

Evaluación agronómica y fisiológica de cinco cultivares de lechuga bajo dos sistemas de agricultura protegida en el departamento de Magdalena, Colombia

Agronomic and Physiological Evaluation of Five Lettuce Cultivars Under Two Protected Agricultura Systems in the Departamento of Magdalena, Colombia

Rommel Igor León-Pacheco^{1*} orcid.org/0000-0002-9928-5282
Jorge Eliécer Jaramillo-Noreña² orcid.org/0000-0003-2515-5706
Martha Liliana Montes-Pérez¹ orcid.org/0000-0002-6832-1252
Alfonso Rafael Orozco-Guerrero¹ orcid.org/0000-0001-6297-8918
Francisco Fabián Carrascal-Pérez¹ orcid.org/0000-0002-3999-049X
Edwin Andrés Villagran Munar³ orcid.org/0000-0003-1860-5932
Andrea Onelia Rodríguez-Roa³ orcid.org/0000-0001-9279-3607

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA
Centro de Investigación Caribe. Magdalena, Colombia.

²Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA
Centro de Investigación La Selva. Rionegro - Antioquia, Colombia.

³Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA
Centro de Investigación Tibaitatá. Bogotá, Mosquera - Cundinamarca, Colombia.

*Autor de correspondencia: rleon@agrosavia.co

Resumen

Objetivo. Evaluar agronómica y fisiológicamente el desarrollo de cultivares de lechuga en condiciones protegidas. **Materiales y métodos.** Bajo un diseño en bloques completamente al azar se evaluó el crecimiento, las características agronómicas y fisiológicas de cinco cultivares de lechuga en dos sistemas de agricultura protegida y en condiciones de campo abierto. **Resultados.** Los cultivares White Boston y Romana Parris Island Coss en casa malla

Abstract

Objective. To agronomically and physiologically evaluate the development of lettuce cultivars under protected conditions. **Materials and methods.** Under a completely randomized block design, the growth, agronomic and physiological characteristics of five lettuce cultivars were evaluated in two protected agriculture systems and in open field conditions. **Results.** The cultivars White Boston and Romana Parris Island Coss in house mesh and open field had the highest values in physiological variables

y campo abierto tuvieron los mayores valores en variables fisiológicas (fotosíntesis cerca de $25.00 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$, transpiración mayor a $7.00 \text{ mmol agua m}^2/\text{s}$ y conductancia estomática mayor a $1.50 \text{ mmol agua m}^2/\text{s}$), lo que provocó los mayores valores en biomasa fresca área y raíz (95.90 y 3.55 g, respectivamente). La variable fotosíntesis en plantas sembradas en campo abierto alcanzaron valores de $22.29 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$, comparado con casa malla e invernadero con 17.14 y $14.16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$. **Conclusiones.** La capacidad de estos cultivares de lechuga a tolerar estrés por calor se debió a mecanismos morfológicos y fisiológicos, entre ellos, hoja de larga vida, control estomático y alto potencial fotosintético.

Palabras clave

Lactuca sativa, intercambio gaseoso, fisiología y productividad.

(Photosynthesis close to $25.00 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$, transpiration greater than $7.00 \text{ mmol water m}^2/\text{s}$ and stomatal conductance greater than $1.50 \text{ mmol water mmol agua m}^2/\text{s}$), which caused the highest values in fresh biomass area and root (95.90 and 3.55 g). The photosynthesis variable in plants sown in the open field reached values of $22.29 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$, compared with house mesh and greenhouse with 17.14 and $14.16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$. **Conclusions.** The ability of these lettuce cultivars to tolerate heat stress was due to morphological and physiological mechanisms, including long-lived leaf, stomatal control, and high photosynthetic potential.

Keywords

Gas Exchange, physiology, *Lactuca sativa* L. and productivity.

Introducción

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es uno de los cultivos más producidos en el mundo, debido a su fácil preparación en la alimentación humana, además, su sabor y características nutricionales contribuyen a incrementar la nutrición en las personas (Filho *et al.*, 2009).

El cultivo de lechuga en Colombia se caracteriza por poseer bajo consumo *per cápita*, con valores de 16.6 g/día y 9.05% de personas que consumen esta especie (ENSIN, 2005). A pesar de ello, para 2019 se cosecharon en el país 4829 ha, con una producción total de 101 632 t, correspondiente a un rendimiento promedio de 21.05 t/ha (AGRONET, 2021), producción que proviene del interior del país, lo que deja vulnerable a la región de la costa en términos de seguridad agroalimentaria y dependiente de la producción de otros pisos térmicos. Aunque existen variedades de lechuga que se adaptan a climas templados y otras a climas cálidos (Qin *et al.*, 2007); en general, es una especie que se adapta a las temperaturas bajas, las óptimas para el crecimiento son 18 a 23 °C durante el día y 7 a 15 °C durante la noche, la temperatura máxima puede ser de 30 °C y la mínima que puede tolerar es hasta -6 °C. Adicionalmente, la productividad de la lechuga está en función de la interacción entre el genotipo y las condiciones ambientales (Quintero *et al.*, 2000).

El cultivo en ambiente protegido es una técnica utilizada por productores hortofrutícolas, lo que permite la protección de las plantas frente a la acción de agentes externos como altas y bajas temperaturas, precipitaciones intensas y fuertes vientos. Este tipo de ambiente funciona como una alternativa tecnológica que promueve la racionalización de los factores de producción, en la que reduce la utilización de agroquímicos y minimiza

la incidencia de patógenos e insectos (Andriolo, 2000). Se demostraron las ventajas del cultivo protegido en regiones de clima tropical, como Velázquez *et al.* (2014) quienes encontraron mayores pesos de cabeza y rendimiento en el cultivo de lechuga; Kavga *et al.* (2018), por su parte, identificaron bajo condiciones protegidas que las diferentes respuestas fisiológicas entre lechuga y rúcula están asociadas al efecto de factores ambientales como la intensidad de la radiación solar, temperatura, humedad y posibles características inherentes a cada cultivar.

