



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO



INTEGRACIÓN SISTEMA DE CULTIVO VERTICAL HIDROPÓNICO  
AUTOMATIZADO EN MINIHORTALIZAS

Por:

Ing. Manuel Felipe López Mora

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias Agropecuarias

Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

Agosto 2023



Integración sistema de cultivo vertical hidropónico automatizado en minihortalizas por Manuel Felipe López Mora se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO



INTEGRACIÓN SISTEMA DE CULTIVO VERTICAL HIDROPÓNICO  
AUTOMATIZADO EN MINIHORTALIZAS

Por:

Ing. Manuel Felipe López Mora

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias Agropecuarias

COMITÉ DE TESIS

Directora: Dra. María Fernanda Quintero Castellanos

Asesora: Dra. María de la Luz Guerrero González

Asesor externo: Dr. José Miguel Guzmán Palomino

Asesor externo: MSc. Carlos Alberto González Murillo

El trabajo titulado “**Integración Sistema de Cultivo Vertical Hidropónico Automatizado en Minihortalizas**” fue realizado por: Manuel Felipe López Mora como requisito parcial para obtener el grado de “Maestro en Ciencias Agropecuarias”, y fue revisado y aprobado por el suscrito Comité de Tesis.

Dra. María Fernanda Quintero Castellanos

Directora

---

Dra. María de la Luz Guerrero González

Asesora

---

Dr. José Miguel Guzmán Palomino

Asesor externo

---

MSc. Carlos Alberto González Murillo

Asesor externo

---

Ejido Palma de la Cruz, Municipio de Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P. a los 18 días del mes de agosto de 2023.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios por todas las bendiciones recibidas y por su apoyo omnipresente, a mi familia, principalmente a mi madre por su apoyo incondicional en los momentos difíciles, por darme una voz de aliento y de lucha para salir adelante, a mi padre por su entendimiento y comprensión, a mis hermanos por sus mensajes de apoyo y hermandad, a mis abuelitas porque siempre oran por mí y me llevan en su corazón, e igualmente a mi novia por su apoyo incondicional a pesar del tiempo y la distancia.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por brindarme la oportunidad de estudiar este posgrado en sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada para mis estudios de posgrado, con (CVU) 115687.

A la Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado (AUIP) por la beca de movilidad otorgada para la realización de la parte experimental del proyecto de investigación, en la Universidad de Almería, España.

A mi Comité de Tesis, liderado por la Dra. María Fernanda Quintero Castellanos, Dra. María de la Luz Guerrero González, Dr. José Miguel Guzmán Palomino y Dr. Carlos Alberto González Murillo, por su apoyo, experiencia, consejos, sabiduría, entendimiento, comprensión y resiliencia en la realización de este trabajo.

A la Dra. María Fernanda Quintero Castellanos por darme de la oportunidad de ser su tesista de maestría, confiar en mí, y brindarme todo el apoyo necesario.

Al grupo de investigación RNM 151 PAIDI-UAL de la Universidad de Almería, en cabeza del Dr. José Miguel Guzmán Palomino, por los recursos materiales, económicos y humanos claves en la ejecución del trabajo.

Al Dr. Agustín Sánchez Prados por el apoyo recibido a lo largo de la estancia de investigación en la Universidad de Almería.

A la maestra de la Universidad de Almería, Calina Borgovan, por su esfuerzo, experiencia y sabiduría aportada en el desarrollo del proyecto de investigación.

Agradezco a los practicantes de grado superior María Ruíz Montes, Andrés Jesús Romera Recio, Ioana Simona Juca y Aitor Romera Segura, quiénes a lo largo del desarrollo de la fase experimental del proyecto participaron activamente en los ensayos de laboratorio y toma de muestras en el invernadero ubicado en las instalaciones de la Universidad de Almería.

## CONTENIDO

|  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| INTRODUCCIÓN .....   | 1             |
| Hipótesis.....   | 4             |
| Objetivo General .....   | 4             |
| Objetivos Específicos.....   | 4             |
| MARCO TEÓRICO.....   | 5             |
| Agricultura Protegida.....   | 5             |
| Estado de la agricultura protegida en México .....                           | 6             |
| Estado de la agricultura protegida en San Luis Potosí, México.....           | 7             |
| Estado de la agricultura protegida en Almería, España.....                   | 8             |
| Cultivos Verticales.....   | 8             |
| Sistemas horizontales apilados.....  | 10            |
| Superficies de crecimiento vertical .....                                    | 11            |
| Fábricas de plantas .....  | 12            |
| Minihortalizas .....   | 13            |
| Hortalizas con alto potencial de producción .....                            | 14            |
| Condiciones de experimentación.....  | 15            |
| Cultivos Hidropónicos .....  | 17            |
| Solución nutritiva .....   | 18            |
| Lechuga ( <i>Lactuca sativa L.</i> ).....                                    | 19            |
| Condiciones de cultivo en invernadero .....                                  | 20            |
| Composición química, nutricional y mineral .....                             | 21            |
| Modelación de un Sistema de Cultivo .....                                    | 22            |
| Modelo de absorción de agua.....   | 22            |
| Modelo de absorción de nutrientes.....                                       | 24            |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....   | 27            |
| Definición del Modelo Hídrico y de Nutrientes.....                           | 27            |
| Modelo matemático de consumo hídrico .....                                   | 27            |
| Modelo matemático de consumo de nutrientes .....                             | 29            |
| Modelo predictivo .....  | 32            |
| Evaluación del Rendimiento del Modelo Predictivo en Condiciones Reales ..... | 35            |
| Localización del experimento .....   | 35            |
| Material vegetal.....  | 37            |
| Diseño experimental y configuración del sistema vertical.....                | 37            |

|  |    |
|--|----|
| Evaluación del modelo predictivo .....                     | 40 |
| Determinación de Parámetros de Producción .....            | 40 |
| Análisis estadístico .....                                 | 41 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                               | 42 |
| Modelo Matemático de Consumo Hídrico y de Nutrientes ..... | 42 |
| Rendimiento del Modelo Predictivo .....                    | 43 |
| Consumo hídrico .....                                      | 44 |
| Acumulación de sodio ( $\text{Na}^+$ ) .....               | 45 |
| Consumo de Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) .....                | 46 |
| Consumo de potasio ( $\text{K}^+$ ) .....                  | 47 |
| Consumo de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) .....               | 48 |
| Consumo de magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) .....             | 49 |
| Parámetros de Producción .....                             | 50 |
| Crecimiento del cultivo .....                              | 50 |
| Número de hojas .....                                      | 54 |
| Diámetro de tallo .....                                    | 55 |
| Altura de planta .....                                     | 57 |
| Longitud de raíz .....                                     | 58 |
| Peso fresco .....  | 59 |
| Peso seco .....  | 62 |
| Productividad .....  | 64 |
| Índice de proporción de crecimiento ( $I_1$ ) .....        | 68 |
| Índice de proporción de crecimiento ( $I_2$ ) .....        | 69 |
| Composición mineral del cultivo .....                      | 70 |
| Contenido de nitrógeno (N) .....                           | 71 |
| Contenido de fósforo (P) .....                             | 72 |
| Pigmentos fotosintéticos del cultivo .....                 | 74 |
| Clorofila a (CA) .....                                     | 74 |
| Clorofila b (CB) .....                                     | 75 |
| Clorofila total (CT) .....                                 | 76 |
| CONCLUSIONES .....   | 78 |
| REFERENCIAS .....  | 79 |

## ÍNDICE DE CUADROS

| Cuadro |   | Página |
|--------|---|--------|
| 1      | Indicadores de los 10 estados con mayor área de AP en México, año 2021.....   | 7      |
| 2      | Variables de respuesta utilizadas en hortalizas.....  | 16     |
| 3      | Fórmulas y concentraciones de soluciones nutritivas (macroelementos) para lechuga en invernadero.....                           | 20     |
| 4      | Rangos de composición mineral para lechuga hidropónica.....   | 22     |
| 5      | Concentraciones de absorción para cultivos hidropónicos cerrados bajo invernadero.....  | 26     |
| 6      | Variables de ingreso en el panel de control del modelo predictivo.....  | 34     |
| 7      | ANOVA para el consumo hídrico y concentraciones iónicas de cationes nutritivos y no nutritivos.....                             | 44     |
| 8      | ANOVA para las variables de crecimiento, número de hojas, diámetro de tallo, altura de planta y longitud de raíz.....           | 51     |
| 9      | ANOVA para las variables de crecimiento, peso fresco foliar, peso fresco radicular, peso seco foliar y peso seco radicular..... | 52     |
| 10     | ANOVA para las variables peso fresco foliar, peso fresco radicular y peso fresco total de la planta, a los 35 DDT.....          | 53     |
| 11     | ANOVA para los índices de proporción de crecimiento $I_1$ e $I_2$ (35 DDT).....   | 54     |
| 12     | ANOVA para las variables de composición mineral foliar del cultivo, nitrógeno y fósforo.....                                    | 71     |
| 13     | ANOVA para las variables clorofila a (CA), clorofila b (CB) y clorofila total (CT) a los 28 DDT.....                            | 74     |



## ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>Figura</b> |  | <b>Página</b> |
|---------------|--|---------------|
| 1             | Tipos de AP: microtúnel (A), macrotúnel (B), cubierta flotante (C), casa sombra (D), invernadero (E).....  | 5             |
| 2             | Histórico del área de AP en México (2009-2021).....  | 6             |
| 3             | Área de AP en San Luis Potosí por municipios, año 2021.....  | 8             |
| 4             | Tipos de sistemas horizontales apilados (SHA): plataformas bajo invernadero (A), fábricas de plantas (B), torres de varios pisos (C) y balcones (D)..... | 11            |
| 5             | Tipos de superficies de crecimiento vertical: muros verdes (A) y unidades de crecimiento cilíndricas (B).....  | 12            |
| 6             | Valor de mercado global de agricultura vertical e iluminación LED.....   | 13            |
| 7             | Minihortalizas: espinaca (A), rúcula (B), kale (C) y lechuga hoja de roble rojo (D).....   | 14            |
| 8             | Tipos de CH según la técnica: aeroponía (A), técnica de película nutritiva (B), aerohidroponía (C) y técnica de flujo profundo (D).....                  | 18            |
| 9             | Sección de panel de control del modelo predictivo de consumo hídrico y de nutrientes.....  | 33            |
| 10            | Sección de cálculos de consumo del modelo predictivo de consumo hídrico y de nutrientes.....   | 33            |
| 11            | Invernadero (A), datalogger (B) y estación climática automática (C), plántulas de lechuga (D).....   | 37            |
| 12            | Unidad experimental (A), unidad Growpipes® (B), montaje (C).....   | 38            |
| 13            | Niveles del Factor 3 (A), mecanismo boya-válvula (B), tanque de agua de riego (C) y filtro de osmosis inversa (D).....                                   | 39            |
| 14            | Controlador (A), bomba de agua (B), programador (C) y mecanismo de dosificación de agua (D).....   | 40            |
| 15            | Modelo matemático predictivo de consumo de agua y nutrientes.....  | 42            |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 16 | Consumo hídrico para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos...   | 45 |
| 17 | Acumulación de (Na <sup>+</sup> ) para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.....   | 46 |
| 18 | Consumo de (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.....                                | 47 |
| 19 | Consumo de (K <sup>+</sup> ) para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos...  | 48 |
| 20 | Consumo de (Ca <sup>+2</sup> ) para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.....  | 49 |
| 21 | Consumo de (Mg <sup>+2</sup> ) para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.....  | 50 |
| 22 | Número de hojas para el factor densidad (A) y posición (B).....  | 55 |
| 23 | Diámetro de tallo para el factor densidad (A) y posición (B).....  | 56 |
| 24 | Altura de planta para el factor densidad (A) y posición (B).....   | 58 |
| 25 | Longitud de raíz para el factor densidad (A) y posición (B).....   | 59 |
| 26 | Peso fresco foliar para el factor densidad (A), peso fresco radicular para el factor densidad (B), peso fresco foliar para el factor posición (C) y peso fresco radicular para el factor posición (D)..... | 61 |
| 27 | Peso seco foliar para el factor densidad (A), peso seco radicular para el factor densidad (B), peso seco foliar para el factor posición (C) y peso seco radicular para el factor posición (D).....         | 63 |
| 28 | Peso fresco foliar para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT)...   | 65 |
| 29 | Peso fresco radicular para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT).....  | 66 |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 30 | Peso fresco total para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT)....                         | 67 |
| 31 | Índice de proporción de crecimiento (I1) para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT)..... | 69 |
| 32 | Índice de proporción de crecimiento (I2) para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT)..... | 70 |
| 33 | Contenido de nitrógeno para el factor densidad (A) y posición (B).....                             | 72 |
| 34 | Contenido de fósforo para el factor densidad (A) y posición (B).....                               | 73 |
| 35 | Clorofila a para el factor densidad (A) y posición (B), (28 DDT).....                              | 75 |
| 36 | Clorofila b para el factor densidad (A) y posición (B), (28 DDT).....                              | 76 |
| 37 | Clorofila total para el factor densidad (A) y posición (B), (28 DDT).....                          | 77 |

## RESUMEN

La seguridad alimentaria e implementación de estrategias sostenibles que aumenten rendimiento, disminuyan área superficial cultivable y gestionen eficientemente recursos agrícolas deben ser características del modelo agroalimentario actual. En cambio, este contribuye a la escasez hídrica, degradación de suelos y crisis climática. Una solución son los cultivos hidropónicos cerrados verticales bajo invernadero. Por tanto, el propósito fue desarrollar un modelo predictivo (MP) de consumo de agua y nutrientes que integre los cultivos verticales con los sistemas hidropónicos cerrados bajo invernadero, cuya evaluación en condiciones reales establezca parámetros de producción óptimos. El experimento se realizó con lechuga en un invernadero ubicado cerca de la costa del Mar Mediterráneo. Se efectuó un diseño factorial con tres factores (densidad, posición y tiempo). El cultivo vertical consistió en torres espaciadas cada 0.3 y 0.19 m, para obtener densidades de 50 (BD: baja densidad) y 80 plantas  $\text{m}^{-2}$  (AD: alta densidad), respectivamente. Cada cultivo vertical se dividió en tres alturas iguales, correspondientes a la posición inferior, media y superior. El tiempo del cultivo fueron 35 días. Se llevó a cabo un análisis estadístico multifactorial ANOVA con un  $p < 0.05$ , método de Tukey para medias y  $R^2$  para medir calidad del modelo. El MP propuesto pronostica el consumo hídrico y de cationes nutritivos ( $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ ) con base en el incremento de salinidad ( $\text{Na}^+$ ), y está cimentado en los conceptos de transpiración y concentración iónica, asociados a la ecuación de Penman-Monteith (1965) y el modelo Carmassi-Sonneveld (2003), respectivamente. El MP presentó un coeficiente de determinación superior a 0.867 para consumo de agua, 0.757 para acumulación de  $\text{Na}^+$ , 0.852 para consumo de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{K}^+$ , 0.595 para consumo de  $\text{Mg}^{+2}$ , y no hubo relación con  $\text{Ca}^{+2}$ . BD produjo 74  $\text{ton ha}^{-1}$ , 1.14 veces más que AD, pero AD ahorró un 85% de agua, 1.09 veces más que BD. Asimismo, BD produjo mínimo 1.2 veces más biomasa que AD. En este sentido, la producción de lechuga es óptima en BD, pues se produce más con los mismos recursos, y, el MP pronostica adecuadamente el consumo de agua y nutrientes, sin embargo, requiere incluir nuevos parámetros que aumenten su bondad de ajuste.

**Palabras clave:** agricultura urbana, hidroponía, evapotranspiración, modelación de cultivos, absorción de nutrientes.

## SUMMARY

Food security and the implementation of sustainable strategies that increase yields, reduce arable area and efficiently manage agricultural resources must be characteristics of the current agri-food model. Instead, it contributes to water scarcity, soil degradation and climate crisis. One solution is vertical closed hydroponic crops under greenhouse. Therefore, the aim was to develop a predictive model (MP) of water and nutrient consumption that integrates vertical crops with closed hydroponic systems under greenhouse, whose evaluation under real conditions establishes optimal production parameters. The experiment was carried out with lettuce in a greenhouse located near the coast of the Mediterranean Sea. A factorial design was carried out with three factors (density, position and time). Vertical cultivation consisted of towers spaced every 0.3 and 0.19 m, to obtain densities of 50 (BD: low density) and 80 plants  $m^{-2}$  (AD: high density), respectively. Each vertical crop was divided into three equal heights, corresponding to the lower, middle and upper position. The cultivation time was 35 days. A multifactorial ANOVA statistical analysis was carried out with a  $p < 0.05$ , Tukey's method for means and  $R^2$  to measure the quality of the model. The proposed MP predicts water and nutrient cation ( $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{+2}$  and  $Mg^{+2}$ ) consumption based on the increase in salinity ( $Na^+$ ) and is based on the concepts of transpiration and ion concentration, associated with the Penman-Monteith equation (1965) and the Carmassi-Sonneveld model (2003), respectively. The MP presented a coefficient of determination greater than 0.867 for water consumption, 0.757 for  $Na^+$  accumulation, 0.852 for  $NH_4^+$  and  $K^+$  consumption, 0.595 for  $Mg^{+2}$  consumption, and there was no relationship with  $Ca^{+2}$ . BD produced 74 tonnes  $ha^{-1}$ , 1.14 times more than AD, but AD saved 85% water, 1.09 times more than BD. BD also produced at least 1.2 times more biomass than AD. In this sense, lettuce production is optimal in BD, since it is produced more with the same resources, and the PM adequately predicts the consumption of water and nutrients, however, it requires the inclusion of new parameters that increase its goodness of adjustment.

**Keywords:** urban agriculture, hydroponics, evapotranspiration, crop modeling, nutrient absorption.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, la población mundial supera los 7,900 millones de personas (U.S. Federal Statistical System, 2022) y se prevé que para el año 2050 alcance los 9,700 millones (United Nations, 2022a). El 68% habitará en zonas urbanas (United Nations, 2019). En México se estima una cifra cercana a los 150 millones de personas, probablemente 88% vivirá en ciudades (United Nations, 2022b, 2018). El crecimiento demográfico y la urbanización, sumado al crecimiento económico, provocará que para 2050 la producción de alimentos deba incrementarse al menos un 50% respecto al año 2012 para lograr suplir la demanda mundial y cumplir con el objetivo “hambre cero” de la Agenda 2030 (FAO, 2021a).

La agricultura consume el 72% de las extracciones de agua dulce a nivel mundial (aguas superficiales y subterráneas) (FAO, 2019; Fitton *et al.*, 2019), y ocupa el 37% de la superficie terrestre (FAO, 2022). Hoy por hoy, el agua escasea y las tierras están cada vez más degradadas antrópicamente, lo que pone en riesgo la producción agrícola (FAO, 2021a). Se espera que para 2050 el porcentaje de área ocupada por la agricultura no cambie (FAO, 2014a), en consecuencia, el margen de expansión del área agrícola es limitado. Es evidente la necesidad de una correcta planificación del uso de los recursos de agua y suelo en virtud de la sostenibilidad y eficiencia de estos.

El sector agroalimentario es responsable del 31% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo, que contribuyen al cambio climático, generando una gran presión sobre los sistemas de producción de alimentos (FAO, 2021b; Fitton *et al.*, 2019; Pradhan *et al.*, 2019). Estos sistemas se enfrentan a grandes desafíos, cuyo enfoque debe ser la sostenibilidad ambiental y seguridad alimentaria (Carlisle *et al.*, 2019).

Foley *et al.* (2011) plantean estrategias frente a los desafíos de producción y protección ambiental de los sistemas agrícolas: detener la superficie agrícola cultivable, aumentar el rendimiento, manejo integral de los recursos (agua, nutrientes, biodiversidad, energía), y aumentar la entrega de alimentos y reducir las pérdidas postcosecha.

Para disminuir la presión sobre la agricultura rural, una alternativa es considerar espacios en las zonas urbanas y periurbanas como centros de producción de alimentos en

el futuro (Eigenbrod & Gruda, 2015). Este tipo de agricultura, denominada como agricultura urbana y periurbana (AUP), cuyos mayores productores son China, Japón, Francia, Alemania, Italia, España, Canadá, Estados Unidos y Australia (Orsini *et al.*, 2020), representa una oportunidad para reducir la huella ecológica de las ciudades, reciclar los desechos urbanos, contener la expansión urbana, proteger la biodiversidad, así como fomentar la resiliencia al cambio climático, además de estimular el crecimiento de las economías regionales (FAO, 2014b). Doscientos sesenta y seis millones de hogares en países en desarrollo producen alimentos en sistemas de cultivos urbanos, distribuidos así: Asia 68%, América Latina 15%, África 11% y Europa 6% (Hamilton *et al.*, 2014).

Dentro de la AUP, la horticultura urbana (HU) es la más competitiva y rentable, pues es un sistema que puede alcanzar rendimientos de  $50 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , con una elevada eficiencia en el uso de los recursos agrícolas, un alto valor agregado de los productos, así como un rápido acceso de estos en el mercado local y una reducción de hasta el 30% en las pérdidas postcosecha (Orsini *et al.*, 2013). Además, satisface rápida y parcialmente la demanda alimentaria debido a su corto ciclo de producción que puede estar entre 60 y 90 días, o incluso menos tiempo (Dubbeling *et al.*, 2010; Eigenbrod & Gruda, 2015). Esto la configura como un tipo de agricultura de respuesta rápida frente a la ruptura de las cadenas de suministro de alimentos generada por pandemias, como ocurrió en Cuba entre 1991 y 1994 (Hamilton *et al.*, 2014), y que sin duda representa una alternativa de agricultura sostenible, en medio de la reciente pandemia de la COVID-19, la cual ha generado impactos negativos en la agricultura a nivel mundial, particularmente relacionados con la cadena de suministro (Štreimikienė *et al.*, 2022).

En general, la AUP se clasifica en (1) sistemas tradicionales, que comprende los huertos urbanos públicos o privados para la producción de hortalizas, la agricultura periurbana extensiva y los huertos comunitarios urbanos; (2) sistemas innovadores, que son los denominados cultivos verticales (CV); y (3) sistemas alternativos, que pueden ser las denominadas microhortalizas (MicroH), silvicultura alimentaria, acuaponía y apicultura urbana (Orsini *et al.*, 2020). No obstante, también se asocia con soluciones tecnológicas como los invernaderos en los techos (Sanyé-Mengual *et al.*, 2015), los sistemas hidropónicos cerrados (Orsini *et al.*, 2013), y los sistemas organopónicos, cuyo

líder a nivel mundial es Cuba, con más de 7,000 unidades productivas, que en conjunto tienen un rendimiento anual superior a 1.4 millones de toneladas (Ellinger & Braley, 2010; Hamilton *et al.*, 2014).

Los cultivos verticales son agrosistemas sostenibles concebidos como unidades de producción dispuestas de manera vertical que aumentan el rendimiento de los cultivos por unidad de área, son adecuados para la producción de hortalizas de hoja, en especial minihortalizas, y se pueden desarrollar a través de técnicas de cultivo como aeroponía, donde las raíces están en un ambiente de aire, o hidroponía, donde las raíces están en sustrato (perlita, lana de roca, etc.) o directamente en solución nutritiva (Beacham *et al.*, 2019; SharathKumar *et al.*, 2020). Los sistemas hidropónicos en donde la solución de nutrientes se reutiliza continuamente (sistemas cerrados) (Voogt & Bar-Yosef, 2019) permite la automatización completa del proceso de nutrición del cultivo.

En México, el gobierno y la industria deben fomentar actividades de I+D+i entorno al concepto de los CV para determinar la viabilidad de este método como sistema de producción sostenible, pues comprende una rama de la AUP con alto potencial de investigación científica debido a la reducción en el uso de agua, fertilizantes, pesticidas, recuperación de ecosistemas perturbados, aumento de productividad y reducción de la huella de carbono (Beacham *et al.*, 2019; de Anda & Shear, 2017).

El propósito de este proyecto de investigación es integrar los sistemas de cultivo vertical a la técnica de cultivo hidropónica automatizada (sistema cerrado), bajo invernadero que permita determinar condiciones óptimas de producción de minihortalizas, contribuyendo al desarrollo y crecimiento del sector hortícola del estado de San Luis Potosí (SLP).



## **Hipótesis**

La agricultura vertical integrada a la técnica de cultivo hidropónica automatizada (sistema cerrado) y bajo condiciones de invernadero produce hortalizas usando menos recursos, con mayor rendimiento y calidad.

## **Objetivo General**

Desarrollar y validar un modelo predictivo de consumo hídrico y de nutrientes que integre los cultivos verticales con la técnica hidropónica automatizada en condiciones de invernadero.

## **Objetivos Específicos**

1. Definir y desarrollar un modelo matemático de consumo hídrico y de nutrientes con uso potencial como herramienta de ayuda a la toma de decisiones.
2. Evaluar el rendimiento del modelo predictivo en condiciones reales de producción en sistema de cultivo vertical hidropónico cerrado.
3. Determinar parámetros ideales de producción para cultivo de lechuga.

## MARCO TEÓRICO

### Agricultura Protegida

Los agrosistemas capaces de crear condiciones microclimáticas óptimas para los cultivos favoreciendo su desarrollo, a través de la modificación de parámetros climáticos, y que ofrecen protección frente al ataque de plagas y enfermedades, y fenómenos climáticos extremos, se conocen como sistemas de agricultura protegida (AP). El propósito de la AP es producir alimentos de alta calidad para el mercado durante todo el año, incrementar el rendimiento, extender los periodos de cosecha y utilizar eficientemente recursos como suelo, agua, nutrientes y energía. Como resultado, los productores generan mayores ingresos debido a que el precio de estos alimentos en el mercado es mayor en comparación con los obtenidos de agrosistemas convencionales. En general, los sistemas de AP se clasifican en invernaderos, túneles (micro y macrotúneles) y cubiertas flotantes, no obstante, también se incluye las mallas o casas sombra (Figura 1) (Castilla, 2013; Kumar & Singh, 2022; Valera *et al.*, 2014).



**Figura 1.** Tipos de AP: microtúnel (A), macrotúnel (B), cubierta flotante (C), casa sombra (D), invernadero (E) (adaptada por autor).

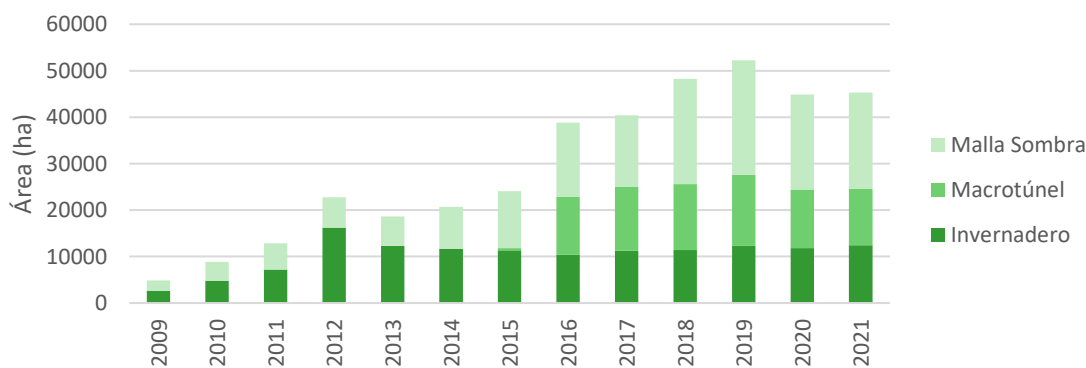
Actualmente, existen más de 4.5 Mha de AP en el mundo, donde cerca del 88% se ubica en Asia, principalmente en China y otros países como Turquía, Corea del Sur, Japón, India e Israel. En Europa el área se distribuye entre España, Italia, Holanda, Francia, Grecia, Alemania y Portugal. Específicamente en España, la provincia de Almería tiene construida una infraestructura con más de 33,000 ha de invernaderos junto a la costa del Mar Mediterráneo. En América, la mayor parte se ubica en México, que tiene alrededor

de 45,000 ha, seguido de países como Brasil, Estados Unidos, Argentina, Colombia y Ecuador (AMHPAC, 2021; Castellón, 2018; Tiseyra *et al.*, 2022; Zhen, 2018). En África los países líderes en AP son Marruecos, Egipto, Argelia y Libia.

#### Estado de la agricultura protegida en México

Actualmente, México cuenta con cerca de 45,307 ha de AP, producto de un crecimiento promedio a razón de 3,109 ha año<sup>-1</sup> desde 2009, cuando tan solo contaba con 4,886 ha. La cercanía con el mercado de Estados Unidos, así como las afectaciones a los cultivos producto del cambio climático, son algunas de las razones de esta rápida expansión (Padilla-Bernal *et al.*, 2012). El 46% del área (20,778 ha) son construcciones tipo malla sombra, el 27% (12,097 ha) macrotúneles y el restante (12,432 ha) son invernaderos (AMHPAC, 2021).

En la Figura 2 se observa el histórico del área sembrada en México entre 2009 y 2021. Se evidencia que, hubo un máximo de 52,261 ha en el año 2019 producto de un incremento de 9% en el área de malla sombra, y de 8% en el área de macrotúneles, respecto al 2018. Sin embargo, en el año 2020 se perdieron más de 7,400 ha, que coincide con el año de inicio de la pandemia COVID-19, que afectó todas las actividades económicas incluida la agricultura. Igualmente, la gráfica muestra que, en el 2016 el área total de AP tuvo un incremento en más del 60% debido al área de macrotúneles (AMHPAC, 2021).



**Figura 2.** Histórico del área de AP en México (2009-2021) (AMHPAC, 2021).

En el año 2021, 90% del área de AP sembrada estuvo concentrada en 10 estados de la república: Sinaloa, Jalisco, Coahuila, Michoacán, Sonora, Guanajuato, San Luis Potosí (SLP), Baja California Sur, Baja California y Puebla (Cuadro 1). A nivel de producción, estos estados alcanzaron más de 3.04 Mton de alimentos, el 79% del total nacional, que

significaron ingresos por cerca de 2,078 millones de dólares, equivalente al 0.2% del PIB nacional (AMHPAC, 2021; Banco Mundial, 2022). La mayoría de estos estados se ubican en las zonas occidente, centronorte y noroeste del país, catalogada como la vertiente empresarial y de alta tecnología de AP en México, pues acceden directamente al mercado internacional, principalmente Estados Unidos, lo que facilita la exportación de alimentos (de Anda & Shear, 2017; García-Sánchez *et al.*, 2018).

El estado de Sinaloa con cerca de 9,300 ha de AP produce más de 827,000 ton, con un rendimiento cercano a las 90 ton ha<sup>-1</sup>, que representan ingresos por más de 526 millones de dólares (Cuadro 1). Igualmente, todos los estados, salvo Puebla, tienen un área sembrada mayor a 1,000 ha, lo cual indica que, en 9 de los 32 estados de la república se encuentra un umbral mínimo de 1,000 ha de AP (AMHPAC, 2021).

**Cuadro 1.** Indicadores de los 10 estados con mayor área de AP en México, año 2021.

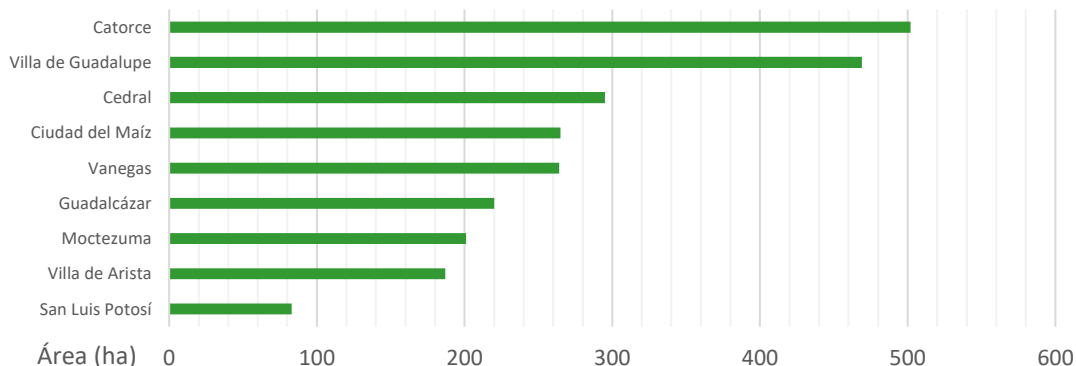
| <b>Estado</b>       | <b>Área (ha)</b> | <b>Producción (ton)</b> | <b>Rendimiento (ton ha<sup>-1</sup>)</b> | <b>Ingresos (USD)</b> |
|---------------------|------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| Sinaloa             | 9,325            | 827,962                 | 89                                       | 526'342,096           |
| Jalisco             | 8,933            | 326,493                 | 37                                       | 333'597,320           |
| Coahuila            | 5,208            | 160,072                 | 31                                       | 97'212,920            |
| Michoacán           | 3,974            | 253,256                 | 64                                       | 292'914,832           |
| Sonora              | 3,762            | 370,282                 | 98                                       | 174'215,048           |
| Guanajuato          | 2,681            | 242,824                 | 91                                       | 157'861,200           |
| San Luis Potosí     | 2,666            | 459,124                 | 172                                      | 261'656,584           |
| Baja California Sur | 2,035            | 150,028                 | 74                                       | 78'016,232            |
| Baja California     | 1,327            | 115,079                 | 87                                       | 103'109,216           |
| Puebla              | 924              | 136,896                 | 148                                      | 52'840,032            |

(AMHPAC, 2021).

#### Estado de la agricultura protegida en San Luis Potosí, México

En el año 2021, el estado de San Luis Potosí sembró 2,670 ha de AP, en donde 67% correspondió a construcciones tipo malla sombra y 33% invernaderos. El área de AP se encuentra distribuida en 16 de los 58 municipios, siendo Catorce, Villa de Guadalupe, Cedral, Ciudad del Maíz y Vanegas los más importantes, pues concentraron el 67.2% del área sembrada, equivalente a unas 1,795 ha (Figura 3). Además, cerca del 27% del área sembrada, (722 ha) fueron destinadas a la producción de alimentos para exportación (AMHPAC, 2021).

Los cultivos con mayor área sembrada fueron tomate rojo en sus variedades saladette, bola y cherry, representando cerca del 66% (1,775 ha) del área total sembrada del estado y la avena forrajera en verde con 480 ha (18%). Otros cultivos, como el pepino americano, pimiento morrón, brócoli, berenjena y chile jalapeño se sembraron en un área de 365 ha (14%) (AMHPAC, 2021).



