



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Efecto de dos condiciones de
protección de cultivo sobre los
índices de crecimiento y producción
de tres variedades de lechuga
(*Lactuca sativa*) tipo gourmet en la
Sabana de Bogotá**

Deissy Giovanna Quintero Arias

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia

2015

Efecto de dos condiciones de protección de cultivo sobre los índices de crecimiento y producción de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa*) tipo gourmet en la Sabana de Bogotá

Deissy Giovanna Quintero Arias

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Agrícola

Director (a):

John Fabio Acuña Caíta

Ingeniero Agrícola Ph. D

Línea de Investigación:

Adecuación de tierras y manejo sostenible

Grupo de Investigación:

Grupo de Gestión en Tecnología, Innovación y Diseño Agroindustrial (GTI)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2015

La relación del ser humano con el campo, ya sea cultivado o en estado natural, es una relación mística, donde la noción de Dios se materializa y entonces surge en todo su esplendor la belleza, la certeza de la bondad fundamental del corazón humano, pues basta con observar una humilde zanahoria o un imponente roble, escuchar el sonido de un arroyo o el viento haciendo música con las hojas de los eucaliptos, para captar la factura de una mano divina conocedora a fondo de la palabra diseño, donde el pulso guía es la alegría del amor que nos conmueve.

Primo Eliseo Rojas

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, a la Dirección Nacional de Bienestar y al Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola por su apoyo tanto educativo como económico para que esta Investigación llegara a feliz término y sus resultados hayan sido presentados a nivel internacional.

Al Ingeniero John Fabio Acuña, director del grupo de investigación GTI, por su apoyo incondicional y su confianza al darme la oportunidad de llevar a cabo esta investigación. Al semillero de Investigación Amaranto por su colaboración en la ejecución del proyecto, en especial a la Ingeniera Jessica Vargas, por compartir conmigo no solo asignaturas sino intercambiar conceptos que enriquecieron los resultados presentados en este documento y al Ingeniero Javier Martín, por su atenta colaboración y participación en la puesta en marcha de este proyecto.

A mi familia, especialmente a mi hermana Silvana Quintero por su apoyo sincero y su cariño incondicional, a mis padres, mis tíos, mis primos y todos aquellos amigos que han estado conmigo en todo momento: Ivonne, Diana, Paola M, Mery, Heliana, Paola B, Daniel, Mercedes, Andrés; doy gracias a Dios por su presencia en mi vida.

A todos mis profesores por su inspiración y dedicación, por mostrarme el mundo de la academia y sembrar la semilla del respeto, el conocimiento y el amor por la profesión.

Resumen

El objetivo del estudio es comparar la respuesta de 3 variedades de lechuga tipo gourmet, frente a diferentes condiciones de protección de cultivo. Para ello se utilizaron dos tipos de película plástica como cobertura (Térmica y no térmica), con diferentes niveles de transmisión de luz y de filtro UV para evaluar el comportamiento morfofisiológico de tres variedades de lechuga (*Lactuca Sativa* L.). Las pruebas se desarrollaron en dos módulos de invernadero ubicados en la Universidad Nacional de Colombia, campus de Bogotá (4°38'8"N 74°4'58"W). Se realizaron pruebas de comparación de medias (Student) a partir de los parámetros Grados Día, Luz Diaria Integrada y Proporción Fototérmica para determinar la variación climática en los dos módulos de invernadero. Se realizó el seguimiento y análisis de las variables morfofisiológicas altura, diámetro, biomasa fresca y seca, Índice de Área Foliar, Área Foliar Específica, Tasa de Crecimiento del Cultivo, Eficiencia Fotosintética, Color de la hoja, mediante análisis de comparación de medias ANOVA, obteniendo diferentes respuestas para cada variedad. Los resultados evidenciaron que para las condiciones de la sabana de Bogotá, se presentaron diferencias significativas en los factores climáticos de producción y por ende variaciones en la respuesta del cultivo en estudio. Estas evaluaciones son una herramienta para la toma de decisiones en la selección adecuada de películas plásticas para implementación de ambientes protegidos como estrategia para la producción de cultivos.

Palabras clave: Grados Día, Luz Diaria Integrada, Proporción Fototérmica, Índice de Área Foliar, Tasa de Crecimiento Relativo, Color de la hoja.

Abstract

The aim of the study was to compare the response of 3 varieties of gourmet lettuce, facing different conditions of crop protection. For this purpose two types of plastic film as a cover (thermal and non-thermal) were used, with different levels of transmission of light and UV filter to evaluate the morphophysiological behavior of three varieties of lettuce (*Lactuca sativa* L.). The tests were developed in two modules of greenhouse located at the Universidad Nacional de Colombia, campus Bogotá (4 ° 38.8 'N 74 ° 4'58 "W). Comparisons of means test (Student) from the Degree Days, Daily Light Integral and Photothermal Ratio parameters were performed to determine climatic variation in the two modules of greenhouses. Monitoring and analysis of morphophysiological variables height, diameter, fresh and dry biomass, Leaf Area Index, Leaf Area Specific, Relative Growth Rate, photosynthetic efficiency, leaf color was performed by analysis of mean comparison ANOVA, getting different answers for each variety. The results showed that for the conditions of the Savannah of Bogota, significant differences occurred in the climatic factors of production and hence variations in crop response under consideration. These assessments are a tool for decision making in the proper selection of plastic films for implementing protected environments as a strategy for crop production.

Keywords: Degree Days, Daily Light Integral, Photothermal ratio, Leaf Area Index, Leaf Area Specific, Relative Growth Rate, photosynthetic efficiency, leaf color.

Contenido

| | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Resumen | IX |
| Lista de gráficos | XIII |
| Lista de tablas | XV |
| Lista de imágenes | XVI |
| Lista de Símbolos y abreviaturas | XVII |
| Introducción | 1 |
| Objetivos | 3 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 5 |
| 1.1 Parámetros climáticos..... | 5 |
| 1.1.1 Grados Día (GD) | 6 |
| 1.1.2 Luz Diaria Integrada (LDI) | 6 |
| 1.1.3 Relación Fototérmica (PTR) | 7 |
| 1.2 Parámetros morfofisiológicos | 7 |
| 1.2.1 Área foliar e índices relacionados | 8 |
| 1.2.2 Fluorescencia de la clorofila | 8 |
| 1.2.3 Color de la hoja | 8 |
| 2. MARCO METODOLOGICO | 11 |
| 2.1 Seguimiento de variables climáticas | 14 |
| 2.1.1 Temperatura y Humedad Relativa | 14 |
| 2.1.2 Intensidad Luminosa | 17 |
| 2.1.3 Relación fototérmica (PTR) | 18 |
| 2.2 Seguimiento de variables morfo fisiológicas | 18 |
| 2.2.1 Altura y diámetro máximo de planta | 18 |
| 2.2.2 Índice de área foliar (IAF) y Área Foliar específica (AFE) | 18 |
| 2.2.3 Tasa de Crecimiento Relativo (TCR)..... | 19 |
| 2.2.4 Eficiencia fotosintética..... | 20 |
| 2.2.5 Índice de color..... | 21 |
| 3. ANALISIS DE RESULTADOS | 23 |
| 3.1 Incidencia de la ubicación de los sensores en la medición de variables de clima | 23 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2 | Análisis del comportamiento de las variables climáticas (T y HR) por ciclo de cultivo | 28 |
| 3.3 | Respuesta del cultivo a las diferentes condiciones climáticas del estudio | 31 |
| 3.3.1 | Determinación de tiempo térmico (Grados día –GD)..... | 31 |
| 3.3.2 | Determinación de Luz Diaria integrada (LDI) | 33 |
| 3.3.3 | Determinación de Relación Fototérmica (PTR)..... | 34 |
| 3.3.4 | Respuesta de las variables morfo fisiológicas..... | 36 |
| | Morfología del cultivo | 36 |
| | Fisiología del cultivo..... | 39 |
| 4. | Conclusiones y recomendaciones | 49 |
| 4.1 | Conclusiones..... | 49 |
| 4.2 | Recomendaciones..... | 50 |
| A. | Anexo: resumen valores estadísticos..... | 53 |
| B. | Anexo: Salidas estadísticas del software Statistix 8.0 | 57 |
| C. | Anexo: Correlaciones de Pearson para las variables morfofisiológicas..... | 59 |
| | Bibliografía | 61 |

Lista de gráficos

| | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Gráfico 3-1 Distribución de temperaturas extremas en los invernaderos. A Cubierta térmica, B Cubierta convencional. | 24 |
| Gráfico 3-2 Distribución de temperatura promedio en los invernaderos. A Cubierta térmica, B Cubierta convencional. | 25 |
| Gráfico 3-3 Comportamiento de la humedad relativa promedio diurna y nocturna en los invernaderos. A cubierta térmica, B cubierta convencional. | 27 |
| Gráfico 3-4 Comportamiento de humedad y temperatura del día promedio del ciclo en el dosel. A ciclo 1 (mayo - julio), B ciclo 2 (septiembre - noviembre). | 29 |
| Gráfico 3-5 Temperaturas extremas por ciclo de cultivo a nivel de dosel. A ciclo 1 (mayo a julio), B ciclo 2 (septiembre a noviembre). | 29 |
| Gráfico 3-6. Descripción de temperatura y humedad relativa en las unidades experimentales. A ciclo 1 (mayo a julio), B ciclo 2 (septiembre a noviembre). | 30 |
| Gráfico 3-7. Grados día obtenidos por diferentes métodos en cada unidad experimental. A Térmica, B Convencional. | 32 |
| Gráfico 3-8 Comportamiento de LDI por ciclo de cultivo. A ciclo 1 (mayo - julio), B ciclo 2 (septiembre - noviembre). | 33 |
| Gráfico 3-9 Comportamiento de LDI y GD en los invernaderos. A método modificado, B método residual, C método de ometto. | 34 |
| Gráfico 3-10 Comportamiento del diámetro de las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera. | 37 |
| Gráfico 3-11 Comportamiento del parámetro altura en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera. | 38 |
| Gráfico 3-12 Comportamiento del parámetro altura en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera. | 39 |
| Gráfico 3-13 Comportamiento del parámetro biomasa fresca en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera. | 40 |
| Gráfico 3-14 Comportamiento del parámetro biomasa seca en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera. | 41 |
| Gráfico 3-15 Comportamiento del parámetro IAF en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera. | 42 |
| Gráfico 3-16 Comportamiento del parámetro AFE en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera. | 43 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 3-17 Comportamiento del parámetro TCR en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera | 44 |
| Gráfico 3-18 Comportamiento del parámetro Fv/Fm en las variedades de lechuga durante el estudio. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera..... | 46 |
| Gráfico 3-19 Índice de color obtenido por variedad | 47 |
| Gráfico 3-20 Comportamiento del parámetro color de la hoja en las variedades de lechuga durante el estudio. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera | 48 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 2-1 Características de las variedades objeto de estudio | 13 |
| Tabla 2-2. Composición de la fórmula empleada para fertilizar el cultivo..... | 14 |
| Tabla 3-1 Valores promedio de temperatura a nivel de dosel y a 1,5 m registrados para cada tipo de cubierta (análisis de comparación de medias t-Student) | 26 |
| Tabla 3-2 Valores promedio de Humedad Relativa a nivel de dosel y a 1,5 m registrados para cada tipo de cubierta (análisis de comparación de medias t-Student) | 26 |
| Tabla 3-3 Valores promedio de Humedad Relativa a nivel de dosel y a 1,5 m registrados para cada tipo de cubierta (análisis de medias t-Student) | 28 |
| Tabla 3-4 Comparación de los valores de GD obtenidos por diferentes métodos para las variedades de lechuga | 32 |
| Tabla 3-5 Comparación de los valores de PTR obtenidos con los diferentes valores de GD generados..... | 35 |
| Tabla 3-6 Ecuaciones de regresión para el parámetro biomasa fresca | 40 |

Lista de imágenes

| | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Imagen 1-1 Representación del espacio de color CIELab..... | 24 |
| Imagen 2-1 Ubicación de las unidades experimentales..... | 27 |
| Imagen 2-2 Unidades experimentales..... | 28 |
| Imagen 2-3 Distribución de plantas para el ensayo..... | 29 |
| Imagen 2-4 Ubicación dataloggers..... | 31 |
| Imagen 2-5 Luxómetro Extech® HD450..... | 33 |
| Imagen 2 6 medidor de área foliar..... | 35 |
| Imagen 2 7 Medición de eficiencia fotosintética..... | 36 |
| Imagen 2 8 Cromámetro Konica Minolta..... | 37 |
| Imagen 3 1 Variación de color en la variedad Lollo Rosso en la cuarta semana después del transplante, A Térmica, B convencional..... | 60 |