Por lo anteriormente descrito, surge esta investigación con el objeto de identificar cultivares de lechuga que se adapten agrónomica y fisiológicamente a condiciones de altas temperaturas, y que permitan producir intensivamente frente a condiciones de agricultura protegida en la región de la costa colombiana.

Materiales y métodos

Descripción del experimento

Se evaluaron los siguientes cultivares de lechuga: Falbala (tipo sin cabeza y hojas sueltas), Simson (tipo sin cabeza y hojas sueltas), Romana Parris Island Coss (tipo romana), White Boston (tipo mantequilla) proveniente de la casa comercial Impulsores Internacionales y Astra (tipo americana con cabeza) de la casa comercial Arroyave.

Las plantas fueron cultivadas en un lote experimental de Agrosavia, CI Caribia y zona bananera (Magdalena, Colombia), localizada, según coordenadas geográficas, a 10°47' latitud norte y 74°10' longitud oeste, y 18 msnm a temperatura media de 28 °C, humedad relativa de 82% y precipitación media anual de 1 280 mm, lo que lo ubica en la zona de vida de bosque seco tropical (Bs-T).

Las semillas se sembraron en bandejas de germinación con sustrato canadiense, previamente desinfectado con yodo a 5%. Las plántulas se trasplantaron a los 10 días de la siembra (28 de agosto de 2020) en parcelas de seis surcos con dos metros de longitud cada uno, una densidad de siembra de 30 cm entre planta y 30 cm entre surco para un total de 42 plantas por unidad experimental. Se utilizó riego por goteo con mangueras de goteo con descarga de 4 l/h y riegos hasta mantener el suelo a capacidad de campo (10-20 centibares) a través de tensiómetros marca Irrrometer. El control de malezas se realizó manualmente y el control de insectos plaga y enfermedades fue permanentemente en todo el experimento mediante control químico. A través del análisis de suelo y con base en las demandas nutricionales para el cultivo de lechuga se realizó la fertilización (120-140 kg/ha N, 30-50 kg/ha P₂O₅ y 180-230 kg/ha K₂O) a través del fertirriego durante todo el ciclo del cultivo. La cosecha se realizó 30 días después del trasplante.

Diseño experimental

Se aplicó en bloques completamente al azar bajo un arreglo de tratamiento en parcelas divididas, con tres repeticiones, la parcela principal estuvo conformada por tres sistemas productivos (invernadero, casa malla y campo abierto) y la parcela secundaria por cinco cultivares de lechuga. Las estructuras de agricultura protegida utilizadas fueron diseñadas



para las condiciones de clima local a partir del uso de herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD). Metodología ampliamente utilizada para desarrollar el estudio de la ventilación natural en edificios agrícolas (Bournet y Boulard, 2010). La descripción de las principales características arquitectónicas de las dos estructuras de agricultura protegida evaluadas en este trabajo de investigación se resume en el cuadro 1.

Comportamiento climático

En cada estructura se instalaron cuatro datalogger marca WatchDog serie A, con los cuales se registró temperatura (°C) y humedad relativa (%) diaria. La radiación fotosintéticamente activa (PAR) se midió con una barra cuántica MQ-306: Line Quantum with 6 Sensors and Handheld Meter en tres horas del día: 8:00, 12:00 y 15:00, en tres puntos de cada estructura.

Cuadro 1

Características de las estructuras de agricultura protegida usadas en la investigación

Tipo de estructura	Descripción general	Prototipo real
Invernadero	<p>Área cubierta: 500 m². Forma de la cubierta: plana con alturas asimétricas. Tipo de material de la cubierta: polietileno y pantalla térmica con nivel de sombreado de 30%. Área de ventilación: 315 m². Ancho: 25.0 m. Largo: 20.0 m. Altura mínima: 2.5 m. Altura máxima: 8.5 m. Configuración de ventilación: lateral, frontal y cenital. Tipo de malla antiinsectos utilizada: 40 mesh (16.1 hilos/cm × 10.1 hilos/cm).</p>	
Casa malla	<p>Área cubierta: 740 m². Forma de la cubierta: techo plano en los costados y tipo capilla en la zona central, con alturas diferenciadas. Tipo del material de cubierta y de las fachadas y paredes laterales: malla antiinsectos de 40 mesh (16.1 hilos/cm × 10.1 hilos/cm). Ancho: 37.0 m. Largo: 20.0 m. Altura mínima: 3.0 m. Altura máxima: 8.0 m.</p>	

Variables evaluadas

- **Fisiológicas:** Grado de verdor (unidad spad). Se evaluó con el medidor de clorofila Spad 502 Konica Minolta. Se tomaron dos plantas y dos hojas/planta de la quinta hoja totalmente expandida en sentido ápice base, por cada unidad

experimental al mes después del trasplante. Fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$), conductancia estomática ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$) y transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^2/\text{s}$) fueron las variables medidas en las horas comprendidas desde las 10:00 hasta las 13:00, utilizando un analizador infrarrojo de Gases CI Systems, en tres hojas/planta, de la quinta hoja totalmente expandida en sentido ápice base para cada unidad experimental quince días después de la siembra.

- *Agronómicas*: Número de hojas. Se contó el número de hojas al final de la cosecha de seis plantas del surco central por unidad experimental, desde la parte basal de la planta hasta la apical del tallo. Peso de follaje y raíces (g/planta): en cada unidad experimental se cosecharon las plantas del surco central y se determinó el peso de raíces (g) y del follaje (g). Biomasa seca aérea y de raíces (g): se obtuvo el peso fresco de tres plantas y luego fueron llevadas al laboratorio, donde se secaron en estufa a 60 °C por 72 horas; una vez que estuvieron secas y alcanzaron el peso constante se separaron en vástago y raíz para la obtención del peso seco (g).
- *Poscosecha*: pH. En cada fruto se separó una porción de 8 g y se depositó en una procesadora de alimentos con 40 ml de agua destilada. Obtenida la mezcla se filtró y del líquido resultante se tomaron 20 ml, a esta solución se le midió el pH sumergiendo el electrodo hasta que registrara el dato en pantalla del potenciómetro. Sólidos solubles totales (°Brix): con ayuda de un exprimidor se extrajo jugo suficiente (5 a 7 gotas) para depositar en el prisma o superficie de muestreo del refractómetro.