**Figura 3.** Área de AP en San Luis Potosí por municipios, año 2021 (AMHPAC, 2021).

#### Estado de la agricultura protegida en Almería, España

Las provincias de Almería, Granada y Málaga forman la zona con mayor concentración de AP de la comunidad autónoma de Andalucía y de España. Estas provincias se sitúan sobre el litoral de Andalucía Oriental, junto al Mar Mediterráneo. En el año 2022, la provincia de Almería reportó un área sembrada de AP de 33,464 ha, donde el 95% se concentra en las comarcas de Campo Dalías con 22,416 ha (67%) y, Campo Níjar y Bajo Andarax con 9,419 ha (28%). El restante 5% (1,632 ha) está repartido entre las comarcas de Alto Andarax, Bajo Almanzora, Campo Tabernas y Río Nacimiento (Junta de Andalucía, 2022).

#### Cultivos Verticales

Los cultivos verticales (CV) son sistemas novedosos de producción que nacen a partir de la necesidad de hacer frente a grandes desafíos globales como el rápido crecimiento poblacional, la urbanización, la disminución del área cultivable y el cambio climático. Está catalogada como un tipo de agricultura urbana (AU) enfocada a la producción de alimentos hortofrutícolas de alta calidad de manera eficiente y sostenible que contribuye a la seguridad alimentaria mundial. Son eficientes en el uso de recursos, principalmente

agua, fertilizantes y tierra, y en cambio, tienen altos consumos energéticos y son costosos (Benke & Tomkins, 2017; Eigenbrod & Gruda, 2015; SharathKumar *et al.*, 2020). Se clasifican en dos categorías: sistemas horizontales apilados (SHA) y superficies de crecimiento vertical (SCV) (Beacham *et al.*, 2019).

Su propósito no es reemplazar la producción a campo abierto sino convertirse en un complemento que materialice la innovación en el sector alimentario y brinde nuevas oportunidades de negocio. Los cultivos aptos son hortalizas con una altura promedio de 40 cm, de rápido crecimiento que se cosechan aproximadamente un mes después de la siembra. Asimismo, deben ser ricos en nutrientes donde se pueda vender más del 85% de la producción (Molin & Martin, 2018).

Este tipo de agrosistemas complejos, también denominados sistemas productivos multicapa se realizan en interiores, como edificios en zonas urbanas o fábricas de plantas, para brindarle protección al cultivo contra las condiciones climáticas extremas y contaminación medioambiental. Los factores de crecimiento del cultivo como luz, temperatura, humedad, concentración de dióxido de carbono, agua y nutrientes se controlan con precisión a través de tecnologías de automatización que usan sensores, técnicas de procesamiento de imágenes, modelos de simulación de cultivos e inteligencia artificial, con el fin de tener altos rendimientos y estándares de calidad de los productos a lo largo de todo el año. Además, representan una alternativa sostenible, ya que se tiene mayor área cultivable y, por ende, mayor producción de alimentos en menor área superficial (Eigenbrod & Gruda, 2015; SharathKumar *et al.*, 2020).

La principal ventaja es el aprovechamiento de los espacios urbanos. También disminuyen los costos de transporte hasta en un 60% debido a su proximidad con el consumidor reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Permite la programación de la producción anual según la demanda y la maximización del rendimiento del cultivo a través del ajuste y control automático de parámetros microclimáticos como temperatura, humedad e iluminación. El consumo hídrico es menor comparado con la agricultura convencional, pues al ser en interior, se reduce la evaporación y permite el uso eficiente del agua proveniente de aguas lluvias, plantas

desalinizadoras y aguas tratadas (Beacham *et al.*, 2019; Benke & Tomkins, 2017; Islam *et al.*, 2021).

Respecto de sus desventajas, los costos iniciales son altos, el número de cultivos factibles para su producción es menor comparado con la agricultura tradicional, los volúmenes de producción son reducidos y requiere de mano de obra calificada (Benke & Tomkins, 2017; Beacham *et al.*, 2019). La implementación de energías renovables como la radiación solar y eólica pueden aumentar la factibilidad de este tipo de sistemas productivos (Beacham *et al.*, 2019), ya que, el mayor consumo de energía en las granjas verticales está a cargo de la iluminación artificial (Molin & Martin, 2018).

En invernaderos a gran escala, la producción de CV involucra nuevas tecnologías, métodos de cobertura vegetal y control climático, así como técnicas de cultivo sin suelo, ya sea en sustrato, lechos flotantes o película nutritiva (hidroponía), siendo esta última, aplicable con los denominados mecanismos cerrados de recirculación de la solución nutritiva (Beacham *et al.*, 2019; Takeshima & Joshi, 2019). De esta manera, los CV se pueden configurar de manera tal que, sean sistemas hidropónicos verticales cerrados y bajo invernadero.

#### Sistemas horizontales apilados

Los sistemas horizontales apilados (SHA) (Figura 4) comprenden múltiples niveles de plataformas de cultivo horizontal apiladas una encima de otra formando estructuras más altas denominadas granjas verticales, que se sitúan dentro de invernaderos o instalaciones de ambiente controlado, también denominadas fábricas de plantas (FP). En esta categoría, también se incluye cultivos en torres de varios pisos, donde los diferentes niveles de plantación están aislados entre sí, y el uso de balcones para producción en interiores (Beacham *et al.*, 2019).

Los SHA en invernaderos suelen utilizar iluminación artificial suplementaria o mecanismos giratorios que permiten el desplazamiento de cada nivel hacia la parte superior del sistema, disminuyendo así los efectos generados por gradientes de temperatura y luz en el cultivo (control sobre la fotomorfogénesis) (Beacham *et al.*, 2019; Kozai & Zhang, 2016). Proporcionar iluminación suplementaria aumenta la fotosíntesis,

el rendimiento y calidad del cultivo, la producción es más temprana y se extiende durante todo el año. Las fuentes de luz más utilizadas son los diodos emisores de luz (LED) rojo, rojo lejano y azul, son de bajo costo y emiten bajos niveles de calor por lo que se pueden situar cerca de la planta (Lu & Mitchell, 2016; Molin & Martin, 2018).



**Figura 4.** Tipos de sistemas horizontales apilados (SHA): plataformas bajo invernadero (A), fábricas de plantas (B), torres de varios pisos (C) y balcones (D) (adaptada por autor).

Igualmente, las altas densidades de plantación afectan las hojas externas o inferiores de la planta, padeciendo un proceso de senescencia acelerado producto de la sombra generada por las hojas superiores o interiores, y la sombra proveniente de las plantas contiguas, lo cual disminuye el rendimiento del cultivo. Por tanto, el suplemento de iluminación puede llevar a incrementos en el peso fresco de la planta de hasta un 18%, y reducir el desperdicio en un 6% con respecto a cultivos no suplementados lumínicamente (Kozai & Zhang, 2016).

Además, los SHA involucran múltiples técnicas de cultivo hidropónicas como la de película nutritiva, flujo profundo y aeroponía; y se configuran como sistemas cerrados donde se recircula la solución nutritiva manteniendo una composición óptima de nutrientes. Los cultivos comúnmente utilizados son lechuga, espinaca y hierbas aromáticas (Beacham *et al.*, 2019).

#### Superficies de crecimiento vertical

Las superficies de crecimiento vertical (SCV) (Figura 5) contemplan muros o paredes verdes, ya sean verticales o inclinadas se ubican principalmente en fachadas de edificios,



cuyas mayores desventajas son la exposición a la contaminación urbana y heterogeneidad en el suministro de agua en cada uno de los niveles. Las unidades de crecimiento cilíndricas (UCC) también forman parte de las SCV y consisten en sistemas donde las plantas crecen unas sobre otras alrededor de una superficie cilíndrica (Beacham *et al.*, 2019).



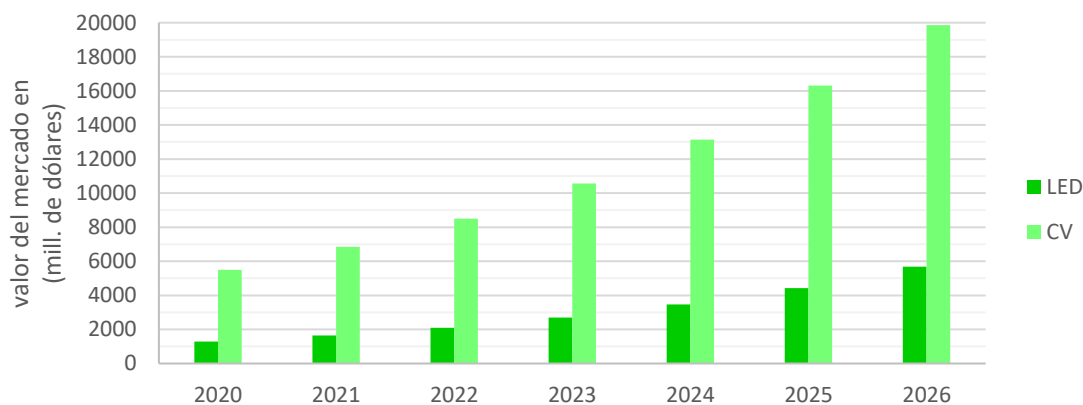
**Figura 5.** Tipos de superficies de crecimiento vertical: muros verdes (A) y unidades de crecimiento cilíndricas (B) (adaptada por autor).

#### Fábricas de plantas

Las fábricas de plantas (FP) con iluminación artificial son instalaciones de cultivo destinadas a la producción de hortalizas como lechuga, rúcula y aromáticas durante todo el año, por medio del control preciso de las condiciones de crecimiento de las plantas (Anpo *et al.*, 2019; Nicole *et al.*, 2019). Es una industria emergente de CV también denominada granja urbana, agricultura de interior y agricultura de ambiente controlado (Hayashi, 2016) capaces de reducir el uso de plaguicidas en un 100%, el área de tierra en más del 95%, fertilizantes en un 50% (sistemas cerrados), residuos vegetales en un 30% y el consumo de agua en más de un 95% (Kozai, 2016; Kozai & Niu, 2020).

A pesar que el primer cultivo vertical tipo FP comercial con iluminación artificial se estableció en 1983 en la prefectura de Shizuoka, Japón (Voutsinos *et al.*, 2021), fue a partir del año 2010 cuando la industria y mercado global de la agricultura vertical presentó un rápido crecimiento producto de las innovaciones tecnológicas en iluminación LED en torno al desarrollo de una mayor eficacia luminosa y disminución de los costos de producción, que han convertido este tipo de iluminación en un componente principal de la agricultura vertical moderna (Paucek *et al.*, 2020; Zissis *et al.*, 2021).

Se pronostica que para 2026 el valor del mercado global de luces LED para agricultura en interior se duplique (Shahbandeh, 2022; Thormundsson, 2023b, 2023a). En tanto, la industria y mercado de agricultura vertical tiene un valor actual de mercado alrededor de 10,500 millones de dólares, y se espera que para 2026 alcance los 20,000 millones de dólares (Figura 6) (Shahbandeh, 2023).



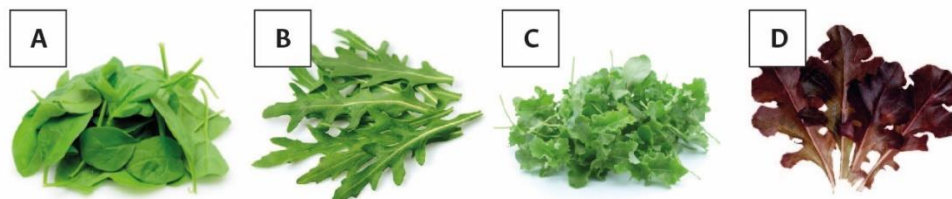
**Figura 6.** Valor de mercado global de agricultura vertical e iluminación LED (Shahbandeh, 2023, 2022; Thormundsson, 2023b, 2023a).

### Minihortalizas

El mercado de los productos vegetales, específicamente en las categorías brotes, microhortalizas (MicroH) y hortalizas de hoja pequeña mínimamente procesadas o minihortalizas (MH) está en crecimiento, pues proporcionan nutrientes esenciales para el cuerpo humano con efectos positivos en la salud (di Gioia *et al.*, 2017), como retrasar el deterioro de las capacidades cognitivas que se pierden con la edad (Morris *et al.*, 2018).

Las MH son hortalizas de tamaño pequeño (Figura 7) cosechadas hasta la etapa de 8 hojas verdaderas, correspondiente a un ciclo vegetativo entre 20 y 40 días donde la altura de la planta oscila entre 5 y 12 cm según la especie. Se siembran con altas densidades en un medio de cultivo con luz y nutrientes, y se cosechan a través de métodos mínimos de procesamiento como corte, lavado, enjuague y empaque con películas poliméricas a bajas temperaturas (di Gioia *et al.*, 2017; European Union, 2014; Saini *et al.*, 2017). También forman parte de los alimentos de la IV gama, cuya demanda ha crecido producto de los cambios de dieta de la sociedad moderna, que prefiere alimentos ricos en vitaminas, minerales, compuestos fenólicos y fibras dietéticas. Se comercializan como ensaladas

listas para comer con una apariencia, sabor y textura atractiva para el consumidor, en donde se exceptúan las raíces como parte comestible (Saini *et al.*, 2017).



**Figura 7.** Minihortalizas: espinaca (A), rúcula (B), kale (C) y lechuga hoja de roble rojo (D) (adaptada por autor).

Por otro lado, se producen principalmente en ambientes protegidos, ya que garantizan la inocuidad del producto, controlan plagas y enfermedades, permiten un manejo eficiente de los fertilizantes, así como una planificación productiva que generan un aumento del número de ciclos de cultivo respecto a la agricultura convencional. Los principales factores que afectan su rendimiento son densidad de cultivo, clima, manejo del fertirriego (agua y nutrientes) (di Gioia *et al.*, 2017).

Las especies vegetales más utilizadas incluye lechuga, escarola, rúcula, perejil, espinaca, acelga, mostaza, col rizada, verdolaga, rúcula silvestre, perilla, mizuna, tatsoi y berro. Plantas cuyo contenido de nitratos debe ser bajo (característica de calidad), de lo contrario pueden representar un problema para la salud humana. Por tanto, los sistemas hidropónicos son ideales para su producción, pues a través del control de nutrientes se pueden alcanzar los estándares de calidad permitidos (cantidad de nitratos). Estos sistemas, normalmente cerrados, suelen aplicar la técnica de flujo profundo debido a su bajo costo y fácil instalación (di Gioia *et al.*, 2017; Sago *et al.*, 2018).

#### Hortalizas con alto potencial de producción

Las familias botánicas comúnmente utilizadas para la producción de MicroH son *Brassicaceae*, *Asteraceae*, *Apiaceae*, *Amaryllidaceae*, *Amaranthaceae* y *Cucurbitaceae*, sin embargo, también se utilizan cereales, leguminosas, oleaginosas (di Dioia & Santamaria, 2015), e incluso plantas silvestres como *Asparagus acutifolius* (*Asparagaceae*), *Helminthotheca echioides* (*Asteraceae*) y *Urtica dioica* (*Urticaceae*) debido a que son una fuente de nutrientes esenciales como minerales, fibra, vitaminas, ácidos grasos, antioxidantes, que pueden disminuir el riesgo de padecer enfermedades

cardiovasculares, trastornos neurológicos y brindar protección contra el cáncer (Boari *et al.*, 2013).

Dentro de los alimentos con alto potencial para reducir el riesgo de enfermedades crónicas, las 15 hortalizas con mayor densidad de nutrientes (hierro, riboflavina, niacina, folato, vitamina B<sub>6</sub>, vitamina B<sub>12</sub>, vitamina C y vitamina K), ordenadas de manera descendente son: berro (*Nasturtium officinale*), col china (*Brassica rapa* subsp. *pekinensis*), acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), remolacha (*Beta vulgaris*), espinaca (*Spinacia oleracea*), escarola (*Cichorium endivia*), lechuga (*Lactuca sativa*), perejil (*Petroselinum crispum*), berza (*Brassica oleracea* var. *viridis*), nabo (*Brassica rapa* subsp. *rapa*), mostaza (*Sinapis alba*), endivia (*Cichorium endivia*), cebollín (*Allium schoenoprasum*), col rizada (*Brassica oleracea* var. *sabellica*) y pimiento rojo (*Capsicum annuum*) (di Noia, 2014). En especial, aquellas que pertenecen a la familia *Brassicaceae* tienen compuestos capaces de proteger al ser humano contra el cáncer, además de carotenoides y glucosinolatos, cuyos productos de la hidrólisis tienen propiedades antimicrobianas (Turner *et al.*, 2020).

Asimismo, consumidores particularmente de países desarrollados son cada vez más conscientes al momento de seleccionar sus alimentos, pues están dispuestos a pagar más por alimentos producidos de manera sostenible con el medio ambiente (alimentos orgánicos) y más saludables (alimentos funcionales). Tendencia que seguirá en aumento debido al auge de la conciencia medio ambiental y cambios en los patrones de consumo (Mehmeti & Xhoxhi, 2014). Se prevé que en el año 2026 los mercados de alimentos orgánicos y funcionales se incrementen en un 74% y 23%, respectivamente, con respecto al 2022 (Shahbandeh M, 2022; Wunsch Nils, 2021). Actualmente, se demandan hortalizas como tomate, pimiento, pepino, berenjena, calabaza, zanahoria, espárragos, coliflor, cilantro, apio, repollo, vegetales asiáticos, brócoli y lechuga (AMHPAC, 2022).

#### Condiciones de experimentación

En hortalizas como lechuga y endivia se han realizado ensayos en sistemas de cultivo sin suelo bajo invernadero controlando pH (5.5-6.5), conductividad eléctrica y oxígeno disuelto en la solución nutritiva, con tiempos de cosecha entre 25-36 días después de siembra (DDS) (Labeke *et al.*, 2021) También se ha evaluado el efecto que tiene la

concentración de cloruro de calcio en la solución nutritiva sobre algunas características de calidad postcosecha (Turner *et al.*, 2020).

Otros factores que han sido objeto de estudio son el pH, la conductividad eléctrica, tipo de sistema de cultivo sin suelo y especie vegetal, evaluando sus efectos sobre características productivas, biofísicas y fisiológicas tales como peso fresco, peso seco, altura de hoja, área foliar, concentración de materia seca, área foliar específica, índices de color, contenido de clorofila, contenido relativo de agua y fuga de electrolitos (Labeke *et al.*, 2021). La temperatura de la solución nutritiva también se ha estudiado, y analizado su efecto en el contenido de clorofila y crecimiento de la planta (Helmy *et al.*, 2017).

En cultivos hortícolas se puede evaluar el efecto de un tratamiento sobre variables de respuesta como los parámetros fisicoquímicos: color, pH, sólidos solubles totales (SST), acidez titulable total (ATT) y análisis de textura; el potencial nutricional, que incluye contenido de proteínas, ácidos grasos, fibra dietética, vitaminas, minerales, carotenoides y compuestos fenólicos (Saini *et al.*, 2017). En el Cuadro 2 se muestra un listado de variables de respuesta ampliamente utilizadas en hortalizas.

**Cuadro 2.** Variables de respuesta utilizadas en hortalizas.

| Parámetro                     | Símbolo | Unidades                            | Ecuación                           |
|-------------------------------|---------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Peso fresco                   | PF      | g                                   |                                    |
| Peso seco                     | PS      | g                                   |                                    |
| Concentración de materia seca | CMS     | %                                   | 100 (PS PF <sup>-1</sup> )         |
| Área foliar                   | AF      | cm <sup>2</sup>                     |                                    |
| Área foliar específica        | AFE     | mg cm <sup>-2</sup>                 | PS AF <sup>-1</sup>                |
| Longitud de la hoja           | LH      | mm                                  |                                    |
| Ancho de la hoja              | AH      | mm                                  |                                    |
| Rendimiento                   | R       | g m <sup>-2</sup>                   | PF A <sup>-1</sup>                 |
| Proporción de rendimiento     | PR      | g m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> | PF A <sup>-1</sup> p <sup>-1</sup> |
| Clorofila                     | Chl     | SPAD                                |                                    |
| Grosor                        | G       | µg mm <sup>-2</sup>                 | PF AF <sup>-1</sup>                |
| Peso fresco por hoja          | PFH     | µg hoja <sup>-1</sup>               | PF h <sup>-1</sup>                 |
| Número de hojas               | NH      | hojas m <sup>-2</sup>               | R PFH <sup>-1</sup>                |

A: área horizontal en donde se establece el cultivo en (m<sup>2</sup>), p: periodo total del cultivo en (días), h: hojas.

(Labeke *et al.*, 2021; Takahama *et al.*, 2019)

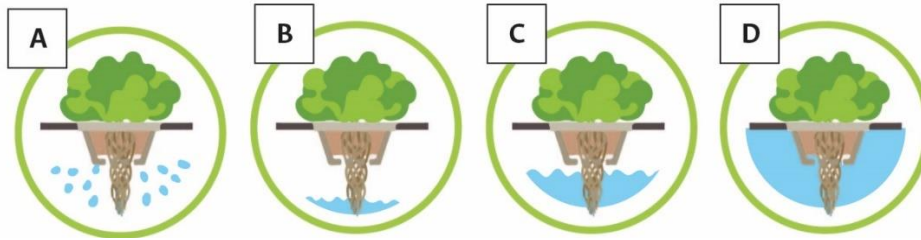
## **Cultivos Hidropónicos**

Los sistemas de cultivo sin suelo (SCSS) son una alternativa sostenible cada vez más utilizada para la producción de alimentos de alta calidad, siempre que se adopten prácticas adecuadas en el manejo de los recursos (agua y nutrientes) (van Os & Kromwijk, 2021; Voogt *et al.*, 2014). Estos se desarrollan en recipientes llenos de medio sólido (sustrato) o en medio líquido (agua) (Ponce *et al.*, 2014).

Los cultivos hidropónicos (CH) y el término hidroponía, provienen del griego “*hydro*” agua y “*ponos*” trabajo, lo que traduce “trabajo en agua” (Mohammed, 2018). Son un sistema de producción intensivo de SCSS donde el medio de cultivo es agua, que al mezclarse con fertilizante forma una solución nutritiva (SN), cuyos atributos como cantidad de O<sub>2</sub> y de nutrientes determinan el éxito del crecimiento vegetal (Mattson & Heinrich, 2019). Estos producen alimentos durante todo el año, son factibles para la alimentación urbana, promueven la conservación de los recursos, evitan la producción de grandes cantidades de residuos y reducen el riesgo de ataque por plagas y enfermedades. Actualmente, existen más de 25,000 ha de CH bajo invernadero, siendo los mayores exponentes Países Bajos, España, Francia y Japón. Las especies vegetales más utilizadas son lechuga, berenjena, melón, tomate, pepino, fresa, pimiento y aromáticas, con rendimientos iguales o superiores a 4.5 veces los sistemas de cultivo convencionales (Ponce *et al.*, 2014).

Se clasifican en sistemas abiertos cuando la SN no se reutiliza, y sistemas cerrados cuando la SN recircula en el sistema, lo que contribuye positivamente al medio ambiente debido a una reducción en el uso de agua y fertilizantes. Asimismo, la implementación de los circuitos cerrados disminuye el costo de los insumos, mejora el rendimiento y la calidad del producto. Igualmente, se clasifican dependiendo el tipo de técnica (Figura 8), (1) técnica de película nutritiva (TPN), (2) técnica de flujo profundo (TFP), (3) aeroponía (AE) y (4) aerohidroponía (AEH), siendo esta última una combinación de la TFP y AE, donde una parte de las raíces está parcialmente sumergida en agua, mientras que la otra zona radicular está suspendida en aire (Mattson & Heinrich, 2019; Molin & Martin, 2018; Ponce *et al.*, 2014; Voogt & Bar-Yosef, 2019).

El monitoreo de variables como pH, CE, nivel de nutrientes y temperatura de la SN permite realizar un uso eficiente de agua y nutrientes. En CH cerrados este proceso es clave debido al aumento en la cantidad de sales presentes en la SN y la aparición de desequilibrios en las proporciones de nutrientes, lo que puede significar una disminución en el rendimiento y calidad de los cultivos. En general, se maneja una CE estándar de  $3 \text{ dS m}^{-1}$  (Mattson & Heinrich, 2019; Richa *et al.*, 2021).



**Figura 8.** Tipos de CH según la técnica: aeroponía (A), técnica de película nutritiva (B), aerohidroponía (C) y técnica de flujo profundo (D) (elaborada por autor).

En un CH cerrado las concentraciones iónicas de cada elemento en la SN cambia con el tiempo produciéndose un desequilibrio de nutrientes, lo que hace necesario el uso de sensores capaces de medir en tiempo real la concentración de todos los nutrientes. Sin embargo, la realidad es que un sistema así sería altamente costoso debido a la precisión que deben tener los instrumentos de medición (sensores iónicos), los cuales, actualmente tienen baja durabilidad y estabilidad. A nivel comercial se prefiere utilizar un sistema de monitoreo compuesto por un sensor de CE y uno de nivel, que permite controlar la concentración total de iones en la SN de manera más pragmática. De esta manera, la acumulación de sales en CH cerrados se gestiona reduciendo paulatinamente los fertilizantes que se disuelven en la solución de repuesto para que junto con la solución de drenaje se alcancen los niveles óptimos de concentración iónica para el cultivo (Son *et al.*, 2020).

#### Solución nutritiva

La mezcla correcta de agua y fertilizantes para la nutrición del cultivo se denomina solución nutritiva (SN), y se controla comúnmente con dos parámetros, conductividad eléctrica (CE) y pH (Wada, 2019). La CE es una medida práctica de la concentración de nutrientes (concentración de sales) en la solución, tanto de iones nutritivos como no

nutritivos que se monitorea para mantener una fertilización adecuada y no sobrepasar el umbral que disminuye el rendimiento del cultivo. La CE objetivo depende según el cultivo y varía en un rango entre 1.0 y 2.5 dS m<sup>-1</sup>, más la concentración del agua de riego (Mattson & Lieth, 2019). El pH de la solución indica la concentración de iones H<sup>+</sup> en la SN, si es 7 es neutro, valores por debajo es ácido y por encima alcalino. Este parámetro es un indicativo de la disponibilidad iónica de los nutrientes en la solución y el rango óptimo para producción hortícola varía entre 5.5 y 6.5 (Tsukagoshi & Shinohara, 2020).

Los valores objetivo de macro y micronutrientes en una SN dependen de múltiples factores que intervienen en el proceso de absorción de nutrientes en las plantas (genotipo, etapa de crecimiento, clima, etc.) (Mattson & Lieth, 2019). De esta manera, la SN debe ser la adecuada para la especie vegetal y la etapa de crecimiento, además, influyen otros factores como la temporada de crecimiento, si el sistema es abierto o cerrado, el uso o no de sustrato y la calidad del producto final. Su correcto manejo garantiza un mayor rendimiento y calidad de los productos. Una estrategia útil para determinar la composición adecuada de la SN, y llevar a cabo una correcta gestión del agua y los nutrientes es saber el contenido de minerales en las hojas de la planta (Tsukagoshi & Shinohara, 2020).

### **Lechuga (*Lactuca sativa* L.)**

Es un cultivo de la familia *Asteraceae* ampliamente extendido y que se consume comúnmente como ensalada por todo el mundo debido a su alto valor nutritivo y propiedades medicinales. Es una buena fuente de polifenoles, carotenoides, ácido ascórbico, ácido fólico, fibra, compuestos antioxidantes como la vitamina C, y minerales como calcio, fósforo, yodo, hierro, cobre y arsénico. Se utiliza a nivel medicinal para tratar problemas de inflamación, dolor, indigestión, bronquitis e infecciones urinarias. Además, está catalogada como una de las hortalizas de hoja con mayor importancia económica y uno de los productos de IV gama (productos mínimamente procesados en fresco) con mayor demanda en todo el mundo (Noumedem *et al.*, 2017; Shatilov *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2022). También es un cultivo modelo utilizado para el estudio del efecto de la iluminación en cultivos verticales debido a su rápido crecimiento, corto ciclo de producción y tamaño pequeño. Además, despierta gran interés a nivel de producción comercial en la agricultura vertical (Voutsinos *et al.*, 2021).



En el año 2021 se cosecharon cerca de 1.21 Mha de lechuga en todo el mundo, con una producción neta de aproximadamente 27 millones de toneladas. El 87% del total de la producción mundial de lechuga se agrupa en 10 países, principalmente en China con una participación del 53% (14.4 Mton), seguido por países como los Estados Unidos, India y España, que tienen una producción anual entre 1 y 4 Mton, cada uno. El porcentaje restante está conformado por países como Italia, Japón, Bélgica, Turquía, México y Francia, cada uno con producciones entre 0.47 y 0.58 Mton. El área cultivada de esta hortaliza en China tuvo 0.61 Mha, Estados Unidos e India, entre 0.1 y 0.18 Mha, y el resto de los países entre 12 y 35 mil hectáreas (FAO, 2021c).

Existen siete grupos principales de morfotipos de lechuga que difieren fenotípicamente en características de forma, tamaño, textura, formación de cabeza y tipo de tallo: mantecosa, crujiente, romana, lechuga de corte, lechuga de tallo, lechuga latina y lechuga oleaginosa (Kim *et al.*, 2016; Křístková *et al.*, 2008; Mou, 2008; Zhang *et al.*, 2017).

#### Condiciones de cultivo en invernadero

Las temperaturas óptimas diurna y nocturna para la producción de lechuga en invernadero son 23 y 17 °C, respectivamente, con un rango óptimo entre 18 y 28 °C. Los periodos de crecimiento para plantas con cogollo completamente desarrollado durante el verano varían entre 65 y 80 días, desde semilla hasta cosecha, y hasta 130 días durante el invierno (Hernández *et al.*, 2020; Petropoulou *et al.*, 2023; Voutsinos *et al.*, 2021).

**Cuadro 3.** Fórmulas y concentraciones de soluciones nutritivas (macroelementos) para lechuga en invernadero.

| Concentración (mM) |                                |                                |     |     |     |     |     | Referencia |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------|
| N                  | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | P   | K   | Ca  | Mg  | S   |            |
| 11.1               | -                              | -                              | 1.5 | 4.9 | 3.8 | 2.1 | 2.7 | 1          |
| 11.8               | -                              | -                              | 1.0 | 6.4 | 4.5 | 1.6 | 2.7 | 2          |
| 9.0                | 8.0                            | 1.0                            | 0.7 | 2.5 | 3.0 | 0.7 | 1.0 | 3          |
| 9.0                | 8.0                            | 1.0                            | 1.0 | 3.0 | 3.0 | 1.0 | 1.5 | 4          |
| 9.2                | 8.2                            | 1.0                            | 0.7 | 2.7 | 2.9 | 0.7 | 1.0 | 5          |
| 8.0                | 8.0                            | -                              | 1.5 | 4.0 | 4.0 | 1.3 | 2.5 | 6          |
| 10.7               | -                              | -                              | 1.1 | 5.4 | 3.3 | 1.4 | 1.4 | 7          |
| 17.0               | 16.1                           | 0.9                            | 1.0 | 8.5 | 3.8 | 1.3 | 1.2 | 8          |

1: (Hernández *et al.*, 2020), 2: (Quintero-Arias *et al.*, 2021), 3: (Formisano *et al.*, 2021), 4: (Buturi *et al.*, 2022), 5: (Carillo *et al.*, 2022), 6: (Cristofano *et al.*, 2022), 7: (Hooks *et al.*, 2022), 8: (Lycoskoufis *et al.*, 2022).

La distancia entre plantas para lechuga en invernadero oscila entre 0.18 y 0.25 m, es decir, con densidades de siembra entre 16 y 31 plantas m<sup>-2</sup> (Carillo *et al.*, 2022; Voutsinos *et al.*, 2021).

En el Cuadro 3 se muestra un listado con fórmulas y concentraciones químicas de soluciones nutritivas utilizadas en el cultivo de lechuga bajo invernadero. El pH y la conductividad eléctrica de las diferentes soluciones varían entre 5.5 y 6.5; y entre 1.1 y 2.1 dS m<sup>-1</sup>, respectivamente. Las concentraciones corresponden a los denominados macroelementos, aquellos que la planta necesita en mayor cantidad en su nutrición.

#### Composición química, nutricional y mineral

El 95% del peso de la lechuga está constituido por agua. Los macronutrientes están presentes en concentraciones medias de 12.3 mg g<sup>-1</sup> de proteína, 2.1 mg g<sup>-1</sup> de lípidos y 27.1 mg g<sup>-1</sup> de carbohidratos (Mou, 2008; Still, 2007). A nivel químico, la lechuga se compone de metabolitos primarios como azúcares solubles (glucosa, fructosa y sacarosa) y ácidos orgánicos (málico, cítrico, fumárico, glutámico, tartárico, etc.), compuestos que determinan características de sabor y nutrición. Esta hortaliza presenta una concentración entre 0.5 y 1.7 mg g<sup>-1</sup> de sacarosa, entre 0.5 y 3.9 mg g<sup>-1</sup> de glucosa, y, entre 1.0 y 4.8 mg g<sup>-1</sup> de fructosa. Asimismo, una concentración de compuestos fenólicos entre 1.2 y 2.2 mg g<sup>-1</sup>, responsables de prolongar la vida útil de la planta y aumentar su tolerancia al estrés, a través de la eliminación de especies reactivas de oxígeno que participan en la senescencia de las hojas. Además, tiene una concentración promedio de vitamina C que varía entre 28.8 y 77.5 µg g<sup>-1</sup>, un valor inferior si se compara con otras hortalizas como brócoli, coliflor o pimienta, que tienen valores entre 350 y 750 µg g<sup>-1</sup> (López *et al.*, 2014; Mou, 2008; Smoleń *et al.*, 2019, 2016).

El contenido de nitratos en hortalizas de hoja como lechuga debe ser reducido para evitar afectaciones a la salud humana. Los valores de nitratos aumentan cuando hay una reducción de la luz solar o en condiciones de alta densidad en el cultivo. En un estudio realizado en tres variedades de lechuga (*Romaine*, *Little Gem* y *Mini Romaine*) se encontraron valores entre 101 y 627 mmol kg<sup>-1</sup> de peso fresco (López *et al.*, 2014), valores altos comparados con los reportados en los cultivares (*Cud Voorburgu*, *Zimujaca*, *Maugli*,

*Królowa lata*, *Lollo rossa* y *Redin*), cuyo rango de variación está entre 32 y 81 mmol kg<sup>-1</sup> (Smoleń *et al.*, 2019).