Lista de Símbolos y abreviaturas

| Símbolo | Término | Unidad |
|--------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>AFE</i> | Área Foliar Específica | cm ² g ⁻¹ |
| dW/dt | Variación de la biomasa seca en función del tiempo | g d ⁻¹ |
| <i>Fv/Fm</i> | Máxima eficiencia del pSII | - |
| <i>GD</i> | Grados Día | °C d ⁻¹ |
| <i>HR</i> | Humedad Relativa | % |
| <i>IAF</i> | Índice de Área Foliar | - |
| <i>PAR</i> | Radiación Fotosintéticamente Activa | μmol m ⁻² s ⁻¹ |
| <i>PTR</i> | Relación fototérmica | mol m ⁻² °C ⁻¹ |
| <i>LDI</i> | Luz Diaria Integrada | mol m ⁻² d ⁻¹ |
| <i>T</i> | Temperatura | °C |
| <i>TCR</i> | Tasa de Crecimiento Relativo | g g ⁻¹ d ⁻¹ |
| <i>W</i> | Biomasa seca | g |

Abreviaturas

| Abreviatura | Término |
|---------------|----------------------------------------------------|
| <i>CIELab</i> | Espacio uniforme de color con coordenadas L* a* b* |
| <i>D</i> | Día |
| <i>IR</i> | Infrarrojo |
| <i>LSD</i> | Mínima diferencia significativa |
| <i>msnm</i> | Metros sobre el nivel del mar |
| <i>nm</i> | Nanómetro |
| <i>N</i> | Norte |
| <i>PE</i> | Polietileno |

| Abreviatura | Término |
|--------------------|----------------------------------|
| <i>Psii</i> | Foto sistema II |
| <i>UV</i> | Ultra Violeta |
| <i>W</i> | Este |
| Δa^* | Diferencia de rojos a verdes |
| Δb^* | Diferencia de amarillos a azules |
| ΔE | Diferencia total de color |
| ΔL^* | Diferencia de luminosidad |
| ® | Marca registrada |

Introducción

Las cubiertas plásticas han sido empleadas desde hace más de 50 años para proteger los cultivos de las condiciones climáticas adversas. Su estudio y desarrollo ha generado la incorporación de diversos tipos de aditivos que modifican sus características de resistencia, transmitancia, difusividad, entre otros, que ofrecen por un lado mejoras en las propiedades de estos materiales (mecánicas, ópticas, térmicas) y por otro brindan condiciones climáticas particulares a los cultivos, generando diferentes respuestas en los procesos de crecimiento de las plantas.

A medida que el estudio de los parámetros climáticos aumenta, también lo hace el entendimiento de la fisiología asociada a los mismos. Se sabe por ejemplo que la respuesta de las plantas a las variables climáticas ha sido estudiada desde 1735, cuando René A.F. de Réaumur publicó las constantes térmicas para fenología (Wang, 1960). Por otro lado se ha observado que, las cubiertas que bloquean la radiación Ultra Violeta generan beneficios a los productores al reducir la población de insectos y las enfermedades causadas por hongos (Kittas *et al.*, 2006), y desde hace algún tiempo la radiación fotosintéticamente activa ha recibido mayor atención debido a su rol fundamental en el proceso de fotosíntesis (Kittas *et al.*, 1999)

El impacto de las variables climáticas temperatura y luminosidad ha sido relacionado con el rendimiento de los cultivos para generar aproximaciones cuantitativas que permitan evaluar la respuesta de las plantas y permitan la implementación de tecnología apropiada para el mejoramiento de las condiciones de cultivo y el incremento de los rendimientos económicos y de producción.

Con esta investigación se buscó evaluar la respuesta de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa*) a la producción bajo ambientes protegidos en la sabana de Bogotá. El estudio se desarrolló en dos unidades de invernadero con cubiertas que presentaban características diferentes, con lo cual se buscó generar diferencias en las condiciones

climáticas al interior de los mismos. Se caracterizaron las condiciones climáticas de los invernaderos para evaluar las diferencias presentadas no solo entre las cubiertas, sino en los puntos de medición del clima, puesto que es habitual que la temperatura del invernadero sea tomada a la altura del observador y no del canopeo o dosel de cultivo. Durante ocho semanas transcurridas después del trasplante se realizó el seguimiento a las variables diámetro y altura de la planta, área foliar, índice de área foliar específica, tasa de crecimiento relativo, eficiencia fotosintética y color de la hoja, para evaluar el comportamiento obtenido por las variedades bajo las dos condiciones climáticas presentadas.

Los resultados generados constituyen una herramienta en la toma de decisiones para los productores, ya que se presenta evidencia científica sobre la conveniencia o no en la implementación de este tipo de tecnología.

Objetivos

General

Evaluar comparativamente la respuesta de 3 variedades de lechuga (*Lactuca sativa*) a la producción bajo dos condiciones de protección de cultivo en la Sabana de Bogotá.

Específicos

- Caracterizar las condiciones climáticas de las unidades experimentales para cada material de cubierta empleado.
- Recopilar los datos sobre las variables de respuesta de las variedades de lechuga cultivadas en las unidades experimentales.
- Establecer las mejores condiciones para la producción de lechuga.

1. MARCO TEÓRICO

Los cultivos protegidos juegan un papel importante en la producción de vegetales. En 2001 la superficie mundial de producción bajo invernadero sumaban 450.000 hectáreas, concentradas principalmente en China, Japón, Corea y la cuenca del mediterráneo (Gruda, 2005)

La producción bajo invernadero ofrece la posibilidad de manejar las condiciones de luz (cantidad y calidad), temperatura, humedad, agua y la disponibilidad de nutrientes –en mayor o menor medida, dependiendo de los niveles de automatización con los que se cuenta- por lo tanto, este tipo de producción presenta algunas ventajas en comparación con la producción al aire libre, como optimizar los parámetros climáticos relacionados con el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Para analizar el crecimiento de un cultivo es necesario hacer uso de una serie de parámetros a partir de los cuales se interpreta el comportamiento de las plantas frente a las condiciones a las cuales se ven expuestas, La respuesta generada puede evaluarse desde el punto morfológico o fisiológico (Thomas *et al.*, 2003)

1.1 Parámetros climáticos

El clima es un factor determinante en el crecimiento de las plantas, y su respuesta a estos factores depende de la variedad y de su estado fisiológico; la producción de plantas de alta calidad se ve afectada directamente por la luz (energía lumínica) y la temperatura (energía térmica). La energía lumínica traducida como radiación fotosintéticamente activa (PAR) es indispensable en el proceso de fotosíntesis y por tanto, en la acumulación de biomasa. La energía térmica es el principal factor ambiental que influye en la tasa de desarrollo (Lambers *et al*, 2008).

Los factores climáticos se comportan con las plantas como un sistema complejo. Para comprender el comportamiento de los cultivos se han simplificado las interacciones entre ellos desarrollando los conceptos de grados día y luz diaria integrada, los cuales se describen a continuación.

1.1.1 Grados Día (GD)

La acumulación de temperatura a partir de un umbral térmico (temperatura base) propio para cada cultivo se denomina suma de Grados Día (GD) o tiempo térmico y se emplea para determinar el desarrollo del cultivo, para estimar la producción potencial, entre otros (Salazar *et al.*, 2007).

Aunque la acumulación de Grados Día para las diferentes etapas de desarrollo es relativamente constante e independiente de la fecha de siembra, cada variedad de una especie puede tener un valor específico de GD (Qadir *et al.*, 2006). La determinación de este parámetro se puede realizar por varios métodos, entre los que se encuentran el método residual o de Sadras, el método de Ometto o el método residual modificado.

1.1.2 Luz Diaria Integrada (LDI)

Luz diaria integrada (LDI) es la cantidad de radiación PAR recibida cada día como función de la intensidad de luz instantánea ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y duración (día o 24 horas). La acumulación de LDI es usada eficientemente para determinar respuesta de las plantas en cuanto a crecimiento, y por sus valores es expresada en moles de luz por metro cuadrado por día ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) (Torres & Lopez, 2010).

Las plantas que crecen en condiciones limitantes de luz (baja LDI) presentan retrasos en el desarrollo reduciendo la acumulación de biomasa. El incremento en la Luz Diaria Integrada incrementa la tasa de crecimiento en diversas especies, reduciendo el tiempo de obtención de productos comercializables. El genotipo determina la plasticidad¹ en la respuesta al incremento en LDI (Lambers *et al.*, 2008)

¹ Capacidad que posee un genotipo particular de expresar diferentes fenotipos frente a la variación ambiental, mediante la alteración de su morfología y fisiología (Pigliucci, 2001).

1.1.3 Relación Fototérmica (PTR)

Al considerar las variables climatológicas que inciden en el cultivo, se observa como al analizar cada variable de forma separada se genera una aproximación a la dinámica del mismo, pero esta aproximación no es la más adecuada debido a que al sucederse perturbaciones, aunque sean transitorias, en estos parámetros se afecta la respuesta obtenida (Staghellini, 1987). La respuesta morfofisiológica de las plantas no puede explicarse a partir de una sola variable climática, ya que la producción se ve afectada tanto por la temperatura como por la luz incidente en el cultivo existiendo procesos claramente diferenciados que se relacionan con parámetros climáticos específicos (fotomorfogénesis). El concepto de relación fototérmica (PTR por sus siglas en inglés), ha sido propuesto para describir el balance entre la energía lumínica y la energía térmica (Liu & Heins, 1997; Ahmed & Hassan, 2011). La PTR describe la cantidad de energía lumínica disponible para la fotosíntesis por grado día de desarrollo (Liu & Heins, 2002).

1.2 Parámetros morfofisiológicos

Sadras *et al.* (2000), definen al desarrollo de las plantas como una sucesión progresiva de estados diferenciados morfológica y fisiológicamente. Las variaciones en las condiciones ambientales alteran la evolución de los procesos metabólicos fundamentales, el transporte de asimilados, la evolución del crecimiento, la dinámica de la expansión foliar y los factores de partición de biomasa (Salisbury & Ross, 2000).

Los cambios en el ambiente ejercen diferentes presiones en las plantas e influyen en el desarrollo de cada una de las especies, dando como resultado diversas formas de crecimiento, las cuales deben ser interpretadas como caminos distintos que han seguido las plantas para adaptarse a un determinado ambiente (Sherry *et al.*, 2007). El ciclo biológico cambia con el genotipo y con los factores del clima, esto quiere decir, que las plantas del mismo genotipo sembradas bajo diferentes condiciones climáticas pueden presentar diferentes estados de desarrollo después de transcurrido el mismo tiempo cronológico, por esta razón se emplean eventos biológicos como indicadores de la presencia o ausencia de ciertos factores ambientales para llegar a ciertas conclusiones o hacer predicciones respecto a las respuestas vegetales (Dahlgren *et al.*, 2007).

1.2.1 Área foliar e índices relacionados

Es la medida usual del tejido fotosintéticamente activo de una planta, que se relaciona con la cantidad de energía que es absorbida y convertida en materiales orgánicos. Al inicio del ciclo de crecimiento, el área foliar es reducida y la energía obtenida es destinada a la formación de brotes y hojas nuevas. Al incrementarse el área foliar se incrementa la producción de asimilados, los cuales son invertidos en el crecimiento vegetativo, incrementando la tasa de crecimiento, así como en la generación de estructuras reproductivas (Lambers *et al.*, 2008).

1.2.2 Fluorescencia de la clorofila

Es una medida no destructiva que se emplea para valorar la tolerancia de las plantas a condiciones medioambientales. La fluorescencia de la clorofila ha sido usada para evaluar la actividad fotosintética en la superficie de la hoja y para determinar la tolerancia a estrés abiótico en programas de mejoramiento genético (Gorbe & Calatayud, 2012).

La relación entre el valor de fluorescencia máxima (F_m) y la fluorescencia variable (F_v) es proporcional a la máxima eficiencia fotoquímica, y es una de las variables de fluorescencia más estudiadas siendo tomada como parámetro para determinar el estrés de la planta (Demming-Adams & Adams, 1992)

1.2.3 Color de la hoja

Diferentes propiedades de los productos se reflejan en el color, como su estado de maduración o el nivel de deterioro. El color es un atributo muy importante en los alimentos, debido a que se considera como el primer contacto con el consumidor. El ojo humano difiere en la visión de los colores, generando subjetividad que se puede traducir en diferencias en calidad que pueden ser percibidas a partir de otro tipo de caracterización menos subjetiva

La coloración característica de los alimentos se relaciona con componentes bioactivos como los compuestos fenólicos, carotenoides, antocianinas y taninos (Sant'anna *et al.*, 2013).

El espacio de color $L^* a^* b^*$, conocido como CIELab, es el espacio de color más usado para medir la composición cromática de los alimentos. El parámetro L^* indica la luminosidad y los parámetros a^* y b^* las coordenadas de color. En la imagen 1-1 se presenta la representación del color en el espacio CIELab.

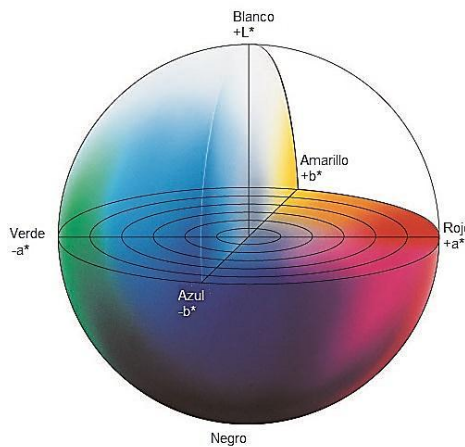


Imagen 1-1 Representación del espacio de color CIELab

Fuente: <http://sensing.konicaminolta.com.mx/newsletter-archive/archive/Nov13CA.html>

En este espacio de color pueden expresarse las diferencias para cada coordenada y establecerse la diferencia total de color mediante la ecuación (Grupo de investigación Color y Calidad de Alimentos, 2003):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

Los valores de ΔE tolerados deben ser establecidos para cada producto, debido a que, dependiendo del tipo de alimento, el margen de diferencia puede llegar a ser más amplio.