Análisis de los resultados

Previo comprobación exigidos por el análisis de la varianza, se empleó el modelo lineal aditivo de un diseño en parcelas divididas y cuando hubo diferencias entre promedios se aplicó comparación de prueba de medias de Tukey, con un nivel de significancia de 5% usando el programa R studio. Para las variables que no dieron diferencias significativas en los efectos de la interacción, se realizó un *heat map* con el programa R studio 1.4 de 2017.

Resultados

Comportamiento de las variables climáticas

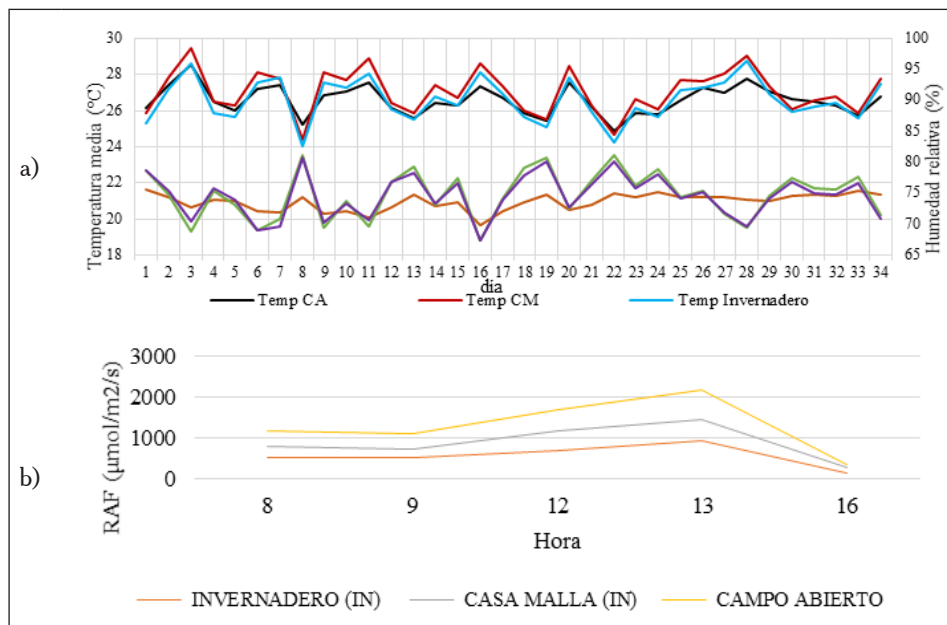
Durante el periodo de evaluación la temperatura media en campo abierto fue de 26.6 °C, en invernadero de 26.7 °C y casa malla 27.1 °C. La mayoría de los días la temperatura en casa malla (Temp. CM) estuvo por encima que en campo abierto (Temp. CA), en promedio 0.5 °C con valores por encima a 1 °C en los días de máxima temperatura. La temperatura del invernadero (Temp. Invernadero) se mantuvo más cercana a la del exterior (figura 1), siendo los días máximos los de mayor diferencia, hasta de 1 °C por encima. Por su parte, la humedad relativa para las estructuras de agricultura protegida, por ser espacios cerrados con una ventilación menor que campo abierto, provocó un balance de energía negativo con valores mínimos y máximos de 67.06-81.25% para casa malla,

67.00-80.87% para invernadero y campo abierto 69.91-75.71%. Este comportamiento tuvo implicaciones fisiológicas en las plantas, ya que, dentro de las estructuras, las temperaturas y la humedad relativa más alta provocó efectos en las variables asociadas al intercambio gaseoso. El comportamiento esperado es que las estructuras tengan un ambiente microclimático similar al de campo abierto, de tal forma que no se afecte negativamente a las plantas y se pueda producir durante todo el año (figura 1a).

La radiación fotosintéticamente activa es muy importante en la fisiología de las plantas, ya que de ello depende la mayor eficiencia fotosintética, a pesar de ello, se puede observar que durante el día la radiación en invernadero y casa malla representó 42 y 68% de los valores registrados en campo abierto, con los menores valores a las 8:00 h con 519.36, 789.50 y 1 156.00 y valores máximos a las 13:00 h con 922.75, 1 450.00 y 2 168.00 $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$ para invernadero, casa malla y campo abierto, respectivamente (figura 1b).

Figura 1

Comportamiento promedio diario de las variables de temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$):
 a) humedad relativa (%) y b) radiación fotosintéticamente activa ($\mu\text{mol m}^2/\text{s}$)



Evaluación ecofisiológica

Efecto de la interacción tratamientos-ambiente por cultivar

La variable transpiración destacó significativamente para los tratamientos campo abierto con el cultivar White Boston y casa malla con Falbala, con valores de 8.6 y 7.1 $\text{mmol agua m}^2/\text{s}$, respectivamente; mientras que el cultivar Astra, dentro del invernadero, tuvo

la menor tasa con 5.1 mmol agua m²/s (cuadro 2). Este comportamiento se observa en todas las variables asociadas al intercambio gaseoso, ya que la mayor fotosíntesis estuvo en plantas de White Boston sembradas en campo abierto (cerca de 25.0 μmol CO₂ m²/s) y la mayor conductancia estomática entre casa malla y Falbala (mayor a 1.5 mmol agua m²/s); contrariamente ocurrió con Astra en el invernadero con la menor tasa de fotosíntesis y conductancia estomática con valores por debajo de 5.0 μmol CO₂ m²/s y 0.5 mmol agua m²/s, respectivamente (figura 2 a, b y c).