**Cuadro 4.** Rangos de composición mineral para lechuga hidropónica.

| g Kg <sup>-1</sup> de peso seco |          |            |           |         |         | Referencia |
|---------------------------------|----------|------------|-----------|---------|---------|------------|
| N                               | P        | K          | Ca        | Mg      | S       |            |
| 37.8-56.8                       | 2.1-6.3  | 44.5-70.5  | 6.9-15.4  | 3.0-6.7 | 2.6-3.5 | 1          |
| 28.7-31.5                       | 2.6-3.0  | 41.9-49.0  | 11.2-14.5 | 3.5-6.1 | -       | 2          |
| 47.3-55.6                       | 7.9-11.9 | 79.6-123.1 | 8.6-15    | 3.2-4.9 | -       | 3          |
| 18.0                            | 1.5      | 20.0       | 13.9      | 3.4     | 2.2     | 4          |
| 43.7                            | 7.0      | 81.1       | 13.2      | 3.9     | 2.1     | 5          |
| 39.9                            | 6.4      | 49.0       | 9.7       | 2.9     | 2.6     | 6          |
| 50.6                            | 6.9      | 83.4       | 11.0      | 3.4     | 1.7     | 7          |
| 48-55                           | 6.5-8.5  | 70-90      | 7.8-12.7  | 2.8-3.6 | 1.6-2.0 | 8          |

1: (Sahin, 2023), 2: (Zandvakili *et al.*, 2019), 3: (Mampholo *et al.*, 2016), 4: (Yildirim *et al.*, 2016), 5: (Sularz *et al.*, 2020), 6: (Smolik *et al.*, 2011), 7: (Smoleń *et al.*, 2016), 8: (Smoleń *et al.*, 2019).

Por otro lado, otro de los compuestos importantes de la lechuga y las hortalizas de hoja verde en general, es la clorofila debido a su capacidad antioxidante a nivel nutricional para el consumo humano. Las variedades de lechuga (*Romaine*, *Little Gem* y *Mini Romaine*) tienen valores de clorofila a entre 72.7 y 117.2 µg g<sup>-1</sup>, y de clorofila b entre 27.0 y 49.6 µg g<sup>-1</sup> (López *et al.*, 2014). El Cuadro 4 muestra el peso fresco, peso seco y la composición mineral de macroelementos para diferentes cultivares de lechuga.

### Modelación de un Sistema de Cultivo

La modelación en sistemas de fertirrigación permite no solo comprender de mejor manera el funcionamiento del cultivo, sino también facilita la implementación de procesos de control y optimización que contribuyen al ahorro de recursos. Un modelo integral de CH bajo invernadero incluye la absorción individual de agua y nutrientes por parte del cultivo en función de su concentración y distribución en el medio de plantación, donde se evidencia la acumulación de sales en CH cerrados (salinidad) (Voogt & Bar-Yosef, 2019).

#### Modelo de absorción de agua

La evapotranspiración (ET) es un concepto que cuantifica la pérdida de agua hacia la atmósfera a través de los procesos de evaporación y transpiración. En la evaporación, el agua líquida se transforma en vapor de agua (vaporización) y proviene de fuentes como

la superficie del suelo, vegetación húmeda, pavimento y cuerpos de agua; mientras que, la transpiración es el proceso de pérdida de agua en los cultivos, en forma de vapor a través de los estomas de las hojas (Zotarelli *et al.*, 2010). Las aplicaciones de la evapotranspiración se extienden en la gestión de recursos hídricos, manejo agrícola y modelos de simulación de cultivos (Córdova *et al.*, 2015).

La ET del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>) son las necesidades de agua del cultivo cuando no está afectado por enfermedades, se le suministra una buena fertilización y se desarrolla bajo condiciones óptimas de riego. La ET<sub>c</sub> se calcula como el producto entre la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) y el coeficiente adimensional de cultivo (K<sub>c</sub>) (Ecuación 1) (Allen *et al.*, 2006). En la Ecuación 1 tanto ET<sub>c</sub> y ET<sub>o</sub> comúnmente se expresan en unidades de (mm día<sup>-1</sup>).

$$ET_c = K_c ET_o \quad \text{Ecuación (1)}$$

El coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) se calcula como la suma entre el coeficiente basal de cultivo (K<sub>cb</sub>) que describe el proceso de transpiración de las plantas y el coeficiente de evaporación del agua del suelo (K<sub>e</sub>) que describe la evaporación que ocurre en la superficie del suelo (Ecuación 2) (Allen *et al.*, 2006).

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad \text{Ecuación (2)}$$

Combinando la Ecuación 1 y 2 se obtiene que la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>) se calcula como:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad \text{Ecuación (3)}$$

El K<sub>c</sub> varía a lo largo de la temporada de crecimiento de la plantación dividida en cuatro fases: inicial, desarrollo, mitad y final de temporada, cada una con su respectivo valor de coeficiente de cultivo. La duración de cada una de las fases de crecimiento presenta valores diferentes según clima, lugar y fecha de siembra (Allen *et al.*, 2006).

La ET<sub>o</sub> es la tasa de evapotranspiración para un cultivo hipotético de pasto de 0.12 m de altura, con una resistencia superficial fija de 70 s m<sup>-1</sup> y un albedo de 0.23. La superficie de referencia (pasto verde) está bajo condiciones de buen riego, altura uniforme y crecimiento activo (Allen *et al.*, 2006). El cálculo de ET<sub>o</sub> para intervalos de tiempo horario

se presenta en la Ecuación 4, conocida como ecuación de Penman-Monteith, desarrollada en 1965 y establecida como método estándar en la FAO (Allen *et al.*, 2006, 2005).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + 37 \gamma u_2 (e_s - e_a) (T + 273)^{-1}}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad \text{Ecuación (4)}$$

En donde  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia del cultivo en ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $R_n$  y  $G$  son la radiación neta en la superficie del cultivo y la densidad de flujo de calor del suelo en la superficie del suelo, ambas en ( $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $T$  es la temperatura media horaria del aire a una altura de 1.5 a 2.5 m en ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  es la velocidad media horaria del viento a 2 m de altura en ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  es la presión de vapor de saturación a una altura de 1.5 a 2.5 m en (kPa),  $e_a$  es la presión de vapor real media a una altura de 1.5 a 2.5 m en (kPa),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación vs. temperatura en ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  es la constante psicrométrica en ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) y  $C_d$  que es una constante que varía según sean horas día ( $C_d=0.24$ ) u horas noche ( $C_d=0.96$ ).

La constante psicrométrica se calcula a través de la Ecuación 5 en función de la altura  $z$  en (m) sobre el nivel del mar en donde se registran los datos climáticos.

$$\gamma = 0.067365(293 - 0.0065 z (293)^{-1})^{5.26} \quad \text{Ecuación (5)}$$

La pendiente de la curva de presión de vapor de saturación vs. temperatura se calcula en función de la temperatura media horaria del aire por medio de la Ecuación 6, donde  $T$  en la temperatura media horaria en ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$\Delta = [2503 \exp(17.27 T (T + 237.3)^{-1})] (T + 237.3)^{-2} \quad \text{Ecuación (6)}$$

La presión de vapor de saturación y la presión de vapor real media se calculan conforme a la Ecuación 7 y 8, respectivamente. La temperatura media horaria  $T$  está en ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la humedad relativa media horaria  $HR$  está en (%).

$$e_s = 0.6108 \exp(17.27 T (T + 237.3)^{-1}) \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$e_a = 0.01 HR e_s \quad \text{Ecuación (8)}$$

#### Modelo de absorción de nutrientes

Uno de los factores más importantes que define el éxito de un CH cerrado o recirculante bajo invernadero es la salinidad en el agua de riego. Este fenómeno se presenta

comúnmente debido a la acumulación de macroelementos y de iones no esenciales o no nutritivos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) que no son absorbidos por el cultivo o que se absorben en cantidades muy reducidas, provocando un rápido aumento de la conductividad eléctrica en la solución nutritiva (Carmassi *et al.*, 2003).

Los modelos de absorción de nutrientes son herramientas útiles en la toma de decisiones para la gestión cultural y de fertirriego para un cultivo bajo invernadero (Carmassi *et al.*, 2005). Un modelo simple a través del cual se puede pronosticar los cambios de la concentración iónica de una solución nutritiva recirculante en CH cerrados es la combinación de la Ecuación 9, 10 y 11 (Carmassi *et al.*, 2003).

La Ecuación 9 permite simular los cambios en la concentración de iones nutritivos para un cultivo hidropónico en donde la evapotranspiración se repone en el tanque de solución nutritiva (Sonneveld, 2000). Esta ecuación se deriva de un balance de absorción de nutrientes en un cultivo hidropónico cerrado (Carmassi *et al.*, 2003).

$$[I]_{t+1} = [I]_t + ([I]_R - [I]_U)(ET_c V^{-1}) \quad \text{Ecuación (9)}$$

En donde  $[I]_{t+1}$  es la concentración del ion I en el tiempo t+1,  $[I]_t$  la concentración del ion I en el tiempo t,  $[I]_R$  la concentración de recarga del ion I en la solución nutritiva y  $[I]_U$  la concentración de absorción del cultivo del ion I, todas en unidades de ( $\text{meq L}^{-1}$ ).  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar en (L) y V es el volumen del tanque de solución nutritiva recirculante en (L).

La concentración de un ion no nutritivo como ( $\text{Na}^+$ ) en la solución nutritiva se puede calcular a través de la Ecuación 10, modelo planteado producto de ensayos de tolerancia a la salinidad en múltiples cultivos de flores en SCSS bajo invernadero (Carmassi *et al.*, 2003; Sonneveld *et al.*, 1999a).

$$[I]_{t+1} = ([I]_t - [I]_R p^{-1}) \exp(-p ET_c V^{-1}) + [I]_R p^{-1} \quad \text{Ecuación (10)}$$

En donde  $[I]_{t+1}$  es la concentración del ion no nutritivo I en el tiempo t+1,  $[I]_t$  la concentración del ion no nutritivo I en el tiempo t y  $[I]_R$  la concentración de recarga del ion no nutritivo I en el agua de riego, todas en unidades de ( $\text{meq L}^{-1}$ ). El factor adimensional  $p$  varía entre 0.01 a 0.2 en cultivos hortícolas, en tomate es igual a 0.1, y

puede alcanzar valores de 0.3.  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar en (L) y V es el volumen del tanque de solución nutritiva recirculante en (L).

La Ecuación 11 expresa la conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva en función de la suma de cationes (Sonneveld *et al.*, 1999b).

$$CE = 0.19 + 0.095 [C^+] \quad \text{Ecuación (11)}$$

En donde  $CE$  es la conductividad eléctrica en ( $dS\ m^{-1}$ ), y  $[C^+]$  es la suma de cationes presentes en la solución nutritiva en (mM).

De esta manera, el modelo simula los cambios de concentración de iones y la CE de la solución nutritiva recirculante en función de los cuatro factores más importantes e influyentes en las relaciones minerales en CH como lo son el volumen de la solución nutritiva recirculante, la transpiración del cultivo, la calidad de agua de riego y la concentración de absorción de nutrientes propia del cultivo. Esta absorción depende de cada especie y de las condiciones del cultivo, y se puede establecer como constante para efectos de calibración del modelo (Carmassi *et al.*, 2003). En el Cuadro 5 se presentan valores de concentración de absorción de elementos nutritivos para cultivos hidropónicos cerrados de tomate, pepino y pimiento dulce bajo invernadero (Sonneveld, 2000).

**Cuadro 5.** Concentraciones de absorción para cultivos hidropónicos cerrados bajo invernadero.

| Cultivo        | Concentración (mM) |     |     |     |     |     |
|----------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                | N                  | P   | K   | Ca  | Mg  | S   |
| Tomate         | 9.6                | 1.1 | 6.1 | 2.2 | 0.9 | 1.2 |
| Pepino         | 12.2               | 1.0 | 6.6 | 2.7 | 0.8 | 0.9 |
| Pimiento dulce | 9.7                | 0.8 | 4.5 | 1.9 | 0.7 | 0.6 |

(Sonneveld, 2000)

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Definición del Modelo Hídrico y de Nutrientes

Modelo matemático de consumo hídrico

El modelo de consumo hídrico está compuesto en primer lugar por el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) planteado en la Ecuación 4, con dos modificaciones en virtud del tipo de sistema productivo y su entorno.

1. La densidad de flujo de calor del suelo en la superficie del suelo ( $G$ ) se asume igual a cero debido a que, el sistema productivo con el que se trabaja es un cultivo hidropónico en donde el medio es agua.
2. La radiación neta ( $R_n$ ) en la superficie del cultivo se calcula como el producto entre la radiación solar externa al invernadero ( $R_s$ ) y el coeficiente de transmisividad ( $\alpha$ ), característica correspondiente a la película plástica del invernadero en donde se establece el sistema de cultivo.

De igual manera, a sabiendas de que la constante ( $C_d$ ) de la Ecuación 4 varía según sean horas día u noche. A continuación, se presentan la Ecuación 12 y 13, correspondientes a la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) de un cultivo hidropónico bajo invernadero durante las horas del día y noche, respectivamente.

$$ET_{o,día} = \frac{0.408 \Delta (\alpha R_s) + 37 \gamma u_2 (e_s - e_a) (T + 273)^{-1}}{\Delta + \gamma (1 + 0.24 u_2)} \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$ET_{o,noche} = \frac{0.408 \Delta (\alpha R_s) + 37 \gamma u_2 (e_s - e_a) (T + 273)^{-1}}{\Delta + \gamma (1 + 0.96 u_2)} \quad \text{Ecuación (13)}$$

En donde  $ET_o$  está en ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $R_s$  es la radiación solar externa al invernadero en ( $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $\alpha$  es el coeficiente de transmisividad de la película plástica del invernadero (-),  $T$  es la temperatura media horaria del aire dentro del invernadero a una altura media del cultivo vertical en ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  es la velocidad media horaria del viento a una altura media del cultivo vertical en ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  es la presión de vapor de saturación a una altura media del cultivo vertical en ( $\text{kPa}$ ),  $e_a$  es la presión de vapor real media a una altura media del cultivo vertical en ( $\text{kPa}$ ),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación vs. temperatura en ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) y  $\gamma$  es la constante psicrométrica en ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).



En segundo lugar, el cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc) planteado en la Ecuación 3, cambia en función de dos principios, el principal proceso causante del consumo hídrico en el cultivo, y la disposición vertical del cultivo.

1. El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) se asume igual al coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ), pues en este tipo de sistemas (cultivos hidropónicos cerrados) no existe evaporación de agua, en cambio, es la transpiración la causa principal del consumo hídrico en las plantas.
2. Se incluye una relación entre la densidad de un cultivo vertical ( $d_v$ ) y la densidad estándar de un cultivo horizontal ( $d_h$ ) (patrón), ambas para la misma especie vegetal. A esta relación ( $\Phi$ ) se le ha denominado como “factor de densidad de cultivo vertical” y lo que busca es transformar el consumo hídrico de sistemas horizontales a sistemas de cultivo vertical.

La Ecuación 14 representa la expresión matemática del factor de densidad de cultivo vertical ( $\Phi$ ), en tanto, la Ecuación 15 y 16 muestran el cálculo de ETc para cultivos hidropónicos cerrados verticales bajo invernadero, durante horas del día y la noche, respectivamente.

$$\phi = d_v d_h^{-1} \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$ET_{c,día} = \phi K_{cb} ET_{o,día} \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$ET_{c,noche} = \phi K_{cb} ET_{o,noche} \quad \text{Ecuación (16)}$$

En donde  $d_v$  y  $d_h$  están en ( $\text{plantas m}^{-2}$ ),  $\Phi$  es adimensional,  $K_{cb}$  es el coeficiente basal de cultivo y también es adimensional,  $ET_o$  en ( $\text{mm h}^{-1} = \text{L m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) y  $ET_c$  en ( $\text{L h}^{-1}$ ). Es importante mencionar que al usar factor  $\Phi$  en la Ecuación 15 y 16, este debe ser multiplicado por un metro cuadrado pues la relación de densidades se efectúa justamente en esta área, con lo cual, dimensionalmente las ecuaciones son correctas.

## Modelo matemático de consumo de nutrientes

El modelo de consumo de nutrientes determina la concentración de cationes nutritivos: amonio  $NH_4^+$ , potasio  $K^+$ , calcio  $Ca^{+2}$  y magnesio  $Mg^{+2}$ , con base en el incremento de la conductividad eléctrica en el tanque de solución nutritiva del sistema hidropónico cerrado, producto a su vez, del incremento de la concentración del catión no nutritivo sodio  $Na^+$ , presente en el agua de riego.

De esta manera, la acumulación de sodio en la solución nutritiva estará definida por la Ecuación 17, obtenida de reemplazar los términos correspondientes en la Ecuación 10.

$$[Na^+]_{t+1} = ([Na^+]_t - [Na^+]_R p^{-1}) \exp(-p ET_c V^{-1}) + [Na^+]_R p^{-1} \text{ Ecuación (17)}$$

En donde  $[Na^+]_{t+1}$  es la concentración de sodio en el tiempo t+1,  $[Na^+]_t$  la concentración de sodio en el tiempo t y  $[Na^+]_R$  la concentración de recarga de sodio en el agua de riego, todas en unidades de (meq  $L^{-1}$ ). El factor adimensional  $p$  varía entre 0.01 y 0.3,  $ET_c$  se obtiene a partir de la Ecuación 15 o 16 (según corresponda) del modelo de consumo hídrico y V es el volumen del tanque de solución nutritiva recirculante en (L), característica del sistema de fertirriego.

Las concentraciones de los cationes nutritivos ( $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$ ) se determinan por medio de la Ecuación 18 a 21, obtenidas con base en la Ecuación 9.

$$[NH_4^+]_{t+1} = [NH_4^+]_t + ([NH_4^+]_R - [NH_4^+]_U)(ET_c V^{-1}) \text{ Ecuación (18)}$$

$$[K^+]_{t+1} = [K^+]_t + ([K^+]_R - [K^+]_U)(ET_c V^{-1}) \text{ Ecuación (19)}$$

$$[Ca^{+2}]_{t+1} = [Ca^{+2}]_t + ([Ca^{+2}]_R - [Ca^{+2}]_U)(ET_c V^{-1}) \text{ Ecuación (20)}$$

$$[Mg^{+2}]_{t+1} = [Mg^{+2}]_t + ([Mg^{+2}]_R - [Mg^{+2}]_U)(ET_c V^{-1}) \text{ Ecuación (21)}$$

Donde el término  $[I]_t$  es la concentración iónica en el tiempo (t) correspondiente al valor inicial de concentración en el tanque de solución nutritiva para cada uno de los cationes nutritivos,  $[I]_{t+1}$  es la concentración iónica en el tiempo (t+1) en el tanque de solución nutritiva para cada uno de los cationes nutritivos. Las concentraciones de absorción del cultivo  $[I]_U$  para cada uno de los cationes nutritivos son valores calibrados por el modelo y, por tanto, resultados del proceso de simulación. Igualmente,  $ET_c$  se

obtiene a partir de la Ecuación 15 o 16 (según corresponda) del modelo de consumo hídrico y V es el volumen del tanque de solución nutritiva recirculante en (L), característica del sistema de fertirriego. Las concentraciones de recarga de los cationes nutritivos  $[I]_R$  se definen con base en el siguiente razonamiento.

En un sistema hidropónico cerrado lo que se busca es mantener constante una conductividad eléctrica óptima para el cultivo (conductividad eléctrica objetivo), evitando problemas de salinidad y desequilibrios entre nutrientes. Por tanto, los fertilizantes se deben reducir progresivamente en la solución de repuesto, la cual, junto a la solución de drenaje permite alcanzar el nivel óptimo de concentración iónica para el cultivo. Bajo esta lógica, el cambio de concentración de sodio  $\Delta[Na^+]$  en el tanque de solución nutritiva (incremento) entre el tiempo t y t+1 (Ecuación 22), es igual a la suma de los cambios de concentración de los cationes nutritivos (decremento), Ecuación 23.

$$\Delta[Na^+] = [Na^+]_{t+1} - [Na^+]_t \quad \text{Ecuación (22)}$$

$$\Delta[Na^+] = \Delta[NH_4^+] + \Delta[K^+] + \Delta[Ca^{+2}] + \Delta[Mg^{+2}] \quad \text{Ecuación (23)}$$

Los decrementos de concentración de los cationes nutritivos se pueden calcular en función del incremento de la concentración de sodio  $\Delta[Na^+]$  en la proporción correcta según lo que absorba el cultivo para cada catión. En la Ecuación 24 a 27 se muestra el cálculo de los descensos de concentración para amonio, potasio, calcio y magnesio, respectivamente.

$$\Delta[NH_4^+] = \Delta[Na^+] X_{NH_4^+} \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$\Delta[K^+] = \Delta[Na^+] X_{K^+} \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$\Delta[Ca^{+2}] = \Delta[Na^+] X_{Ca^{+2}} \quad \text{Ecuación (26)}$$

$$\Delta[Mg^{+2}] = \Delta[Na^+] X_{Mg^{+2}} \quad \text{Ecuación (27)}$$

Donde el cambio de concentración de sodio  $\Delta[Na^+]$  es un valor conocido a partir de la aplicación de la Ecuación 10. Las proporciones correctas de absorción para cada uno de los cationes, expresadas como  $X_i$ , se calculan con base en la ponderación de las concentraciones de absorción del cultivo. En la Ecuación 28 se muestra la suma de

concentraciones de absorción de cationes nutritivos, la cual permite en la Ecuación 29 a 32, realizar el cálculo respectivo de las proporciones de absorción. Durante el proceso de simulación del modelo, se suponen unos valores iniciales de concentración de absorción para cada uno de los cationes, y se recalculan en iterativamente hasta encontrar el mejor ajuste posible con la información real medida.

$$\sum[I]_U = [NH_4^+]_U + [K^+]_U + [Ca^{+2}]_U + [Mg^{+2}]_U \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$X_{NH_4^+} = [NH_4^+]_U (\sum[I]_U)^{-1} \quad \text{Ecuación (29)}$$

$$X_{K^+} = [K^+]_U (\sum[I]_U)^{-1} \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$X_{Ca^{+2}} = [Ca^{+2}]_U (\sum[I]_U)^{-1} \quad \text{Ecuación (31)}$$

$$X_{Mg^{+2}} = [Mg^{+2}]_U (\sum[I]_U)^{-1} \quad \text{Ecuación (32)}$$

Al realizar un balance de concentraciones para cada uno de los cationes nutritivos en el sistema hidropónico cerrado, encontramos que, la concentración inicial del catión I en la solución nutritiva  $[I]_0$  es igual a la suma de la concentración del catión I en el tiempo t  $[I]_t$  (solución de drenaje del cultivo), la concentración de recarga del catión I por parte del controlador de fertirriego  $[I]_R$ , y el aumento de la concentración de sodio en la proporción correcta para el catión I  $\Delta[I]$ . Así entonces, en la Ecuación 33 a 36 se muestra el respectivo balance para cada uno de los cationes nutritivos.

$$[NH_4^+]_0 = [NH_4^+]_t + \Delta[NH_4^+] + [NH_4^+]_R \quad \text{Ecuación (33)}$$

$$[K^+]_0 = [K^+]_t + \Delta[K^+] + [K^+]_R \quad \text{Ecuación (34)}$$

$$[Ca^{+2}]_0 = [Ca^{+2}]_t + \Delta[Ca^{+2}] + [Ca^{+2}]_R \quad \text{Ecuación (35)}$$

$$[Mg^{+2}]_0 = [Mg^{+2}]_t + \Delta[Mg^{+2}] + [Mg^{+2}]_R \quad \text{Ecuación (36)}$$

De lo anterior, reemplazando la Ecuación 24 a 27 y despejando la concentración de recarga para cada uno de los cationes nutritivos, se obtiene la Ecuación 37 a 40, que permiten junto con la Ecuación 18 a 21 definir en su totalidad el modelo de consumo de nutrientes (cationes nutritivos) para cultivos hidropónicos cerrados verticales bajo invernadero.

$$[NH_4^+]_R = [NH_4^+]_0 - [NH_4^+]_t - \Delta[Na^+] X_{NH_4^+} \quad \text{Ecuación (37)}$$

$$[K^+]_R = [K^+]_0 - [K^+]_t - \Delta[Na^+] X_{K^+} \quad \text{Ecuación (38)}$$

$$[Ca^{+2}]_R = [Ca^{+2}]_0 - [Ca^{+2}]_t - \Delta[Na^+] X_{Ca^{+2}} \quad \text{Ecuación (39)}$$

$$[Mg^{+2}]_R = [Mg^{+2}]_0 - [Mg^{+2}]_t - \Delta[Na^+] X_{Mg^{+2}} \quad \text{Ecuación (40)}$$

Reemplazando la Ecuación 29 a 32 en la Ecuación 37 a 40 se obtienen las siguientes expresiones (Ecuación 41 a 44) para las concentraciones de recarga en la solución nutritiva, para cada uno de los cationes nutritivos.

$$[NH_4^+]_R = [NH_4^+]_0 - [NH_4^+]_t - \Delta[Na^+] [NH_4^+]_U (\sum[I]_U)^{-1} \quad \text{Ecuación (41)}$$

$$[K^+]_R = [K^+]_0 - [K^+]_t - \Delta[Na^+] [K^+]_U (\sum[I]_U)^{-1} \quad \text{Ecuación (42)}$$

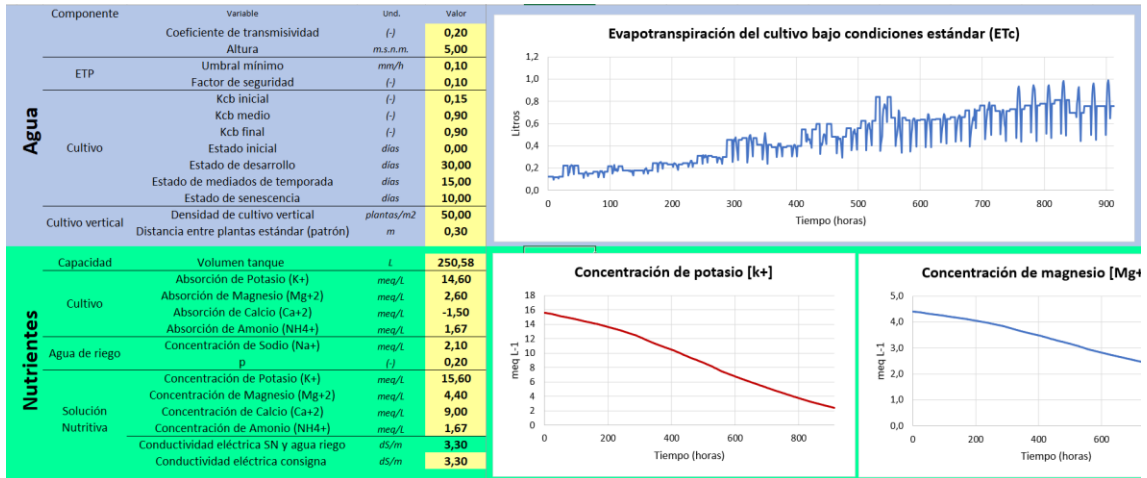
$$[Ca^{+2}]_R = [Ca^{+2}]_0 - [Ca^{+2}]_t - \Delta[Na^+] [Ca^{+2}]_U (\sum[I]_U)^{-1} \quad \text{Ecuación (43)}$$

$$[Mg^{+2}]_R = [Mg^{+2}]_0 - [Mg^{+2}]_t - \Delta[Na^+] [Mg^{+2}]_U (\sum[I]_U)^{-1} \quad \text{Ecuación (44)}$$

### Modelo predictivo

El modelo predictivo (MP) para cultivos hidropónicos cerrados verticales bajo invernadero está conformado por los módulos de consumo hídrico y consumo de nutrientes definidos anteriormente. El MP se desarrolló en su primera versión en una hoja de cálculo de Microsoft Excel (prototipo) constituida por dos secciones: panel de control y cálculos de consumo.

En el panel de control (Figura 9) el usuario observa en color azul el módulo de consumo de agua, y en verde, el módulo de consumo de nutrientes, en ambos debe ingresar la información necesaria para alimentar el modelo (casillas de color amarillo). Asimismo, puede observar en tiempo real las gráficas de consumo hídrico y de nutrientes. Para el consumo hídrico se muestra la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc) en (L) con una frecuencia horaria a lo largo del desarrollo del cultivo. En el consumo de nutrientes, el usuario observa un total de cinco gráficas, correspondientes al consumo de los cuatro cationes nutritivos: amonio  $NH_4^+$ , potasio  $K^+$ , calcio  $Ca^{+2}$  y magnesio  $Mg^{+2}$ , y otra referente a la acumulación de sodio  $Na^+$  en el tanque de la solución nutritiva.



**Figura 9.** Sección de panel de control del modelo predictivo de consumo hídrico y de nutrientes.

En la sección de cálculos de consumo (Figura 10) el usuario debe de ingresar la información climática necesaria a lo largo de todo el desarrollo del cultivo. Por un lado, la temperatura media horaria en (°C), la humedad relativa media horaria en (%) y la velocidad media horaria del viento en (m s<sup>-1</sup>), todas medidas a una altura media del cultivo vertical dentro del invernadero. Asimismo, la radiación solar media en (MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), medida en la parte externa del invernadero.

| No. | Fecha      | Hora  | Día | Mes | Año | U <sub>z</sub> | T media | HR      | Rn                   | Rn'                  | Δ      | e <sub>a</sub> | e <sub>s</sub> | e <sub>a</sub> -e <sub>s</sub> | C <sub>d</sub> | ET <sub>o</sub> |        |
|-----|------------|-------|-----|-----|-----|----------------|---------|---------|----------------------|----------------------|--------|----------------|----------------|--------------------------------|----------------|-----------------|--------|
|     |            |       |     |     |     | m/s            | °C      | %       | MJ/m <sup>2</sup> /h | MJ/m <sup>2</sup> /h | kPa/°C | kPa            | kPa            | kPa                            |                | mm/h            |        |
| 0   |            |       |     |     |     |                |         |         |                      |                      |        |                |                |                                |                |                 |        |
| 1   | 15/03/2023 | 0:30  | 0   | 15  | 3   | 2023           | 0,1660  | 16,8573 | 78,0117              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1218         | 1,9203         | 1,4980                         | 0,4222         | 0,96            | 0,0030 |
| 2   | 15/03/2023 | 1:30  | 1   | 15  | 3   | 2023           | 0,4428  | 17,7001 | 69,8613              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1276         | 2,0254         | 1,4150                         | 0,6104         | 0,96            | 0,0104 |
| 3   | 15/03/2023 | 2:30  | 2   | 15  | 3   | 2023           | 0,2308  | 15,0511 | 83,8335              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1101         | 1,7110         | 1,4344                         | 0,2766         | 0,96            | 0,0029 |
| 4   | 15/03/2023 | 3:30  | 3   | 15  | 3   | 2023           | 0,1660  | 14,0879 | 84,9979              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1043         | 1,6077         | 1,3665                         | 0,2412         | 0,96            | 0,0019 |
| 5   | 15/03/2023 | 4:30  | 4   | 15  | 3   | 2023           | 0,1130  | 14,2083 | 81,5048              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1050         | 1,6203         | 1,3207                         | 0,2997         | 0,96            | 0,0016 |
| 6   | 15/03/2023 | 5:30  | 5   | 15  | 3   | 2023           | 0,3368  | 13,8470 | 78,0117              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1028         | 1,5828         | 1,2348                         | 0,3480         | 0,96            | 0,0053 |
| 7   | 15/03/2023 | 6:30  | 6   | 15  | 3   | 2023           | 0,4958  | 17,2185 | 52,3959              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1243         | 1,9647         | 1,0294                         | 0,9353         | 0,96            | 0,0178 |
| 8   | 15/03/2023 | 7:30  | 7   | 15  | 3   | 2023           | 0,4958  | 16,7369 | 51,2316              | 1,3206               | 0,2641 | 0,1210         | 1,9057         | 0,9763                         | 0,9294         | 0,24            | 0,0866 |
| 9   | 15/03/2023 | 8:30  | 8   | 15  | 3   | 2023           | 0,4958  | 18,4226 | 47,7385              | 1,9068               | 0,3814 | 0,1328         | 2,1195         | 1,0118                         | 1,1077         | 0,24            | 0,1218 |
| 10  | 15/03/2023 | 9:30  | 9   | 15  | 3   | 2023           | 0,4958  | 20,7103 | 41,9168              | 2,2112               | 0,4422 | 0,1504         | 2,4431         | 1,0241                         | 1,4190         | 0,24            | 0,1466 |
| 11  | 15/03/2023 | 10:30 | 10  | 15  | 3   | 2023           | 0,2308  | 23,6002 | 46,5742              | 2,3801               | 0,4760 | 0,1754         | 2,9131         | 1,3567                         | 1,5563         | 0,24            | 0,1505 |
| 12  | 15/03/2023 | 11:30 | 11  | 15  | 3   | 2023           | 0,3368  | 21,4328 | 84,9979              | 2,6018               | 0,5204 | 0,1563         | 2,5539         | 2,1708                         | 0,3831         | 0,24            | 0,1496 |
| 13  | 15/03/2023 | 12:30 | 12  | 15  | 3   | 2023           | 0,3368  | 21,7940 | 87,3266              | 2,5845               | 0,5169 | 0,1594         | 2,6109         | 2,2800                         | 0,3309         | 0,24            | 0,1488 |
| 14  | 15/03/2023 | 13:30 | 13  | 15  | 3   | 2023           | 0,3898  | 22,0348 | 80,3404              | 2,4865               | 0,4973 | 0,1614         | 2,6496         | 2,1287                         | 0,5209         | 0,24            | 0,1466 |
| 15  | 15/03/2023 | 14:30 | 14  | 15  | 3   | 2023           | 0,6106  | 22,6369 | 74,5187              | 2,4739               | 0,4948 | 0,1667         | 2,7483         | 2,0480                         | 0,7003         | 0,24            | 0,1528 |
| 16  | 15/03/2023 | 15:30 | 15  | 15  | 3   | 2023           | 0,4958  | 24,2022 | 60,5464              | 2,3165               | 0,4633 | 0,1810         | 3,0203         | 1,8287                         | 1,1916         | 0,24            | 0,1528 |
| 17  | 15/03/2023 | 16:30 | 16  | 15  | 3   | 2023           | 0,4428  | 24,3226 | 59,3821              | 2,0387               | 0,4077 | 0,1821         | 3,0422         | 1,8065                         | 1,2357         | 0,24            | 0,1359 |
| 18  | 15/03/2023 | 17:30 | 17  | 15  | 3   | 2023           | 0,2838  | 25,5267 | 50,0672              | 1,4041               | 0,2808 | 0,1939         | 3,2685         | 1,6365                         | 1,6321         | 0,24            | 0,0981 |
| 19  | 15/03/2023 | 18:30 | 18  | 15  | 3   | 2023           | 0,3368  | 23,8410 | 71,0256              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1776         | 2,9556         | 2,0992                         | 0,8564         | 0,96            | 0,0091 |
| 20  | 15/03/2023 | 19:30 | 19  | 15  | 3   | 2023           | 0,2308  | 21,9144 | 72,1900              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1604         | 2,6302         | 1,8987                         | 0,7315         | 0,96            | 0,0059 |
| 21  | 15/03/2023 | 20:30 | 20  | 15  | 3   | 2023           | 0,1000  | 19,9879 | 76,8474              | 0,0000               | 0,0000 | 0,1446         | 2,3365         | 1,7956                         | 0,5410         | 0,96            | 0,0021 |

**Figura 10.** Sección de cálculos de consumo del modelo predictivo de consumo hídrico y de nutrientes.

La información que el usuario debe de ingresar en el panel de control se observa en el Cuadro 6. Respecto al módulo de consumo hídrico, la información necesaria se puede segmentar en cuatro apartados: invernadero, evapotranspiración, cultivo y sistema

vertical. Igualmente, el módulo de consumo de nutrientes está conformado por cuatro apartados: capacidad, cultivo, agua de riego y solución nutritiva.