2. MARCO METODOLOGICO

Para alcanzar los objetivos propuestos y realizar el análisis comparativo de la respuesta de 3 variedades de lechuga (*Lactuca sativa*) tipo gourmet a la producción bajo ambientes protegidos en la sabana de Bogotá, se describe a continuación el procedimiento y análisis desarrollado.

Los ensayos se llevaron a cabo en dos unidades experimentales ubicadas en la zona de invernaderos de la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia (4°38'17" N, 74°5'20" W, 2576 msnm (Imagen 2-1). Esta ciudad presenta valores de temperatura que oscilan entre 19,4°C y 9,1°C, mientras que la humedad relativa presenta un valor medio anual de 78%, se registran en promedio 1476 horas de brillo solar anual y 940 mm como precipitación anual con carácter bimodal².



Imagen 2-1 Ubicación de las unidades experimentales

Fuente: aplicación Google earth³

² Valores obtenidos en la estación meteorológica Universidad Nacional 2120622 IDEAM
<http://www.empresavirgiliobarco.gov.co/concurso/Documents/ANEXO%209%20Estudio%20de%20Caracterizaci%C3%B3n%20Clim%C3%A1tica.pdf>. Recopilado en agosto de 2013

³ <http://www.google.es/intl/es/earth/index.html>. Recopilado en agosto de 2013

Cada unidad cuenta con un área de 27 metros cuadrados (m^2), con una altura a nivel de canal de 1,7 metros, de cumbre 2,86 metros y distancia de 9 metros en sus pórticos extremos o cerchas de culata. Su estructura está compuesta por columnas en guadua con cerchas en madera tradicional, como se observa en la imagen 2-2.

El material de cubierta de los invernaderos corresponde a dos tipos de películas transparentes coextruidas de polietileno de baja densidad con las siguientes características:

Invernadero 1 (Térmica): película plástica térmica de filtro total, con valores de termicidad de 87%, transmisión de luz total de 81%, transmisión de luz difusa de 30% y filtro UV a 380 nm.

Invernadero 2 (Convencional): película plástica no térmica sin filtro con valores de termicidad de 50%, transmisión de luz total de 86%, transmisión de luz difusa de 18% y no posee filtro UV.



Imagen 2-2 Unidades experimentales

Fuente: esta investigación

Cada unidad estaba conformada por 9 camas de 0,6m x 2,50m, las cuales fueron divididas en áreas de 0,6m x 1,25m para un total de 18 parcelas. Se utilizaron plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) tipo gourmet en tres variedades, dos del tipo verde crespa (Casabela y Vera) y una del tipo morada (Lollo Rosso), cuyas características se presentan en la tabla 2-1. Se realizó el seguimiento de variables para dos ciclos productivos, cada uno durante ocho semanas después del trasplante del material vegetal.

Tabla 2-1 Características de las variedades objeto de estudio

| NOMBRE | COLOR | CARACTERISTICAS |
|-------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Casabela | Verde claro | Se adapta a climas fríos y medios, pesa entre 300 y 400 g, resistente a florecimiento prematuro y a Bremia razas 1 a 16, 21 y 23. |
| Vera | Verde claro | Se adapta a climas fríos y medios, pesa entre 300 y 400 g, resistente a florecimiento prematuro y a Bremia razas 1 a 16, 21 y 23. |
| Lollo Rosso | Morado intenso | Planta compacta de buena estructura, muy atractiva por su color intenso, adaptabilidad de 1800 a 2800 msnm. |

Fuente: https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2012/446/42109/1/Documento2.pdf

Las plantas utilizadas fueron producidas en semilleros sobre bandejas plásticas, las cuales fueron trasplantadas a los 25 días para el primer ciclo productivo, y a los 28 días después de la siembra para el segundo ciclo en estudio. El sistema de siembra fue a tres bolillo con una separación entre plantas de 25 centímetros, sembrando en cada parcela 10 plantas, para un total de 180 individuos distribuidos en tres variedades y 6 parcelas dentro de cada unidad experimental (imagen 2-3). En las parcelas se instaló cobertura plástica (Mulch) de color gris con el objeto de controlar arvenses, aumentar la temperatura del sustrato y disminuir la evaporación del agua de riego. El sustrato empleado fue una mezcla de suelo orgánico (80%) y cascarilla de arroz (20%).



Imagen 2-3 Distribución de plantas para el ensayo

Fuente: esta investigación

Para el esquema de fertilización y riego se siguieron los parámetros sugeridos por el proveedor de las plántulas (Semillas Arroyave), donde para la fertilización se empleó la formulación presentada en la tabla 2-2 y para el riego se empleó una lámina de agua total de 120 mm.

Tabla 2-2. Composición de la fórmula empleada para fertilizar el cultivo

| ELEMENTO | CONCENTRACION (PPM) |
|-----------|---------------------|
| Nitrógeno | 165 |
| Fósforo | 30 |
| Potasio | 250 |
| Calcio | 180 |
| Magnesio | 40 |
| Azufre | 88 |
| Manganeso | 0,3 |
| Zinc | 0,3 |
| Cobre | 0,1 |
| Hierro | 3 |
| Boro | 1 |
| Molibdeno | 0,1 |

En este ensayo se controlaron malezas, plagas, enfermedades y las condiciones del suelo para eliminar estas variables como factores limitantes; de igual manera el agua y los nutrientes fueron disponibles sin limitaciones.

Para el análisis de las variables climáticas y evaluar la relevancia en las diferencias climáticas presentadas en las unidades experimentales se realizaron comparaciones de medias empleando la prueba de significación de la distribución t de Student, mientras que para el análisis de las variables de respuesta del cultivo se empleó un diseño factorial 2 x 3, donde los factores de efectos fijos fueron los tipos climas generados en cada unidad (Térmica y Convencional) y se tomaron como niveles en cada factor las tres variedades de lechuga empleadas, con seis repeticiones en bloques al azar. Para comparar las medias de las interacciones significativas se empleó la prueba LSD de Fisher. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Statistix 8.0 para Windows.

2.1 Seguimiento de variables climáticas

2.1.1 Temperatura y Humedad Relativa

Durante los dos ciclos de cultivo y con el objeto de caracterizar el clima de cada unidad experimental, se tomaron medidas continuas de temperatura (°C) y humedad relativa (%) a lo largo del día por medio de datalogers Extech instruments ® RT40, colocados en el

centro de cada unidad experimental, uno a 1,5 m de altura y el segundo ubicado a nivel de dosel de cultivo. Los datos fueron tomados cada hora durante los periodos de medición, analizando las diferencias entre temperaturas y humedad relativa promedio, máximas y mínimas obtenidas en las dos zonas de medición de cada unidad experimental para determinar la significancia de las diferencias en dichas áreas.



Imagen 2-4 Ubicación dataloggers

Fuente: esta investigación

Para estimar los valores diurno y nocturno, se promediaron los datos registrados de temperatura teniendo en cuenta 12 horas de luz (06:00 a 17:00) y 12 horas de sombra (18:00 a 05:00).

Para visualizar el efecto de la temperatura sobre el cultivo se realizó el cálculo de la acumulación de grados día calor (GD) empleando tres métodos, comparando posteriormente los coeficientes de variación CV de cada método:

1. Método residual o de Sadras (Ardila *et al.*, 2011):

$$GD (^{\circ}C) = \left(\frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} \right) - T_{base}$$

Donde:

$T_{m\acute{a}x}$: temperatura máxima diaria del aire.

$T_{m\acute{i}n}$: temperatura mínima diaria del aire.

T_{base} : temperatura base del cultivo.

2. Método residual modificado (Gilmore & Rogers, 1958 citados por Yzarra *et al.*, 2009):

$$GD (^{\circ}C) = \left(\frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} \right) - T_{base} \quad T_{m\acute{a}x} < T_{mb}$$

$$GD (^{\circ}C) = \left(\frac{T_{om} + T_{m\acute{i}n}}{2} \right) - T_{base} \quad T_{m\acute{a}x} > T_{mb}$$

Donde:

$T_{m\acute{a}x}$: temperatura máxima diaria del aire.

$T_{m\acute{i}n}$: temperatura mínima diaria del aire.

T_{base} : temperatura base del cultivo.

T_{mb} : temperatura máxima para el desarrollo del cultivo.

3. Método de Ometto (Ometto, 1981 citado por Yzarra *et al.*, 2009):

$$GD (^{\circ}C) = \left(\frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} \right) + T_{m\acute{i}n} - T_{base} \quad T_{mb} > T_{max} > T_{min} > T_{base}$$

$$GD (^{\circ}C) = \frac{(T_{m\acute{a}x} - T_{base})^2}{2 \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})} \quad T_{mb} > T_{m\acute{a}x} > T_{base} > T_{min}$$

$$GD (^{\circ}C) = \frac{2 \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \cdot (T_{m\acute{i}n} - T_{base}) \div (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^2 - (T_{m\acute{a}x} - T_{mb})}{2 \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})}$$

$$T_{m\acute{a}x} > T_{mb} > T_{m\acute{i}n} > T_{base}$$

$$GD (^{\circ}C) = \frac{1}{2} \cdot \frac{(T_{m\acute{a}x} - T_{base})^2 - (T_{m\acute{a}x} - T_{mb})^2}{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}} \quad T_{m\acute{a}x} > T_{mb} > T_{base} > T_{min}$$

Donde:

$T_{m\acute{a}x}$: temperatura máxima diaria del aire.

$T_{m\acute{i}n}$: temperatura mínima diaria del aire.

T_{base} : temperatura base del cultivo.

T_{mb} : temperatura máxima para el desarrollo del cultivo.

Los valores de temperatura base y temperatura máxima de desarrollo empleados en esta investigación son de 7°C y 22°C, los cuales fueron obtenidos mediante la revisión de literatura, especialmente las investigaciones de Brunini *et al.*(1976) y Smith *et al.* (2011)

2.1.2 Intensidad Luminosa

Las mediciones de intensidad luminosa se realizaron diariamente con un luxómetro Extech® HD450 en tres horas diferentes del día (07:00; 13:00 y 17:00). Los datos fueron procesados para determinar la Luz Diaria integrada (LDI), definida como la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR) recibida cada día como función de la intensidad de luz y duración (24 horas) (Seginer *et al.*, 2006). Esta unidad es expresada en $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (moles por metro cuadrado y por día).



Imagen 2-5 Luxómetro Extech® HD450

Fuente: <http://www.termocuplas.com.co/web/wp-content/uploads/2013/07/51-Extech-HD450.jpg>

Para obtener el valor de LDI se empleó la metodología presentada por Torres & Lopez (2010), donde se transforma el valor medio horario de intensidad luminosa en el valor acumulado de radiación PAR en el día a partir de la ecuación:

$$LDI(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = \bar{I} \times p \times 0,0864$$

Dónde:

\bar{I} : Intensidad Luminosa (lux)

p : factor de conversión ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ / lux) Para luz solar es 0,02

El factor 0,0864 es la millonésima parte de segundos del día

Para los dos ciclos de cultivo se analizaron los valores diarios de LDI a fin de determinar variaciones en las dos unidades experimentales.

2.1.3 Relación fototérmica (PTR)

El crecimiento y desarrollo de las plantas es impulsado por dos tipos de energía: lumínica y calórica. La energía lumínica impulsa la fotosíntesis y por lo tanto el aumento de peso seco, mientras que la energía térmica o calórica impulsa tasa de desarrollo, por esta razón se emplea la relación fototérmica (PhotoThermal Ratio - PTR) para integrar la energía empleada por las plantas en su crecimiento. La PTR fue definida por Liu & Heins (1997) con la ecuación:

$$PTR = \frac{LDI (mol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})}{GD (°C \cdot d^{-1})}$$

Para los dos ciclos de cultivo se analizaron los valores obtenidos de PRT obtenidos con los tres métodos de cálculo de grados día, GD, con el fin de determinar variaciones en las dos unidades experimentales.

2.2 Seguimiento de variables morfo fisiológicas

2.2.1 Altura y diámetro máximo de planta

Para caracterizar adecuadamente el crecimiento de las plantas durante los periodos en estudio, se consideró importante cuantificar la evolución del diámetro máximo y la altura de la planta. Para obtener la información, se realizaron mediciones semanales de estos parámetros en tres plantas por cada parcela, para un total de 18 plantas por variedad en cada unidad experimental, seleccionadas para el seguimiento, durante las 8 semanas de cada ciclo productivo correspondiente al ensayo.