El valor *spad* varió significativamente, destacando plantas del cultivar Romana Parris Island Coss en casa malla e invernadero y Astra en campo abierto con valores de 24, 23, 17, 67 y 16.8, respectivamente, comparado con el resto de las interacciones que variaron entre 4.9 y 15.0 *spad*. No se encontraron relaciones entre las variables *spad* y fotosíntesis, lo que indica que, para el caso de la especie de la lechuga, la coloración de la variedad juega un papel importante en la interacción, ya que la tendencia fue a tener los mayores valores de lechugas con los colores de hojas más verde (Romana Parris Island Coss, Astra y Falbala) en todas las estructuras.

Las variables asociadas a la agronomía del cultivo variaron significativamente en casa malla para los cultivares White Boston y Romana Parris Island Coss con el mayor peso fresco de raíz (3.72 y 3.55 g), lo que permitió que las plantas alcanzaran mayores números de hojas (31.78 y 19.72); por ende, el mayor peso fresco de hojas por planta (124.01 y 95.9 g) y mayor diámetro de tallo 20.7 y 16.3 cm (cuadro 2) con la misma tendencia para la biomasa seca de hoja y raíz (4-8 g peso seco de hoja y 0.25-0.50 g peso seco de raíz) (figura 2f).

A pesar de lo expuesto anteriormente, comercialmente destacaron, en todos los ambientes, los cultivares Romana Parris Island Coss (lechuga tipo romana) y Falbala (lechuga sin cabeza y hojas sueltas). Este último cultivar tuvo valores bajos en las variables asociadas a la agronomía del cultivo, destacando para casa malla con 12 hojas, 28.64 g de biomasa aérea, 1.99 g de biomasa de raíz y 10.11 cm en el diámetro del tallo, y con los mayores valores para sólidos solubles totales en casa malla con valores superior a los 4 °Brix (figura 2d), lo que se podría inferir una calidad culinaria superior comparadas con el resto de cultivares en las diferentes estructuras de agricultura protegida.

El pH varió significativamente, pero biológicamente no se observaron muchas diferencias entre los diferentes cultivares de cada estructura de agricultura protegida, con valores que oscilaron entre 6.03 y 6.67.

Finalmente, se debe destacar que las plantas de los cultivares White Boston y Romana Parris Island Coss en casa malla y campo abierto tuvieron los mayores valores en variables asociadas al intercambio gaseoso, lo que provocó que los fotoasimilados se distribuyeran positivamente en las biomásas frescas aérea y raíz, respectivamente. Mientras que el cultivar Falbala, a pesar de no alcanzar las mayores biomásas aéreas, destacó para la variable conductancia estomática, y usando los fotoasimilados para la mayor producción de azúcares, tal como se observa en los sólidos solubles totales.

Cuadro 2

Comportamiento promedio para variables fisiológicas, agronómicas y asociadas a la calidad en tres ambientes productivos y cinco cultivares de lechuga

A	Cultivares	E	SPAD	NH	PFH	PFR	DT	pH
CM	White Boston	6.56bcde	5.53 ef	31.78 a	124.01 a	3.72 a	20.7 a	6.43 ab
CA	White Boston	8.58 a	8.03 cdef	28.00 a	62.96bcde	1.95 bcd	15.33 abc	6.73 a
CA	Simson	7.66 abc	9.07 cdef	20.00 b	76.79 bc	2.68 abcd	10.11 cde	6.63 a
CA	RPIC	7.71 abcd	15.07 bc	19.78 b	82.38 abc	2.93 abc	12.06 bcde	6.60 a
CM	RPIC	6.43bcde	24.23 a	19.72 b	95.9 ab	3.55 ab	16.33 ab	6.60 a
I	White Boston	6.25 cde	6.77 def	16.39 bc	48.16 cdef	2.32 abcd	10.00 cde	6.23 ab
CM	Simson	7.06 abcd	4.9 f	15.56 bcd	90.01 abc	2.39 abcd	15.11 bc	6.25 ab
I	RPIC	6.92 abcd	17.67 ab	12.78 cde	47.39 cdef	2.38 abcd	9.00 de	6.57 a
CA	Astra	6.82 abcde	16.8 b	12.33 cde	74.04 bc	1.33 cd	13.11 bcd	6.67 a
CM	Falbala	8.04 ab	11.33 bcdef	12.00 cde	28.64 def	1.99 bcd	10.11 cde	6.03 b
CM	Astra	6.02 de	10.43 bcdef	11.78 cde	67.95 bcd	1.18 d	13.84 bcd	6.27 ab
CA	Falbala	7.83 abc	15.17 bc	11.33 cde	12.41 f	1.42 cd	7.00 e	6.33 ab
I	Falbala	6.13 cde	12.67 bcde	9.92 de	23.15 ef	1.64 cd	8.75 de	6.40 ab
I	Astra	5.13 e	13.03 bcd	9.5 e	47.36 cdef	1.08 d	11.50 bcde	6.70 a
I	Simson	6.47 bcde	5.97 def	9.33 e	25.86 def	1.50 cd	7.50 e	6.45 ab
EEM		0.33	1.4	1.07	8.08	0.31	1.02	0.1
P		0.0174	0.0011	<0.0001	0.0008	0.0456	0.0033	0.0248