**Cuadro 6.** Variables de ingreso en el panel de control del modelo predictivo.

| Módulo                | Apartado                                     | Variable                                     | Unidades                     |
|-----------------------|--|--|------------------------------|
| Consumo de agua       | Invernadero                                  | $\alpha$                                     | -                            |
|                       |  | Altitud                                      | m.s.n.m.                     |
|                       | Evapotranspiración                           | Umbral mínimo                                | mm h <sup>-1</sup>           |
|                       |  | Factor de seguridad                          | -                            |
|                       | Cultivo                                      | Kcb inicial                                  | -                            |
|                       |  | Kcb medio                                    | -                            |
|                       |  | Kcb final                                    | -                            |
|                       |  | Estado inicial                               | días                         |
|                       |  | Estado de desarrollo                         | días                         |
|                       |  | Estado medio                                 | días                         |
| Consumo de nutrientes |  | Estado de senescencia                        | días                         |
|                       | Sistema vertical                             | Densidad patrón                              | plantas m <sup>-2</sup><br>m |
|                       | Capacidad                                    | Volumen del tanque                           | L                            |
|                       | Cultivo                                      | [K <sup>+</sup> ] <sub>U</sub>               | mM                           |
|                       |  | [Mg <sup>+2</sup> ] <sub>U</sub>             | mM                           |
|                       |  | [Ca <sup>+2</sup> ] <sub>U</sub>             | mM                           |
|                       |  | [NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ] <sub>U</sub> | mM                           |
|                       | Agua de riego                                | [Na <sup>+</sup> ] <sub>R</sub>              | mM                           |
|                       |  | p  | -                            |
|                       | Solución nutritiva                           | [K <sup>+</sup> ] <sub>0</sub>               | mM                           |
|                       | [Mg <sup>+2</sup> ] <sub>0</sub>             | mM   |                              |
|                       | [Ca <sup>+2</sup> ] <sub>0</sub>             | mM   |                              |
|                       | [NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ] <sub>0</sub> | mM   |                              |
|                       | CE   | dS m <sup>-1</sup>                           |                              |

El apartado invernadero requiere del coeficiente de transmisividad ( $\alpha$ ) de la película plástica, así como la altitud a la cual se encuentra el invernadero sobre el nivel del mar en (m). En evapotranspiración se ingresan dos valores, un umbral mínimo de ETo en (mm h<sup>-1</sup>) para las horas de noche, cuando la radiación solar es cero (sugiere utilizar 1 mm h<sup>-1</sup>); y un factor de seguridad para valores de ETo mayores a cero y menores que el umbral mínimo (sugiere utilizar 0.1), justo en las primeras y últimas horas del día (amanecer y atardecer), el cual, recalcula la ETo como el producto entre el factor de seguridad y la ETo diaria. En el cultivo se especifica el coeficiente basal de cultivo (K<sub>cb</sub>) para el inicio, medio y final de temporada de la plantación, así como los días de duración de los estadios fenológicos inicial, desarrollo, mediados de temporada y senescencia. En tanto, para el

cultivo vertical, es necesario ingresar la densidad del cultivo vertical en ( $\text{plantas m}^{-2}$ ) y la distancia entre plantas estándar (patrón) en (m) para el cálculo del parámetro ( $\Phi$ ).

En el apartado de capacidad se especifica el volumen del tanque de solución nutritiva en (L), en cultivo se ingresan las concentraciones de absorción del cultivo [I]u para cada uno de los cationes nutritivos ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ ) en (mM), en el agua de riego se ingresa concentración de recarga de sodio ( $\text{Na}^+$ ) en (mM) y el parámetro p, y, en la solución nutritiva se especifica las fórmulas de concentración iniciales de la solución nutritiva para cada uno de los cationes nutritivos en (mM) y la conductividad eléctrica objetivo en ( $\text{dS m}^{-1}$ ).

## **Evaluación del Rendimiento del Modelo Predictivo en Condiciones Reales**

### Localización del experimento

La fase experimental de la evaluación del modelo predictivo se llevó a cabo en la primavera del año 2023 en un invernadero semicircular de media tecnología en la Universidad de Almería, Comunidad Autónoma de Andalucía, España, ubicado en cercanías a la costa del Mar Mediterráneo ( $36^\circ 46' 37.8''$  latitud norte y  $2^\circ 24' 20.1''$  longitud oeste). Las condiciones climáticas promedio del lugar indican que, en la ciudad de Almería la temperatura media mensual anual es de  $19^\circ\text{C}$ , con una media máxima mensual de  $31^\circ\text{C}$  en el mes de agosto y una mínima mensual de  $8^\circ\text{C}$  en enero, la precipitación anual es de 200 mm y llueve 25 días al año, la humedad media anual es de 65%, con valores máximos y mínimos mensuales de 68 y 60% en los meses de octubre y julio, respectivamente, y con una insolación media anual de 2,800 horas, que configura un clima semiárido cálido (BSh) según la clasificación Köppen (Agencia Estatal de Meteorología, 2023b, 2023a).

El invernadero (Figura 11-A) tiene una orientación N-S con una superficie de  $51\text{ m}^2$ , ancho de 6.3 m, largo de 8.1 m y altura a la cresta de 3.5 m. El material de la cubierta es polietileno de baja densidad calibre 720 con propiedades radiométricas frente a rayos UV, y fue blanqueado con cal. Las paredes son de policarbonato. Cuenta con ventilación mecánica en el techo con el eje de apertura en la mitad, con una abertura del 94% y con



mallas de protección contra insectos. En la parte interna tiene una malla sombra color negro y toda la estructura es tubo de acero galvanizado.

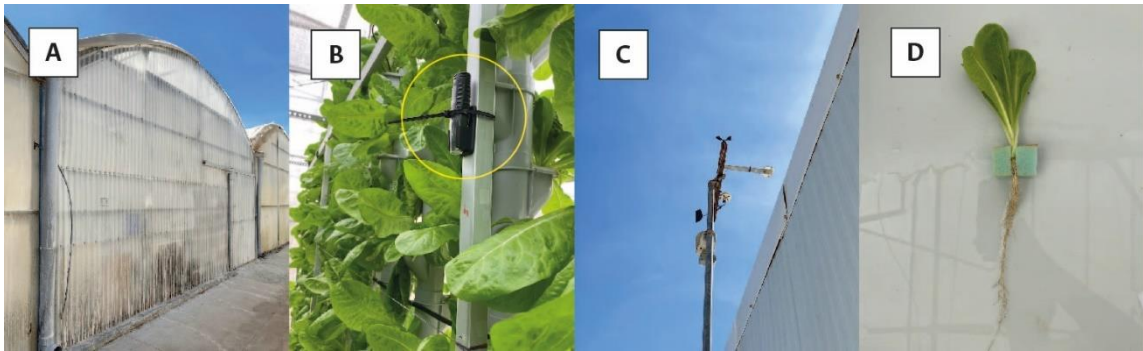
Debido a que la cubierta plástica sufrió un proceso de blanqueamiento y existe una malla sombra en la parte interna del invernadero, se midió el coeficiente de transmisividad ( $\alpha$ ) indirectamente con un luxómetro. Para ello, se tomaron 192 mediciones de iluminancia a una altura de 2.5 m dentro del invernadero con un luxómetro o medidor de iluminancia Sekonic C-7000 con rango de medición entre 1 y 200,000 lx, a lo largo de diferentes horas del día, entre el 6 y 21 de abril de 2023. Los valores fueron convertidos a valores de irradiancia en ( $\text{W m}^{-2}$ ) con un factor de conversión de  $1 \text{ lx} = 118 \text{ W m}^{-2}$  (Michael *et al.*, 2020), y posteriormente divididos con los valores respectivos de irradiancia externa medidos por medio de un piranómetro, en la estación climática automática (ECA) de la zona de invernaderos de la universidad. Como resultado se obtuvo un  $\alpha$  de 0.2.

Dentro del invernadero se ubicaron estratégicamente tres *datalogger* Elitech RC-51H cerca del cultivo vertical (Figura 11-B), los cuales, registraron la temperatura en ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la humedad relativa en (%) cada 30 minutos a una altura de 1.2 m a lo largo de todo el tiempo del cultivo. Igualmente, los datos climáticos en la parte externa del invernadero se registraron de manera continua por medio de la ECA ubicada a 15 m en dirección este (Figura 11-C). Esta estación registró la irradiancia, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento cada 30 minutos a lo largo de todo el tiempo del cultivo.

La base de datos climáticos que alimentó la sección de cálculos de consumo del MP se construyó en mayor medida a partir de la información de los *datalogger* y la ECA, sin embargo, parte de los datos se complementaron con el Sistema de Información Geográfico Fotovoltaico de la Unión Europea (*PGIS* por sus siglas en inglés) (European Commission, 2022) y la estación meteorológica automática Almería Aeropuerto ( $36^{\circ} 50' 47''$  latitud norte y  $2^{\circ} 21' 25''$  longitud oeste) de la AEMET (Meteostat, 2023), particularmente en los primeros días después del trasplante del cultivo, cuando aún no entraba en funcionamiento la ECA. Los datos de velocidad de viento exterior ( $v_e$ ) fueron transformados a valores estimados dentro del invernadero ( $v_i$ ) con el modelo lineal  $v_i = 0.008 + 0.098v_e$  que maneja unidades de ( $\text{m s}^{-1}$ ) y fue planteado para este tipo de invernaderos (Wang, 1999).

## Material vegetal

Se utilizaron plántulas de lechuga baby cv. *Gatsby* (Figura 11-D) suministradas por Gautier Semillas. La fecha de siembra fue el 24 de febrero de 2023. El trasplante se llevó a cabo 20 días después de la siembra (DDS) (15 de marzo) en espuma de poliestireno de 3 x 3 cm, y fueron cosechadas 35 días después del trasplante (DDT) (19 de abril). El día del trasplante las plántulas tenían un promedio de 8 hojas, un diámetro de  $4.86 \pm 0.11$  mm, una altura de  $15.5 \pm 0.2$  cm y una longitud de raíz de  $18.4 \pm 1.2$  cm.



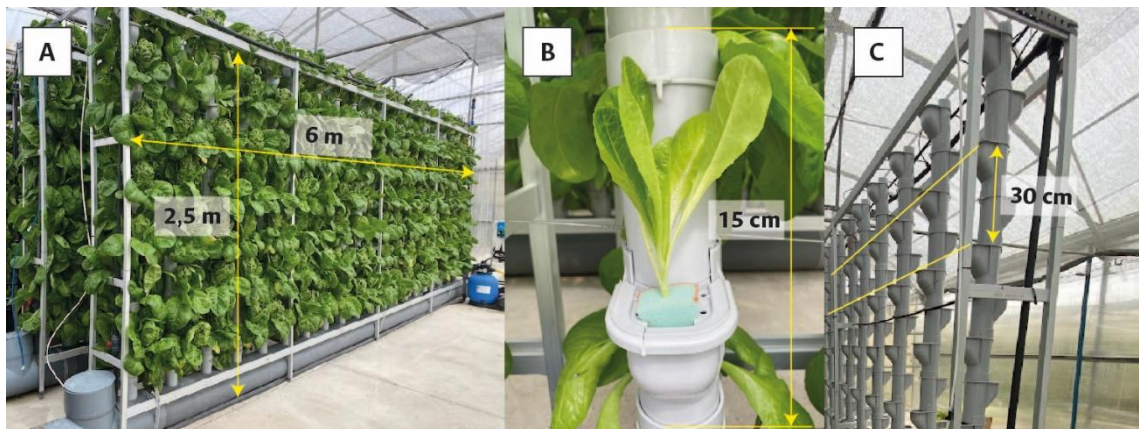
**Figura 11.** Invernadero (A), *datalogger* (B) y estación climática automática (C), plántulas de lechuga (D).

## Diseño experimental y configuración del sistema vertical

Se llevó a cabo un diseño factorial con tres factores, densidad del cultivo vertical (Factor 1) con dos niveles, 50 plantas  $m^{-2}$  (BD: baja densidad) y 80 plantas  $m^{-2}$  (AD: alta densidad), tiempo del cultivo en días después del trasplante (DDT) (Factor 2) y, posición a la cual se ubica la planta en el cultivo vertical (Factor 3) con tres niveles, inferior (de 0.25 a 1 m del suelo), medio (de 1 a 1.75 m del suelo) y superior (de 1.75 a 2.5 m del suelo). Se realizaron tres repeticiones.

La unidad experimental consistió en un cultivo vertical compuesto por unidades cilíndricas o torres de 2.5 m de altura, dispuestas en fila a lo largo de 6 m de longitud (Figura 12-A). Cada torre se compone de 15 unidades modulares de GrowPipes® (GP) de 15 cm de altura y diámetro de 7.5 cm. Cada unidad GP (Figura 12-B) contiene una planta y su montaje se realiza una encima de otra oponiéndose  $180^\circ$  (Figura 12-C) que dan como resultado una distancia entre plantas a nivel superior de 0.3 m. Las densidades de plantación se lograron modificando la distancia entre torres. En el caso de BD la distancia

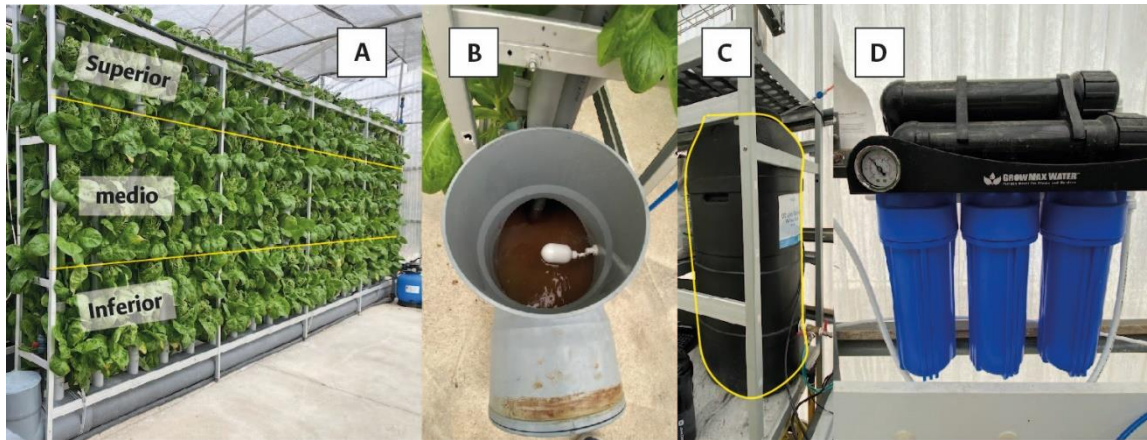
fue 30 cm, en tanto en AD la distancia fue 18.8 cm. De esta manera, el sistema de cultivo vertical BD tuvo 20 torres para un total 300 plantas y AD 32 torres con 480 plantas. La distancia entre unidades experimentales fue de 1 m.



**Figura 12.** Unidad experimental (A), unidad Growpipes® (B), montaje (C).

Cada unidad experimental se dividió en tres alturas, correspondientes a cada uno de los niveles del Factor 3 (Figura 13-A). Las plantas del nivel superior recibieron el 100% de la radiación transmitida por la película plástica del invernadero, un promedio de  $57 \text{ W m}^{-2}$ , las plantas del nivel medio el 36% de la radiación, y las del nivel inferior el 24%.

En la parte inferior de cada unidad experimental (a nivel del suelo) se ubica una tubería de drenaje de 6.26 m de longitud, diámetro de 25 cm, con capacidad para 250 L, y la cual, recibe el drenaje de las torres del cultivo vertical, y a su vez, funciona como tanque de solución nutritiva (TSN) del sistema de fertirrigación. Cada tanque dispone de un mecanismo de boya plástica y válvula (Figura 13-B) conectado por medio de una manguera neumática de poliuretano de 1.25 mm de diámetro a un tanque de agua de riego con capacidad de 100 L (Figura 14-C), el cual suministra al sistema un flujo constante de agua filtrada con 6.97 de pH, conductividad eléctrica de  $0.31 \text{ dS m}^{-1}$  y con las siguientes concentraciones iónicas:  $0.42 \text{ mM Ca}^{+2}$ ,  $3.43 \text{ mM Cl}^{-}$ ,  $0.01 \text{ mM K}^{+}$ ,  $2.15 \text{ mM Na}^{+}$ ,  $0.01 \text{ mM NH}_4^{+}$ ,  $0.31 \text{ mM NO}_3^{-}$ ,  $0.22 \text{ mM Mg}^{+2}$ . El tanque de agua de riego recibe un flujo constante de agua a 50 psi, proveniente de un grifo ubicado dentro del invernadero. Esta agua se filtra mediante un sistema de osmosis inversa Mega Grow 1000 GrowMax Water con capacidad para filtrar hasta  $40 \text{ L h}^{-1}$  y el cual cuenta con dos membranas de carbón activado (Figura 14-D).



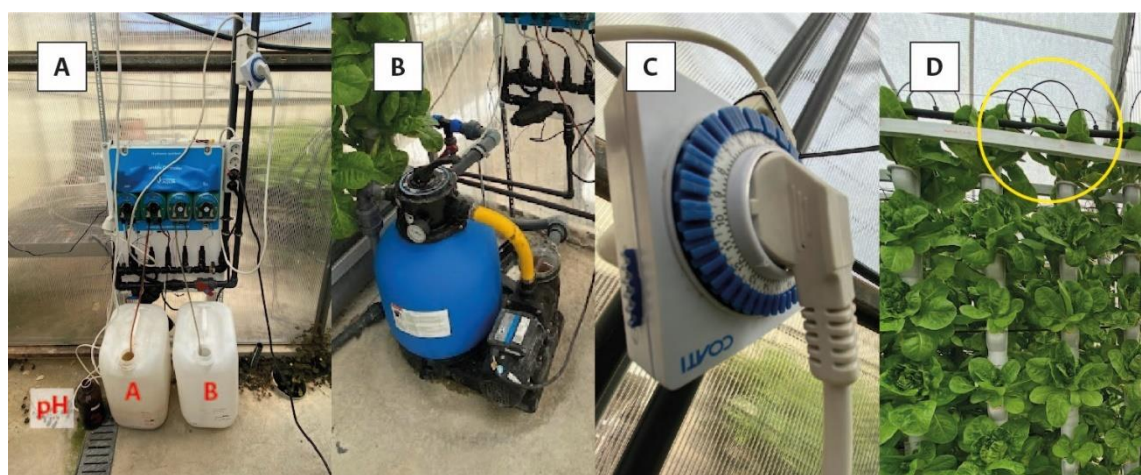
**Figura 13.** Niveles del Factor 3 (A), mecanismo boya-válvula (B), tanque de agua de riego (C) y filtro de osmosis inversa (D).

El sistema de dosificación de fertilizantes para la fertirrigación del cultivo vertical se compone del TSN; un sistema de control y medición en continuo del pH y la conductividad eléctrica (CE) Prosystem Aqua (controlador), el cual cuenta con tres bombas peristálticas con capacidad de hasta  $2 \text{ L h}^{-1}$ , dos para los tanques A y B de solución madre (nutrientes) y una tercera para el tanque de pH (Figura 14-A); una bomba de agua Monzana MZPP27 de 0.74 hp,  $11,000 \text{ L h}^{-1}$  de caudal nominal y altura máxima de levantamiento de 11 m, acoplada a un sistema de filtro de arena (Figura 14-B); un programador de riego analógico automático Coati con tiempos de maniobra de 15 minutos (Figura 14-C); un sistema de dosificación de agua ubicado en la parte superior de cada torre compuesto por goteros autocompensantes supertif Rivulis de  $2.2 \text{ L h}^{-1}$  de caudal nominal, microtubo flexible de  $3 \times 5 \text{ mm}$  color negro y piqueta de riego (Figura 14-D).

La fertirrigación del cultivo se configuró para riegos cada 15 minutos entre las 10:00 y las 16:00, y cada 45 minutos para el resto del día. La solución nutritiva utilizada se determinó a través de la calculadora de soluciones nutritivas de EUphoros desarrollada por el Dr. Luca Incrocci de la Universidad de Pisa, Italia. Las concentraciones iónicas fueron:  $15 \text{ mM NO}_3^-$ ,  $1 \text{ mM NH}_4^+$ ,  $2 \text{ mM PO}_4^{3-}$ ,  $10 \text{ mM K}^+$ ,  $4.5 \text{ mM Ca}^{+2}$ ,  $1 \text{ mM Mg}^{+2}$ ,  $1.78 \text{ mM Na}^+$ ,  $2.59 \text{ mM SO}_4^{-2}$ ,  $1.85 \text{ mM Cl}^-$ ,  $40 \text{ }\mu\text{M Fe}$ ,  $5.9 \text{ }\mu\text{M B}$ ,  $1 \text{ }\mu\text{M Cu}$ ,  $1 \text{ }\mu\text{M Zn}$ ,  $26.1 \text{ }\mu\text{M Mn}$  y  $1 \text{ }\mu\text{M Mo}$ . El factor de dilución fue 1:100 con un pH y CE consigna de 5.5 y  $2.45 \text{ dS m}^{-1}$ , respectivamente. En el tanque de solución madre A se diluyeron nitrato cálcico, nitrato potásico y los micros; en el tanque B, sulfato de magnesio, fosfato



monoamónico, nitrato potásico, fosfato monopotásico y sulfato potásico, y para el tanque de pH se utilizó ácido nítrico. La solución nutritiva se suministró continuamente durante los primeros 31 DDT. El controlador de fertirriego se configuró con una CE consigna de 2.45 dS m<sup>-1</sup> durante los primeros 6 DDT, y en 3.2 dS m<sup>-1</sup> entre los 7 y 31 DDT.



**Figura 14.** Controlador (A), bomba de agua (B), programador (C) y mecanismo de dosificación de agua (D).

#### Evaluación del modelo predictivo

Para la evaluación del MP se realizaron 21 muestreos en el tanque de solución nutritiva, en las horas de la mañana (9:00), entre el 21 de marzo y el 14 de abril de 2023, de las variables: consumo de agua, consumo de cationes nutritivos (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup>) y acumulación de cationes no nutritivos (Na<sup>+</sup>) en el sistema de cultivo vertical. El consumo de agua se midió como el volumen de agua necesario para recargar el tanque de solución nutritiva hasta su nivel inicial, por medio de una cubeta calibrada con una precisión de 1 L. El consumo de cationes nutritivos y la acumulación de cationes no nutritivos se midieron a través de un medidor de concentración de electrodos de ion selectivo Imacimus con precisión de 0.1 mM.

#### Determinación de Parámetros de Producción

El crecimiento del cultivo se midió a través de seis parámetros: número de hojas, diámetro de tallo, altura de planta, longitud de raíz, masa seca y masa fresca. Para el diámetro de tallo se utilizó un calibrador pie de rey con precisión 0.01 mm, en tanto, para la altura de planta y longitud de raíz, una regla con precisión de 0.1 cm. El muestreo se

realizó de manera aleatoria en 48 plantas del cultivo vertical, 16 por cada nivel del Factor 3 (posición), las cuales se monitorearon a los 0, 20, 28 y 35 DDT. Por otro lado, tanto el peso seco (biomasa) como el peso fresco (productividad) se midieron en (g), diferenciando la zona foliar y radicular de la planta. Para ello, se muestrearon a los 0, 24 y 35 DDT, un total de 18 plantas del cultivo vertical, 6 por cada nivel del Factor 3 (posición). El proceso consistió en medir el peso fresco de cada planta, luego secarla a una temperatura de 70 °C durante 24 horas en un horno de convección forzada, para posteriormente, medir el respectivo peso seco. Tanto el peso fresco como seco se midieron con una balanza con precisión de 0.01 g. El rendimiento del cultivo se midió a los 35 DDT. También se determinaron dos índices de proporción de crecimiento a partir de las mediciones directas, uno fue la relación de peso seco foliar por hoja en ( $\text{g hoja}^{-1}$ ) ( $I_1$ ) y la altura de planta por peso seco foliar ( $\text{cm g}^{-1}$ ) ( $I_2$ ).

Asimismo, se determinó la composición mineral foliar de nitrógeno y fósforo en (%) de materia seca vegetal con una precisión de 0.1%. Para ello, se muestrearon a los 24 y 35 DDT, un total de 48 plantas del cultivo vertical, 16 por cada nivel del Factor 3 (posición). La medición de nitrógeno se realizó a través del método Kjeldahl (García-Servin *et al.*, 2021; Muñoz-Huerta *et al.*, 2013) el cual consiste en tres etapas: digestión, destilación y valoración. Las etapas de destilación y valoración se realizaron simultáneamente. La medición de fósforo se realizó por el método de colorimetría a través del uso de un espectrofotómetro, cuyo procedimiento se especifica en (Sadzawka *et al.*, 2004).

Los pigmentos fotosintéticos determinados fueron clorofila a, clorofila b y clorofila total en ( $\text{mg g}^{-1}$ ), y el método utilizado fue el espectrofotométrico descrito en (Ruíz *et al.*, 2019) que proporciona fórmulas de cálculo con una precisión de  $0.001 \text{ mg g}^{-1}$ . El muestreo se realizó a los 28 DDT, tomando un total de 12 plantas del cultivo vertical, 4 por cada nivel del Factor 3 (posición).

#### Análisis estadístico

Se llevó a cabo un análisis estadístico multifactorial de varianza ANOVA con una significancia de 0.05 y un método de comparación de medias de Tukey, a través del software estadístico SPSS en su versión 28. La bondad de ajuste del modelo predictivo se midió a través del coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Modelo Matemático de Consumo Hídrico y de Nutrientes

Se desarrolló un modelo predictivo (MP) que pronostica el consumo de agua y de nutrientes de un sistema hidropónico cerrado vertical bajo invernadero (Figura 15). El módulo de consumo hídrico (color azul) está cimentado en el concepto de transpiración y asociado a la ecuación de Penman-Monteith (1965) de la FAO (Allen *et al.*, 2006). Se compone por la Ecuación 15 y 16 correspondientes a la evapotranspiración estándar del cultivo según sean horas noche o día, y, se alimenta a partir de datos del cultivo ( $K_{cb}$  y fenología), características del invernadero ( $\alpha$  y altitud) y sistema de cultivo vertical (densidad y patrón).

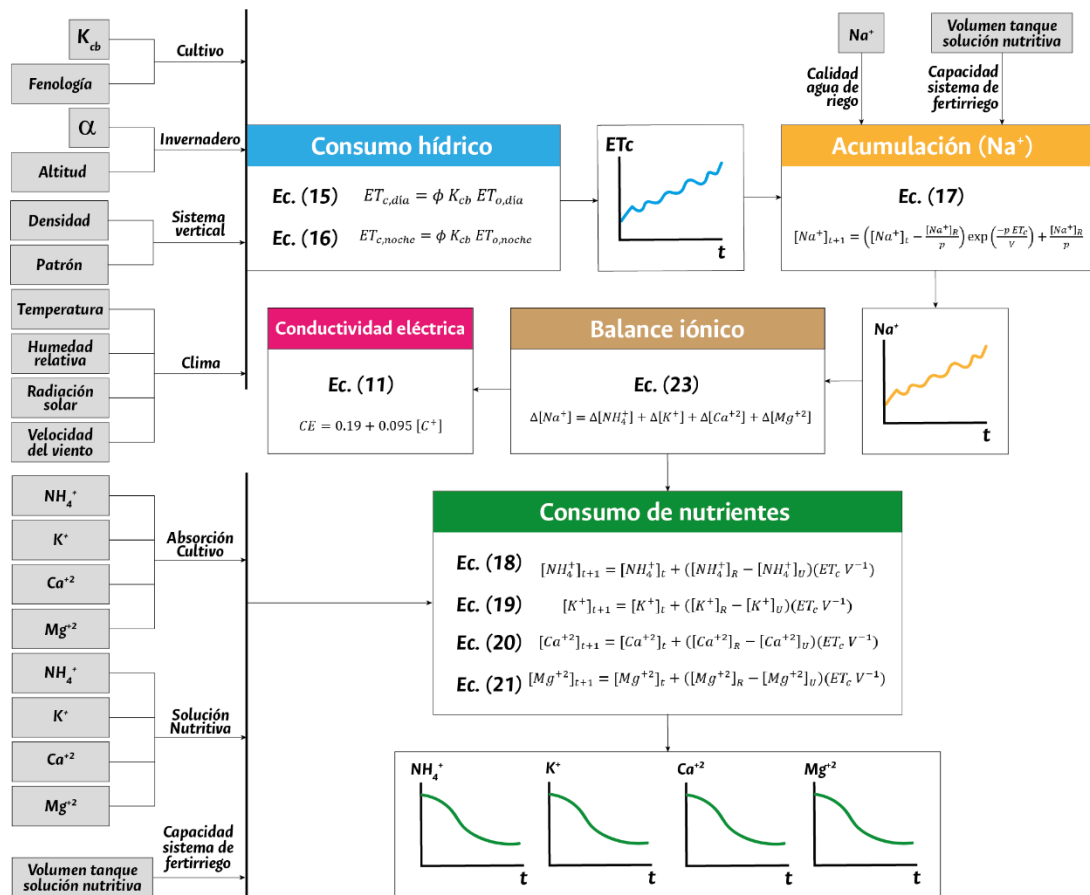


Figura 15. Modelo matemático predictivo de consumo de agua y nutrientes.

El módulo de acumulación de sodio (color naranja), alimentado por el módulo de consumo hídrico, está cimentado en el concepto de incremento de salinidad en la solución nutritiva y asociado a la ecuación de concentración para iones no nutritivos de Carmassi-Sonneveld (2003) (Carmassi *et al.*, 2003; Sonneveld *et al.*, 1999a). Se alimenta de la concentración de sodio ( $\text{Na}^+$ ) aportada por el agua de riego y la capacidad del sistema de fertirriego (volumen del tanque de solución nutritiva).

A partir de los resultados del módulo de acumulación de sodio, se realiza un balance iónico en el tanque de solución nutritiva con la Ecuación 23 que, a su vez, suministra información tanto para el cálculo de la conductividad eléctrica (CE) que se mantiene constante en el tiempo (Ecuación 11), como para el módulo de consumo de nutrientes (color verde). Particularmente, este módulo está cimentado en el concepto de concentración para iones nutritivos de Carmassi-Sonneveld (2003) (Carmassi *et al.*, 2003; Sonneveld *et al.*, 1999a), y se ha configurado para cuatro cationes nutritivos: amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), correspondientes a la Ecuación 18 a 21, respectivamente.

El módulo de consumo de nutrientes se alimenta a partir de las concentraciones de absorción del cultivo para cada catión nutritivo, concentraciones iniciales de los cationes nutritivos en la solución nutritiva empleada en el proceso de fertirrigación del cultivo, y la capacidad del sistema de fertirrigación (volumen del tanque de solución nutritiva).

### **Rendimiento del Modelo Predictivo**

En el Cuadro 7 se observan los resultados del análisis de varianza respecto de las variables de respuesta consumo hídrico y concentración iónica de los cationes nutritivos ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ ) y no nutritivos ( $\text{Na}^+$ ) del cultivo vertical. Los factores tiempo y densidad afectaron significativamente todas las variables excepto la concentración de sodio, en donde la densidad no influyó, lo cual sugiere que, la concentración de sodio es independiente del número de plantas y, por el contrario, únicamente fue influenciado por la calidad inicial del agua de riego (concentración inicial de sodio). Igualmente, la interacción entre la densidad y tiempo afectaron significativamente todas las variables de respuesta con excepción del sodio. La media de consumo hídrico y concentración iónica de todos los cationes nutritivos es mayor en alta densidad (AD) que en baja densidad (BD).



Asimismo, se observa que la fuente de variación repetición no afectó significativamente ninguna variable de respuesta.