2.2.2 Índice de área foliar (IAF) y Área Foliar específica (AFE)

El índice de área foliar se define como la proporción de hojas que cubren la proyección de ellas en el suelo. Es un indicador útil de la capacidad fotosintética de la comunidad vegetal (Curtis & Läuchli, 1986). Está definido por la ecuación:

$$IAF = \frac{Area\ foliar\ (cm^2)}{Area\ proyectada\ en\ la\ superficie\ del\ suelo\ (cm^2)}$$

Por su parte, el área foliar específica caracteriza el tamaño relativo del aparato asimilatorio para diferenciar la respuesta entre variedades, reflejando la interacción de factores ontogenéticos con efectos ambientales (Flores *et al.*, 2006). Matemáticamente se define como:

$$AFE = \frac{\text{Área foliar (cm}^2\text{)}}{\text{Materia seca total (g)}}$$

Para obtener el IAF para cada variedad en las dos unidades experimentales, se tomaron datos de área foliar mediante un acumulador de área foliar LICOR 360® tomando 2 muestras por parcela para un total de 12 plantas en cada variedad, con una frecuencia quincenal durante los dos ciclos en estudio. En campo se obtuvo el valor del diámetro mayor de las plantas para determinar el área foliar proyectada en la superficie de suelo.

De igual forma para obtener el AFE, a las plantas a las que se les midió el área foliar, fueron pesadas y llevadas a un horno marca Binder® por 72 horas a 60°C para obtener el peso seco de cada una de ellas.



Imagen 2-6 Medidor de área foliar LICOR ®

Fuente: <http://www.concessus.pt/es/produtos-prod.asp?id=105&idcat=15&idsubcat=55&idmarca=58&idmodelo=346>

2.2.3 Tasa de Crecimiento Relativo (TCR)

Representa la eficiencia de la planta como productor de nuevo material, expresa el incremento en masa seca de la planta en un intervalo de tiempo dado, tomando como referencia el valor inicial de la masa seca producida (Pedroza *et al.*, 1997). Se define por la ecuación:

$$TCR = \left(\frac{1}{W}\right) \left(\frac{dW}{dt}\right)$$

Dónde:

TCR: Tasa de crecimiento relativo [$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$]

W: Biomasa seca total [g]

dW/dt: Variación de la masa seca en función del tiempo [$\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$]

Quincenalmente se tomaron dos plantas por parcela, para un total de 12 plantas en cada variedad, y por unidad experimental, las cuales fueron pesadas y llevadas a un horno marca Binder® por 72 horas a 60°C para obtener el peso seco de cada una de ellas.

2.2.4 Eficiencia fotosintética

La eficiencia fotosintética se evaluó teniendo en cuenta la relación entre la fotosíntesis tomada en un instante específico y la fotosíntesis máxima (F_v/F_m), debido a que este parámetro expresa el máximo rendimiento cuántico del fotosistema II pSII (Sistema encargado de captar la energía lumínica de longitud de onda igual o menor a 680 nm) (Maxwell & Johnson, 2000).



Imagen 2-7 Medición de eficiencia fotosintética

Fuente: esta investigación

Con intervalos de 15 días a la misma hora (14:00), se tomaron 3 registros por parcela para un total de 18 plantas en cada variedad dentro de cada unidad experimental. Las plantas se adaptaron a oscuridad por 20 minutos antes de la medición y se seleccionaron las hojas que se encontraban en la zona media de la planta (Murchie & Lawson, 2013). Para la obtención de este parámetro se empleó un fluorómetro de campo marca Hansatech Instruments® referencia Handy PEA, el cual calcula automáticamente el parámetro F_v/F_m .

2.2.5 Índice de color

Teniendo en cuenta que el cultivo de lechuga es sensible a las condiciones de estrés lumínico, se empleó el parámetro de Índice de Color, determinando la respuesta del cultivo frente a la variación en la intensidad luminosa recibida. Esta sensibilidad se manifiesta en las variedades verdes con el incremento en el nivel de xantofilas generando tonalidades amarillentas (Sandermann, 1996; Demming-Adams & Adams, 1992), y en el caso de la variedad *Lollo Rosso*, afectan los niveles de antocianinas y flavonoides como responsables de la coloración morada (Gazula *et al.*, 2007; Tsormpatsidis E. *et al.*, 2008). Para esto se utilizó un cromámetro Konica Minolta®, analizando los datos en el espacio de color CiEI L*a*b*, tomando 3 muestras por cada variedad y por parcela en cada unidad experimental, con una frecuencia quincenal durante los dos ciclos en estudio.



Imagen 2-8 Cromámetro Konica Minolta

Fuente: <http://www.interempresas.net/FotosArtProductos/P98957.jpg>

La diferencia de color (ΔE) presentada por las plantas entre cubiertas plásticas se obtiene por la ecuación

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

Dónde:

ΔL , Δa , Δb : diferencia entre las magnitudes L*, a* y b* obtenidas en cada cubierta.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 Incidencia de la ubicación de los sensores en la medición de variables de clima⁴

Al tomar datos de clima en invernaderos, normalmente se colocan los sensores en sitios de fácil acceso para lectura. Sin embargo, el cultivo recibe condiciones climáticas diferentes a las del sensor. Para evaluar el efecto de una correcta ubicación del sensor en la toma de mediciones de variables climáticas, se realizó el análisis estadístico de comparación de medias para las temperaturas promedio: máxima, mínima, diurna y nocturna obtenidas en cada unidad experimental a 1,5 metros de altura y a dosel de cultivo. En el gráfico 3-1, se presentan los valores de temperaturas extremas (máximas y mínimas) registrados en las unidades experimentales durante los dos ciclos de cultivo.

Los rangos de variación de temperatura presentados en el invernadero con cubierta térmica oscilan entre 0,2°C y 7,1 °C en el día, y 0,2°C y 0,6°C en la noche; mientras que para el invernadero con cubierta convencional oscilan entre 0,1°C y 5,5°C en el día y 0,1°C y 1,5°C en la noche. Estos gradientes verticales de temperatura se deben a la menor densidad del aire caliente como lo explican Moller *et al.* (2003), Piscia (2012), Sumathy (1999) y Tanny (2013).

⁴ Se presentan los valores del estadístico t de Student para la comparación de medias de las variables climáticas en el anexo A.

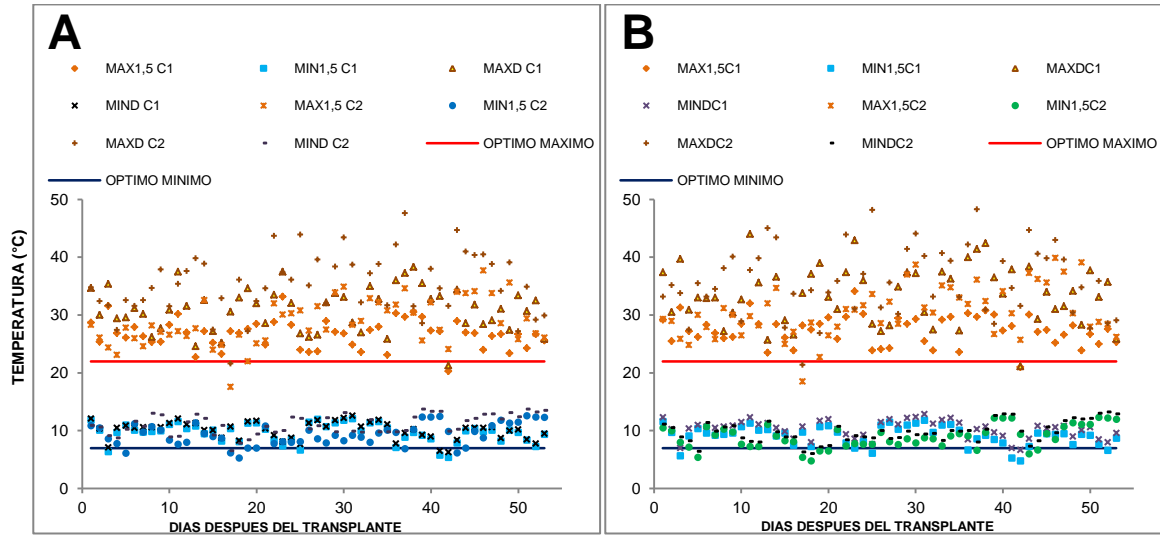


Gráfico 3-1 Distribución de temperaturas extremas en los invernaderos. A Cubierta térmica, B Cubierta convencional.

MAX1,5C1: temperatura máxima a 1,5 metros ciclo 1, MIN1,5C1: temperatura mínima a 1,5 metros ciclo 1, MAXDC1: temperatura máxima en dosel ciclo 1, MINDC1: temperatura mínima en dosel ciclo 1, MAX1,5C2: temperatura mínima a 1,5 metros ciclo 2, MIN1,5C2: temperatura mínima a 1,5 metros ciclo 2, MAXDC2: temperatura máxima en dosel ciclo 2, MINDC2: temperatura mínima en dosel ciclo 2.-

Se observa que durante el 97% del ciclo productivo se registraron temperaturas por encima del óptimo biológico (22°C) en los dos tipos de cubierta tanto a nivel de dosel como a 1,5 metros, lo cual activa los mecanismos de aclimatación y protección de las plantas, generando disminución en la eficiencia fotosintética (Hesketh & Moss, 1963; Demmig-Adams & Adams, 1996). En cuanto a los valores mínimos de temperatura registrados, en la unidad con cubierta térmica se presentaron valores por debajo del mínimo óptimo (7°C) para el desarrollo del cultivo durante el 1,9% del periodo evaluado a nivel de dosel y 8,5% a 1,5 metros, mientras que en el invernadero con cubierta convencional se registró este tipo de valores el 4,7% del ciclo productivo a nivel de dosel y 13,2% a 1,5 metros.

En el gráfico 3-2 se observa la distribución de temperaturas promedio diurna y nocturna para los dos invernaderos en los periodos analizados. Al comparar los valores, se advierte que, a nivel de dosel, el invernadero con cubierta convencional mantuvo temperaturas por encima del óptimo máximo el 72% de los días, mientras el invernadero con cubierta térmica lo hizo el 49% del tiempo. De otro lado, se observa que, aunque ninguna de las cubiertas presentó valores promedio por debajo de la temperatura óptima mínima, los promedios nocturnos de la unidad con cubierta convencional registraron

valores más bajos, mientras que la cubierta térmica presentó no solo valores más altos, sino más homogéneos dentro del invernadero.

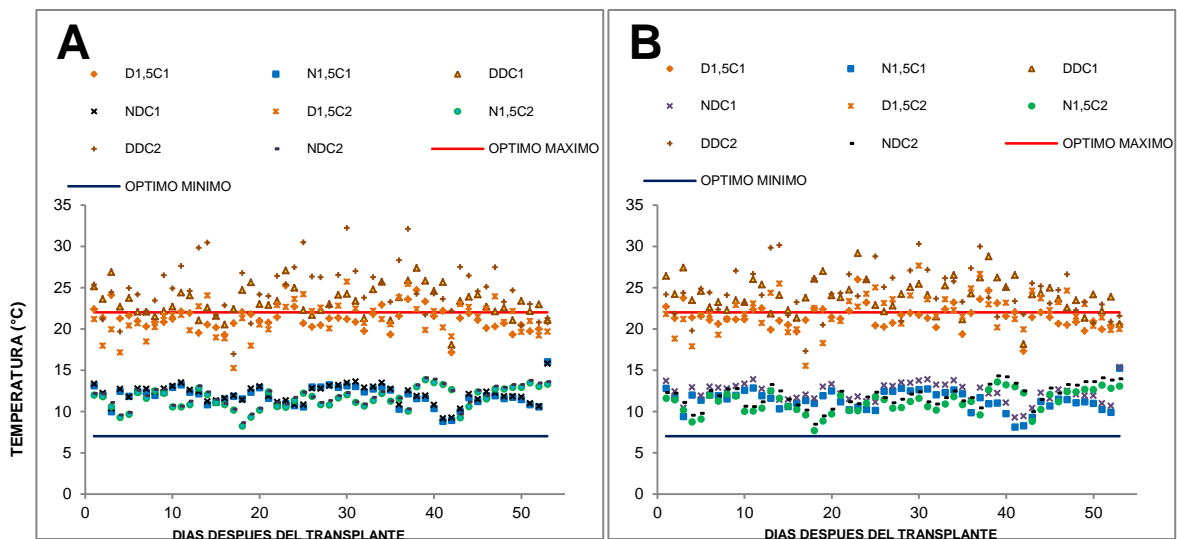


Gráfico 3-2 Distribución de temperatura promedio en los invernaderos. A Cubierta térmica, B Cubierta convencional.

D1,5C1: promedio diurno a 1,5 metros en el ciclo 1, DDC1: promedio diurno en dosel ciclo 1, N1,5C1: promedio nocturno a 1,5 metros ciclo 1, NDC1: promedio nocturno en dosel ciclo 1, D1,5C2: promedio diurno a 1,5 metros ciclo 2, DDC2: promedio diurno en dosel ciclo 2, N1,5C2: promedio nocturno a 1,5 metros ciclo 2, NDC2: promedio nocturno en dosel ciclo 2.