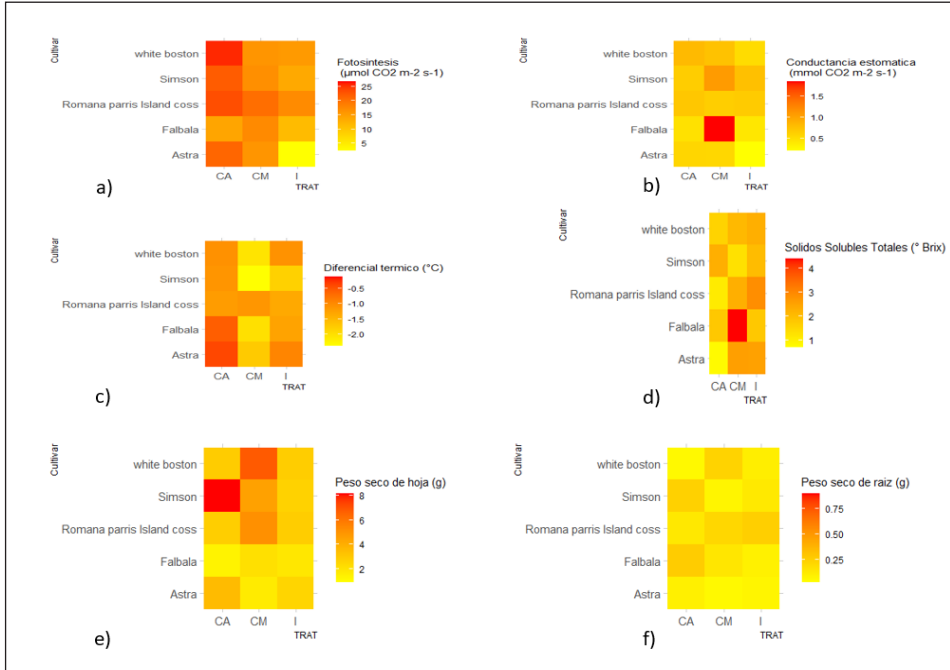
a,b,c,d,e,f: Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (Tukey, $P=0.05$). EEM: Error estándar de la media. P: valor de la probabilidad. A: Ambiente. CA: Campo abierto. CM: Casa malla. I: Invernadero. RPIC: Romana Parris Island Coss. E: Transpiración ($\text{mmol agua m}^2/\text{s}$). SPAD: Valor Spad. NH: Número de hojas. PFH: Peso fresco de hojas (g). PFR: Peso fresco de raíz (g). DT: Diámetro del tallo (cm).

Efecto de los tipos de sistemas productivos

La variable fotosíntesis en las plantas sembradas en campo abierto destacaron significativamente con valores de $22.29 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$, comparado con casa malla e invernadero con 17.14 y $14.16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. La tendencia fue a que la mayoría de los cultivares se destacaron a campo abierto para la variable transpiración (cuadro 3) y conductancia estomática (figura 3b y c). Este comportamiento se puede explicar por la mayor temperatura y menor radiación fotosintéticamente activa (figura 1 y 2) dentro de las estructuras, lo que provocó que las plantas cerraran parcialmente los estomas para evitar las pérdidas por transpiración, afectando la tasa de fotosíntesis.

Figura 2

Mapa de calor para variables asociadas a la fisiología y agronomía del cultivo en tres estructuras de agricultura protegida y cinco cultivares de lechuga



Fisiología del cultivo: a) fotosíntesis, b) conductancia estomática y c) diferencial térmico.

Agronomía del cultivo: d) sólidos solubles totales, e) peso seco de hoja y f) peso seco de raíz.

Efecto de los cultivares

A pesar que la conductancia estomática y el diferencial térmico tuvieron comportamiento similar entre los cultivares con valores entre 0.50 y 0.78 $\text{mmol H}_2\text{O m}^2/\text{s}$ y -0.89 a -1.42, respectivamente, Falbala tuvo el valor menos promisorio para la variable asociada a la fotosíntesis (15.3 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$) (cuadro 3), lo que afectó negativamente la biomasa seca de hoja con 1.64 g, 31% menos que el cultivar más promisorio para esta variable (White Boston), lo que provocó que el cultivar Falbala, además de tener el menor peso, fue un genotipo con la menor palatabilidad para el consumo en fresco.

Cuadro 3

Comportamiento promedio para variables asociadas a la fisiología y agronomía para cinco cultivares de lechuga

Cultivares	Fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$)	Conductancia estomática ($\text{mmol H}_2\text{O m}^2/\text{s}$)	Diferencial térmico ($^{\circ}\text{C}$)	Peso seco de hoja (g)
Romana Parris Island Coss	19.94 a	0.67 ab	-1.16 ab	3.3bc
Simson	19.34 ab	0.78 a	-1.42 b	4.76 ab
White Boston	18.63 abc	0.63 ab	-1.29 ab	5.23 a
Astra	16.13 bc	0.5 b	-0.89 a	3.06 bc
Falbala	15.38 c	0.76 a	-1.04 ab	1.64 c
EEM	0.84	0.06	0.12	0.45
P	0.0015	0.0191	0.0261	0.0001

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (Tukey, $P=0.05$). EEM: Error estándar. P: valor de la probabilidad.

Discusión

Efecto de la interacción sistema productivo y cultivares de lechuga

En esta investigación, White Boston se adaptó fisiológicamente a diferentes condiciones microclimáticas, ya que en altas temperaturas, las plantas cerraron parcialmente los estomas para evitar las pérdidas por transpiración, sacrificando las tasas de fotosíntesis; sin embargo, se pudo observar la importancia de seleccionar cultivares adaptados a zonas de altas temperaturas, debido a que la tendencia es que se puedan identificar genotipos con mecanismos fisiológicos que permitan tolerar diferentes microclimas, tal como se observa en casa malla, la cual, a pesar que la tendencia fue a tener las mayores temperaturas y humedad relativa, las plantas del cultivar Falbala alcanzaron comportamiento superior en las variables asociadas al intercambio gaseoso.

Aunque existen variedades de lechuga que se adaptan a climas cálidos (Qin *et al.*, 2007), en general, es una especie que se adapta a temperaturas bajas. El comportamiento anterior fue atribuido a la capacidad de adaptación a las condiciones climáticas, competencia por agua, luz, nutrientes y espacio edáfico de las variedades; tal como ocurrió en cultivares de lechuga sometidas a diferentes láminas de riego radiación y sombreado (Fu *et al.*, 2012).