**Cuadro 7.** ANOVA para el consumo hídrico y concentraciones iónicas de cationes nutritivos y no nutritivos.

| Fuente de variación                    | Agua<br>(L día <sup>-1</sup> ) | Concentración (mM)           |                |                  |                  |                 |
|--|--------------------------------|------------------------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|
|  |                                | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>+2</sup> | Mg <sup>+2</sup> | Na <sup>+</sup> |
| T: Tiempo de cultivo                   | <0.05                          | <0.05                        | <0.05          | <0.05            | <0.05            | <0.05           |
| D: Densidad (plantas m <sup>-2</sup> ) | <0.05                          | <0.05                        | <0.05          | <0.05            | <0.05            | ns              |
| 50                                     | 15a                            | 0.9a                         | 9.3a           | 4.8a             | 1.6a             | 3.1             |
| 80                                     | 16b                            | 1.0b                         | 10.7b          | 5.1b             | 2.0b             |                 |
| R: Repeticiones                        | ns                             | ns                           | ns             | ns               | ns               | ns              |
| DxT                                    | <0.05                          | <0.05                        | <0.05          | <0.05            | <0.05            | ns              |

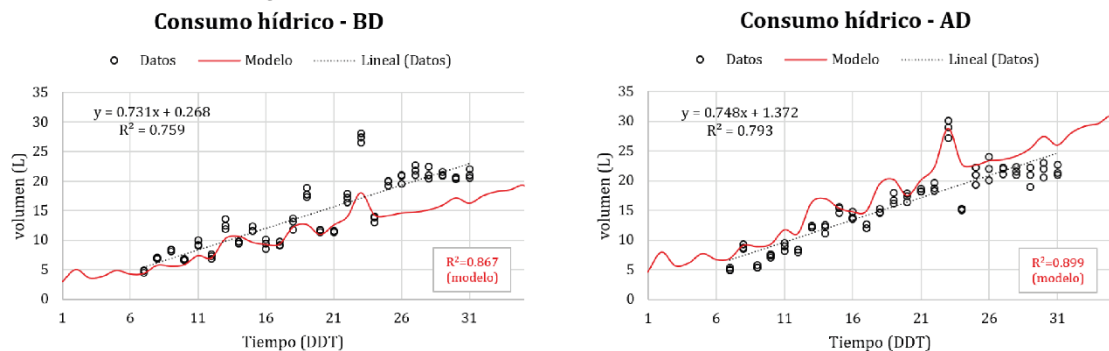
Valores medios seguidos de diferente letra que representan diferencias estadísticamente significativas.

#### Consumo hídrico

De acuerdo con la proyección del modelo de consumo hídrico, tanto en alta (AD) como en baja densidad (BD) se presentó un incremento progresivo desde 5 L (1 DDT) hasta alcanzar 20 L en el caso de BD y 30 L en AD (Figura 16), transcurridos 35 DDT, con lo cual, hubo una tasa de incremento promedio en el consumo igual a 0.43 L día<sup>-1</sup> para BD y 0.71 L día<sup>-1</sup> para AD. Sin embargo, en BD hubo una subestimación y en AD una sobrestimación de las proyecciones del modelo predictivo con respecto a los valores medidos, lo cual puede indicar la falta de parámetros o utilizar otros modelos de estimación dentro del modelo hídrico que lo hagan más flexible y cercano a la realidad. El modelo predictivo en ambos casos tuvo un mejor ajuste sobre los datos reales que la regresión lineal, con un R<sup>2</sup> de 0.867 en BD y 0.899 en AD, siendo mayor el ajuste en AD.

El sistema AD consumió significativamente más agua que el sistema BD con un valor promedio de 16 L día<sup>-1</sup>, 1 L día<sup>-1</sup> más que BD (Cuadro 7), lo que significó 35 L de agua más a lo largo de los 35 días de duración del cultivo. Esto corresponde según lo previsto, pues a mayor número de plantas se espera que el consumo sea mayor. Por otro lado, al calcular el consumo por planta de cada sistema, se encuentra que, BD consumió un promedio de 0.05 L planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, superior a AD, con un valor de 0.034 L planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>. Ambos consumos por planta están cercanos al rango reportado en la literatura (0.01-0.02 L planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) para sistemas hidropónicos horizontales cerrados bajo invernadero en el

cultivo de lechuga (Barbosa *et al.*, 2015). Durante los 35 días de cultivo, el sistema BD presentó un consumo promedio de 1.75 L planta<sup>-1</sup>, mayor a los 1.17 L planta<sup>-1</sup> de AD.

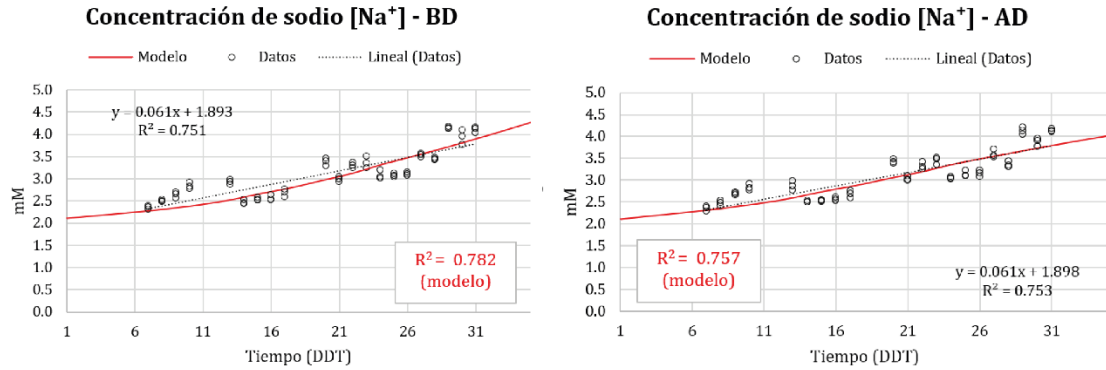


**Figura 16.** Consumo hídrico para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.

Al comparar el consumo por planta de los sistemas de cultivo vertical con el valor de consumo promedio reportado en la literatura (0.226 L planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) para sistemas de producción convencionales de lechuga (cultivo en suelo) (Barbosa *et al.*, 2015), se encuentra que, AD ahorró un 85% de agua y BD un 78%. A pesar de que el sistema de cultivo vertical utilizado no fueron fábricas de plantas, las cuales son capaces de ahorrar agua en más de un 95% (Kozai, 2016; Kozai & Niu, 2020), este tipo de sistema vertical (unidades cilíndricas) bajo estructuras de protección como los invernaderos, presentó un importante ahorro de agua a lo largo de todo del desarrollo del cultivo.

#### Acumulación de sodio (Na<sup>+</sup>)

El modelo predictivo estimó un incremento en la concentración de sodio desde los 2.1 mM (1 DDT) hasta los 4.2 y 4.0 mM para los sistemas BD y AD, respectivamente, transcurridos 35 DDT (Figura 17). El valor de concentración inicial coincidió con el valor aportado por el agua de riego a lo largo del cultivo, cuyo valor fue de 2.15 mM. La tasa de incremento promedio en la acumulación de sodio fue de 0.06 mM día<sup>-1</sup> para BD y de 0.054 mM día<sup>-1</sup> para AD. En ambas densidades el modelo predictivo tuvo un mayor ajuste sobre los datos que la regresión lineal, con valores R<sup>2</sup> de 0.782 y 0.757 para BD y AD, respectivamente, siendo mayor el ajuste en BD.



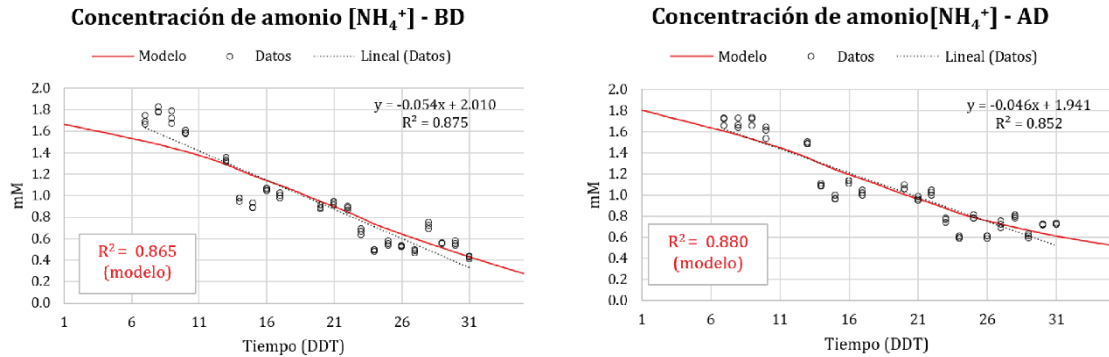
**Figura 17.** Acumulación de ( $\text{Na}^+$ ) para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.

La concentración promedio de sodio a lo largo de todo el tiempo de cultivo no presentó diferencias significativas entre BD y AD, con un valor de 3.1 mM, con lo cual, la concentración de sodio no depende de la densidad del cultivo vertical (Cuadro 7). El factor adimensional  $p$  calibrado por el modelo predictivo tuvo un valor de 0.2 para BD y 0.42 para AD, valores que se encuentran dentro o cerca del rango reportado por la literatura (0.01-0.3) (Carmassi *et al.*, 2004, 2003). Estos parámetros permiten estimar la concentración de absorción de sodio por parte del cultivo a lo largo de los 35 días del ensayo experimental. En el caso de BD fue 0.6 mM, en tanto para AD fue más del doble, 1.3 mM, valores de concentración cercanos a los reportados y sugeridos en soluciones nutritivas para lechuga (Cristofano *et al.*, 2022; Formisano *et al.*, 2021).

#### Consumo de Amonio ( $\text{NH}_4^+$ )

En la Figura 18, el modelo predictivo estimó que la concentración inicial de amonio en el tanque de solución nutritiva tuvo valores de 1.67 y 1.81 mM para los sistemas de BD y AD, respectivamente (1 DDT), valores cercanos a lo reportado en la literatura para lechuga (Buturi *et al.*, 2022). Al comparar estos valores calibrados por el modelo con el valor inicial de concentración empleado en la solución nutritiva (1 mM) se encuentra que, en ambas densidades la concentración fue superior. A partir de los valores iniciales de concentración se presentó un descenso hasta los 0.3 y 0.5 mM para BD y AD, respectivamente, transcurridos 35 DDT. De esta manera, hubo una tasa de decrecimiento promedio de 0.039 en BD y 0.037 en AD, con unas diferencias netas de concentración entre el inicio y final de cultivo de 1.37 mM en BD y 1.31 mM para AD. En AD el modelo

predictivo tuvo mayor ajuste sobre los datos medidos que la regresión lineal, con un  $R^2$  de 0.880, mientras que, en BD la regresión lineal presentó una mayor bondad de ajuste que el modelo predictivo, con un  $R^2$  de 0.875.



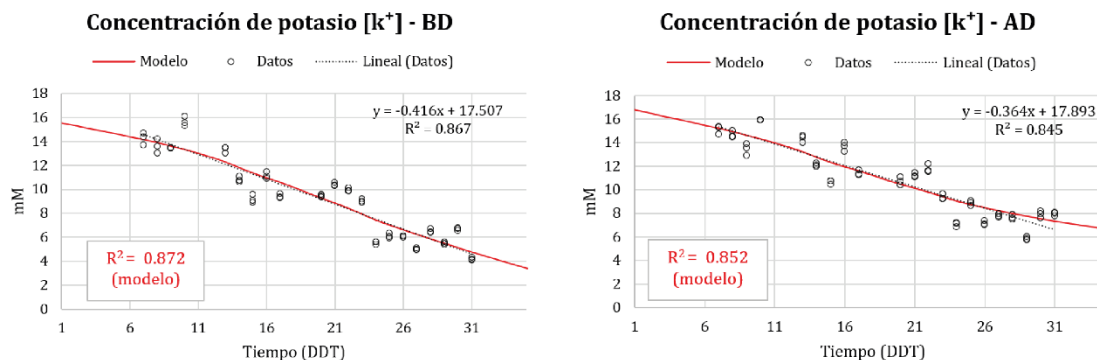
**Figura 18.** Consumo de  $(\text{NH}_4^+)$  para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.

La concentración promedio de amonio a lo largo del tiempo del cultivo fue significativamente menor en BD que en AD, con un valor de 0.9 mM, 0.1 mM por debajo de AD (Cuadro 7). Los valores de concentración de absorción de amonio calibrados por el modelo predictivo fueron de 1.67 mM en BD y 1.25 mM en AD, cercanos, pero por debajo del valor reportado para sistemas hidropónicos horizontales cerrados bajo invernadero en el cultivo de tomate y pimiento dulce (1.9 mM) (Sonneveld, 2000) considerando una proporción entre amonio y nitrato de 20:80 (Söylemez, 2021).

#### Consumo de potasio ( $\text{K}^+$ )

Los gráficos de la Figura 19 muestran que el modelo predictivo determinó unos valores iniciales de concentración de potasio en la solución nutritiva equivalentes a 15.6 mM en BD y 16.9 mM en AD (1 DDT), superiores a los 8.5 mM reportados en la literatura para cultivos hidropónicos horizontales de lechuga (Lycoskoufis *et al.*, 2022). Al comparar estos valores calibrados por el modelo con el valor inicial de concentración empleado en la solución nutritiva (10 mM), se evidencia que, ambas densidades presentaron concentraciones superiores. A lo largo del tiempo del cultivo se presentó un descenso hasta los 3.5 y 6.5 mM, para BD y AD, respectivamente. De esta manera, hubo una tasa de decrecimiento promedio de 0.35 en BD y 0.30  $\text{mM día}^{-1}$  en AD, con unas diferencias netas de concentración entre el inicio y final del cultivo equivalentes a 12.1 y 10.4 mM

para BD y AD, respectivamente. El modelo predictivo tuvo un mayor ajuste sobre los datos medidos que la regresión lineal, con un  $R^2$  de 0.872 en BD y 0.852 en AD, siendo mayor el ajuste en BD.



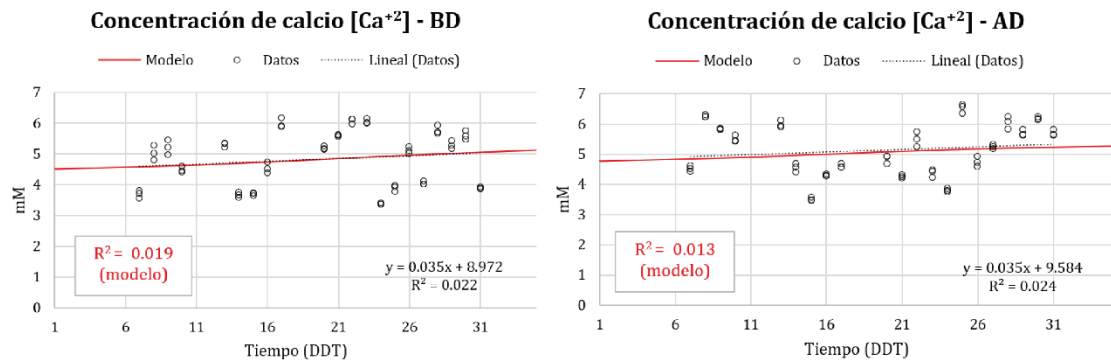
**Figura 19.** Consumo de ( $K^+$ ) para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.

A lo largo del tiempo del cultivo, la concentración promedio de potasio fue significativamente menor en BD que en AD, con un valor de 9.3 mM, 1.4 mM por debajo de AD (Cuadro 7). Los valores de concentración de absorción de potasio calibrados por el modelo fueron de 14.6 mM en BD y 10 mM en AD, superiores al valor reportado para pepino (6.6 mM) en sistemas de cultivo hidropónico horizontal cerrados bajo invernadero (Sonneveld, 2000) lo cual evidencia que, no solo influye el tipo de especie vegetal sino también la densidad en el sistema de cultivo.

#### Consumo de calcio ( $Ca^{+2}$ )

A pesar de que BD tuvo una concentración significativamente menor que AD, con un valor de 4.8 mM, 0.3 mM menos que AD (Cuadro 7), en la Figura 20 se observa que, tanto el modelo predictivo como la regresión lineal no se ajustaron a los datos medidos con valores de  $R^2$  inferiores a 0.03. El comportamiento de los datos medidos no corresponde con un consumo normal por parte del cultivo, por el contrario, en ambas densidades la concentración se incrementó a lo largo del tiempo, dando como resultado valores negativos de concentración de absorción para calcio, -0.75 mM en BD y -0.5 mM en AD. Este extraño comportamiento se puede explicar por la baja velocidad de absorción por parte del cultivo y que, la concentración de absorción de calcio fue menor que la concentración aportada en la solución nutritiva de refresco, lo que condujo a una

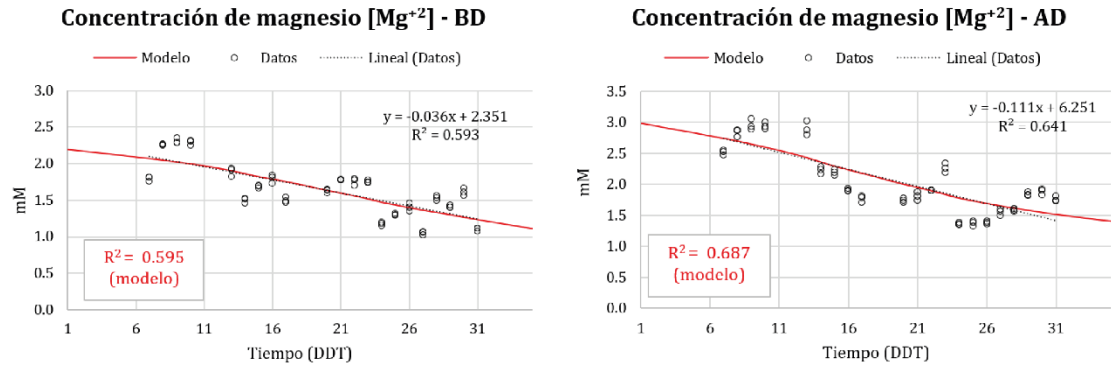
acumulación. Como resultado, el cultivo manifestó un desorden fisiológico conocido como “*tip-burn*” donde los bordes de las hojas aparecen quemados. Una posible causa de este problema fue la falta de ventilación dentro del invernadero (Hamidon & Ahamed, 2022). Asimismo, una posible solución puede ser cambiar la forma de suministro de calcio, de la forma iónica a la no iónica a través del uso de compuestos como la Nano-hidroxiapatita (nHAp) y los lignosulfonatos de calcio para este tipo de sistemas verticales cerrados.



**Figura 20.** Consumo de  $(Ca^{+2})$  para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.

### Consumo de magnesio ( $Mg^{+2}$ )

En la Figura 21 se observa que el modelo predictivo determinó unos valores iniciales de concentración de magnesio en la solución nutritiva equivalentes a 2.2 mM en BD y 3.0 mM en AD (1 DDT), valores superiores a lo reportado para soluciones nutritivas en lechuga (2.1 mM) (Hernández *et al.*, 2020). Igualmente, al comparar estos valores calibrados por el modelo con el valor inicial de concentración empleado en la solución nutritiva (1 mM) se evidencia que, en ambas densidades se presentaron valores de concentración superior. Al finalizar el día 35 del cultivo, la concentración de magnesio en BD fue de 1.1 mM, y en AD fue de 1.4 mM, lo que da como resultado una diferencia neta de concentración entre el inicio y final del cultivo de 1.1 mM en BD y 1.6 mM en AD. La tasa de decrecimiento promedio fue de 0.03 mM día<sup>-1</sup> para BD y de 0.05 para AD. El modelo predictivo tuvo un mayor ajuste sobre los datos medidos que la regresión lineal, con valores de  $R^2$  iguales a 0.595 en BD y 0.687 en AD, siendo mayor el ajuste en AD.



**Figura 21.** Consumo de (Mg<sup>+2</sup>) para los sistemas baja densidad (BD) y alta densidad (AD), con datos, modelo predictivo y una regresión lineal de los datos.

Igualmente, la concentración promedio de magnesio a lo largo de todo el tiempo de cultivo fue significativamente menor en BD que en AD, con un valor de 1.6 mM, 0.4 mM por debajo de AD (Cuadro 7). Los valores de concentración de absorción de magnesio calibrados por el modelo fueron de 1.3 mM en BD y 1.55 mM en AD, superiores al valor reportado para tomate (0.9 mM) en sistemas hidropónicos horizontales cerrados bajo invernadero (Sonneveld, 2000).

## Parámetros de Producción

### Crecimiento del cultivo

En el Cuadro 8 se observa que, los factores de estudio: densidad del cultivo vertical, posición de planta dentro del cultivo vertical y tiempo de cultivo, así como sus interacciones influyeron significativamente en el número de hojas, diámetro de tallo, altura de planta y longitud de raíz. La fuente de variación repetición no tuvo significancia como era de esperarse. Asimismo, se muestran los valores medios de todas las variables de respuesta para los 35 días de duración del cultivo, con respecto a los niveles de los factores densidad y posición.

El sistema de baja densidad (BD) tuvo significativamente mayor número de hojas (NH), un mayor diámetro de tallo (DT) y una mayor longitud de raíz (LR) en comparación con el sistema de alta densidad (AD). Por el contrario, las plantas del sistema AD fueron significativamente más altas (AP) que las de BD. Respecto al factor posición, tanto la variable número de hojas como diámetro de tallo presentaron diferencias significativas en

los tres niveles (inferior, medio y superior), en tanto, en la variable longitud de raíz, las plantas del nivel medio y superior no presentaron diferencias significativas. La variable altura de planta tuvo diferencias significativas en los tres niveles del factor posición, en donde las plantas del nivel superior fueron significativamente más pequeñas que las de los niveles medio e inferior.

**Cuadro 8.** ANOVA para las variables de crecimiento, número de hojas, diámetro de tallo, altura de planta y longitud de raíz.

| <b>Fuente de variación</b>             | <b>NH<br/>(#)</b> | <b>DT<br/>(mm)</b> | <b>AP<br/>(cm)</b> | <b>LR<br/>(cm)</b> |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| D: Densidad (plantas m <sup>-2</sup> ) | <0.05             | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| 50                                     | 18b               | 10.70b             | 24.4a              | 32.5b              |
| 80                                     | 16a               | 9.46a              | 27.9b              | 29.4a              |
| P: Posición                            | <0.05             | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| Inferior                               | 16a               | 9.25a              | 27.6c              | 25.7a              |
| Medio                                  | 17b               | 10.17b             | 26.5b              | 33.5b              |
| Superior                               | 18c               | 10.82c             | 24.4a              |                    |
| T: Tiempo                              | <0.05             | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| R: Repetición                          | ns                | ns                 | ns                 | ns                 |
| DxP                                    | <0.05             | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| DxT                                    | <0.05             | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| PxT                                    | <0.05             | <0.05              | <0.05              | <0.05              |

Valores medios seguidos de diferente letra que representan diferencias estadísticamente significativas. NH: número de hojas, DT: diámetro de tallo, AP: altura de planta, LR: longitud de raíz.

Igualmente, los factores densidad, posición y tiempo de cultivo influyeron significativamente en las variables de respuesta relacionadas con la biomasa y productividad del cultivo: peso fresco foliar (PFF), peso fresco radicular (PFR), peso seco foliar (PSF) y peso seco radicular (PSR) (Cuadro 9). La interacción densidad posición (DxP) no influyó significativamente en las variables PFR y PSR. Por el contrario, el resto de las interacciones temporales, densidad tiempo (DxT) y posición tiempo (PxT) influyeron de manera significativa en todas las variables de respuesta peso fresco y peso seco, tanto en zona foliar como radicular. La fuente de variación repetición no influyó significativamente en los resultados como era de esperar.

Las plantas del sistema BD presentaron significativamente mayor peso fresco y peso seco, tanto en zona foliar como radicular, en comparación con las plantas del sistema AD.



Respecto al factor posición, se evidencia que la variable PFF presentó diferencias significativas entre todos sus niveles (inferior, medio y superior), donde las plantas del nivel superior presentaron el mayor PFF. En las variables PFR, PSF y PSR, solo hubo diferencias significativas entre los grupos a (nivel inferior y medio) y b (nivel superior), presentándose igualmente valores más altos de peso fresco y seco en las plantas del nivel superior.

**Cuadro 9.** ANOVA para las variables de crecimiento, peso fresco foliar, peso fresco radicular, peso seco foliar y peso seco radicular.

| <b>Fuente de variación</b>             | <b>PFF<br/>(g)</b> | <b>PFR<br/>(g)</b> | <b>PSF<br/>(g)</b> | <b>PSR<br/>(g)</b> |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| D: Densidad (plantas m <sup>-2</sup> ) | <0.05              | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| 50                                     | 105.15b            | 10.37b             | 4.20b              | 0.65b              |
| 80                                     | 60.09a             | 4.50a              | 2.32a              | 0.27a              |
| P: Posición                            | <0.05              | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| Inferior                               | 65.23a             | 5.94a              | 2.63a              | 0.35a              |
| Medio                                  | 74.98b             |                    |                    |                    |
| Superior                               | 107.64c            | 10.42b             | 4.54b              | 0.68b              |
| T: Tiempo                              | <0.05              | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| R: Repetición                          | ns                 | ns                 | ns                 | ns                 |
| DxP                                    | <0.05              | ns                 | <0.05              | ns                 |
| DxT                                    | <0.05              | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| PxT                                    | <0.05              | <0.05              | <0.05              | <0.05              |

Valores medios seguidos de diferente letra que representan diferencias estadísticamente significativas. PFF: peso fresco foliar, PFR: peso fresco radicular, PSF: peso seco foliar, PSR: peso seco radicular.

En el Cuadro 10 se observa la productividad del cultivo a los 35 DDT en peso fresco foliar (PFF), peso fresco radicular (PFR) y peso fresco total (PFT). Los factores densidad y posición influyeron significativamente en las tres variables de respuesta, sin embargo, la interacción densidad posición (DxP) no influyó significativamente en el PFR. La fuente de variación repetición no influyó significativamente en los resultados como era de esperarse.

Las plantas del sistema BD presentaron significativamente un mayor PFF, PFR y PFT, en comparación con las plantas del sistema AD. Respecto al factor posición, las tres variables de respuesta presentaron diferencias significativas entre los grupos a (nivel

inferior y medio) y b (nivel superior), en donde las plantas del grupo b tuvieron significativamente un mayor PFF, PFR y PFT.

**Cuadro 10.** ANOVA para las variables peso fresco foliar, peso fresco radicular y peso fresco total de la planta, a los 35 DDT.

| <b>Fuente de variación</b>             | <b>PFF<br/>(g)</b> | <b>PFR<br/>(g)</b> | <b>PFT<br/>(g)</b> |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| D: Densidad (plantas m <sup>-2</sup> ) | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| 50                                     | 148.33b            | 14.59b             | 162.92b            |
| 80                                     | 80.84a             | 5.86a              | 86.70a             |
| P: Posición                            | <0.05              | <0.05              | <0.05              |
| Inferior                               | 97.19a             | 8.14a              | 105.33a            |
| Medio                                  |                    |                    |                    |
| Superior                               | 149.38b            | 14.40b             | 163.77b            |
| R: Repetición                          | ns                 | ns                 | ns                 |
| DxP                                    | <0.05              | ns                 | <0.05              |

Valores medios seguidos de diferente letra que representan diferencias estadísticamente significativas. PFF: peso fresco foliar, PFR: peso fresco radicular, PFT: peso fresco total.

Respecto de los índices de proporción de crecimiento  $I_1$  e  $I_2$ , se observa en el Cuadro 11 que tanto los factores densidad y posición, como su interacción afectaron significativamente las variables de respuesta. La fuente de variación repetición no influyó en los resultados. El sistema AD presentó un valor promedio de  $I_1$  significativamente menor al del sistema BD, en cambio, en el índice  $I_2$  sucedió lo opuesto, AD fue significativamente mayor a BD. En cuanto al factor posición,  $I_1$  tuvo diferencias significativas entre los grupos a (nivel inferior y medio) y b (nivel superior), siendo mayor el grupo b. En tanto,  $I_2$  tuvo diferencias significativas en todos los niveles del factor posición, siendo mayor en las plantas del nivel superior. Esto indica que, las plantas del sistema BD tuvieron hojas con mayor biomasa, resultado de una mayor actividad fotosintética, en cambio, el sistema AD tuvo plantas tres veces más grandes con la misma biomasa, resultado del ahilamiento, anomalía del crecimiento vegetal donde los entrenudos están más distanciados de lo normal.

**Cuadro 11.** ANOVA para los índices de proporción de crecimiento  $I_1$  e  $I_2$  (35 DDT).

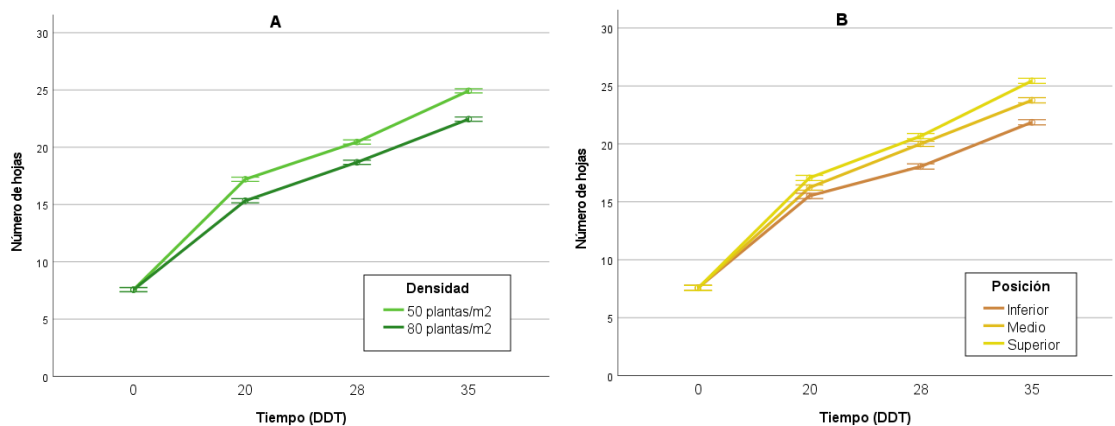
| <b>Fuente de variación</b>             | <b><math>I_1</math><br/>(g hoja<sup>-1</sup>)</b> | <b><math>I_2</math><br/>(cm g<sup>-1</sup>)</b> |
|--|---|---|
| D: Densidad (plantas m <sup>-2</sup> ) | <0.05   | <0.05   |
| 50                                     | 0.24b   | 7.39a   |
| 80                                     | 0.13a   | 18.59b  |
| P: Posición                            | <0.05   | <0.05   |
| Inferior                               | 0.15a   | 20.37c  |
| Medio                                  |   | 12.96b  |
| Superior                               | 0.25b   | 5.63a   |
| R: Repetición                          | ns  | ns  |
| DxP                                    | <0.05   | <0.05   |

Valores medios seguidos de diferente letra que representan diferencias estadísticamente significativas.  $I_1$ : es la relación entre el peso seco foliar (PSF) y el número de hojas,  $I_2$ : es la relación entre la altura de planta y el peso seco foliar (PSF).

#### Número de hojas

Las plantas de lechuga en el sistema de baja densidad (BD) tuvieron un promedio de 18 hojas, significativamente mayor a las 16 hojas que presentaron las plantas en alta densidad (AD) (Cuadro 8). De esta manera, el aumento de un 60% en la densidad del cultivo, de 50 a 80 plantas m<sup>-2</sup>, redujo significativamente el número de hojas en un 11%. Respecto al factor posición, las plantas de cada nivel (inferior, medio y superior) presentaron diferencias significativas. Las plantas del nivel superior que recibieron el 100% de radiación dentro del invernadero tuvieron 18 hojas, significativamente mayor a las 17 hojas que presentaron las plantas del nivel medio (36% de radiación), y a su vez, significativamente mayor a las 16 hojas de las plantas del nivel inferior (24% de radiación). Con lo cual, al reducir en un 76% la radiación incidente sobre el cultivo entre el nivel superior e inferior, valor obtenido como la diferencia entre los porcentajes de recepción de radiación entre los dos niveles, se redujo significativamente el número de hojas en un 11%. Los valores promedio de número de hojas en ambos factores (densidad y posición) son cercanos a lo reportado para cultivos hidropónicos horizontales bajo invernadero y sistemas convencionales intensivos de lechuga (15-19 hojas planta<sup>-1</sup>) con densidades de siembra entre 8 y 16 plantas m<sup>-2</sup> (Ahmed *et al.*, 2021; Hasan *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2017; Travieso *et al.*, 2016).

En la Figura 22-A se observa que el número promedio de hojas por planta se incrementó desde las 8 hojas planta<sup>-1</sup> (0 DDT) hasta las 25 hojas planta<sup>-1</sup> en BD y 22 hojas planta<sup>-1</sup> en AD, transcurridos 35 DDT. De esta manera, hubo un incremento promedio de 0.49 hojas planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> en BD, mayor al de AD, con 0.4 hojas planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>. A los 20, 28 y 35 DDT el sistema BD tuvo un mayor número promedio de hojas en comparación con AD. En tanto, en la Figura 22-B se evidencia que, a los 35 DDT las plantas de la posición superior tuvieron 25 hojas planta<sup>-1</sup>, valor superior a las plantas de la posición media con 24 hojas planta<sup>-1</sup>, y a su vez, superior al valor de las plantas del nivel inferior con 22 hojas planta<sup>-1</sup>. De esta manera los incrementos promedio por posición fueron de 0.49, 0.46 y 0.4 hojas planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, respectivamente. La tendencia de incrementarse el número de hojas con la posición se mantuvo igualmente a los 20 y 28 DDT.



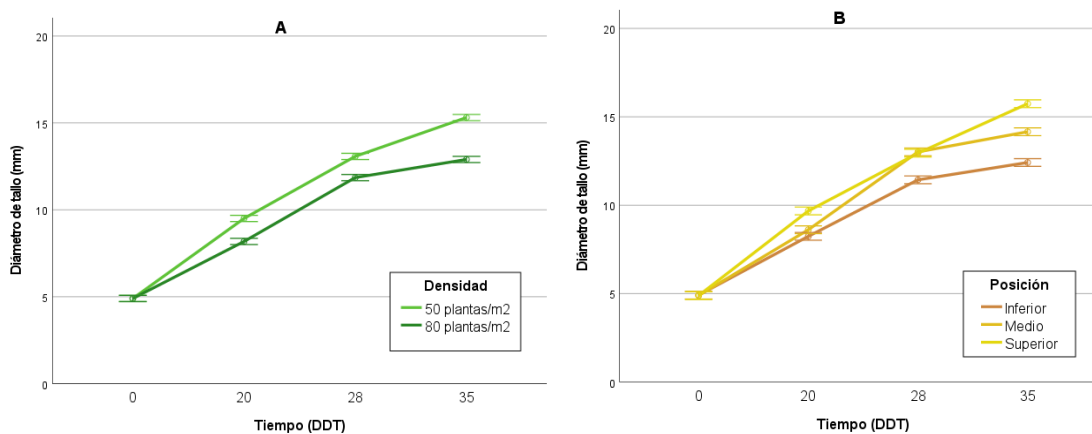
**Figura 22.** Número de hojas para el factor densidad (A) y posición (B).