Se observó (tabla 3-1) que la tendencia en los dos ciclos de cultivo se mantiene, mostrando diferencias altamente significativas entre las temperaturas tomadas a nivel de dosel de cultivo y a 1,5 m de altura en el centro del invernadero, coincidente con lo mostrado por Acuña (2009) mediante simulación para invernaderos de flores en Bogotá, y por Villagrán *et al.* (2012) en invernaderos para otras regiones del país. Lo anterior indica que para el caso de temperatura, la ubicación del sensor es clave para la correcta toma de decisiones en favor del cultivo. En este caso, debe colocarse el sensor a nivel de dosel de cultivo para visualizar correctamente el efecto de la temperatura sobre las variables fisiológicas.

Tabla 3-1 Valores promedio de temperatura a nivel de dosel y a 1,5 m registrados para cada tipo de cubierta (análisis de comparación de medias t-Student)

| TEMPERATURA °C | TERMICA | | | | CONVENCIONAL | | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|--------------|--------|---------|--------|
| | CICLO 1 | | CICLO 2 | | CICLO 1 | | CICLO 2 | |
| | 1,5 m | DOSEL | 1,5 m | DOSEL | 1,5 m | DOSEL | 1,5 m | DOSEL |
| PROMEDIO DIURNA | 21,2 ‡ | 25,3 ‡ | 21,2 ‡ | 24,8 ‡ | 21,4 ‡ | 24,1 ‡ | 22,1 ‡ | 24,4 ‡ |
| PROMEDIO NOCTURNA | 11,8 ns | 12,1 ns | 11,6 ns | 11,8 ns | 11,4 ‡ | 13,3 ‡ | 11,2 ‡ | 13,9 ‡ |
| MAXIMA | 33,2 ‡ | 38,3 ‡ | 37,7 ‡ | 47,6 ‡ | 34,1 ‡ | 44,0 ‡ | 39,9 ‡ | 48,3 ‡ |
| MINIMA | 5,4 ‡ | 6,3 ‡ | 5,3 ‡ | 6,5 ‡ | 4,8 ‡ | 6,7 ‡ | 4,8 ‡ | 6,0 ‡ |

‡: p<0,01, †: p<0,05, ns: no significativo

En cuanto a la humedad relativa, se observó que la unidad con cubierta térmica presentó variaciones de humedad entre 7,3% y 7,8% promedio diurna y 5,3% y 5,8% nocturna; mientras que en la unidad con cubierta convencional las variaciones oscilaron entre 7,7% y 9,5% en el día y 6,0% y 6,8% en la noche. Para este parámetro, no se presentaron diferencias estadísticas entre los valores medidos en los dos puntos del invernadero (tabla 3-2), lo cual se explica por el alto índice de renovación del aire, mayor a 50 renovaciones por hora, debido al volumen pequeño del invernadero y al área de ventilación del mismo, con lo cual se consiguen valores de humedad relativa similares a los presentados por el aire del ambiente exterior. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Arellano-García *et al.* (2011) para invernaderos con ventilación natural y con la investigación realizada por De Sá Andrade *et al.* (2011) en invernaderos con diferentes cubiertas plásticas. Lo anterior indica que para esta variable, la toma de decisiones no se ve afectada por el punto de ubicación del sensor.

Tabla 3-2 Valores promedio de Humedad Relativa a nivel de dosel y a 1,5 m registrados para cada tipo de cubierta (análisis de comparación de medias t-Student)

| HUMEDAD RELATIVA % | TERMICA | | | | CONVENCIONAL | | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|
| | CICLO 1 | | CICLO 2 | | CICLO 1 | | CICLO 2 | |
| | 1,5 m | DOSEL | 1,5 m | DOSEL | 1,5 m | DOSEL | 1,5 m | DOSEL |
| PROMEDIODIURNA | 55,9 ns | 56,7 ns | 55,5 ns | 51,8 ns | 54,4 ns | 53,0 ns | 53,2 ns | 53,1 ns |
| PROMEDIO NOCTURNA | 81,6 ns | 83,3 ns | 82,0 ns | 82,2 ns | 81,7 ns | 82,5 ns | 82,2 ns | 82,8 ns |
| MAXIMA | 95,7 ns | 93,1 ns | 95,8 ns | 92,5 ns | 94,5 ns | 92,8 ns | 94,6 ns | 92,9 ns |
| MINIMA | 29,4 ns | 25,5 ns | 25,3 ns | 18,1 ns | 26,1 ns | 20,0 ns | 21,9 ns | 17,1 ns |

‡: p<0,01, †: p<0,05, ns: no significativo

En el gráfico 3-3 se presenta el comportamiento de la humedad relativa promedio diurna y nocturna, donde se observa en el promedio diurno la disminución de la humedad al cambiar el punto de ubicación del sensor, al igual que en las investigaciones realizadas por Tanny *et al.* (2003) para pantallas térmicas en invernaderos. Sin embargo, es de resaltar que aunque se aprecia esta disminución de humedad relativa al cambiar el punto de ubicación del sensor, al realizar el análisis estadístico no se encuentran diferencias significativas en el comportamiento de este parámetro medido bajo los dos tipos de cubierta.

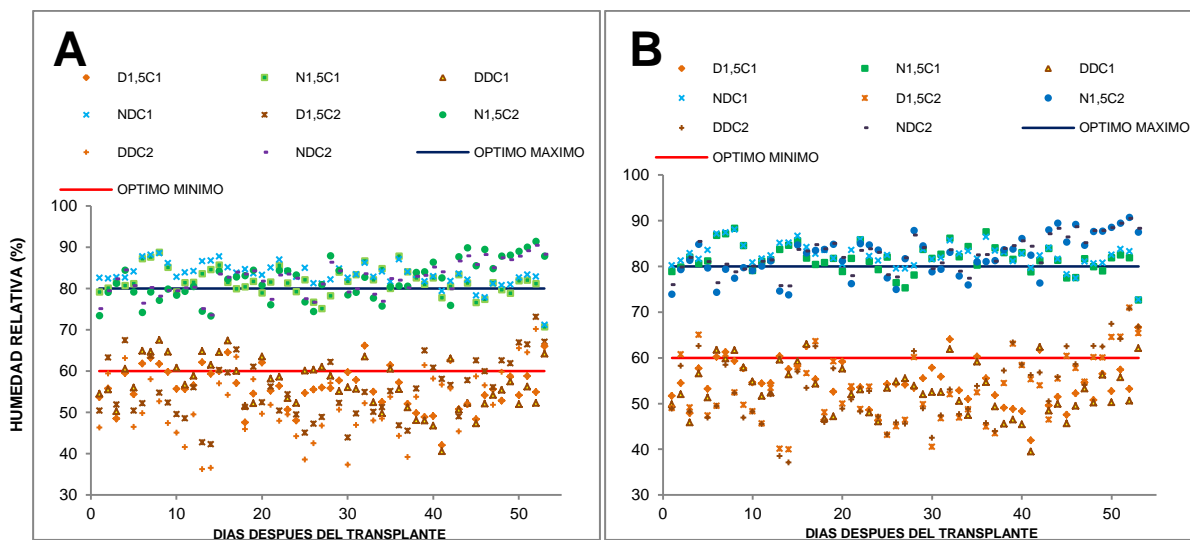


Gráfico 3-3 Comportamiento de la humedad relativa promedio diurna y nocturna en los invernaderos. A cubierta térmica, B cubierta convencional.

D1,5C1: promedio diurno a 1,5 metros ciclo 1, DDC1: promedio diurno en dosel ciclo 1, N1,5C1: promedio nocturno a 1,5 metros ciclo 1, NDC1: promedio nocturno en dosel ciclo 1, D1,5C2: promedio diurno a 1,5 metros ciclo 2, DDC2: promedio diurno en dosel ciclo 2, N1,5C2: promedio nocturno a 1,5 metros ciclo 2, NDC2: promedio nocturno en dosel ciclo 2.

Comparando los valores de clima (temperatura y humedad relativa) presentes entre los dos tipos de cubierta, se considera que el comportamiento es similar durante el día en los dos invernaderos. Sin embargo las diferencias de comportamiento se generan en las noches por efecto del carácter térmico en una de las dos cubiertas (tabla 3-3), donde se restringe la pérdida de calor nocturna dentro del invernadero por salida de la radiación terrestre a través de la cubierta, disminuyendo las variaciones bruscas de temperatura.

Tabla 3-3 Valores promedio de Temperatura a nivel de dosel y a 1,5 m registrados para cada tipo de cubierta (análisis de medias t-Student)

| TEMPERATURA °C | CICLO 1 | | | | CICLO 2 | | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1,5 m | | DOSEL | | 1,5 m | | DOSEL | |
| | TERM | CONV | TERM | CONV | TERM | CONV | TERM | CONV |
| PROMEDIO DIURNA | 21,2 ns | 21,4 ns | 23,3 ns | 24,1 ns | 22,1 ns | 21,2 ns | 24,8 ns | 24,4 ns |
| PROMEDIO NOCTURNA | 11,8 ns | 11,4 ns | 12,1 ns | 12,3 ns | 11,2 ns | 11,6 ns | 11,8 † | 11,9 † |
| MAXIMA | 33,2 ns | 34,1 ns | 38,3 ns | 44,0 ns | 39,9 ns | 37,7 ns | 47,6 ns | 48,3 ns |
| MINIMA | 5,4 ns | 4,8 ns | 6,3 ‡ | 4,7 ‡ | 4,8 ns | 5,3 ns | 6,5 ns | 6,0 ns |

‡: p<0,01, †: p<0,05, ns: no significativo

3.2 Análisis del comportamiento de las variables climáticas (T y HR) por ciclo de cultivo

En el numeral anterior se aclaró que la ubicación del sensor de temperatura a nivel de dosel de cultivo brinda datos más confiables sobre la respuesta de la lechuga a los cambios de esta variable abiótica de producción. Por esta razón en este numeral, el análisis se realizó mediante comparación de medias de las temperaturas promedio: máxima, diurna y nocturna solamente a nivel de dosel de cultivo entre los invernaderos.

Al realizar el análisis comparativo, en el gráfico 3-4 se presenta el comportamiento de humedad relativa y temperatura a lo largo del día en cada ciclo de cultivo a nivel de dosel, determinado mediante el promedio de temperaturas para cada hora durante el tiempo de medición. Se presentaron variaciones de temperatura entre cubiertas entre 0,1°C y 6,5°C durante el día y 0,2°C y 3,8°C en la noche.

Se observa que en el primer ciclo la cubierta térmica registra menores valores de temperatura y humedad relativa en el periodo diurno, debido a la disminución de la calidad de luz incidente generada por la nubosidad presentada entre mayo y junio. Para el segundo ciclo se observa cómo los valores de temperatura registrados en la unidad con cubierta térmica se incrementan y se equiparan con los obtenidos en el invernadero con cubierta convencional.

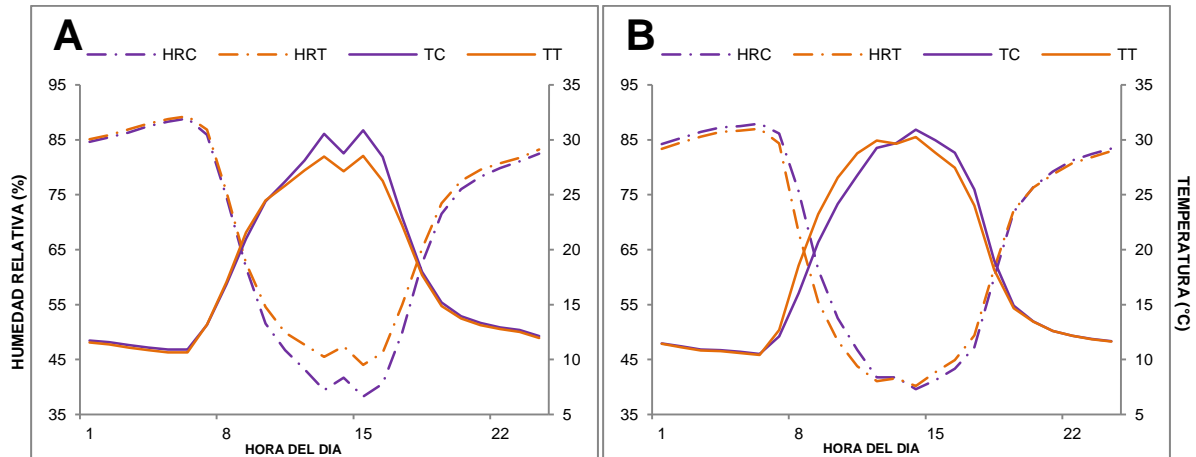


Gráfico 3-4 Comportamiento de humedad y temperatura del día promedio del ciclo en el dosel. A ciclo 1 (mayo - julio), B ciclo 2 (septiembre - noviembre).

HRC: humedad relativa cubierta convencional, HRT: humedad relativa cubierta térmica TC: temperatura cubierta convencional, TT: temperatura cubierta térmica.

El gráfico 3-5 muestra los valores de las temperaturas extremas a nivel de dosel, donde se observa que en el segundo ciclo (septiembre a noviembre) se presentaron mayores diferencias de temperatura que en el periodo comprendido entre mayo y julio, esto es el reflejo de la nubosidad propia de la ciudad, pues mayo y junio son dos de los meses que presentan mayor cubrimiento del cielo nublado con 34% y 37% respectivamente (IDEAM, 2007).