Este mismo comportamiento lo observó Kavga *et al.* (2018) en el cultivo de lechuga sembradas en invernadero, las cuales disminuyeron las tasas de fotosíntesis motivado por la baja radiación generada por el sombreado. Mientras que la única variable de crecimiento que se vio significativamente afectada fue el peso seco de la raíz, que mostró una disminución de 46%. En particular, se redujo el peso seco (25, 14 y 46% para toda

la planta, tallo y raíz, respectivamente) como ya se demostró, para el cultivo de lechuga sembrado en diferentes condiciones microclimáticas. Además, otras características de crecimiento (planta, longitud del tallo y raíz y longitud de la hoja, ancho y superficie), las cuales se incrementaron hasta un 13% mediante el sombreado, lo que coincide con estudios previos en diferentes cultivares de lechuga (Marrou *et al.*, 2013; Tani *et al.*, 2014).

Se observó relaciones negativas entre la conductancia estomática y la fotosíntesis (Via *et al.*, 2014) y la conductancia y transpiración (Bunce, 1996). Los estomas juegan un papel esencial en el intercambio de gases de las hojas, controlando tanto las pérdidas de agua como la absorción de CO₂. Dado que su apertura está controlada por la presión de turgencia de las células de guarda, los estomas tienen la capacidad de responder rápidamente contra condiciones ambientales en constante cambio con la radiación solar, la temperatura y la humedad del aire (Chaves *et al.*, 2003; Baroli *et al.*, 2008; Damour *et al.*, 2010; Padhi *et al.*, 2012). Además, la pérdida de agua a través de la transpiración de las hojas depende de los mismos factores ambientales (Padhi *et al.*, 2012). Debido a que, en un momento dado, varios mecanismos estomáticos pueden estar respondiendo a un conjunto complejo de factores ambientales (Chaves *et al.*, 2003), por lo anterior se explica que la mayor fotosíntesis ocurrió en plantas de White Boston sembradas en campo abierto (cerca de 25.0 μmol CO₂ m²/s) y la mayor conductancia estomática entre casa malla y Falbala (mayor a 1.5 mmol agua m²/s), mientras que contrariamente ocurrió con Astra en el invernadero con la menor tasa de fotosíntesis y conductancia estomática con valores por debajo de 5.0 μmol CO₂ m²/s y 0.5 mmol agua m²/s, respectivamente.

Al ver que la fotosíntesis afecta la fisiología de la planta y, en consecuencia, la productividad del cultivo, los resultados de la variable de crecimiento vegetativo, correspondió también con la tasa de fotosíntesis de la lechuga, ya que no se vio afectada por el sombreado inducido por el invernadero en comparación con el invernadero de referencia de la investigación desarrollada por Kavga *et al.* (2018) siendo similares con estudios previos que refieren que la lechuga se puede adaptar a diferentes ambientes de radiación solar considerando que no requiere una alta intensidad de radiación solar para lograr la máxima fotosíntesis. Por lo tanto, nuestros hallazgos confirman que la lechuga se puede plantar en invernaderos proporcionando un alto rendimiento, especialmente en época lluviosa y condiciones de sombra moderada (Marrou *et al.*, 2013; Tani *et al.*, 2014).

Las plantas de lechuga alcanzaron los mayores números de hojas, mayor peso fresco de hojas por planta, diámetro de tallo y con la misma tendencia para la biomasa seca de hoja para White Boston y Romana Parris Island Coss en la casa malla con rendimiento promedio de 3.10 y 2.39 kg/m² motivado a la alta radiación y temperatura. Comportamiento contrario ocurrió en tres variedades de lechuga sembradas en invernadero con peso fresco de follaje y cabezas de 7.5 y 9.2 kg/m; y con peso fresco de raíz diferentes significativamente en la variedad Durango (Martínez *et al.*, 2015), mientras que Silva *et al.* (2000) reportaron diferencias en los rendimientos de materia fresca para diferentes cultivares de lechuga de cabeza y romanas, pero debido principalmente por tres tratamientos de riego. Sin embargo, estas investigaciones fueron realizadas en zonas de climas fríos, lo que provocó comportamiento superior para las variables productivas, pero en un mayor

tiempo y con densidades de siembra desde cinco hasta 20 plantas/m², mientras que en la investigación realizada en Colombia fue de 25 plantas/m² con la proyección de aumentar la densidad de siembra hasta del doble por el tamaño de la cabeza de las lechugas, lo que podría incrementar la productividad por espacio y tiempo, ya que a los 25 días estaban aptas a cosecha.

Efecto de los sistemas productivos

El sombreado de las estructuras de agricultura protegida parece inducir la disminución de la tasa fotosintética, mientras que tanto la disminución de temperatura como el aumento de humedad favorecen el aumento de la conductancia estomática y la reducción de la transpiración. Es así como la productividad del cultivo de lechuga en invernadero se ve afectada por varios factores ambientales, ya que el sombreado inducido por paneles fotovoltaicos, pantallas térmicas y techo, entre otras, pueden afectar la temperatura y la humedad dentro de las estructuras. Todos estos parámetros ambientales, combinados con las características inherentes de los cultivares de lechuga, la época de siembra, la formación de la matriz fotovoltaica y el porcentaje de cobertura, influyen en las funciones fisiológicas de las plantas y, en consecuencia, en su productividad (Kavga *et al.*, 2018).

La investigación en túneles reportada por Del Ángel-Hernández *et al.* (2017) observaron diferencias en la transmitancia de las cubiertas entre las estructuras de diferentes colores y materiales a la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y fue más evidente que la observada para la radiación solar total incidente. Esto se debió a que las diferentes cubiertas son más selectivas a la radiación PAR que a la radiación cercana y lejana al infrarrojo. Se observó claramente que las plantas bajo el policarbonato de color rojo recibieron la menor cantidad de radiación PAR, inferior a la recibida por los policarbonatos de otros colores y de la que incide sobre los túneles. La menor radiación PAR que se transmite sobre el policarbonato de color rojo tendrá un marcado efecto en la fisiología de las plantas y en el crecimiento y rendimiento de las plantas, tal como ocurrió con el invernadero en la mayoría de las plantas sembradas.