### Diámetro de tallo

Las plantas del sistema BD presentaron un diámetro promedio de tallo de 10.7 mm, significativamente mayor a los 9.46 mm que tuvieron las plantas de AD (Cuadro 8). Con lo cual, el aumento de la densidad de 50 a 80 plantas m<sup>-2</sup> redujo significativamente el diámetro promedio de tallo en un 12%. Respecto al factor posición, todos los niveles tuvieron diferencias significativas. Las plantas del nivel superior que recibieron el 100% de la radiación dentro del invernadero, presentaron un diámetro promedio de tallo de 10.82 mm, significativamente mayor al de las plantas del nivel medio, e igualmente al de las plantas del nivel inferior. Por tanto, con una reducción del 76% de la radiación incidente sobre el cultivo, entre el nivel superior e inferior, se redujo significativamente el diámetro

promedio del tallo de la planta en un 15%. Los valores de diámetro promedio de tallo de cada uno de los niveles, tanto del factor densidad y posición, fueron inferiores a los valores reportados para lechuga en suelo (11.6 mm) y en sistemas hidropónicos horizontales bajo invernadero (18.6 mm) (Martins *et al.*, 2017).

En la Figura 23-A se observa que el diámetro promedio de tallo se incrementó desde los 4.9 mm (0 DDT) hasta los 15.31 mm en BD y 12.90 mm en AD, transcurridos 35 DDT. De esta manera hubo una tasa promedio de crecimiento en el diámetro de tallo equivalente a 0.30 mm día<sup>-1</sup> en BD, mayor al valor para AD, con 0.23 mm día<sup>-1</sup>. A los 20, 28 y 35 DDT, el diámetro de tallo fue mayor en BD que en AD. En tanto, en la Figura 23-B se evidencia que transcurridos 35 DDT, las plantas ubicadas en el nivel superior tuvieron un diámetro promedio de tallo de 15.74 mm, superior al de las plantas del nivel medio (14.16 mm) y del nivel inferior (12.42 mm). Estos valores son superiores a lo reportado para lechuga en sistemas convencionales (cultivo en suelo) (Martins *et al.*, 2017). La tasa de incremento promedio en el diámetro de tallo fue de 0.31, 0.26 y 0.21 mm día<sup>-1</sup>, en orden descendente de posición, respectivamente. A los 20 DDT, hubo diferencias entre el grupo conformado por el nivel inferior y medio, y el nivel superior; mientras que, a los 28 DDT, el diámetro de tallo presentó diferencias entre el grupo conformado por el nivel superior y medio, y el nivel inferior.

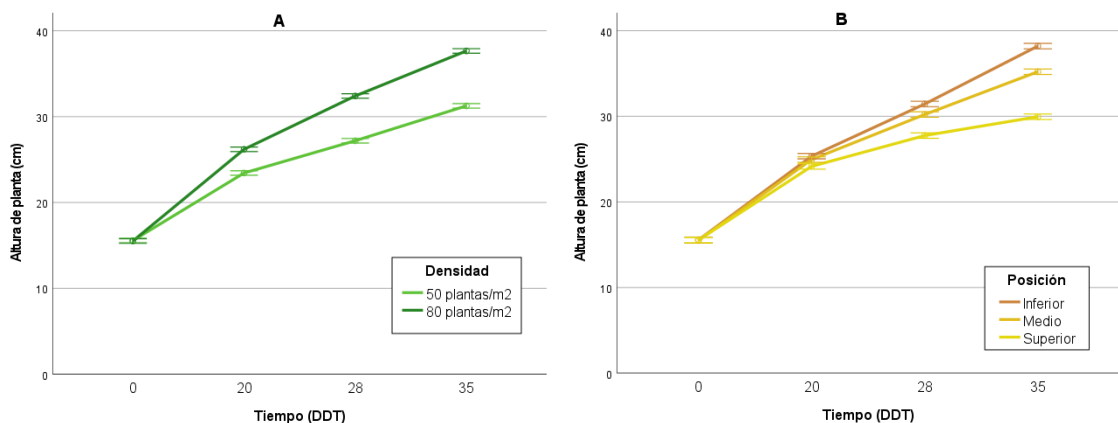


**Figura 23.** Diámetro de tallo para el factor densidad (A) y posición (B).

### Altura de planta

Las plantas del sistema BD presentaron una altura promedio de 24.4 cm, significativamente menor a las plantas de AD, con 27.9 cm de altura (Cuadro 8). De esta manera, el aumento de la densidad del cultivo aumentó significativamente la altura de la planta en un 14%. Respecto del factor posición, todos los niveles presentaron diferencias significativas. Las plantas del nivel inferior que recibieron un 24% de la radiación dentro del invernadero, tuvieron una altura promedio de 27.6 cm, es decir, fueron significativamente más altas que las plantas del nivel medio (26.5 cm) y las plantas del nivel superior (24.4 cm). Con lo cual, con una reducción del 76% de la radiación incidente sobre el cultivo, entre el nivel superior e inferior, se aumentó significativamente la altura de la planta en un 13%. En este sentido, tanto el factor densidad como posición contribuyeron significativamente a la presencia de ahilamiento o etiolación en las plantas del sistema AD, donde el tallo y la distancia entre nudos son más grandes de lo normal. Los valores promedio para la altura de planta, en ambas densidades y en las tres posiciones, fueron superiores a lo reportado para lechuga en sistemas hidropónicos bajo invernadero (15-18 cm) y en suelo (21-23 cm) (Ahmed *et al.*, 2021; Hasan *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2017).

En la Figura 24-A se observa que la altura de planta se incrementó desde los 15.5 cm (0 DDT) hasta los 37.7 cm en AD y 31.3 cm en BD, transcurridos 35 DDT. Con lo cual, hubo una tasa promedio de crecimiento de 0.63 cm día<sup>-1</sup> en AD, superior a los 0.45 cm día<sup>-1</sup> en BD. A los 20, 28 y 35 DDT, la altura promedio de planta fue superior en AD que en BD. En tanto, en la Figura 24-B se evidencia que transcurridos 35 DDT, las plantas ubicadas en el nivel inferior alcanzaron una altura de 38.2 cm, superior a los 35.2 cm del nivel medio, y los 30 cm del nivel superior. De esta manera, la tasa de incremento promedio en la altura de planta para cada uno de los niveles fue de 0.65, 0.56 y 0.41 cm día<sup>-1</sup>, en orden ascendente de posición, respectivamente. A los 20 DDT, la altura entre los tres niveles fue similar, mientras que, a los 28 DDT las diferencias fueron más marcadas, principalmente entre el nivel superior y, los niveles inferior y medio.



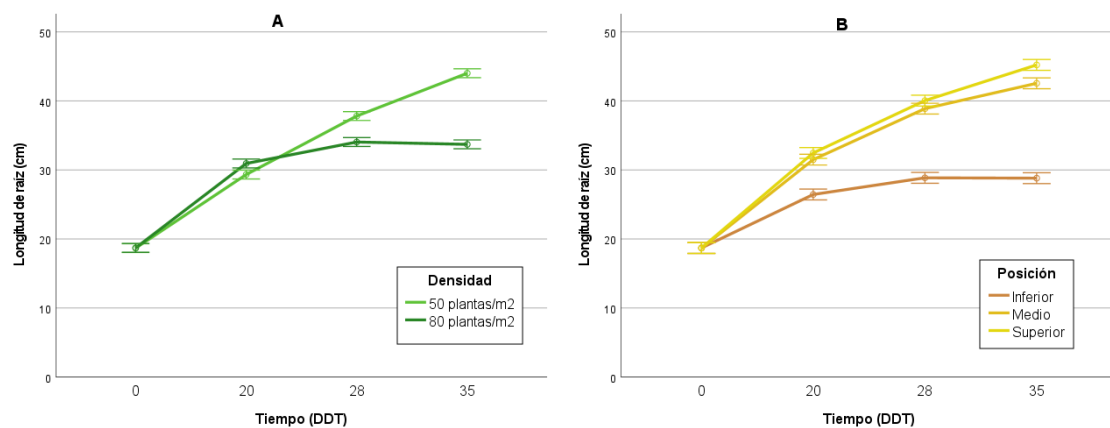
**Figura 24.** Altura de planta para el factor densidad (A) y posición (B).

### Longitud de raíz

Las plantas del sistema BD presentaron una longitud promedio de raíz de 32.5 cm, significativamente mayor a la longitud en las plantas del sistema AD, con 29.4 cm (Cuadro 8). El aumento de la densidad del cultivo redujo significativamente la longitud promedio de la raíz en un 11%. Respecto al factor posición, solo se presentaron diferencias significativas entre el nivel inferior (grupo a) y, las plantas del grupo b (nivel medio y superior). Las plantas del nivel inferior, que recibieron un 24% de la radiación incidente dentro del invernadero y por ende tuvieron menor disponibilidad de fotoasimilados para el crecimiento radical, presentaron una longitud promedio de raíz de 25.7 cm, significativamente menor a los 33.5 cm de las plantas del grupo b. De esta manera, con una reducción del 76% de la radiación sobre el cultivo, lo cual limitó la disponibilidad de fotoasimilados para el crecimiento radical (entre los grupos a y b), se redujo significativamente la longitud promedio de la raíz en un 23%. Los valores promedio de longitud de raíz se encuentran dentro o cerca del rango reportado para cultivo de lechuga en hidroponía (23-31 cm) (Li *et al.*, 2018).

En la Figura 25-A se observa que la longitud de raíz de la planta se incrementó desde los 18.7 cm (0 DDT) hasta los 44 cm en BD y 33.7 cm en AD, transcurridos 35 DDT. La tasa promedio de crecimiento fue de 0.72 cm día<sup>-1</sup> en BD, superior a los 0.43 cm día<sup>-1</sup> en AD. A los 20 DDT, el sistema AD tuvo plantas con una longitud de raíz superior a las del sistema BD, mientras que, a los 28 DDT sucedió todo lo contrario, fueron las plantas del sistema BD las que empezaron a tener una mayor longitud de raíz y esta tendencia se

mantuvo hasta el final del cultivo (35 DDT). En la Figura 25-B se evidencia que al final del cultivo (35 DDT) las plantas del nivel superior tuvieron una longitud promedio de raíz de 45.2 cm, mayor a los 42.6 cm del nivel medio, y a los 28.8 cm del nivel inferior. Los valores de los niveles superior y medio se encuentran cercanos al rango reportado para lechuga en sistemas de aeroponía (40-42 cm) (Li *et al.*, 2018). Las tasas promedio de crecimiento para cada nivel fueron de 0.76, 0.68 y 0.29 cm día<sup>-1</sup>, en orden descendente de posición, respectivamente. A los 20 DDT, se mantuvo la tendencia de menor longitud de raíz a menor posición, sin embargo, las diferencias entre los niveles no fueron muy marcadas, y más aún entre los niveles medio y superior, que tuvieron valores relativamente similares. De igual manera, a los 28 DDT se evidencia que, las diferencias de longitud entre los niveles medio y superior no son tan marcadas, pero sí con respecto al nivel inferior.



**Figura 25.** Longitud de raíz para el factor densidad (A) y posición (B).

### Peso fresco

Las plantas de lechuga en el sistema BD tuvieron un promedio de 105.15 g de peso fresco foliar (PFF) y 10.37 g de peso fresco radicular (PFR), significativamente mayores a los 60.09 g de PFF y 4.5 g de PFR en el sistema AD (Cuadro 9). De esta manera, el aumento en un 60% en la densidad del cultivo, de 50 a 80 plantas m<sup>-2</sup>, disminuyó significativamente el peso fresco tanto foliar como radicular, en un 43 y 57%, respectivamente. Respecto al factor posición, la variable PFF presentó diferencias significativas en todos sus niveles, en tanto, en el PFR hubo diferencias únicamente entre el grupo a (nivel inferior y medio) y b (nivel superior). Así entonces, las plantas del nivel

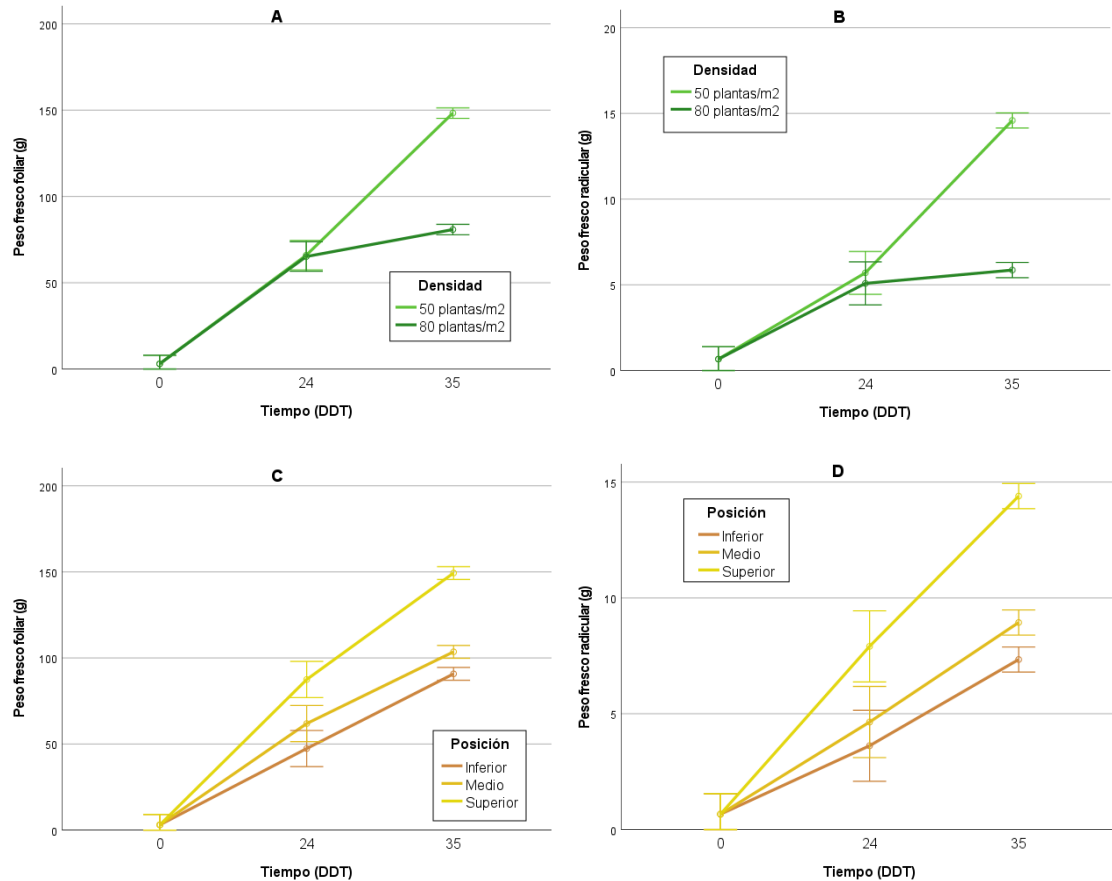


superior que recibieron un 100% de la radicación dentro del invernadero tuvieron un PFF de 107.64 g, significativamente mayor a los 74.98 g del nivel medio, e igualmente mayor a los 65.23 g del nivel inferior; con lo cual, con una reducción del 76% en la radiación incidente sobre el cultivo, entre el nivel superior e inferior, se redujo significativamente el PFF en un 39%. Asimismo, las plantas del nivel superior tuvieron un PFR de 10.42 g, significativamente mayor al presentado por las plantas del grupo b (nivel medio e inferior) con un valor de 5.94 g; dando como resultado una reducción del 43% entre grupos.

Los valores promedio de PFF se encuentran dentro o cercanos del rango reportado para lechuga hidropónica en invernadero (88-100 g) (Li *et al.*, 2018; Travieso *et al.*, 2016). Igualmente, los valores promedio de PFR se encuentran cercanos o dentro del rango reportado para lechuga hidropónica bajo invernadero (7-13 g) (Li *et al.*, 2018)

En la Figura 26-A se observa que el PFF pasó de los 3.05 g (0 DDT) en ambas densidades, hasta los 148.33 g en BD y 80.84 g en AD, transcurridos 35 DDT. Esto da como resultado una tasa incremento promedio de biomasa de 4.15 g de PFF día<sup>-1</sup> en BD, mayor a la de AD, con 2.22 g de PFF día<sup>-1</sup>. A los 24 DDT no hubo diferencias entre las densidades. En tanto en la Figura 26-B se evidencia que, el PFR pasó de los 0.67 g (0 DDT) en ambas densidades, hasta los 14.59 g en BD y 5.86 g en AD (35 DDT). Con una tasa de incremento promedio de biomasa de 0.40 y 0.15 g PFR día<sup>-1</sup> en BD y AD, respectivamente. A los 24 DDT, no hubo diferencias marcadas entre ambas densidades.

En la Figura 26-C se evidencia que, al finalizar el cultivo (35 DDT), las plantas del nivel superior alcanzaron un promedio de PFF de 149.38 g, superior a los 103.59 g del nivel medio, y los 90.78 g del nivel inferior. Con lo cual, hubo un incremento promedio de biomasa de 4.18; 2.87 y 2.51 g de PFF día<sup>-1</sup>, en orden descendente de posición, respectivamente. A los 24 DDT, se presentaron diferencias entre los diferentes niveles de posición, sin embargo, fue más marcado entre el nivel superior y los otros dos niveles (medio e inferior). En la Figura 26-D el PFR alcanzó un valor promedio de 14.4 g en el nivel superior, mayor a los 8.94 g del nivel medio, y los 7.34 g del nivel inferior. Las tasas promedio de incremento de biomasa fueron de 0.39, 0.24 y 0.19 g PFR día<sup>-1</sup>, en orden descendente de posición, respectivamente. A los 24 DDT solo se presentaron diferencias entre el nivel superior y el grupo conformado por los niveles medio e inferior.



**Figura 26.** Peso fresco foliar para el factor densidad (A), peso fresco radicular para el factor densidad (B), peso fresco foliar para el factor posición (C) y peso fresco radicular para el factor posición (D).

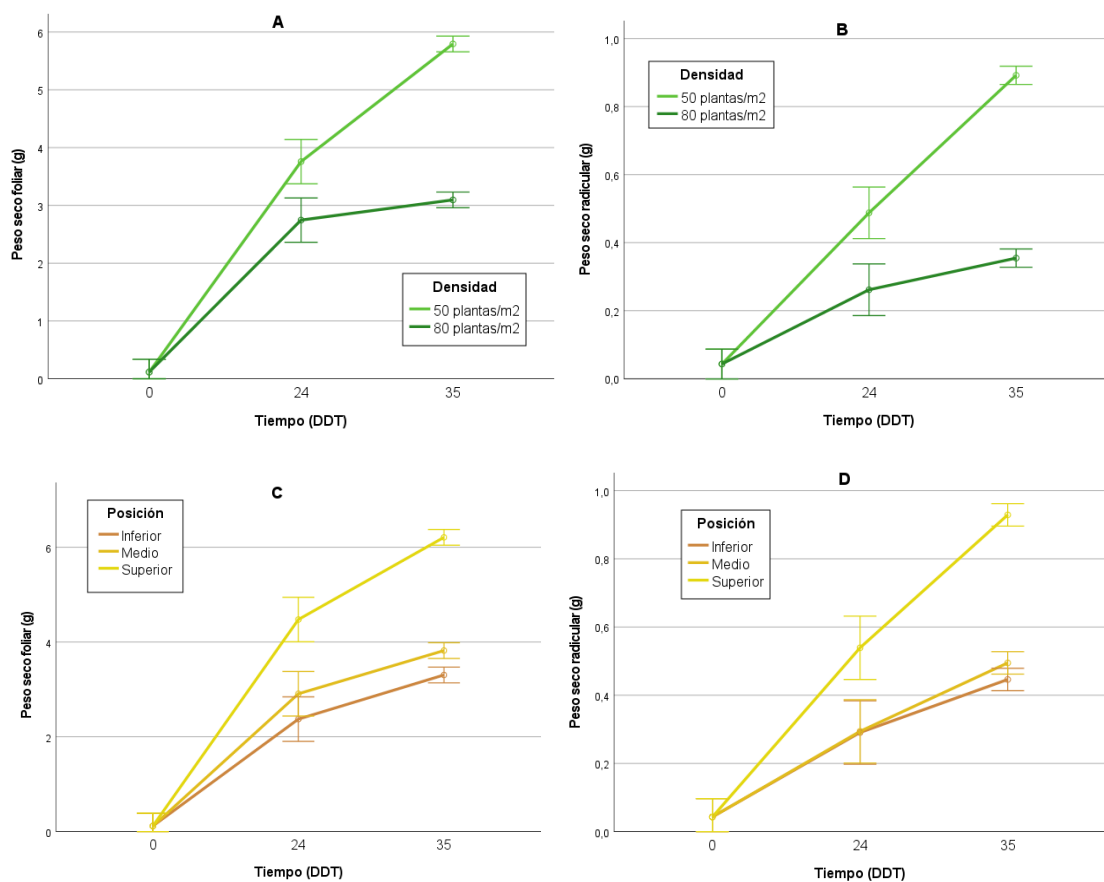
Desde la perspectiva de eficiencia en el uso de recursos, el sistema BD produjo un promedio de 60.09 g de PFF L<sup>-1</sup> de agua consumida, y un promedio de producción por cada catión nutritivo consumido de 4 g PFF mmol<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 0.39 g PFF mmol<sup>-1</sup> (K<sup>+</sup>), 0.75 g PFF mmol<sup>-1</sup> (Ca<sup>+2</sup>) y 2.25 g PFF mmol<sup>-1</sup> (Mg<sup>+2</sup>), en tanto, en el sistema AD los consumos fueron menores, 51.36 g de PFF L<sup>-1</sup> de agua, 3.30 g PFF mmol<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 0.31 g PFF mmol<sup>-1</sup> (K<sup>+</sup>), 0.65 g PFF mmol<sup>-1</sup> (Ca<sup>+2</sup>) y 1.65 g PFF mmol<sup>-1</sup> (Mg<sup>+2</sup>). Respecto de la variable PFR, se encuentra que el consumo hídrico fue de 5.93 g PFR L<sup>-1</sup> en BD y de 3.85 g PFR L<sup>-1</sup> en AD, con unos consumos nutritivos en BD de 0.40 g PFF mmol<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 0.04 g PFF mmol<sup>-1</sup> (K<sup>+</sup>), 0.07 g PFF mmol<sup>-1</sup> (Ca<sup>+2</sup>) y 0.22 g PFF mmol<sup>-1</sup> (Mg<sup>+2</sup>), superiores a los del sistema AD, con valores de 0.25 g PFF mmol<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 0.02 g PFF mmol<sup>-1</sup> (K<sup>+</sup>), 0.05 g PFF mmol<sup>-1</sup> (Ca<sup>+2</sup>) y 0.12 g PFF mmol<sup>-1</sup> (Mg<sup>+2</sup>).

### Peso seco

En el sistema BD las plantas tuvieron un promedio de 4.2 g de peso seco foliar (PSF) y 0.65 g de peso seco radicular (PSR), significativamente mayores a los 2.32 g de PSF y 0.27 g PSR en AD (Cuadro 9). Con lo cual, al aumentar la densidad en un 60% entre BD y AD, se disminuyó significativamente el PSF y PSR en un 45 y 58%, respectivamente. Respecto al factor de variación posición, tanto la variable PSF y PSR presentaron diferencias significativas entre el grupo a (nivel inferior y medio) y b (nivel superior). Las plantas del nivel superior que recibieron el 100% de la radiación dentro del invernadero tuvieron un PSF promedio de 4.54 g, significativamente mayor a los 2.63 g del grupo a (nivel inferior y medio), de esta manera, al reducir la radiación en un 76%, entre el nivel superior e inferior, se redujo significativamente el PSF en un 42%. Asimismo, las plantas del nivel superior tuvieron un PSR promedio de 0.68 g, significativamente mayor a los 0.35 g del grupo a (nivel inferior y medio), con lo cual, al reducir la radiación incidente sobre el cultivo en un 76%, se redujo significativamente el PSR en un 49%. Los valores promedio de PSF se encuentran dentro del rango reportado para lechuga en sistemas de hidroponía y aeroponía bajo invernadero (2.2-5.4 g) (Li *et al.*, 2018). Igualmente, los valores promedio de PSR se encuentran dentro o cerca del rango reportado para lechuga en sistemas hidropónicos y de aeroponía bajo invernadero (0.27-0.68 g) (Li *et al.*, 2018).

En la Figura 27-A se observa que el PSF pasó de los 0.12 g (0 DDT) en ambas densidades, hasta los 5.79 g en BD y 3.10 g en AD (35 DDT). Lo cual, establece una tasa de crecimiento promedio de 0.16 g de PSF día<sup>-1</sup> en BD, mayor al valor de AD con 0.09 g de PSF día<sup>-1</sup>. A los 24 DDT hubo diferencias entre ambas densidades, siendo mayor el PSF en BD. En la Figura 27-B se muestra que el PSR pasó de los 0.04 g (0 DDT) en ambas densidades, hasta los 0.89 g en BD y 0.35 g en AD (35 DDT). Por tanto, hubo una tasa de incremento promedio de 0.024 y 0.009 g de PSR día<sup>-1</sup>, en los sistemas BD y AD, respectivamente. En la Figura 27-C se evidencia que, transcurridos 35 DDT el PSF promedio en el nivel superior fue de 6.21 g, mayor al valor presentado en el nivel medio (3.82 g) y en el nivel inferior (3.3 g). De esta manera, se presentaron unos incrementos promedio de 0.17, 0.11 y 0.09 g PSF día<sup>-1</sup>, en orden descendente de posición, respectivamente. A los 24 DDT no hubo diferencias entre los niveles inferior y medio, y,

por el contrario, si hubo diferencias con el nivel superior. En la Figura 27-D se muestra que, a los 35 DDT el nivel superior tuvo un PSR promedio de 0.93 g, superior al que presentaron los niveles medio e inferior, con valores de 0.49 y 0.45 g. Las tasas de incremento promedio fueron de 0.025, 0.013 y 0.012 g PSR día<sup>-1</sup>, en orden descendente de posición, respectivamente. A los 24 DDT, se evidencia que no hubo diferencias entre los niveles inferior y medio, pero si las hubo con respecto al nivel superior.



**Figura 27.** Peso seco foliar para el factor densidad (A), peso seco radicular para el factor densidad (B), peso seco foliar para el factor posición (C) y peso seco radicular para el factor posición (D).

A nivel de eficiencia en el uso de recursos, el sistema BD produjo un promedio de 2.4 g de PSF L<sup>-1</sup> de agua consumida, y unas producciones relativas al consumo nutritivo de 0.16 g PSF mmol<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 0.02 g PSF mmol<sup>-1</sup> (K<sup>+</sup>), 0.03 g PSF mmol<sup>-1</sup> (Ca<sup>+2</sup>) y 0.09 g PSF mmol<sup>-1</sup> (Mg<sup>+2</sup>), mientras que, en el sistema de AD los consumos fueron menores, 1.98 g de PSF L<sup>-1</sup> agua consumida, 0.13 g PSF mmol<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 0.01 g PSF mmol<sup>-1</sup> (K<sup>+</sup>),

0.02 g PSF mmol<sup>-1</sup> (Ca<sup>+2</sup>) y 0.06 g PSF mmol<sup>-1</sup> (Mg<sup>+2</sup>). Respecto de la variable PSR, el sistema BD produjo 0.37 g de PSR L<sup>-1</sup> agua consumida, 0.025 g PSR mmol<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 0.002 g PSR mmol<sup>-1</sup> (K<sup>+</sup>), 0.005 g PSR mmol<sup>-1</sup> (Ca<sup>+2</sup>) y 0.014 g PSR mmol<sup>-1</sup> (Mg<sup>+2</sup>), valores mayores a los presentados en el sistema AD, que produjo 0.23 g de PSR L<sup>-1</sup> agua consumida, 0.015 g PSR mmol<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 0.001 g PSR mmol<sup>-1</sup> (K<sup>+</sup>), 0.003 g PSR mmol<sup>-1</sup> (Ca<sup>+2</sup>) y 0.007 g PSR mmol<sup>-1</sup> (Mg<sup>+2</sup>).

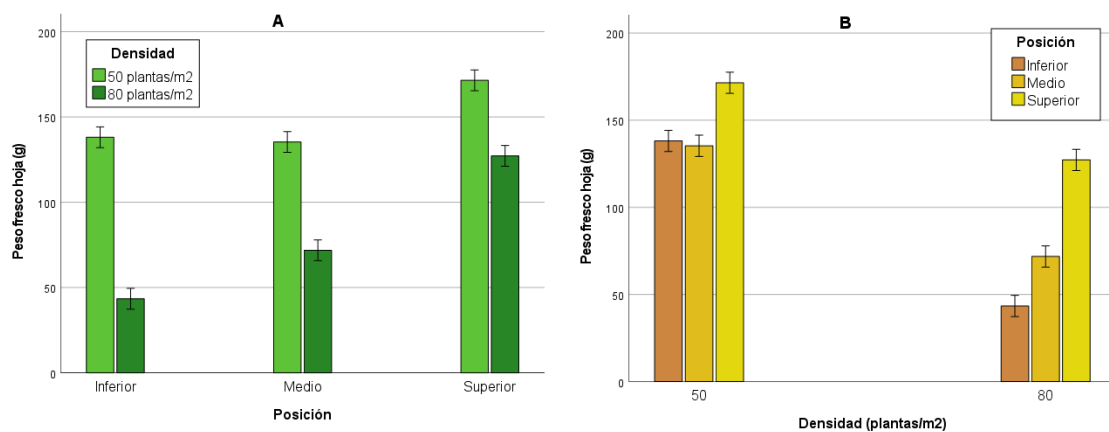
### Productividad

Al final del cultivo (35 DDT), el sistema BD presentó un peso fresco foliar (PFF) promedio de 148.33 g, significativamente mayor a los 80.84 g del sistema AD (Cuadro 10). De esta manera, el aumento de la densidad, de BD a AD, redujo significativamente el PFF en un 46%. Respecto al factor posición, solo hubo diferencias significativas entre el grupo a (nivel inferior y medio) y b (nivel superior). Las plantas del nivel superior, que recibieron un 100% de la radicación dentro del invernadero, presentaron un promedio de 149.38 g de PFF, significativamente mayor a los 97.18 g de PFF del grupo a. De esta manera, al reducir la radiación en un 76%, entre los grupos a y b, se redujo significativamente el PFF en un 35%. Los valores promedio de PFF tanto para el factor densidad como posición, se encuentran dentro o en algunos casos fueron superiores al rango reportado en la literatura para lechuga hidropónica en invernadero (88-100 g) (Li *et al.*, 2018; Travieso *et al.*, 2016).

En la Figura 28-A se muestra que, en cada uno de los tres niveles del factor posición hubo diferencias significativas entre las dos densidades, siendo mayor el PFF en BD que en AD, y donde los valores medios se incrementan en orden ascendente de posición. De igual manera, en la Figura 28-B se observa que, en AD hubo diferencias entre los tres niveles de posición, presentándose un mayor PFF en el nivel superior, mayor que los promedios que tuvieron los niveles medio e inferior. En tanto, en BD solo se observan diferencias significativas entre el nivel superior y el grupo conformado por los niveles medio e inferior.

A partir de los valores medios de PFF mostrados en la Figura 28, se puede calcular el rendimiento de cada densidad de cultivo considerando las variaciones a nivel de posición. Los valores medios de PFF para los niveles inferior, medio y superior en BD fueron

138.14, 135.34 y 171.50 g, respectivamente. Considerando un total de 100 plantas por nivel y que, el área superficial son 6 m<sup>2</sup>, el rendimiento promedio de BD fue 74.16 ton ha<sup>-1</sup>, superior a las 48 ton ha<sup>-1</sup> reportadas para este tipo de sistemas de horticultura urbana (Orsini *et al.*, 2013) e igualmente superior a lo reportado para lechuga hidropónica horizontal bajo invernadero (40-46 ton ha<sup>-1</sup>) (Ahmed *et al.*, 2021). En cambio, los valores medios de PFF para AD fueron 43.42, 71.84 y 127.25 g para los niveles inferior, medio y superior, respectivamente. Considerando 160 plantas por nivel y que, el área superficial son 6 m<sup>2</sup>, el rendimiento promedio de AD fue 64.67 ton ha<sup>-1</sup>, inferior al sistema BD, pero igualmente superior a los sistemas hidropónicos horizontales para lechuga en invernadero. Por tanto, al aumentar la densidad del cultivo en un 60%, de 50 a 80 plantas m<sup>-2</sup>, se redujo el rendimiento en un 13%. De esta manera, los sistemas de cultivo verticales sin iluminación complementaria necesitan de estrategias como la producción escalonada para minimizar estos efectos sobre la producción.



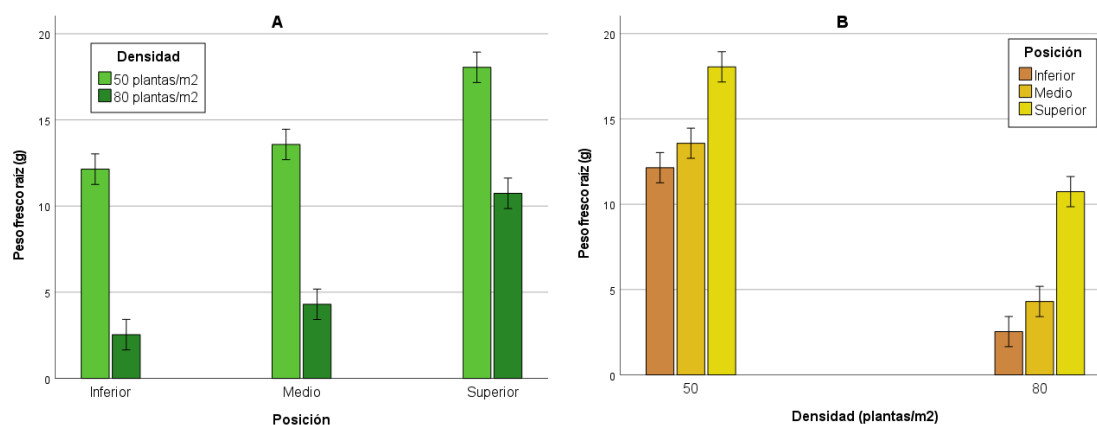
**Figura 28.** Peso fresco foliar para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT).