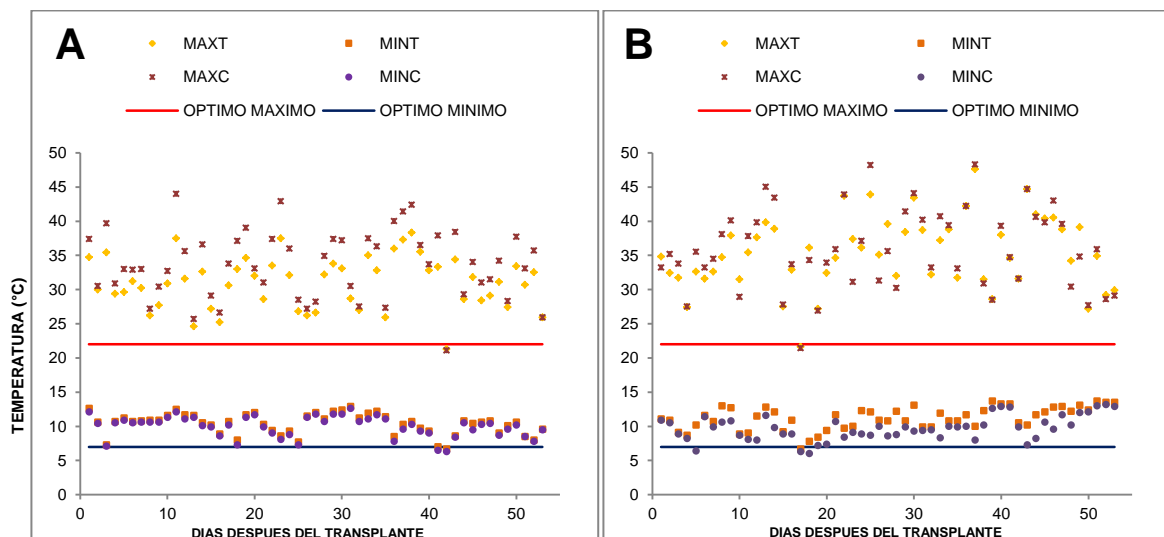


Gráfico 3-5 Temperaturas extremas por ciclo de cultivo a nivel de dosel. A ciclo 1 (mayo a julio), B ciclo 2 (septiembre a noviembre).

MAXT: temperatura máxima cubierta térmica, MINT: temperatura mínima cubierta térmica, MAXC: temperatura máxima cubierta convencional, MINC: temperatura mínima cubierta convencional.

En el gráfico 3-6 se presenta la relación entre humedad y temperatura para los ciclos de cultivo generada a partir de valores promedio semanales, medidos a nivel de dosel de cultivo. En la unidad con cubierta termica se mantienen los valores óptimos (Brunini *et al.*,1976; Smith *et al.*, 2011) de humedad (60% - 80%) y temperatura (7°C -22°C) el 66,1% del día, mientras que en la cubierta convencional lo hace el 64,6% en el primer ciclo. En el segundo ciclo, la cubierta térmica mantiene condiciones óptimas el 63,5% del día y la convencional 62,0% del tiempo, mostrando similitudes con las observaciones realizadas por Dufault *et al.*, (2009) y Brunini *et al.* (1976). Es de anotar que el tiempo de zona de confort, es aquel en donde tanto por temperatura como por humedad se encontraban en el rango óptimo. Los puntos fuera de este rango indican un nivel de estrés por cualquiera de las dos variables, causando cierres estomáticos o disminución en las tasas de crecimiento, debido al consumo energético de la planta para mantenerse trabajando en estas condiciones. Sin embargo, se resalta que en ningún momento las plantas llegaron a condiciones de estrés severo que causara daños permanentes o letales, que afectaran las tendencias o las mediciones en este estudio.

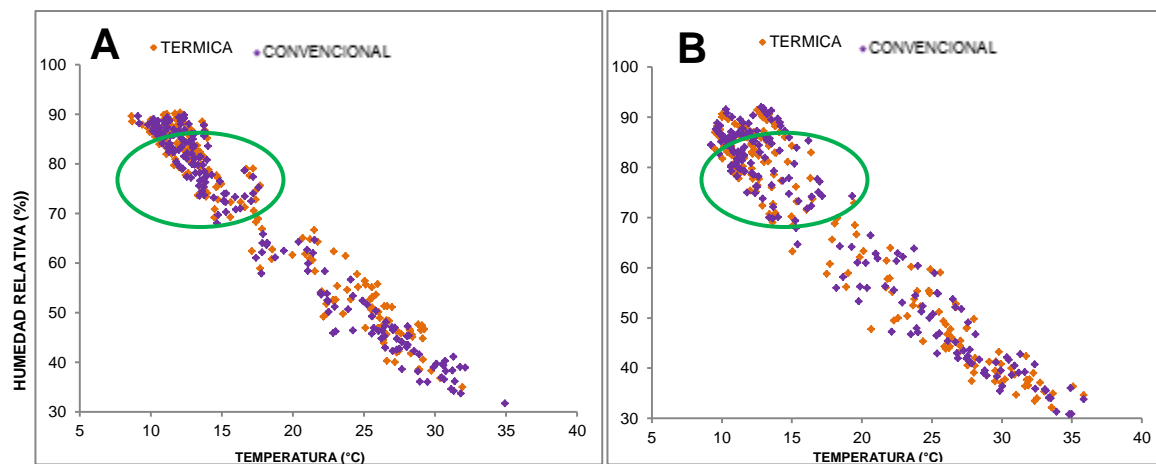


Gráfico 3-6. Descripción de temperatura y humedad relativa en las unidades experimentales. A ciclo 1 (mayo a julio), B ciclo 2 (septiembre a noviembre).

Al realizar el análisis estadístico de comparación de medias de las temperaturas promedio: máxima, diurna y nocturna a nivel de dosel de cultivo para los dos ciclos productivos, se encontraron diferencias significativas únicamente en las temperaturas mínima y nocturna, validando el efecto térmico de la película de cubierta en una de las unidades experimentales, de manera similar a las observaciones realizadas por Meca Abad (2012) en Almería.

Por su parte la prueba de comparación de medias no generó diferencias significativas para los valores de humedad relativa entre cubiertas. Lo anterior nos indica que aunque la humedad relativa en los invernaderos pueda ser similar, en caso de valores elevados de HR, el efecto térmico de una de las cubiertas permite mantener el cultivo seco, al requerir de un mayor nivel energético para condensar el agua presente en el aire. Este resultado que concuerda con las investigaciones de Zhang *et al.* (1996).

3.3 Respuesta del cultivo a las diferentes condiciones climáticas del estudio

3.3.1 Determinación de tiempo térmico (Grados día –GD)

Los métodos empleados para la obtención de GD presentan diferentes sesgos en la generación de los datos: El método residual considera las temperaturas del ambiente y las relaciona con la temperatura base del cultivo asumiendo un comportamiento lineal, el método residual modificado descarta la acumulación de calor cuando la temperatura ambiente es mayor que la temperatura máxima de crecimiento del cultivo. Finalmente el método de Ometto relaciona no solo las temperaturas del ambiente, sino las temperaturas base y de máximo desarrollo del cultivo asumiendo un comportamiento sinusoidal dependiendo de las relaciones entre estas temperaturas (Castillo Lopez, 2000)

En el grafico 3-7 se observan los valores de GD calculados por los diferentes métodos durante 8 semanas después del transplante. Los valores de temperatura base de cultivo y temperatura máxima son los registrados por Brunini *et al.* (1976) y Smith *et al.* (2011) para el cultivo de lechuga (Tbase: 7°C, Tmax: 22°C).

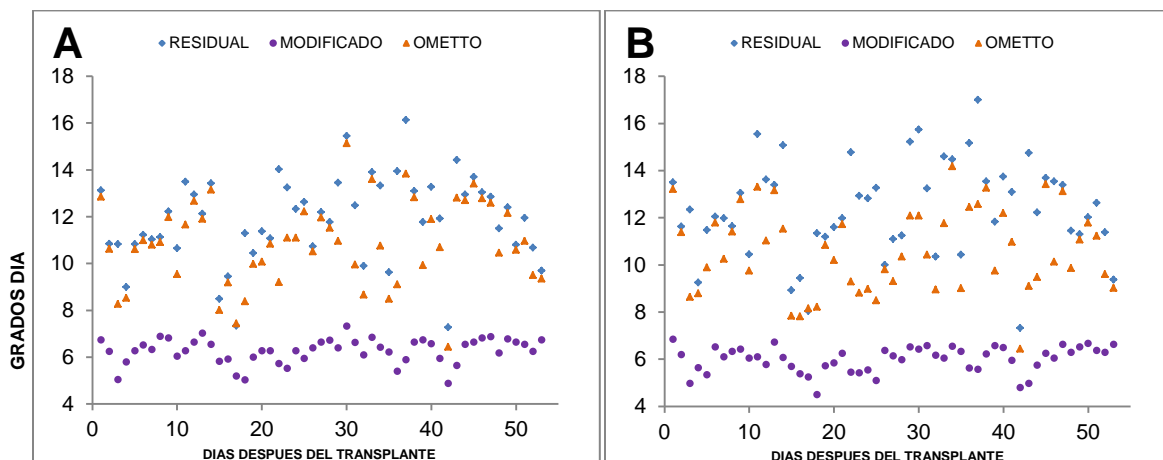


Gráfico 3-7. Grados día obtenidos por diferentes métodos en cada unidad experimental. A Térmica, B Convencional.

Se presentaron diferencias para los valores de GD acumulados obtenidos con los tres métodos, los cuales se registran en la tabla 3-3. Los métodos de Ometto y modificado muestran una mayor acumulación de GD en la cubierta térmica, mientras que en el método residual se acumulan más GD en la cubierta convencional, este tipo de variaciones de acumulación entre métodos ha sido registrada también en otros cultivos como *Fressia x híbrida* (Miranda Villagomez, 2012) y maíz amarillo (Yzarra, Trebejo, & Noriega, 2009).

Tabla 3-4 Comparación de los valores de GD obtenidos por diferentes métodos para las variedades de lechuga

R: residual, M: residual modificado, O: Ometto

| METODO | CUBIERTA TERMICA | | | CUBIERTA CONVENCIONAL | | |
|---------------------|------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|
| | R | M | O | R | M | O |
| GD acumulado | 628,85 | 332,78 | 575,83 | 655,3 | 318,13 | 561,01 |
| CV (%) | 15,292 | 8,5565 | 16,492 | 16,393 | 9,0792 | 16,758 |

Se observa cómo, aunque el método residual es el más empleado para la determinación de GD, el método modificado presenta un menor coeficiente de variación y al igual que Ometto, presentan a la cubierta térmica como aquella donde se acumulan más GD. Estos resultados dificultan la toma de decisión sobre cual método se ajusta mejor al cultivo (Bonhomme, 2000).

3.3.2 Determinación de Luz Diaria integrada (LDI)

La respuesta de la lechuga a las variaciones de Luz Diaria Integrada generada por la variación en la intensidad luminosa presentada en las cubiertas, se refleja en la tasa de crecimiento especialmente para las variedades verdes (Kitaya *et al.*, 1998; loslovich, 2009) y en una coloración más profunda en las variedades moradas (Shioshita *et al.*, 2007; Tsormpatsidis *et al.*, 2008 y 2010)

Se observa en el gráfico 3-8 el comportamiento de la Luz diaria integrada LDI en los dos ciclos de cultivo. Para cada ciclo se presentaron diferencias altamente significativas entre las cubiertas. Los valores de LDI calculados a partir de la Intensidad Luminosa medida en la cubierta térmica oscilaron entre 12,4 y 17,5 mol m²d⁻¹, mientras que en la cubierta convencional oscilaron entre 13,6 y 19,1 mol m²d⁻¹, los cuales se encuentran dentro de los rangos óptimos para el cultivo de lechuga (Dorais, 2003).

Al igual que Cemek *et al.* (2006), se encontró que la cubierta convencional registra valores mas altos que la cubierta térmica, debido a que el filtro UV de la cubierta térmica restringe el paso de la radiación a 380 nm. La diferencia entre los valores obtenidos en los dos ciclos se explica por los niveles de nubosidad presentados en la zona durante el estudio, como se expone en el estudio de la caracterización climática de Bogotá y la cuenca del rio Tunjuelo (IDEAM, 2007), y es concordante con los resultados obtenidos por Legarrea *et al.* (2014) sobre cubiertas fotoselectivas.