Trabajos realizados por Retamal *et al.* (2015) en arándanos (*Vaccinium corymbosum*) a cielo abierto y bajo túneles de polietileno de alta densidad, demostraron que bajo los túneles se incrementa la temperatura del aire, aumenta la precocidad, el rendimiento y la conductancia estomática debido a mayor difusividad de la radiación fotosintéticamente activa. Sales *et al.* (2014) reportaron que la malla sombra de color negro mostró un aumento en el índice de área foliar en lechuga (*Lactuca sativa* L.) respecto a la malla de color rojo. Santos y Salame (2012) encontraron que en arándano (*Vaccinium oxycoccus*) bajo un túnel de polietileno con 35% de sombreado se tuvo incremento de la floración, mayor peso del fruto y rendimiento en comparación que con cielo abierto. Casierra *et al.* (2014) observaron que para chile pimiento (*Capsicum annuum*) el mayor contenido de clorofila se observó en las plantas bajo las cubiertas de polipropileno de color azul, verde y transparente, con respecto al observado bajo las cubiertas de color amarillo y rojo.

Efecto de los cultivares de lechuga

Los valores de *spad* están relacionados con el contenido de clorofila y por ende con la fotosíntesis; sin embargo, para esta investigación no se encontraron relaciones entre dichas variables, lo que indica que para el caso de la especie de la lechuga, la coloración de la variedad juega un papel importante en la interacción, ya que las lechugas con los colores de hojas más verde (Romana Parris Island Coss, Astra y Falbala) en todas las estructuras tienden a tener los mayores valores, asimismo, el nivel de pigmentos fotosintéticos —como la apertura estomática— no causa una respuesta en la velocidad fotosintética inmediata, sino que será en un plazo más largo, porque está accionando mecanismos de defensa que no permite que estas variables impacten inmediatamente. Comportamiento similar observaron Martínez *et al.* (2015) con variedades que presentaron el mayor índice de *spad* en aquellas plantas cuya pigmentación es morada en las hojas, motivado principalmente al contenido de carotenoides (Balsam *et al.*, 2013). Estos resultados concuerdan en parte con los observados por Villar y Ortega (2003) y Escalona *et al.* (2009), quienes encontraron que existe relación directa entre la lectura *spad*, el contenido de nitrógeno y el tamaño y color de las hojas.

En otro orden de ideas, cuando las plantas presentan estrés hídrico o ambiental, los estomas se cierran y la transpiración decrece, por lo que la temperatura de la hoja se incrementa. Cuando una planta transpira completamente, disminuye el efecto por el estrés hídrico y la temperatura de la hoja oscila de 1 a 4 °C menos que la temperatura ambiental; tal como se reportó con la lechuga, la cual no tuvo afectaciones por las altas temperaturas. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire (Tarqui *et al.*, 2017). En este caso, las mayores temperaturas del ambiente provocaron, dentro de las estructuras de agricultura protegida, que la transpiración de las hojas se redujera drásticamente con el incremento de la temperatura foliar.

Finalmente, se debe desatacar que los cultivares de lechuga evaluados no son fenotípicamente estables, tal como se observó en White Boston en casa malla y Falbala en invernadero con el mejor comportamiento fisiológico (mayor apertura estomática y tasa de fotosíntesis) y agronómico (mayores valores en biomasa fresca y seca). Asimismo, se observó que la tendencia es que las temperaturas más altas dentro de las estructuras afectaron las variables asociadas al intercambio gaseoso, lo que provocó disminución en variables productivas; sin embargo, la radiación fotosintéticamente activa más baja, dentro de las estructuras, afectó positivamente las variables asociadas a la calidad de las hojas, lo que tendría implicaciones de manejo, pues se podría producir intensivamente en condiciones protegidas durante todo el año para atender las demandas más exigentes del mercado. Cabe destacar que en condiciones de clima frío colombiano, las lechugas se cosechan aproximadamente a los 60 días, mientras que en esta investigación se logró cosechar en la mitad del tiempo, lo que tiene implicaciones importantes para esta especie en la región.

Conclusiones

El cultivar Falbala, a pesar de ser el genotipo con el menor rendimiento, tuvo comercialmente las características más promisorias para producirla en condiciones protegidas. Mientras que las condiciones de campo abierto provocaron cierre parcial de los estomas, lo que afectó la fotosíntesis y por ende las variables productivas, lo que permite inferir que en condiciones protegidas esta especie puede ser promisoriosa en la región.

Los cultivares de lechuga se pueden plantar en invernaderos con alto rendimiento, especialmente en época lluviosa y en condiciones de sombra moderada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA por el apoyo técnico y administrativo en este estudio, y al Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria-FONTAGRO por la financiación de la investigación, titulada: “Innovaciones para la horticultura en ambientes protegidos: opción de intensificación sostenible de la agricultura familiar en el contexto del cambio climático en América Latina y el Caribe (ALC)”.