Por otro lado, a los 35 DDT el sistema BD tuvo un peso fresco radicular (PFR) promedio de 14.59 g, significativamente mayor a los 5.86 g de AD (Cuadro 10). Por tanto, el aumento de la densidad redujo significativamente el PFR en un 60%. Respecto al factor posición, hubo diferencias significativas entre el grupo a (nivel inferior y medio) y b (nivel superior). Las plantas del nivel superior que recibieron el 100% de la radiación dentro del invernadero, presentaron un promedio de 14.4 g de PFR, significativamente mayor a los 8.14 g del grupo a. Así entonces, la reducción de la radiación en un 76%, entre el nivel superior y el grupo a, redujo significativamente el PFR en un 43%. Los valores promedio

de PFR tanto en el factor posición como densidad, se encuentran cercanos o dentro del rango reportado para lechuga hidropónica bajo invernadero (7-13 g) (Li *et al.*, 2018)

En la Figura 29-A se observa que, en los tres niveles del factor posición hubo diferencias significativas entre los sistemas BD y AD, siendo mayor el PFR en BD, y donde los valores medios se incrementan con la posición. Asimismo, en la Figura 29-B se observa que, tanto en baja como en alta densidad, hubo diferencias significativas entre el nivel superior y el grupo conformado por el nivel medio e inferior, siendo mayor el PFR en el nivel superior.

Los valores medios de PFR para los niveles inferior, medio y superior en BD fueron 12.14, 13.58 y 18.05 g, respectivamente. Con lo cual, el rendimiento promedio de PFR fue de 7.30 ton ha<sup>-1</sup>. En tanto, en el sistema AD, los PFR promedio para los tres niveles del factor posición fueron 2.54, 4.30 y 10.74 g, en orden ascendente de posición, respectivamente. De esta manera, el rendimiento promedio de PFR fue de 4.69 ton ha<sup>-1</sup>, inferior al sistema BD. En ambos casos, los valores de rendimiento de PFR fueron inferiores a lo reportado en literatura para cultivos de lechuga hidropónica horizontal en invernadero (8-10 ton ha<sup>-1</sup>) (Ahmed *et al.*, 2021).



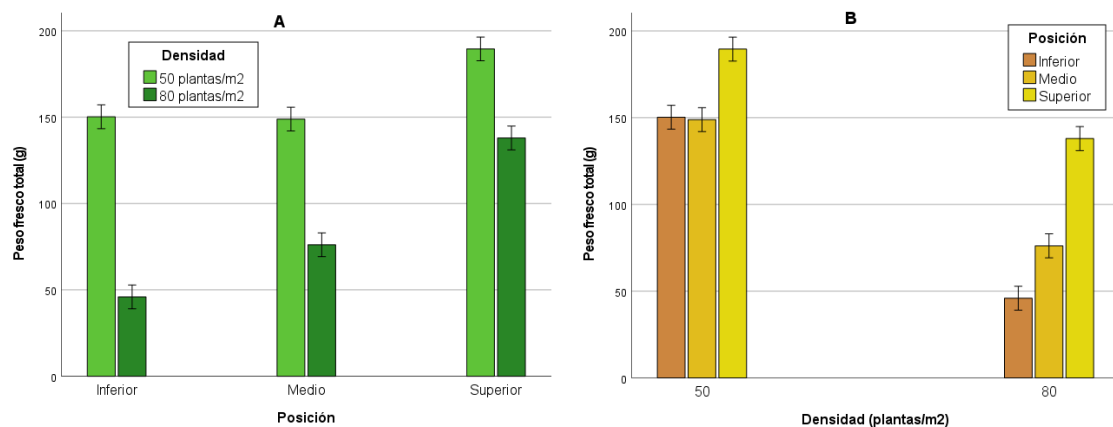
**Figura 29.** Peso fresco radicular para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT).

Finalmente, al considerar todo el peso de la planta 35 DDT, el sistema BD tuvo plantas con un peso fresco total (PFT) promedio de 162.92 g, significativamente mayor a los 86.7 g del sistema AD (Cuadro 10). Con lo cual, con un aumento del 60% en la densidad del cultivo, se redujo significativamente el PFT en un 47%. Respecto al factor posición, solo hubo diferencias significativas entre el grupo a (nivel inferior y medio) y b (nivel

superior). Las plantas del nivel superior que recibieron un 100% de la radiación dentro del invernadero, presentaron un promedio de 163.77 g de PFT, significativamente mayor a los 105.33 g de PFT del grupo a. Esto significa que, al reducir la radiación incidente sobre el cultivo en un 76%, entre los grupos a y b, se redujo significativamente el PFT en un 36%. Los valores promedio de PFT tanto para el factor densidad como posición, se encuentran dentro del rango reportado por la literatura para lechuga en sistemas hidropónicos bajo invernadero (97-223 g) (Ahmed *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2018).

En la Figura 30-A se muestra que, en cada uno de los tres niveles del factor posición hubo diferencias significativas entre las dos densidades, siendo mayor el PFT en BD que en AD, y donde los valores medio se incrementan en orden ascendente de posición. Asimismo, en la Figura 30-B se evidencia que, en BD hubo diferencias entre el grupo conformado por el nivel inferior y medio, y el nivel superior, mientras que, en AD, los tres niveles presentaron diferencias.

Los valores medios de PFT para los tres niveles de posición en BD fueron 150.29, 148.92 y 189.56 g, en orden ascendente de posición, respectivamente. Lo cual determinó un rendimiento promedio de PFT de 81.46 ton ha<sup>-1</sup>. En tanto, para AD, los valores medios de PFT fueron 45.96, 76.15 y 137.99 g, en orden ascendente de posición, respectivamente. De esta manera, el sistema AD tuvo un rendimiento promedio de 69.36 ton ha<sup>-1</sup>, inferior al de BD. En ambas densidades, los valores promedio de rendimiento de PFT fueron superiores a lo reportado en literatura para lechuga hidropónica horizontal bajo invernadero (24-56 ton ha<sup>-1</sup>) (Ahmed *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2018).



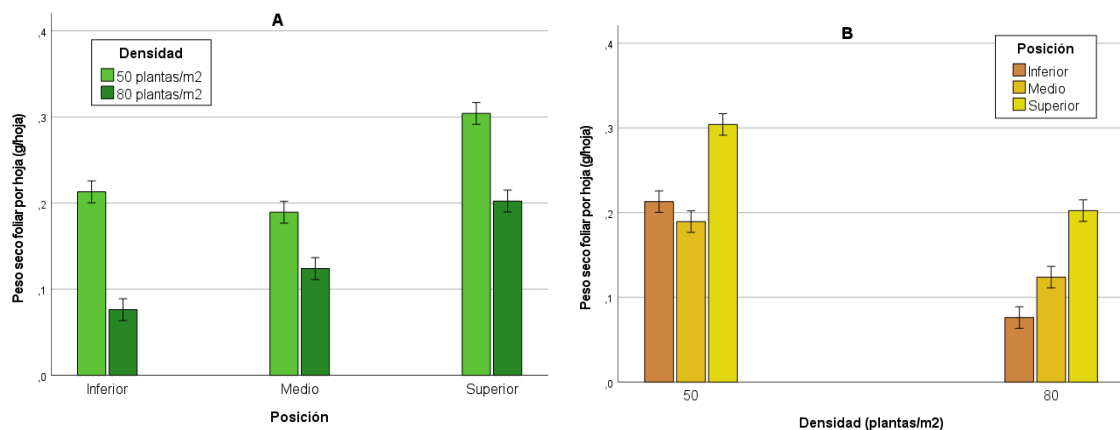
**Figura 30.** Peso fresco total para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT).



### Índice de proporción de crecimiento ( $I_1$ )

Las plantas del sistema BD tuvieron una biomasa por hoja promedio ( $I_1$ ) de 0.24 g hoja<sup>-1</sup>, significativamente mayor al valor de 0.13 g hoja<sup>-1</sup> en AD (Cuadro 11), a los 35 DDT. Por lo que, al aumentar la densidad en un 60%, se redujo significativamente el  $I_1$  promedio en un 46%, es decir, se redujo aproximadamente a la mitad la biomasa por hoja, resultado de una menor actividad fotosintética. Respecto al factor posición, solo se presentaron diferencias significativas entre el grupo a (nivel inferior y medio) y b (nivel superior). Las plantas del nivel superior que recibieron el 100% de la radiación dentro del invernadero tuvieron un  $I_1$  de 0.25 g hoja<sup>-1</sup>, significativamente mayor a los 0.15 g hoja<sup>-1</sup> del grupo a. Así entonces, al reducir en un 76% la radiación sobre el cultivo, entre el nivel superior y grupo a, se redujo la biomasa promedio por hoja en un 40%, resultado de una menor actividad fotosintética. Los valores promedio para este índice fueron inferiores a lo reportado en la literatura para lechuga hidropónica horizontal bajo invernadero (0.64-0.79 g hoja<sup>-1</sup>) (Ahmed *et al.*, 2021).

En la Figura 31-A se observa que, para cada uno de los niveles del factor posición, hubo diferencias entre las dos densidades, siendo mayor el valor en BD que en AD. El crecimiento fue ascendente en posición en el caso de AD, mientras que, para BD el  $I_1$  en el nivel medio fue relativamente inferior al valor promedio del nivel inferior. El  $I_1$  promedio en BD presentó una variación entre 0.21 g hoja<sup>-1</sup> (nivel inferior) hasta los 0.30 g hoja<sup>-1</sup> (nivel superior); y en AD, este rango fue entre 0.08 y 0.20 g hoja<sup>-1</sup>. En tanto, en la Figura 31-B se observa como en BD, solo hubo diferencias entre el nivel superior (0.3 g hoja<sup>-1</sup>) y el grupo conformado por el nivel medio e inferior (0.2 g hoja<sup>-1</sup>). En AD hubo diferencias entre los tres niveles con valores promedio de 0.2, 0.12 y 0.08 g hoja<sup>-1</sup>, en orden descendente de posición, respectivamente.



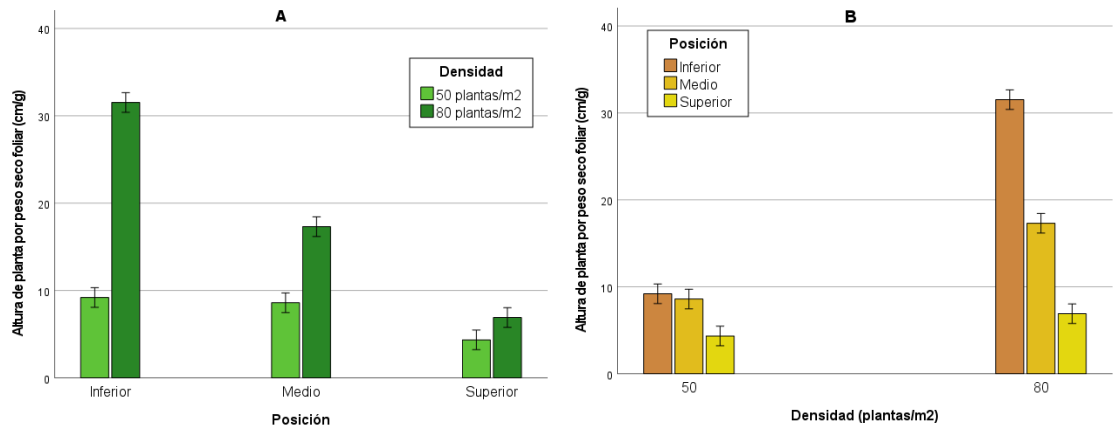
**Figura 31.** Índice de proporción de crecimiento ( $I_1$ ) para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT).

### Índice de proporción de crecimiento ( $I_2$ )

Las plantas del sistema BD tuvieron una relación altura biomasa promedio ( $I_2$ ) de  $7.39 \text{ cm g}^{-1}$ , significativamente menor al valor de  $18.59 \text{ cm g}^{-1}$  en AD (Cuadro 11), a los 35 DDT. De esta manera, se deduce que, al aumentar la densidad del cultivo, se aumentó significativamente el  $I_2$  promedio en un 152%, es decir, las plantas del sistema AD fueron aproximadamente tres veces más grandes que BD, con la misma biomasa, como resultado del ahilamiento o etiolación, anomalía del crecimiento vegetal donde los entrenudos están más distanciados de lo normal. Respecto al factor posición, hubo diferencias significativas entre los tres niveles. Las plantas del nivel superior que recibieron un 100% de la radiación dentro del invernadero tuvieron un  $I_2$  de  $5.63 \text{ cm g}^{-1}$ , significativamente menor a los  $12.96 \text{ cm g}^{-1}$  del nivel medio, y los  $20.37 \text{ cm g}^{-1}$  del nivel inferior. De esta manera, al reducir en un 76% la radiación sobre el cultivo, entre el nivel superior e inferior, se aumentó significativamente la relación altura biomasa en un 262%, y como resultado se obtuvieron plantas ahiladas. Los valores promedio para este índice fueron superiores a los reportados para lechuga hidropónica horizontal bajo invernadero ( $1.70\text{-}1.74 \text{ cm g}^{-1}$ ) (Ahmed *et al.*, 2021).

En la Figura 32-A se muestra que, para cada uno de los niveles del factor posición, hubo diferencias entre las dos densidades, siendo mayores los valores en AD que en BD. El crecimiento fue descendente en posición en AD, mientras que, para BD el  $I_2$  en el nivel medio fue relativamente similar al valor promedio del nivel inferior. El  $I_2$  promedio en

BD presentó una variación entre 4.35 cm g<sup>-1</sup> (nivel superior) y 9.21 cm g<sup>-1</sup> (nivel inferior); y en AD, este rango fue entre 6.91 y 31.54 cm g<sup>-1</sup>. En tanto, en la Figura 32-B se observa como en BD solo hubo diferencias entre el nivel superior (4.35 cm g<sup>-1</sup>) y el grupo conformado por el nivel medio e inferior (8.91 cm g<sup>-1</sup>). En AD hubo diferencias entre los tres niveles con valores promedio de 31.54, 17.31 y 6.91 cm g<sup>-1</sup>, en orden ascendente de posición, respectivamente.



**Figura 32.** Índice de proporción de crecimiento ( $I_2$ ) para el factor densidad (A) y posición (B), (35 DDT).

### Composición mineral del cultivo

En el Cuadro 12 se observa que, el factor densidad afectó significativamente el contenido de nitrógeno. La posición no influyó significativamente en el contenido de nitrógeno y fósforo en la zona foliar de la planta. Los factores densidad y tiempo solo afectaron significativamente el contenido de nitrógeno. Ninguna de las interacciones entre factores influyó de manera significativa en el contenido de nitrógeno. Por el contrario, las interacciones densidad posición (DxP) y posición tiempo (PxT) si afectaron significativamente el contenido de fósforo en la planta. La fuente de variación repetición no presentó diferencias significativas para ninguna variable.

**Cuadro 12.** ANOVA para las variables de composición mineral foliar del cultivo, nitrógeno y fósforo.

| <b>Fuente de variación</b>             | <b>Nitrógeno (%)</b> | <b>Fósforo (%)</b> |
|--|----------------------|--------------------|
| D: Densidad (plantas m <sup>-2</sup> ) | <0.05                | ns                 |
| 50                                     | 3.6a                 | 0.9                |
| 80                                     | 3.9b                 |                    |
| P: Posición                            | ns                   | ns                 |
| Inferior                               |                      |                    |
| Medio                                  | 3.7                  | 0.9                |
| Superior                               |                      |                    |
| T: Tiempo                              | <0.05                | ns                 |
| R: Repetición                          | ns                   | ns                 |
| DxP                                    | ns                   | <0.05              |
| DxT                                    | ns                   | ns                 |
| PxT                                    | ns                   | <0.05              |

Valores medios seguidos de diferente letra que representan diferencias estadísticamente significativas. % en peso seco foliar de la planta.

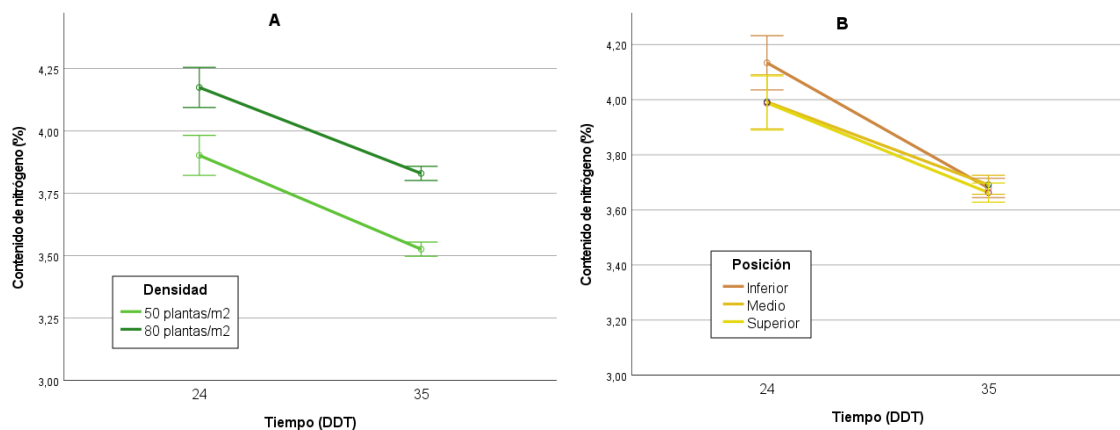
#### Contenido de nitrógeno (N)

Las plantas del sistema BD presentaron un contenido promedio de nitrógeno de 3.6% en peso seco foliar o materia seca, significativamente menor al 3.9% en AD (Cuadro 12). De esta manera, el aumento en un 60% de la densidad del cultivo, de 50 a 80 plantas m<sup>-2</sup>, aumentó significativamente el contenido promedio de nitrógeno en la planta en un 8%. Respecto al factor posición, no hubo diferencias significativas entre los niveles, presentándose un valor promedio de 3.7%. Los valores promedio de nitrógeno se encuentran dentro del rango reportado en literatura para lechuga hidropónica bajo invernadero (1.8-5.7%) (Sahin, 2023; Yildirim *et al.*, 2016), e igualmente, está dentro del rango de suficiencia reportado para este tipo de especie vegetal (3.3-4.5%) (Plank & Kissel, 1989).

A partir de los valores de PSF en ambas densidades (Cuadro 9), cuyos valores promedio fueron 4.2 g en BD y 2.32 g en AD; y los valores promedio de contenido de nitrógeno, se estima que, cada planta en el sistema BD absorbió un promedio de 0.15 g de N, superior a los 0.09 g N en AD. Considerando una proporción entre amonio y nitrato de 20:80 (Söylemez, 2021), se estima que, cada planta en el sistema BD absorbió 0.03 g N en forma de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y 0.12 g N en forma de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), valores superiores a los que se

presentaron en AD, con 0.018 g N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y 0.072 g N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Los valores de concentración de absorción de amonio estimados por el modelo predictivo, cuyos valores fueron 1.67 mM en BD y 1.25 mM en AD, junto con el respectivo número de plantas para cada sistema y la capacidad del tanque de solución nutritiva (250 L), permiten estimar que el cultivo absorbió 0.019 g N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en BD y 0.015 g N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en AD. Al comparar lo medido con lo estimado por el modelo, se encuentra que, en el sistema de BD hubo una diferencia del 37% y en el sistema AD del 17%.

En la Figura 33-A se observa que hubo un descenso en el contenido nitrógeno entre los 24 y 35 DDT, siendo mayor el contenido en AD. El sistema BD pasó de tener un 4.2 a 3.8% y el sistema AD pasó de tener un 3.9 a 3.5%. Este descenso se debe a que, 31 DDT se dejó de suministrar solución nutritiva nueva o de recarga por parte del controlador. En tanto, en la Figura 33-B se evidencia que no hubo diferencias entre los niveles de posición, tanto a los 24 como 35 DDT.



**Figura 33.** Contenido de nitrógeno para el factor densidad (A) y posición (B).

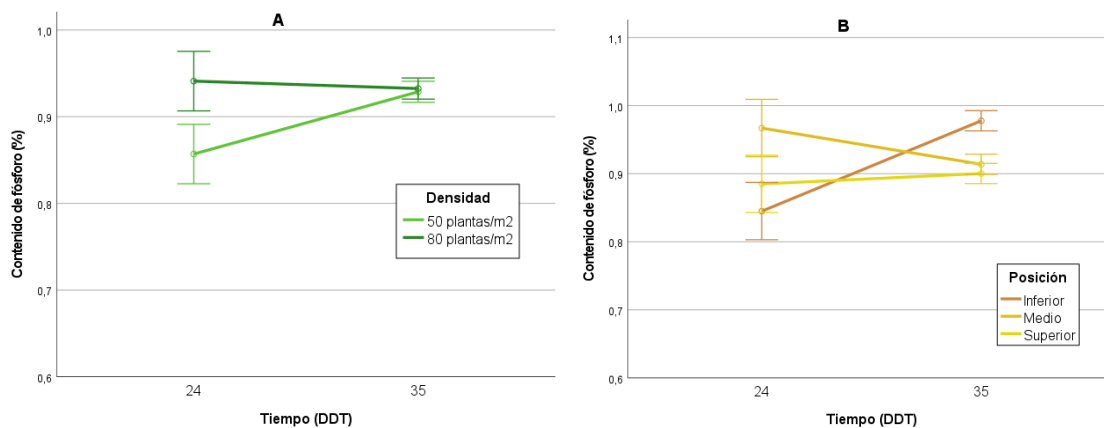
### Contenido de fósforo (P)

Las plantas de los sistemas BD y AD presentaron un valor promedio de contenido de fósforo de 0.9% (Cuadro 12). De esta manera, el aumento de la densidad del cultivo no influyó en el porcentaje de fósforo en la planta. Respecto al factor posición, todos los niveles presentaron igualmente un valor promedio en el contenido de fósforo igual al 0.9%. Por tanto, la reducción de la radiación entre el nivel superior e inferior no afectó significativamente esta variable de respuesta. Los valores promedio de fósforo se

encuentran dentro del rango reportado en literatura para lechuga hidropónica bajo invernadero (0.2-1.3%) (Mampholo *et al.*, 2016; Yildirim *et al.*, 2016), pero fueron superiores al rango de suficiencia reportado para esta especie vegetal (0.4-0.6%) (Plank & Kissel, 1989).

A partir de los valores de PSF en ambas densidades (Cuadro 9), cuyos valores promedio fueron 4.2 g en BD y 2.32 g en AD; y el valor promedio de contenido de fósforo, se estima que, cada planta en el sistema BD absorbió un promedio de 0.04 g de P, superior a los 0.02 g P en AD. La concentración de fósforo aportada en la solución nutritiva (2 mM), junto con el respectivo número de plantas para cada sistema y la capacidad del tanque de solución nutritiva (250 L), permiten estimar que a las plantas del sistema BD se les suministró 0.02 g P, y a las de AD 0.01 g P. Al comparar lo aportado en la solución nutritiva con lo absorbido por el cultivo, se encuentra que las plantas absorbieron el doble de lo aportado en ambas densidades, esto se debe a que, la conductividad eléctrica objetivo con la que se configuró el controlador fue superior a la conductividad eléctrica de la solución nutritiva utilizada.

En la Figura 34-A se observa que, entre los 24 y 35 DDT no existen diferencias marcadas entre las densidades. En tanto, en la Figura 34-B a los 24 DDT tanto el nivel superior como inferior presentaron valores similares de fósforo, y a su vez presentaron diferencias con el nivel medio. Por el contrario, a los 35 DDT, hubo diferencias entre el nivel inferior y, el grupo conformado por el nivel medio y superior.



**Figura 34.** Contenido de fósforo para el factor densidad (A) y posición (B).

## Pigmentos fotosintéticos del cultivo

En el Cuadro 13 se observan los valores medios para clorofila a (CA), clorofila b (CB) y clorofila total (CT), para los niveles del factor densidad y del factor posición, a los 28 DDT. El factor densidad y la interacción densidad posición (DxP) afectó significativamente el contenido de CA, CB y CT, por el contrario, el factor posición no influyó significativamente en los resultados. Asimismo, hubo diferencias significativas entre las densidades, siendo mayor el contenido de CA, CB y CT en BD, pero no hubo diferencias entre los niveles del factor posición. La fuente de variación repetición no afectó significativamente los resultados como era de esperarse.

**Cuadro 13.** ANOVA para las variables clorofila a (CA), clorofila b (CB) y clorofila total (CT) a los 28 DDT.

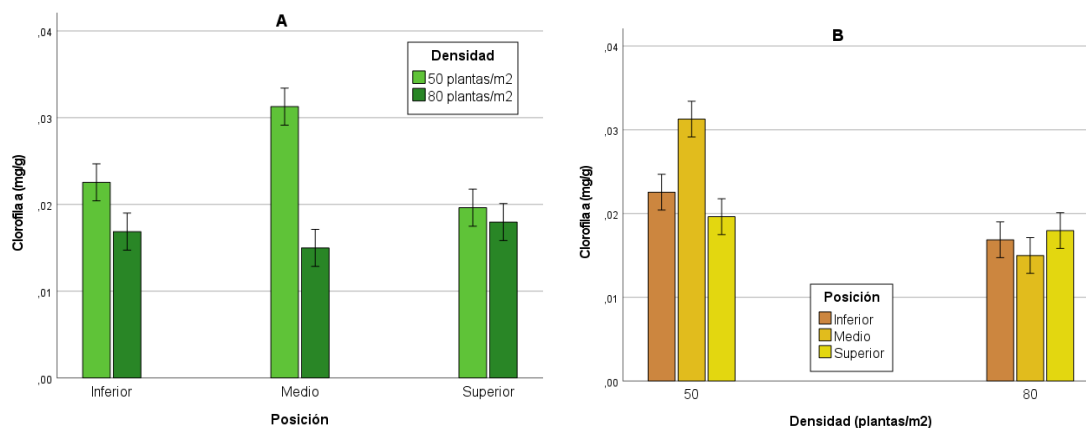
| <b>Fuente de variación</b>             | <b>Clorofila a<br/>(mg g<sup>-1</sup>)</b> | <b>Clorofila b<br/>(mg g<sup>-1</sup>)</b> | <b>Clorofila Total<br/>(mg g<sup>-1</sup>)</b> |
|--|--|--|--|
| D: Densidad (plantas m <sup>-2</sup> ) | <0.05                                      | <0.05                                      | <0.05  |
| 50                                     | 0.025b                                     | 0.026b                                     | 0.050b   |
| 80                                     | 0.017a                                     | 0.020a                                     | 0.037a   |
| P: Posición                            | ns   | ns   | ns   |
| Inferior                               |  |  |  |
| Medio                                  | 0.021                                      | 0.023                                      | 0.044  |
| Superior                               |  |  |  |
| R: Repetición                          | ns   | ns   | ns   |
| DxP                                    | <0.05                                      | ns   | <0.05  |

Valores medios seguidos de diferente letra que representan diferencias estadísticamente significativas. mg de clorofila g<sup>-1</sup> de material vegetal fresco.

### Clorofila a (CA)

A los 28 DDT, las plantas del sistema BD presentaron un contenido promedio de clorofila a (CA) de 0.025 mg g<sup>-1</sup>, significativamente mayor a los 0.017 mg g<sup>-1</sup> del sistema AD (Cuadro 13). De esta manera, el aumento de la densidad del cultivo redujo significativamente el contenido promedio de CA en un 32%. Respecto a la posición no hubo diferencias significativas, los tres niveles tuvieron un promedio de 0.021 mg g<sup>-1</sup> de CA. Los valores promedio de contenido de CA se encuentran por debajo del nivel reportado para este tipo de especie vegetal (0.073-0.117 mg g<sup>-1</sup>) en sistemas de hidroponía bajo invernadero (López *et al.*, 2014).

En la Figura 35-A se observa que, en el nivel inferior y medio del factor posición hubo diferencias entre las dos densidades, siendo mayor la diferencia en el nivel medio, mientras que, en el nivel superior no se presentaron diferencias entre BD y AD. La tendencia muestra que las plantas del sistema BD tuvieron un promedio de CA mayor en los tres niveles del factor posición. En tanto, en la Figura 35-B se evidencia que, en el sistema de BD hubo diferencias entre el nivel medio y el grupo conformado por el nivel inferior y superior, siendo mayor el contenido promedio de CA en el nivel medio. En cambio, en el sistema AD, no hubo diferencias entre los niveles del factor posición.



**Figura 35.** Clorofila a para el factor densidad (A) y posición (B), (28 DDT).

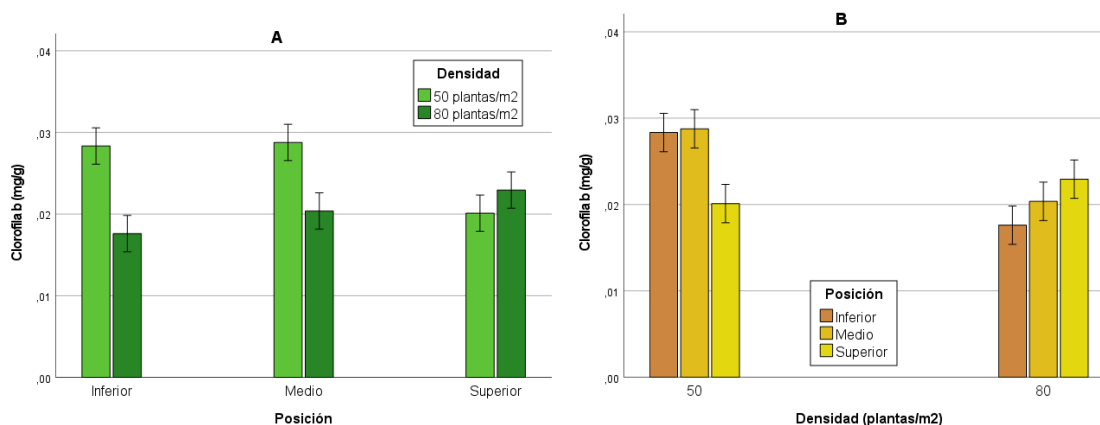
### Clorofila b (CB)

Transcurridos 28 DDT, las plantas del sistema BD presentaron un contenido promedio de clorofila b (CB) de  $0.026 \text{ mg g}^{-1}$ , significativamente mayor a los  $0.020 \text{ mg g}^{-1}$  del sistema AD (Cuadro 13). De esta manera, el aumento de la densidad del cultivo redujo significativamente el contenido promedio de CB en un 23%. Respecto a la posición no hubo diferencias significativas, los tres niveles tuvieron un promedio un promedio de  $0.023 \text{ mg g}^{-1}$  de CB. Los valores promedio de contenido de CB se encuentran cercanos al límite inferior del rango reportado para este tipo de especie vegetal ( $0.027\text{-}0.049 \text{ mg g}^{-1}$ ) en sistemas de hidroponía bajo invernadero (López *et al.*, 2014).

En la Figura 36-A se observa que, en los niveles inferior y medio del factor posición hubo diferencias entre las dos densidades, siendo mayor el contenido de CB en BD, mientras que, en el nivel superior no hubo diferencias entre AD y BD. En cambio, en la



Figura 36-B se muestra que, en el sistema BD hubo diferencias entre el grupo conformado por el nivel inferior y medio, y, el nivel superior, siendo inferior el contenido promedio de CB en el nivel superior. En cambio, en el sistema AD no se presentaron diferencias marcadas entre los tres niveles de posición.

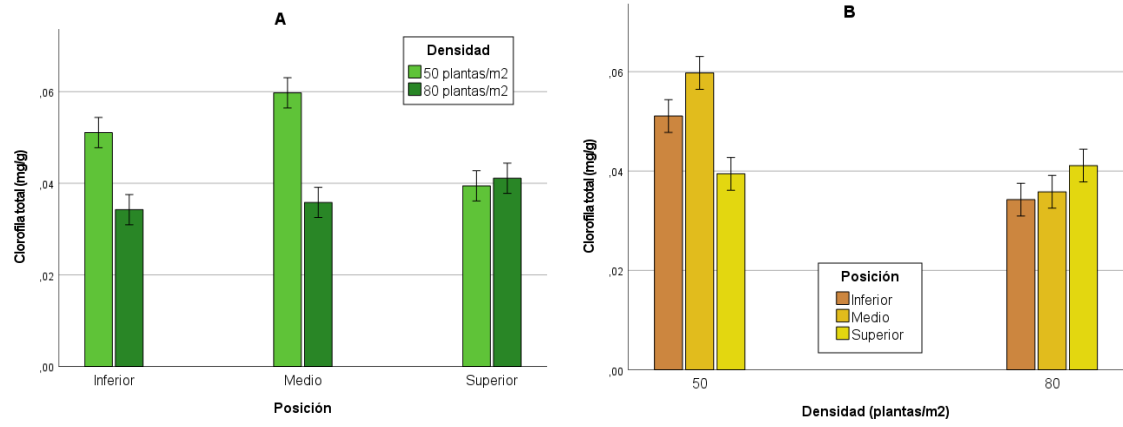


**Figura 36.** Clorofila b para el factor densidad (A) y posición (B), (28 DDT).

### Clorofila total (CT)

En el día 28 después del trasplante, las plantas del sistema BD presentaron un contenido promedio de clorofila total (CT) de  $0.050 \text{ mg g}^{-1}$ , significativamente mayor a los  $0.037 \text{ mg g}^{-1}$  del sistema AD (Cuadro 13). Así entonces, el aumento de la densidad del cultivo redujo significativamente el contenido promedio de CT en un 26%. Respecto a la posición no hubo diferencias significativas, los tres niveles tuvieron un promedio de  $0.044 \text{ mg g}^{-1}$  de CT. Los valores promedio de contenido de CT se encuentran por debajo del valor reportado para lechuga hidropónica horizontal bajo invernadero ( $0.25 \text{ mg g}^{-1}$ ) (Travieso *et al.*, 2016).

En la Figura 37-A se observa que, en el nivel inferior y medio del factor posición hubo diferencias entre las dos densidades, siendo mayor el contenido promedio de CT en BD, mientras que, no se presentaron diferencias entre BD y AD. En tanto, en la Figura 37-B se muestra que, en el sistema BD hubo diferencias entre los tres niveles de posición, siendo mayor el contenido promedio de CT en el nivel medio, seguido del nivel inferior, y posteriormente el nivel superior. Por el contrario, en el sistema AD no hubo diferencias entre los tres niveles del factor posición.