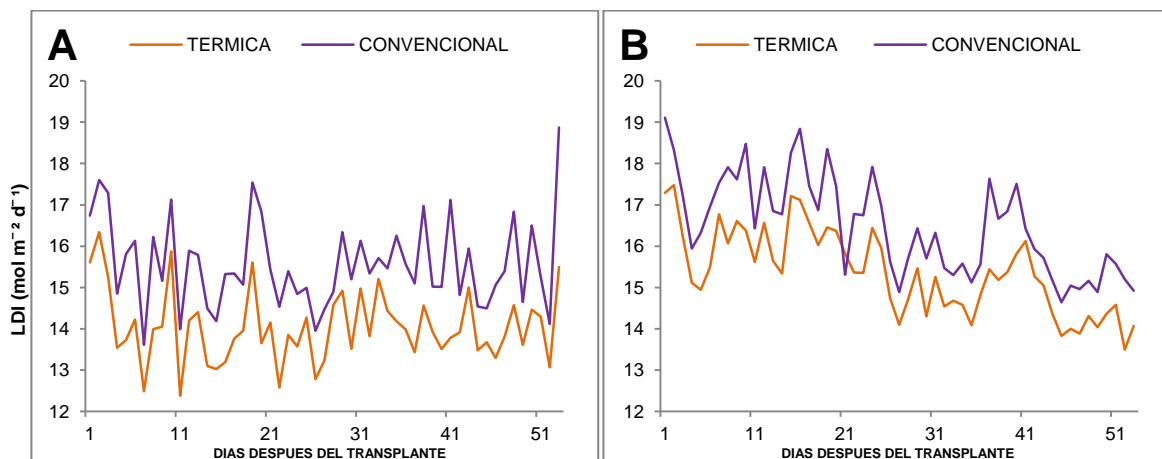


Gráfico 3-8 Comportamiento de LDI por ciclo de cultivo. A ciclo 1 (mayo - julio), B ciclo 2 (septiembre - noviembre).

En cuanto a los valores de LDI acumulados, la cubierta térmica registra 779,43 mol m⁻²d⁻¹, mientras que la cubierta convencional acumula 849,615 mol m⁻²d⁻¹, los cuales se encuentran dentro de los rangos presentados por Kittas *et al*, (1999) para materiales de cubierta en invernaderos y con las investigaciones de Becker (2014) en variedades de lechuga de hoja roja.

3.3.3 Determinación de Relación Fototérmica (PTR)

El comportamiento de la relación fototérmica, obtenida a partir de los valores de Luz Diaria Integrada LDI y Grados Día GD obtenidos (promedio para los dos ciclos de cultivo) se presentan en el gráfico 3-6. Se aprecia como en la cubierta térmica se generan datos menos dispersos que en la cubierta convencional, relacionando menores valores de luminosidad pero mayores valores de temperatura.

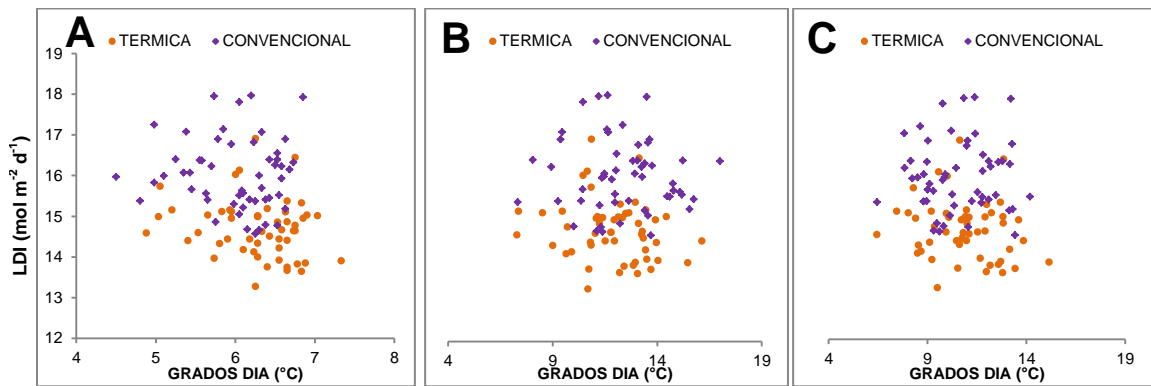


Gráfico 3-9 Comportamiento de LDI y GD en los invernaderos. A método modificado, B método residual, C método de ometto.

Se observa que la cubierta convencional tiene una mayor proporción entre energía térmica y energía lumínica, independientemente del valor de GD empleado. Al igual que con los GD, el menor valor de coeficiente de variación se obtuvo con los resultados del método modificado, como se observa en la tabla 3-5.

Tabla 3-5 Comparación de los valores de PTR obtenidos con los diferentes valores de GD generados.
R: residual, M: residual modificado, O: Ometto

| CUBIERTA TERMICA | | | CUBIERTA CONVENCIONAL | | | | |
|------------------|-------|--------|-----------------------|-----------|-------|--------|-------|
| METODO | R | M | O | METODO | R | M | O |
| PTR | 70,05 | 126,40 | 76,87 | PTR | 73,60 | 144,71 | 85,75 |
| acumulado | | | | acumulado | | | |
| CV (%) | 24,36 | 11,95 | 20,84 | CV (%) | 25,90 | 12,07 | 19,87 |

Al realizar la comparación de medias, no se presentaron diferencias significativas entre cubiertas con los valores de PTR obtenidos con los GD por el método residual y método de Ometto, mientras que con el método modificado se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$). Teniendo en cuenta que en la comparación de medias entre cubiertas no se presentaron diferencias significativas en la temperatura mientras que la iluminancia en los invernaderos presentó diferencias altamente significativas, y que los análisis entre los métodos para la obtención de GD presentan variaciones en cuanto a la tendencia de acumulación de calor del cultivo, estos resultados son esperados.

Al considerar las variables climatológicas que inciden en el cultivo, se observa como al analizar cada variable de forma separada se genera una aproximación a la dinámica del mismo, pero esta aproximación no es la más adecuada debido a que al sucederse perturbaciones, aunque sean transitorias, en estos parámetros se afecta la respuesta obtenida; además, se debe tener en cuenta que la respuesta morfofisiológica de las plantas no puede explicarse a partir de una sola variable climática, ya que existen procesos claramente diferenciados que se relacionan con parámetros climáticos específicos (fotomorfogénesis). Por otro lado, se debe tener en cuenta que en el caso de los grados día, al no existir un modelo unificado para su obtención y al emplear diversos rangos de temperatura de cultivo dependiendo del modelo aplicado, los valores generados se ven sesgados y dificultan su réplica en otras investigaciones.

Teniendo en cuenta que existen modelos de crecimiento para lechuga robustos donde se evidencia la interacción de la temperatura y la radiación PAR (Seginer I., 2003; Van Henten, 1994) y siguiendo la metodología propuesta por Liu & Heins (2002), se evaluó la respuesta de las variables fisiológicas tomando la proporción fototérmica como variable climática, dado que, al relacionar la energía térmica con la energía lumínica y con el crecimiento del cultivo, se incrementa la robustés de los resultados obtenidos asociados

a parámetros climáticos generados tanto por las variaciones de temperatura como por las de luminosidad.

3.3.4 Respuesta de las variables morfo fisiológicas

Los resultados de la ANOVA factorial para las variables morfo fisiológicas se presentan en el anexo A. El crecimiento presentó tendencia exponencial reflejada en el comportamiento de las variables analizadas; este tipo de respuesta se genera cuando el cultivo no cumple la totalidad del ciclo de vida, presentándose solo las fases de crecimiento logarítmico y lineal descritas por Salisbury y Ross (2000).

Morfología del cultivo

- DIAMETRO

En el gráfico 3-10 se presenta el comportamiento del diámetro por variedad. El mayor valor se presentó bajo la cubierta térmica en la variedad Vera (22,75 cm) y el menor valor se registró en la variedad Casabela bajo cubierta térmica (15,92 cm)

Se presentaron diferencias significativas debidas a la cubierta en la variedad Vera, las cuales superaron los 4 cm. En las variedades Lollo Rosso y Casabela no se presentaron diferencias significativas en el diámetro debido al tipo de cubierta empleado y, los mayores valores de diámetro se presentaron en las plantas bajo cubierta convencional, a diferencia de la variedad Vera, donde los mayores valores se obtuvieron en la cubierta térmica. Esos resultados concuerdan con las investigaciones realizadas por Mascarini *et al.* (2013) sobre la productividad de rosa bajo cubiertas fotoselectivas, donde sugieren que la interacción significativa entre la variedad y el film depende de la variedad.

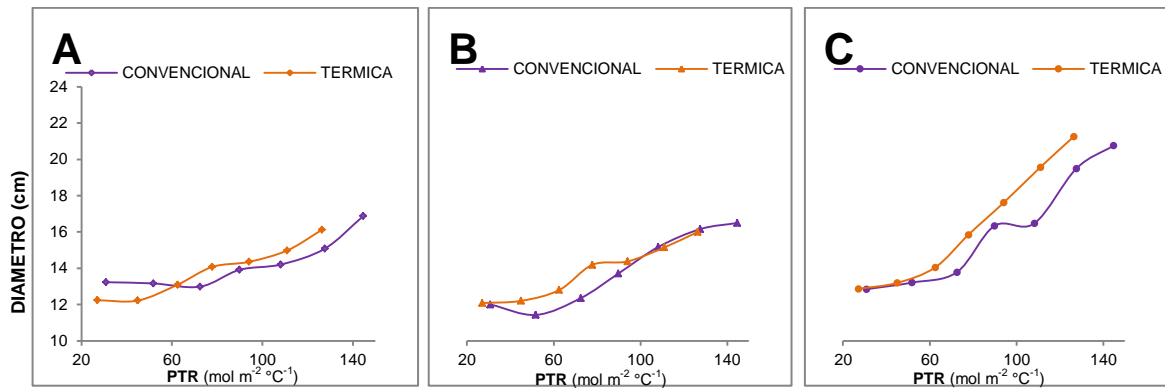


Gráfico 3-10 Comportamiento del diámetro de las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera

▪ ALTURA

No se detectaron diferencias significativas entre cubiertas para la variable altura, observándose promedios estadísticamente homogéneos por variedad ante la variación de cubierta, las diferencias encontradas por variedad y tipo de cubierta son inferiores a 0,7 mm. Para las variedades Lollo Rosso y Casabela los menores valores de altura se presentaron en la cubierta térmica, mientras que para la variedad Vera se presentaron en la cubierta convencional. Aguilar-García *et al.* (2005) señalan que las diferencias en la altura de las plantas son generadas por la competencia intraespecífica generada por el aumento en la densidad de siembra del cultivo. Sin embargo, teniendo en cuenta que para el presente estudio la densidad de siembra fue la misma, se podría decir que la variación de altura se debe también a los efectos de la cubierta plástica y la variedad.

Al correlacionar la altura con las demás variables estudiadas, para todas las variedades, se observa que se presentan correlaciones positivas pero no significativas, excepto con la variable TCR, con la que tienen una correlación negativa débil, lo que muestra que al incrementarse la altura disminuye la velocidad de crecimiento. Estas correlaciones pueden observarse en el anexo C.

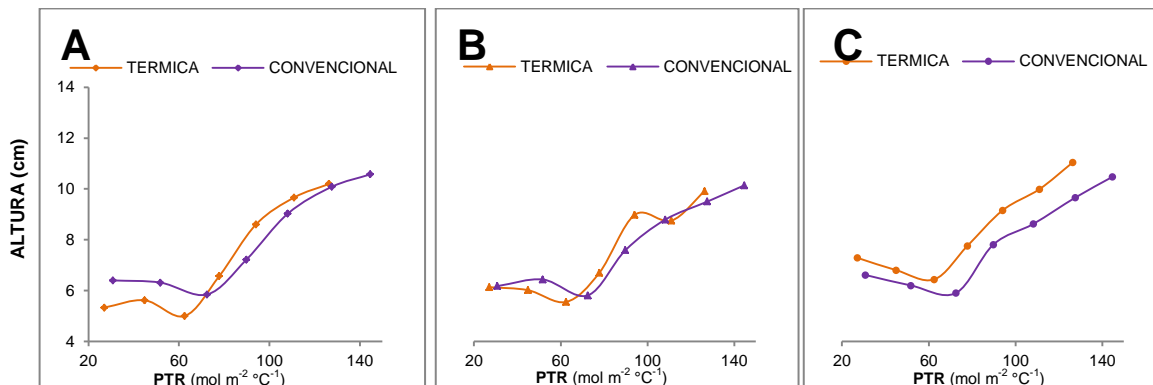


Gráfico 3-11 Comportamiento del parámetro altura en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera.

▪ ÁREA FOLIAR

El tipo de cubierta presentó un efecto significativo en el área foliar de las variedades Lollo Rosso y Ver, presentándose diferencias de 34% 21% respectivamente. El mayor valor de área foliar se presentó en la variedad Lollo Rosso bajo cubierta convencional (1284,71 cm²) y el menor valor se registra en la variedad Casabela bajo cubierta convencional (833,32 cm²).

En el gráfico 3-12 se observa cómo después de 60 mol m⁻² -1 (cuatro semanas después del transplante) se acentúan las diferencias de área foliar entre cubiertas. Para las variedades Casabela y Vera la mayor acumulación de área se presentó en los cultivos bajo cubierta térmica, mientras que para la variedad Lollo Rosso se presentó mayor acumulación en las plantas cultivadas bajo cubierta convencional.

Se presenta correlación positiva y altamente significativa entre el área foliar, diámetro y biomasa fresca y seca mostrando que al incrementarse el área foliar, se incrementa el diámetro y se acumula más biomasa.