Literatura citada

- AGRONET. (2021). Estadísticas agrícolas: Base agrícola EVA 2020. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/paginas/home.aspx?cod=59>. (Consultada el 11 septiembre de 2021).
- Andriolo, J.L. (2000). Production physiology of horticulture in a protected environment. *Rev. Hort. Bras.* 18(1): 26-32.
- Balsam, M.; Morales, F.; Germendia, I. y Goicochea, N. (2013). Nutritional quality of outer and inner leaves of green and red pigmented lettuces (*Lactuca sativa* L.) consumed as salads. *Scientia Horticulturae*. 151:103-111.
- Baroli, I.; Price, G.D.; Badger, M.R. y Von Caemmerer, S. (2008). The contribution of photosynthesis to the red light response of stomatal conductance. *Plant Physiology*. 146(2): 737-747.
- Bournet, P.E. y Boulard, T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Comput Electron Agric.* 74(2): 195-217. Doi: 10.1016/j.compag.2010.08.007.
- Bunce, J.A. (1996). Does transpiration control stomatal responses to water vapour pressure deficit. *Plant, Cell & Environment*. 19: 131-135.
- Casierra, P.F.; Matallana, D. y Zapata, E. (2014). Growth of bell pepper plants (*Capsicum annuum*) affected by coloured covers. *Healthy plants*. 66(4):149-155.
- Chaves, M.M.; Maroco, J.P. y Pereira, J.S. (2003). Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*. 30(3): 239-264.
- Del Ángel-Hernández, M.; Zermeno-Gonzalez, A.; Melendres-Álvarez, A.; Campos-Magaña, S.; Cadena-Zapata, M. y Del Bosque-Villarreal, G. (2017). Características de la cubierta de un túnel efecto en radiación, clorofila y rendimiento de calabacita. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8(5): 1127-1142.
- Damour, G.; Simonneau, T.; Cochard, H. y Urban, L. (2010). An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell & Environment*. 33: 1419-1438.
- ENSIN. (2005). Profamilia, Salud IN de Antioquia U de, Salud OP de la, ICBF. Base de datos Bogotá. D.C. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/V/S/ED/GCFI/Ensin%202005.pdf>. (Consultada el 11 septiembre de 2021).

- Escalona, A.; Santana, M.; Acevedo, I.; Rodríguez, V. y Meru, M.L. (2009). Efecto de las fuentes nitrogenadas sobre el contenido de nitratos y lecturas *spad* en el cultivo de la lechuga. *Agron. Trop.* 59(1): 99-105.
- Filho, S.; Lobato, A.K.S.; Silva, R.B.; Schmidt, D.; Costa, R.C.L.; Alves, G.A.R. y Oliveira, N. (2009). Growth of Lettuce (*Lactuca Sativa* L.) In Protected Cultivation and Open Field. *Journal of Applied Sciences Research.* 5(5): 529-533.
- Fu, W.; Li, P., y Wu, Y. (2012). Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce. *Sci. Hortic.* 135: 45-51.
- Kavga, A.; Trypanagnostopoulos, G.; Zervoudakis, G. y Tripanagnostopoulos, Y. (2018). Growth and physiological characteristics of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) and Rocket (*Eruca sativa* Mill.) plants cultivated under photovoltaic panels. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 46(1): 206-212. Doi:10.15835/nbha46110846.
- Martínez, G.; Lara, A.; Padilla, L.; Flores, M.; Mejía, J.; y Llamas, J. (2015). Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno. Nota de investigación. *Terra Latinoamericana.* 33(3): 251-260.
- Qin, L.; He, J.; Lee, S.K. y Dodd, I.C. (2007). An assessment of the role of ethylene in mediating lettuce (*Lactuca sativa*) root growth at high temperatures. *Journal of experimental botany.* 58(11): 3017-3024.
- Quintero, I.; Zambrano, J.; Cabrita M. y Gil, R. (2000). Evaluación en campo y postcosecha de nueve cultivares de lechuga *Lactuca sativa* L. *Rev. Fac. Agron.* 17(6): 482-491.
- Marrou, H.; Wéry, J.; Dufour, L. y Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy.* 44: 54-66.
- Padhi, J.; Misra, R.K. y Payero J.O. (2012). Estimation of soil water deficit in an irrigated cotton field with infrared thermography. *Field Crops Research.* 126: 45-55.
- Retamal, J.; Bastías, M.; Wilckens, R. y Paulino, L. (2015). Influence of microclimatic conditions under high tunnels on the physiological and productive responses in Blueberry O Neal. *Chilean J. Agric. Res.* 75(3): 291-297.
- Sales, A.; Barbosa, J.; Barbosa, P.; Viana, V. y Freitas, A. (2014). Agricultural nets as undercover in hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa*). *Rural Sci.* 44(10): 1755-1760.
- Santos, M. y Salame, P. (2012). Performance of southern highbush blueberry cultivars under high tunnels in Florida. *Hort. Technol.* 22(5): 700-704.
- Silva, V.F.; Bezerra, N.F.; Negreiros, M.Z. y Pedrosa, J.F. (2000). Comportamento de cultivares de alface em diferentes espacamentos sob temperatura e luminosidad elevadas. *Hortic. Bras.* 18(3): 183-187.
- Tani, A.; Shiina, S.; Nakashima, K. y Hayashi, M. (2014). Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels. *Journal of Agricultural Meteorology.* 70(3): 139-149.
- Tarqui, M.; Mena, F. y Quino, J. (2017). Temperatura foliar de la lechuga (*lactuca sativa*) y aire influenciado por el déficit de presión de vapor. *Revista RIIA.* 4(1): 60-66.
- Velázquez, P.; Ruíz, H.; Chaves, G. y Luna, C. (2014). Productivity of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in high tunnel conditions on vitric haplustands soil. *Revistas de Ciencias Agrícolas.* 31(2): 93-105. Doi. org/10.22267/rcia.143102.34.
- Via, S.M.; Zinnert, J.C.; Butler, A.D. y Young, D.R. (2014). Comparative physiological responses of *Morella cerifera* to RDX, TNT, and composition B contaminated soils. *Environmental and Experimental Botany.* 99: 67-74.
- Villar, D. y Ortega, R. (2003). Medidor de clorofila. Bases teóricas y su aplicación para la fertilización nitrogenada en cultivos. *Agron. For.* 18: 4-8.

Recepción: 22 de septiembre de 2021

Arbitraje: 27 de noviembre de 2021

Dictamen: 16 de enero 2022

Aceptado: 27 de marzo 2022