**Figura 37.** Clorofila total para el factor densidad (A) y posición (B), (28 DDT).

## CONCLUSIONES

Se ha desarrollado y validado un modelo predictivo de consumo hídrico y nutritivo que ha sido capaz de pronosticar el consumo de agua y de nutrientes (cationes nutritivos) en cultivos hidropónicos cerrados verticales en invernadero bajo diferentes densidades de cultivo con un alto grado de correlación con información real medida “in situ”, sin embargo, necesita la inclusión de otros parámetros e información que le permita obtener un grado de ajuste aún mayor.

La escalabilidad y potencial uso en el mercado de este modelo predictivo como herramienta de gestión integral de recursos agrícolas que facilite la toma de decisiones por parte del agricultor puede ser aún mejorada con la incorporación de un módulo que pronostique el consumo de aniones nutritivos.

El modelo predictivo presenta un mejor rendimiento en sistemas verticales de alta densidad, particularmente respecto al consumo hídrico, de amonio y magnesio. En cambio, para el consumo de potasio y acumulación de sodio, el rendimiento del modelo es mejor en sistemas de baja densidad.

El modelo permite determinar y ajustar los parámetros de producción adecuados para el cultivo de lechuga bajo sistemas hidropónicos cerrados verticales bajo invernadero. Se constata un ahorro importante en el uso de agua y nutrientes comparado con los sistemas horizontales y convencionales, con una mayor productividad en sistemas de baja densidad, equivalentes a tres veces la densidad en sistemas horizontales, y una mayor eficiencia en el uso de recursos.

## REFERENCIAS

- Agencia Estatal de Meteorología. (2023a). Valores climatológicos normales, Almería Aeropuerto. aemet.es.  
<https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=63250&k=undefined>.
- Agencia Estatal de Meteorología. (2023b). Valores climatológicos normales, clasificación climática de Köppen. aemet.es.  
<https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>.
- Ahmed, Z. F. R., Alnuaimi, A. K. H., Askri, A., & Tzortzakis, N. (2021). Evaluation of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Production under Hydroponic System: Nutrient Solution Derived from Fish Waste vs. Inorganic Nutrient Solution. *Horticulturae*, 7(9), 292.  
<https://doi.org/10.3390/horticulturae7090292>.
- Allen, Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (1a ed., Vol. 1). ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>.
- Allen, Walter, I., Elliot, R., Howell, T., Itenfisu, D., & Jensen, M. (2005). The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation (R. G. Allen, I. A. Walter, R. L. Elliott, T. A. Howell, D. Itenfisu, M. E. Jensen, & R. L. Snyder, Eds.). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784408056>.
- AMHPAC. (2021). Histórico Cierres de la Producción Agrícola - SIAP SADER. Portal de Negocios & Mercados AMHPAC.  
<https://amhpac.org/negociosmercados/socios/v2/produccion/>.
- AMHPAC. (2022). Demanda para exportación: Demanda reportada por compradores en el extranjero, seleccione la empresa para consultar su perfil. Portal de Negocios & Mercados AMHPAC. <https://amhpac.org/negociosmercados/socios/v2/demanda-p-exportacion/>.
- Anpo, M., Fukuda, H., & Wada, T. (2019). Introduction: Artificial Light-Type Plant Factories—Outline and a Vision for the Future. En M. Anpo, H. Fukuda, & T. Wada (Eds.), *PLANT FACTORY USING ARTIFICIAL LIGHT Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation* (1a ed., Vol. 1). Elsevier.
- Banco Mundial. (2022). PIB (US\$ a precios constantes de 2010) - México. [datos.bancomundial.org](https://datos.bancomundial.org).

<https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD?end=2020&locations=MX&start=2020&view=bar>.

- Barbosa, G. L., Almeida 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. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879–6891. <https://doi.org/10.3390/IJERPH120606879>.
- Beacham, A. M., Vickers, L. H., & Monaghan, J. M. (2019). Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(3), 277–283. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214>.
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*, 13(1), 13–26. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>.
- Boari, F., Cefola, M., di Gioia, F., Pace, B., Serio, F., & Cantore, V. (2013). Effect of cooking methods on antioxidant activity and nitrate content of selected wild Mediterranean plants. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 64(7), 870–876. <https://doi.org/10.3109/09637486.2013.799125>.
- Buturi, C. V., Sabatino, L., Mauro, R. P., Navarro-León, E., Blasco, B., Leonardi, C., & Giuffrida, F. (2022). Iron Biofortification of Greenhouse Soilless Lettuce: An Effective Agronomic Tool to Improve the Dietary Mineral Intake. *Agronomy*, 12(8), 1793. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081793>.
- Carillo, P., De Micco, V., Ciriello, M., Formisano, L., El-Nakhel, C., Giordano, M., Colla, G., & Roupheal, Y. (2022). Morpho-Anatomical, Physiological, and Mineral Composition Responses Induced by a Vegetal-Based Biostimulant at Three Rates of Foliar Application in Greenhouse Lettuce. *Plants*, 11(15), 2030. <https://doi.org/10.3390/plants11152030>.
- Carlisle, L., Montenegro de Wit, M., DeLonge, M. S., Iles, A., Calo, A., Getz, C., Ory, J., Munden-Dixon, K., Galt, R., Melone, B., Knox, R., & Press, D. (2019). Transitioning to Sustainable Agriculture Requires Growing and Sustaining an Ecologically Skilled Workforce. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 96. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2019.00096/BIBTEX>.
- Carmassi, G., Incrocci, L., Maggini, R., Malorgio, F., Tognoni, F., & Pardossi, A. (2005). Modeling Salinity Build-Up in Recirculating Nutrient Solution Culture. *Journal of Plant Nutrition*, 28(3), 431–445. <https://doi.org/10.1081/PLN-200049163>.

- Carmassi, G., Incrocci, L., Malorgio, M., Tognoni, F., & Pardossi, A. (2003). A SIMPLE MODEL FOR SALT ACCUMULATION IN CLOSED-LOOP HYDROPONICS. *Acta Horticulturae*, 614, 149–154. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.614.20>.
- Carmassi, G., Maggini, R., & Incrocci, L. (2004). MODELLING ION CONCENTRATION IN THE CULTURE SOLUTION OF CLOSED-LOOP HYDROPONICS. *Acta Horticulturae*, 654, 251–256. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.654.28>.
- Castellón, H. (2018). Situación de la Plasticultura en Iberoamérica. En H. Castellón (Ed.), XXI CIPA Congress “Agriculture, Plastics and Environment”. Comité Internacional de Plásticos en la Agricultura (CIPA). <https://cipa-plasticulture.com/presentations-to-download-the-cipa-congress-2018>.
- Castilla, N. (2013). *Greenhouse Technology and Management* (N. Castilla, Ed.; 2a ed., Vol. 1). CABI. <https://cabidigitalibrary.org/doi/book/10.1079/9781780641034.0000>.
- Córdova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Céleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-0024.1>.
- Cristofano, F., El-Nakhel, C., Colla, G., Cardarelli, M., Pii, Y., Lucini, L., & Rouphael, Y. (2022). Tracking the Biostimulatory Effect of Fractions from a Commercial Plant Protein Hydrolysate in Greenhouse-Grown Lettuce. *Antioxidants*, 12(1), 107. <https://doi.org/10.3390/antiox12010107>.
- de Anda, J., & Shear, H. (2017). Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/SU9010140>.
- di Dioia, F., & Santamaria, P. (2015). Microgreens: novel fresh and functional food to explore all the value of biodiversity (F. di Dioia & P. Santamaria, Eds.; 1a ed., Vol. 1). *ECOLOGICA srl*. [https://www.researchgate.net/publication/283426636\\_Microgreens](https://www.researchgate.net/publication/283426636_Microgreens).
- di Gioia, F., Renna, M., & Santamaria, P. (2017). Sprouts, Microgreens and “Baby Leaf” Vegetables. *Food Engineering Series*, 403–432. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7018-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7018-6_11).
- di Noia, J. (2014). Defining Powerhouse Fruits and Vegetables: A Nutrient Density Approach. *Preventing Chronic Disease*, 11(6). <https://doi.org/10.5888/PCD11.130390>.
- Dubbeling, M., de Zeeuw, H., & van Veenhuizen, R. (2010). Cities, Poverty and Food, Multi-Stakeholder Policy and Planning in Urban Agriculture (F. Hoekstra & I. Tellam, Eds.; 1a

- ed., Vol. 1). International Development Research Centre (IDRC). <https://ruaf.org/assets/2019/11/Cities-Poverty-and-Food.pdf>.
- Eigenbrod, C., & Gruda, N. (2015). Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 483–498. <https://doi.org/10.1007/S13593-014-0273-Y>.
- Ellinger, M., & Braley, S. (2010). Urban Agriculture in Cuba. *Race, Poverty & the Environment*, 17(2), 14–17. <http://www.jstor.org/stable/41554736>.
- European Commission. (2022). PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. [commission.europa.eu](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/). [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/).
- European Union. (2014). REGLAMENTO (UE) No 752/2014 DE LA COMISIÓN de 24 de junio de 2014 por el que se sustituye el anexo I del Reglamento (CE) no 396/2005 del Parlamento Europeo y del Consejo. *En Official Journal of the European Union* (Núm. 752). European Union Law. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L\\_.2014.208.01.0001.01.SPA&toc=OJ%3AL%3A2014%3A208%3ATOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2014.208.01.0001.01.SPA&toc=OJ%3AL%3A2014%3A208%3ATOC).
- FAO. (2014a). Building a common vision for sustainable food and agriculture PRINCIPLES AND APPROACHES. <https://www.fao.org/3/i3940e/i3940e.pdf>.
- FAO. (2014b). Growing greener cities in Latin America and the Caribbean, an FAO report on urban and peri-urban agriculture in the region. <https://www.fao.org/3/i3696e/i3696e.pdf>.
- FAO. (2019). Water withdrawal by sector. AQUASTAT. [https://tableau.apps.fao.org/views/ReviewDashboard-v1/country\\_dashboard?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y](https://tableau.apps.fao.org/views/ReviewDashboard-v1/country_dashboard?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y).
- FAO. (2021a). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cb7654es>.
- FAO. (2021b). The share of agri-food systems in total greenhouse gas emissions Global, regional and country trends 1990–2019 FAOSTAT Analytical Brief 31. <https://www.fao.org/3/cb7514en/cb7514en.pdf>.
- FAO. (2021c). Crops and livestock products: Lettuce and chicory. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- FAO. (2022). Land statistics and indicators Global, regional and country trends, 2000-2020 FAOSTAT Analytical Brief 48. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc0963en>.

- Fitton, N., Alexander, P., Arnell, N., Bajzelj, B., Calvin, K., Doelman, J., Gerber, J. S., Havlik, P., Hasegawa, T., Herrero, M., Krisztin, T., van Meijl, H., Powell, T., Sands, R., Stehfest, E., West, P. C., & Smith, P. (2019). The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. *Global Environmental Change*, 58, 101944. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2019.101944>.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>.
- Formisano, L., Ciriello, M., Cirillo, V., Pannico, A., El-Nakhel, C., Cristofano, F., Duri, L. G., Giordano, M., Rouphael, Y., & De Pascale, S. (2021). Divergent Leaf Morpho-Physiological and Anatomical Adaptations of Four Lettuce Cultivars in Response to Different Greenhouse Irradiance Levels in Early Summer Season. *Plants*, 10(6), 1179. <https://doi.org/10.3390/plants10061179>.
- García-Sánchez, E. I., Vargas-Canales, J. M., Palacios-Rangel, M. I., Aguilar-Ávila, J., García-Sánchez, E. I., Vargas-Canales, J. M., Palacios-Rangel, M. I., & Aguilar-Ávila, J. (2018). Sistema de innovación como marco analítico de la agricultura protegida en la región centro de México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15(81), 93–116. <https://doi.org/10.11144/JAVERIANA.CDR15-81.SIMA>.
- García-Servin, M., Contreras-Medina, L. M., Torres-Pacheco, I., & Guevara-González, R. G. (2021). Estimation of Nitrogen Status in Plants. En *Nitrate Handbook* (pp. 163–181). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429326806-10>.
- Hamidon, M. H., & Ahamed, T. (2022). Detection of Tip-Burn Stress on Lettuce Grown in an Indoor Environment Using Deep Learning Algorithms. *Sensors*, 22(19), 7251. <https://doi.org/10.3390/s22197251>.
- Hamilton, A. J., Burry, K., Mok, H. F., Barker, S. F., Grove, J. R., & Williamson, V. G. (2014). Give peas a chance? Urban agriculture in developing countries. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 45–73. <https://doi.org/10.1007/S13593-013-0155-8>.
- Hasan, M. R., Tahsin, A. K. M. M., Islam, M. N., Ali, M. A., & Uddain, J. (2017). Growth and Yield of Lettuce (*Lactuca Sativa* L.) Influenced As Nitrogen Fertilizer and Plant Spacing. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 10(06), 62–71. <https://doi.org/10.9790/2380-1006016271>.



- Hayashi, E. (2016). Current Status of Commercial Plant Factories with LED Lighting Market in Asia, Europe, and Other Regions. En *LED Lighting for Urban Agriculture* (pp. 295–308). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0\\_22](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_22).
- Helmy, Mahaidayu, M. G., Nursyahid, A., Setyawan, T. A., & Hasan, A. (2017). Nutrient film technique (NFT) hydroponic monitoring system based on wireless sensor network. 2017 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite, COMNETSAT 2017 - Proceedings, 2018-January, 81–84. <https://doi.org/10.1109/COMNETSAT.2017.8263577>.
- Hernández, E., Timmons, M. B., & Mattson, N. S. (2020). Quality, Yield, and Biomass Efficacy of Several Hydroponic Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Cultivars in Response to High Pressure Sodium Lights or Light Emitting Diodes for Greenhouse Supplemental Lighting. *Horticulturae*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6010007>.
- Hooks, T., Sun, L., Kong, Y., Masabni, J., & Niu, G. (2022). Short-Term Pre-Harvest Supplemental Lighting with Different Light Emitting Diodes Improves Greenhouse Lettuce Quality. *Horticulturae*, 8(5), 435. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050435>.
- Islam, R., Solaiman, A. H. M., Kabir, M. H., Arefin, S. M. A., Azad, M. O. K., Siddiquee, M. H., Alsanius, B. W., & Naznin, M. T. (2021). Evaluation of Lettuce Growth, Yield, and Economic Viability Grown Vertically on Unutilized Building Wall in Dhaka City. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, 14. <https://doi.org/10.3389/FRSC.2021.582431/BIBTEX>.
- Junta de Andalucía. (2022). Cartografía de cultivos protegidos en Almería, Granada y Málaga. Año 2022. <https://www.juntadeandalucia.es/servicios/estadistica-cartografia/actividad/detalle/71049/64106.html#toc-resultados>.
- Kim, M. J., Moon, Y., Tou, J. C., Mou, B., & Waterland, N. L. (2016). Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 49, 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.004>.
- Kozai, T. (2016). Why LED Lighting for Urban Agriculture? En *LED Lighting for Urban Agriculture* (pp. 3–18). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_1).
- Kozai, T., & Niu, G. (2020). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. En *Plant Factory* (pp. 7–34). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00002-9>.

- Kozai, T., & Zhang, G. (2016). Some Aspects of the Light Environment. En LED Lighting for Urban Agriculture (pp. 49–55). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_4).
- Křístková, E., Doležalová, I., Lebeda, A., Vinter, V., & Novotná, A. (2008). Description of morphological characters of lettuce (*Lactuca sativa* L.) genetic resources. *Horticultural Science*, 35(3), 113–129. <https://doi.org/10.17221/4/2008-HORTSCI>.
- Kumar, R., & Singh, V. (2022). Plastics for Crop Protection. En R. Kumar & V. Singh (Eds.), *Plasticulture Engineering and Technology* (1a ed., Vol. 1). CRC Press.
- Labeke, M.-C. van, Conversa, G., Bonasia, A., Lazzizzera, C., Rotonda, P. la, & Elia, A. (2021). Reduction of Nitrate Content in Baby-Leaf Lettuce and Cichorium endivia Through the Soilless Cultivation System, Electrical Conductivity and Management of Nutrient Solution. *Frontiers in Plant Science* | [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org), 12, 645671. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.645671>.
- Li, Q., Li, X., Tang, B., & Gu, M. (2018). Growth Responses and Root Characteristics of Lettuce Grown in Aeroponics, Hydroponics, and Substrate Culture. *Horticulturae*, 4(4), 35. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4040035>.
- López, A., Javier, G.-A., Fenoll, J., Hellín, P., & Flores, P. (2014). Chemical composition and antioxidant capacity of lettuce: Comparative study of regular-sized (Romaine) and baby-sized (Little Gem and Mini Romaine) types. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33(1), 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.10.001>.
- Lu, N., & Mitchell, C. A. (2016). Supplemental Lighting for Greenhouse-Grown Fruiting Vegetables. En LED Lighting for Urban Agriculture (pp. 219–232). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_16).
- Lycoskoufis, I., Kavga, A., Koubouris, G., & Karamousantas, D. (2022). Ultraviolet Radiation Management in Greenhouse to Improve Red Lettuce Quality and Yield. *Agriculture*, 12(10), 1620. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101620>.
- Mampholo, B. M., Maboko, M. M., Soundy, P., & Sivakumar, D. (2016). Phytochemicals and Overall Quality of Leafy Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Varieties Grown in Closed Hydroponic System. *Journal of Food Quality*, 39(6), 805–815. <https://doi.org/10.1111/jfq.12234>.
- Martins, L. M., Silva, E. C. da, Carlos, L. de A., Ferraz, L. de C. L., Maciel, G. M., & Cruz, J. L. (2017). Physical and chemical characteristics of lettuce cultivars grown under three

production systems. *Bioscience Journal*, 621–630. <https://doi.org/10.14393/BJ-v33n3-36546>.

Mattson, N., & Heinrich, J. (2019). Liquid Culture Hydroponic System Operation. *Soilless Culture: Theory and Practice Theory and Practice*, 567–585. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00012-8>.

Mattson, N., & Lieth, J. H. (2019). Liquid Culture Hydroponic System Operation. En *Soilless Culture* (pp. 567–585). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00012-8>.

Mehmeti, G., & Xhoxhi, O. (2014). FUTURE FOOD TRENDS. *Annals. Food Science and Technology*, 15(2), 392–400. <https://afst.valahia.ro/annals-food-science-and-technology-2014/>.

Meteostat. (2023). Almeria Aeropuerto. [meteostat.net](https://meteostat.net). <https://meteostat.net/en/station/08487?t=2023-05-05/2023-05-12>.

Michael, P. R., Johnston, D. E., & Moreno, W. (2020). A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance. *Journal of Measurements in Engineering*, 8(4), 153–166. <https://doi.org/10.21595/jme.2020.21667>.

Mohammed, S. (2018). Introduction. En S. Mohammed (Ed.), *Tomorrow’s Agriculture: “NFT Hydroponics”-Grow within Your Budget* (pp. 1–6). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99202-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99202-0_1).

Molin, E., & Martin, M. (2018). Reviewing the energy and environmental performance of vertical farming systems in urban In cooperation with Node Farm (E. Molin & M. Martin, Eds.; 1a ed., Vol. 1). IVL Swedish Environmental Research Institute . [www.ivl.se](http://www.ivl.se).

Morris, M. C., Wang, Y., Barnes, L. L., Bennett, D. A., Dawson-Hughes, B., & Booth, S. L. (2018). Nutrients and bioactives in green leafy vegetables and cognitive decline. *Neurology*, 90(3), e214–e222. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000004815>.

Mou, B. (2008). Lettuce. En *Vegetables I* (pp. 75–116). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-30443-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30443-4_3).

Muñoz-Huerta, R., Guevara-Gonzalez, R., Contreras-Medina, L., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J., & Ocampo-Velazquez, R. (2013). A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances. *Sensors*, 13(8), 10823–10843. <https://doi.org/10.3390/s130810823>.

- Nicole, C. C. S., Krijn, M. P. C. M., & van Slooten, U. (2019). Postharvest Quality of Leafy Greens Growing in a Plant Factory. En *Plant Factory Using Artificial Light* (pp. 33–43). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00005-1>.
- Noumedem, J. A. K., Djeussi, D. E., Hritcu, L., Mihasan, M., & Kuete, V. (2017). *Lactuca sativa*. En *Medicinal Spices and Vegetables from Africa* (pp. 437–449). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809286-6.00020-0>.
- Orsini, F., Kahane, R., Nono-Womdim, R., & Gianquinto, G. (2013). Urban agriculture in the developing world: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 2013 33:4, 33(4), 695–720. <https://doi.org/10.1007/S13593-013-0143-Z>.
- Orsini, F., Pennisi, G., Michelon, N., Minelli, A., Bazzocchi, G., Sanyé-Mengual, E., & Gianquinto, G. (2020). Features and Functions of Multifunctional Urban Agriculture in the Global North: A Review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 228. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2020.562513/BIBTEX>.
- Padilla-Bernal, L. E., Reyes-Rivas, E., & Pérez-Veyna, Ó. (2012). Evaluación de un cluster bajo agricultura protegida en México. *Contaduría y administración*, 57(3), 219–237. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-10422012000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-10422012000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es).
- Paucek, I., Appolloni, E., Pennisi, G., Quaini, S., Gianquinto, G., & Orsini, F. (2020). LED Lighting Systems for Horticulture: Business Growth and Global Distribution. *Sustainability*, 12(18), 7516. <https://doi.org/10.3390/su12187516>.
- Petropoulou, A. S., van Marrewijk, B., de Zwart, F., Elings, A., Bijlaard, M., van Daalen, T., Jansen, G., & Hemming, S. (2023). Lettuce Production in Intelligent Greenhouses—3D Imaging and Computer Vision for Plant Spacing Decisions. *Sensors*, 23(6), 2929. <https://doi.org/10.3390/s23062929>.
- Plank, C., & Kissel, D. (1989). *Plant Analysis Handbook for Georgia* (C. Plank & D. Kissel, Eds.; 1a ed., Vol. 1). Cooperative Extension Service, University of Georgia College of Agriculture. <http://aesl.ces.uga.edu/publications/plant/>.
- Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., & MacCleery, B. (2014). *Greenhouse Design and Control*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17391>.
- Pradhan, B. B., Chaichaloempreecha, A., & Limmeechokchai, B. (2019). GHG mitigation in Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) sector in Thailand. *Carbon Balance and Management*, 14(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0119-7>.

- Quintero-Arias, D. G., Acuña-Caita, J. F., Asensio, C., & Valenzuela, J. L. (2021). Ultraviolet Transparency of Plastic Films Determines the Quality of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Grown in a Greenhouse. *Agronomy*, 11(2), 358. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020358>.
- Richa, A., Fizir, M., & Touil, S. (2021). Advanced monitoring of hydroponic solutions using ion-selective electrodes and the internet of things: a review. *Environmental Chemistry Letters* 2021 19:4, 19(4), 3445–3463. <https://doi.org/10.1007/S10311-021-01233-8>.
- Ruíz, F., Ruíz, J., Hernández, B., García, R., & Valadez, A. (2019). Extracción y cuantificación de clorofila en hojas comestibles del estado de Tabasco. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4, 891–896. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/10/126.pdf>.
- Sadzawka, A., Grez, R., Carrasco, M., & Mora, M. (2004). Métodos de análisis de tejidos vegetales. [http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4\\_jornada/Manual\\_chilenos\\_tejido\\_vegetal.pdf](http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4_jornada/Manual_chilenos_tejido_vegetal.pdf).
- Sago, Y., Watanabe, N., & Minami, Y. (2018). Zinc biofortification of hydroponic baby leaf lettuce grown under artificlighting with elevated wind speed and root zone temperature. *Journal of Agricultural Meteorology*, 74(4), 173–177. <https://doi.org/10.2480/AGRMET.D-17-00048>.
- Sahin, O. (2023). Growing media effect on essential and non-essential mineral composition of lettuce. *Journal of Plant Nutrition*, 46(5), 665–674. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2087087>.
- Saini, R. K., Ko, E. Y., & Keum, Y. S. (2017). Minimally processed ready-to-eat baby-leaf vegetables: Production, processing, storage, microbial safety, and nutritional potential. *Food Reviews International*, 33(6), 644–663. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1204614>.
- Sanyé-Mengual, E., Cerón-Palma, I., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., & Rieradevall, J. (2015). Integrating Horticulture into Cities: A Guide for Assessing the Implementation Potential of Rooftop Greenhouses (RTGs) in Industrial and Logistics Parks. *Journal of Urban Technology*, 22(1), 87–111. <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942095>.
- Shahbandeh, M. (2022, marzo 10). Forecasted market value of LED grow lights used in indoor farming worldwide from 2020 to 2030. *statista.com*. <https://www.statista.com/statistics/803331/global-led-grow-light-market-value/>.

- Shahbandeh M. (2022, junio 20). Forecast market value of organic food markets worldwide in 2021 to 2026. *statista.com*. <https://www.statista.com/statistics/869052/global-organic-food-and-beverage-market-value/>.
- Shahbandeh, M. (2023, marzo 13). Projected vertical farming market worldwide from 2020 to 2026. *statistica.com*. <https://www.statista.com/statistics/487666/projection-vertical-farming-market-worldwide/>.
- SharathKumar, M., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2020). Vertical Farming: Moving from Genetic to Environmental Modification. *Trends in Plant Science*, 25(8), 724–727. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.05.012>.
- Shatilov, M. V, Razin, A. F., & Ivanova, M. I. (2019). Analysis of the world lettuce market. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 395(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012053>.
- Smoleń, S., Kowalska, I., Czernicka, M., Halka, M., Kęska, K., & Sady, W. (2016). Iodine and Selenium Biofortification with Additional Application of Salicylic Acid Affects Yield, Selected Molecular Parameters and Chemical Composition of Lettuce Plants (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01553>.
- Smoleń, S., Kowalska, I., Kováčik, P., Sady, W., Grzanka, M., & Kutman, U. B. (2019). Changes in the Chemical Composition of Six Lettuce Cultivars (*Lactuca sativa* L.) in Response to Biofortification with Iodine and Selenium Combined with Salicylic Acid Application. *Agronomy*, 9(10), 660. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100660>.
- Smolik, B., Rożek, S., Strzetelski, P., & Ledwożyw-Smoleń, I. (2011). Preliminary evaluation of the influence of soil fertilization and foliar nutrition with iodine on the effectiveness of iodine biofortification and mineral composition of carrot. *Journal of Elemntology*, 1/2011. <https://doi.org/10.5601/jelem.2011.16.1.103-114>.
- Son, J. E., Kim, H. J., & Ahn, T. I. (2020). Hydroponic systems. *En Plant Factory* (pp. 273–283). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00020-0>.
- Sonneveld, C. (2000). Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture [PhD]. WUR.
- Sonneveld, C., Baas, Nijssen, & de Hoog. (1999a). Salt tolerance of flower crops grown in soilless culture. *Journal of Plant Nutrition*, 22(6), 1033–1048. <https://doi.org/10.1080/01904169909365692>.

- Sonneveld, C., Voogt, W., & Spaans, L. (1999b). A UNIVERSAL ALGORITHM FOR CALCULATION OF NUTRIENT SOLUTIONS. *Acta Horticulturae*, 481, 331–340. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.481.38>.
- Söylemez, S. (2021). The impact of different growth media and ammonium-nitrate ratio on yield and nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* var. *longifolia*). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(4), 12540. <https://doi.org/10.15835/nbha49412540>.
- Still, D. W. (2007). Lettuce. En *Vegetables* (pp. 127–140). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-34536-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-34536-7_2).
- Štreimikienė, D., Baležentis, T., Volkov, A., Ribašauskienė, E., Morkūnas, M., & Žičkienė, A. (2022). Negative effects of covid-19 pandemic on agriculture: systematic literature review in the frameworks of vulnerability, resilience and risks involved. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35(1), 529–545. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1919542>.
- Sularz, O., Smoleń, S., Koronowicz, A., Kowalska, I., & Leszczyńska, T. (2020). Chemical Composition of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Biofortified with Iodine by KIO<sub>3</sub>, 5-Iodo-, and 3,5-Diiodosalicylic Acid in a Hydroponic Cultivation. *Agronomy*, 10(7), 1022. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071022>.
- Takahama, M., Kawagishi, K., Sugawara, A., Araki, K., Munekata, S., Nicola, S., & Araki, H. (2019). Classification and screening of baby-leaf vegetables on the basis of their yield, external appearance and internal quality. *Horticulture Journal*, 88(3), 387–400. <https://doi.org/10.2503/HORTJ.UTD-033>.
- Takeshima, H., & Joshi, P. (2019). Protected Agriculture, Precision Agriculture, and Vertical Farming Brief Reviews of Issues in the Literature Focusing on the Developing Region in Asia (Núm. 01814; 1). <https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/133152/filename/133363.pdf>.
- Thormundsson, B. (2023a, enero 5). LED penetration rate of the global lighting market based on sales from 2012 to 2030. [statista.com. https://www.statista.com/statistics/246030/estimated-led-penetration-of-the-global-lighting-market/](https://www.statista.com/statistics/246030/estimated-led-penetration-of-the-global-lighting-market/).

- Thormundsson, B. (2023b, marzo 17). LED lighting: global market size 2020-2026. *statista.com*. <https://www.statista.com/statistics/753939/global-led-luminaire-market-size/>.
- Tiseyra, B., Quezada, G., & López, M. (2022). Cambios sociales provocados por el modelo de Agricultura Almeriense [en prensa]. En B. Tiseyra, G. Quezada, & M. López (Eds.), *I Seminario Internacional Riales “Acciones de (I+D+i) para implementar una Agricultura más Sostenible, Equitativa y Resiliente al Cambio Climático”*. Red Iberoamericana de Agricultura Resiliente Equitativa y sostenible (RIARES). <http://www2.ual.es/riares/>.
- Travieso, L. L., Leon, A. P., Logegaray, V. R., Frezza, D., & Chiesa, A. (2016). Loose Leaf Lettuce Quality Grown in Two Production Systems. *European Scientific Journal, ESJ*, 12(30), 55. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n30p55>.
- Tsukagoshi, S., & Shinohara, Y. (2020). Nutrition and nutrient uptake in soilless culture systems. En *Plant Factory* (pp. 221–229). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00014-5>.
- Turner, E. R., Luo, Y., & Buchanan, R. L. (2020). Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: A review. *Journal of Food Science*, 85(4), 870–882. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15049>.
- United Nations. (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. <https://population.un.org/wup/Download/>.
- United Nations. (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>.
- United Nations. (2022a). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3. [www.unpopulation.org](http://www.unpopulation.org).
- United Nations. (2022b). *World Population Prospects 2022, Online Edition*. Department of Economic and Social Affairs Population Division. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/MostUsed/>.
- U.S. Federal Statistical System. (2022). *U.S. and World Population Clock*. U.S. Census Bureau. <https://www.census.gov/popclock/world>.
- Valera, D., Belmonte, L., Molina, F., & López, A. (2014). *Los invernaderos de Almería: análisis de su tecnología y rentabilidad* (Cajamar Caja Rural, Ed.; 1a ed., Vol. 1). Cajamar Caja Rural.



- van Os, E., & Kromwijk, A. (2021). Advances in soilless culture of ornamentals. *Advances in horticultural soilless culture*, 401–416. <https://doi.org/10.1201/9781003048206-18>.
- Voogt, W., & Bar-Yosef, B. (2019). Water and Nutrient Management and Crops Response to Nutrient Solution Recycling in Soilless Growing Systems in Greenhouses. *En Soilless Culture* (pp. 425–507). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00010-4>.
- Voogt, W., van Dijk, P., Douven, F., & van der Maas, R. (2014). Development of a soilless growing system for blueberries (*vaccinium corymbosum*): Nutrient demand and nutrient solution. *Acta Horticulturae*, 1017, 215–221. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2014.1017.27>.
- Voutsinos, O., Mastoraki, M., Ntatsi, G., Liakopoulos, G., & Savvas, D. (2021). Comparative Assessment of Hydroponic Lettuce Production Either under Artificial Lighting, or in a Mediterranean Greenhouse during Wintertime. *Agriculture*, 11(6), 503. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060503>.
- Wada, T. (2019). Theory and Technology to Control the Nutrient Solution of Hydroponics. *En Plant Factory Using Artificial Light* (pp. 5–14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00001-4>.
- Wang, S. (1999). Air speed profiles in a naturally ventilated greenhouse with a tomato crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96(4), 181–188. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00063-5).
- Wunsch Nils. (2021, septiembre 21). Size of the functional food market worldwide 2019-2027. [statista.com. https://www.statista.com/statistics/1264165/global-functional-food-market-size/](https://www.statista.com/statistics/1264165/global-functional-food-market-size/).
- Yang, X., Gil, M. I., Yang, Q., & Tomás-Barberán, F. A. (2022). Bioactive compounds in lettuce: Highlighting the benefits to human health and impacts of preharvest and postharvest practices. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(1), 4–45. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12877>.
- Yildirim, E., Kul, R., Turan, M., Ekinci, M., Alak, G., & Atamanalp, M. (2016). Effect of nitrogen and fish manure fertilization on growth and chemical composition of lettuce. 020021. <https://doi.org/10.1063/1.4945847>.
- Zandvakili, O. R., Barker, A. V., Hashemi, M., Etemadi, F., & Autio, W. R. (2019). Comparisons of commercial organic and chemical fertilizer solutions on growth and composition of lettuce. *Journal of Plant Nutrition*, 42(9), 990–1000. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1589505>.

- Zhang, L., Su, W., Tao, R., Zhang, W., Chen, J., Wu, P., Yan, C., Jia, Y., Larkin, R. M., Lavelle, D., Truco, M.-J., Chin-Wo, S. R., Michelmore, R. W., & Kuang, H. (2017). RNA sequencing provides insights into the evolution of lettuce and the regulation of flavonoid biosynthesis. *Nature Communications*, 8(1), 2264. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02445-9>.
- Zhen, L. (2018). Plasticulture in China. En L. Zhen (Ed.), XXI CIPA Congress “Agriculture, Plastics and Environment”. Comité Internacional de Plásticos en la Agricultura (CIPA). <https://cipa-plasticulture.com/presentations-to-download-the-cipa-congress-2018>.
- Zissis, G., Bertoldi, P., & Serrenho, T. (2021). Update on the Status of LED-Lighting world market since 2018. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC122760>.
- Zotarelli, L., Dukes, M., Romero, C., Migliaccio, K., & Morgan, K. (2010, febrero). Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). Agricultural and Biological Engineering Department, UF/IFAS Extension.