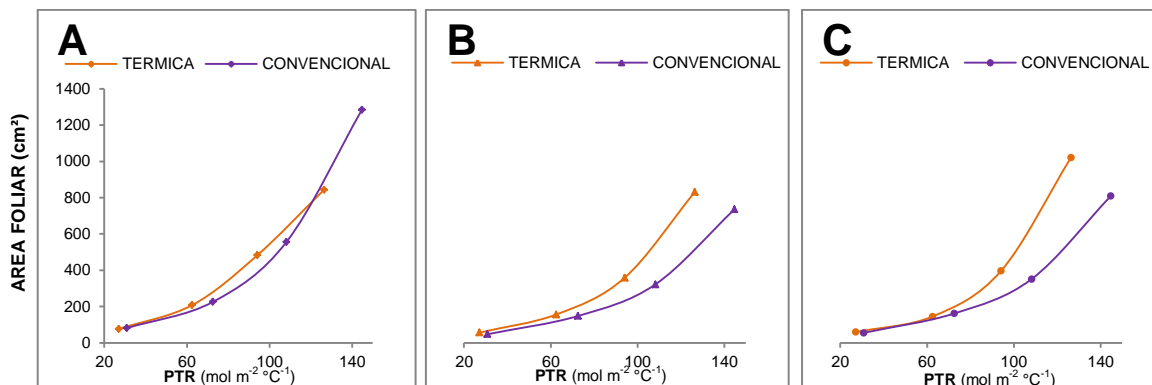


Gráfico 3-12 Comportamiento del parámetro altura en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera.

Fisiología del cultivo

▪ BIOMASA FRESCA

El tipo de cubierta no presentó ningún efecto en las variedades estudiadas, Benavides Mendoza (1998) obtuvo una respuesta similar en su estudio con lechuga variedad Great Lakes. La mayor acumulación de biomasa fresca se presentó en la variedad Casabela cultivada bajo cubierta convencional (866,63 g) y la menor acumulación se presentó en la variedad Casabela cultivada bajo cubierta térmica (618,75 g).

En el gráfico 3-13 se evidencia como el crecimiento es lento y lineal hasta que se acumulan $60 \text{ mol m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$ (cuarta semana después del transplante), donde aumenta la velocidad del crecimiento. Este mismo comportamiento fue observado por Becker (2014) en lechugas variedad Lollo Rosso y red oak leaf, y por Hoyos C. *et al.* (2009) para espinaca cultivada en la misma zona de este estudio.

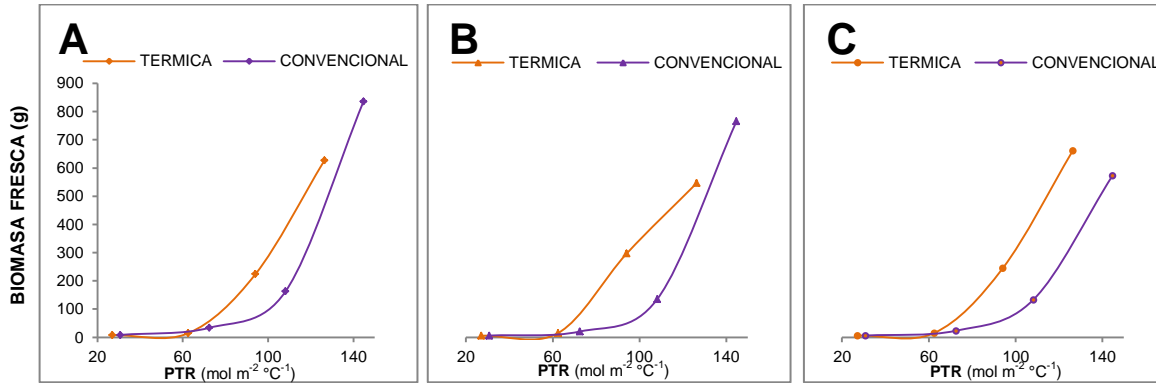


Gráfico 3-13 Comportamiento del parámetro biomasa fresca en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera.

En la tabla 3-6 se presentan las ecuaciones de regresión para la obtención de biomasa fresca a partir de la acumulación de PTR. Se observa que para obtener el peso mínimo requerido para categorías I y II con base en la Norma Técnica Colombiana NTC 1064 (200 g), se requiere acumular bajo cubierta térmica 102, 99 y 98 mol m⁻² °C⁻¹ para las variedades Lollo Rosso, Casabela y Vera respectivamente, y bajo cubierta convencional se requiere acumular 112, 114 y 117 mol m⁻² °C⁻¹ para las variedades Lollo Rosso, Casabela y Vera respectivamente.

Tabla 3-6 Ecuaciones de regresión para el parámetro biomasa fresca

| VARIABLE | VARIEDAD - CUBIERTA | MODELO EXPONENCIAL | R ² |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------|
| Biomasa fresca (Bf) | Lollo Rosso - Térmica | $Bf = 1,5579e^{0,0478 PTR}$ | 0,9309 |
| | Lollo Rosso - Convencional | $Bf = 2,1525e^{0,0405 PTR}$ | 0,9946 |
| | Casabela - Térmica | $Bf = 1,4108e^{0,0503 PTR}$ | 0,9345 |
| | Casabela - Convencional | $Bf = 1,4801e^{0,043 PTR}$ | 0,9846 |
| | Vera - Térmica | $Bf = 1,4029e^{0,0506 PTR}$ | 0,9479 |
| | Vera - Convencional | $Bf = 1,7898e^{0,0404 PTR}$ | 0,9932 |

Los mayores valores de acumulación de biomasa en el invernadero con cubierta térmica, se deben al balance espectral, donde no solo se tiene en cuenta el valor de la radiación PAR (400 - 700 nm), sino la radiación en el espectro del infrarrojo (IR) (700 -1100 nm). (Pearson *et al.*, 1995; Benavides-Mendoza, *et al.*, 1998; Benavides-Mendoza A., 2004). Kittas & Baille (1998), determinaron las propiedades espectrales de varios materiales de cubierta de invernadero y al realizar la evaluación de los parámetros específicos

relacionados con la respuesta de plantas, encontraron que para materiales con filtros o fluorescentes es necesario no solo evaluar la radiación PAR interceptada, sino la relación del calor radiante - relación entre luz roja lejana (660-760 nm) e infrarroja (760-1000 nm)- debido a que los procesos morfogénéticos pueden verse drásticamente afectados por las variaciones generadas en las bandas UV e IR (criptocromo).

▪ BIOMASA SECA

A diferencia de la biomasa fresca, se presentó una respuesta significativa en la variedad Casabela en cuanto al contenido de materia seca acumulada al final del estudio, presentándose una diferencia de 20% entre cubiertas.

Para las variedades Casabela y Vera, la mayor acumulación se presentó bajo la cubierta convencional, mientras que para la variedad Lollo Rosso se presentó en la cubierta térmica, como puede observarse en el gráfico 3-14. La respuesta de la variedad Lollo Rosso es similar a la obtenida por Tsormpatsidis *et al.* (2008) y Shiohita *et al.* (2007) en sus investigaciones en esta variedad, donde la mayor acumulación de biomasa se presenta bajo cubiertas con filtro UV.

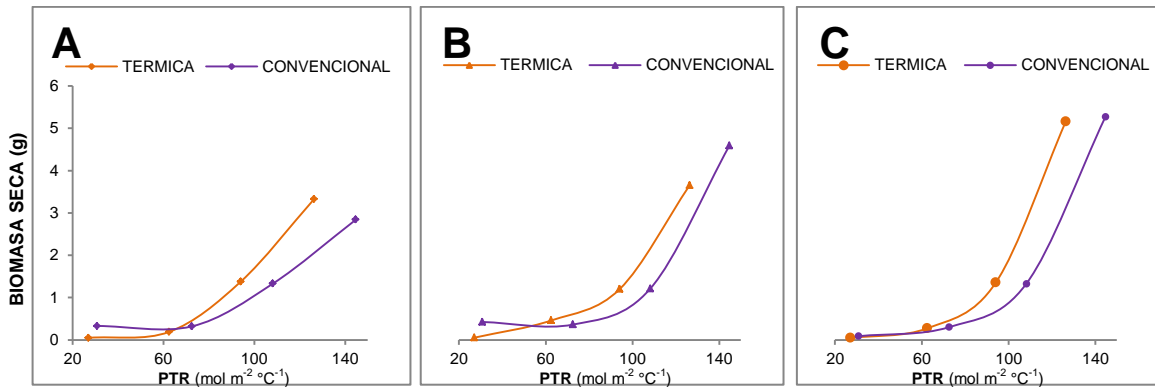


Gráfico 3-14 Comportamiento del parámetro biomasa seca en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera.

La curva de crecimiento de biomasa seca presenta valores de R² entre 0,8207 (variedad Casabela bajo cubierta térmica) y 0,9976 (variedad Vera bajo cubierta térmica). Los resultados obtenidos son consistentes con las investigaciones realizadas por Tei *et al.* (1996) en lechuga variedad crispa.

La menor acumulación de biomasa seca por parte de las variedades Casabela y Vera cultivada bajo cubierta térmica, se relaciona con la calidad de la radiación incidente, como lo muestran Liu y Heins (2002) en sus investigaciones sobre el crecimiento de poinsettia variedad freedom bajo diversas condiciones de luz y temperatura donde relaciona la radiación total con la acumulación de biomasa, y por Paradiso (2011) *et al.* en su investigación sobre la dependencia de la fotosíntesis y la absorvancia de luz debida al balance espectral de la radiación en el cultivo de rosa.

▪ INDICE DE AREA FOLIAR (IAF)

El tipo de cubierta no influyó en los resultados obtenidos de IAF, puesto que no se encontraron diferencias significativas en los valores obtenidos entre variedades y entre cubiertas. En el gráfico 3-15 se observa que el valor máximo se presentó en la variedad Lollo Rosso bajo cubierta convencional (5,38) y el mínimo se presentó en la variedad Vera bajo cubierta térmica (2,43), estos valores son mucho menores que los presentados por Tei *et al.* (1996) y Archila (1998), donde registran valores superiores a 12 obtenidos 75 días después del transplante. Carranza *et al.* (2009) en sus investigaciones presentan valores de 6,78 a 61 días despues del transplante en lechugas variedad batavia cultivadas en suelos salinos en la sabana de Bogotá, con lo que puede inferirse que los valores de IAF obtenidos reflejan que las plantas se han visto sometidas a estrés térmico, que redunda en un alargamiento del ciclo de cultivo.

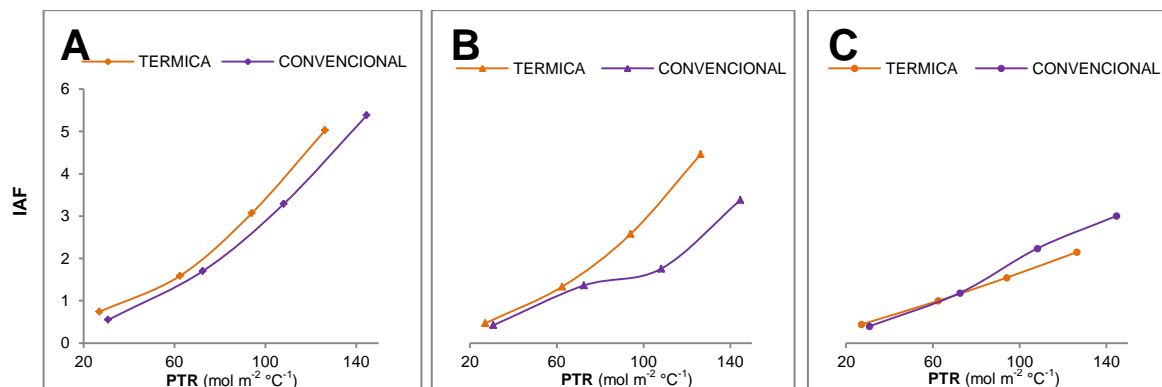


Gráfico 3-15 Comportamiento del parámetro IAF en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera.7

▪ AREA FOLIAR ESPECIFICA (AFE)

No se presentó influencia por parte de la cubierta para este parámetro. En el gráfico 3-13 se presentan los valores de AFE obtenidos en el estudio. Mayores valores de AFE implican que la planta invierte menos biomasa por unidad de área, presentando hojas menos turgentes (Poorter & De Jong, 1999). Hasta que el cultivo acumula 60 mol m⁻² °C⁻¹ se observa que las plantas bajo la cubierta térmica presentan mayores valores de AFE que los presentados en la cubierta convencional, tiempo después del cual las plantas bajo los dos ambientes presentan comportamientos similares.

Se observa que la variedad Lollo Rosso tuvo un comportamiento diferente a las otras variedades, presentando aumento de este parámetro hasta los 50 mol m⁻² °C⁻¹, decreciendo hasta los 90 mol m⁻² °C⁻¹, para finalmente aumentar los valores después de los 100 mol m⁻² °C⁻¹, mientras que las demás variedades tuvieron un comportamiento siempre decreciente. Esto muestra que en las variedades verdes el incremento de biomasa y área foliar se realiza de manera proporcional, en la variedad morada se presentan diferentes tasas de crecimiento entre los parámetros.

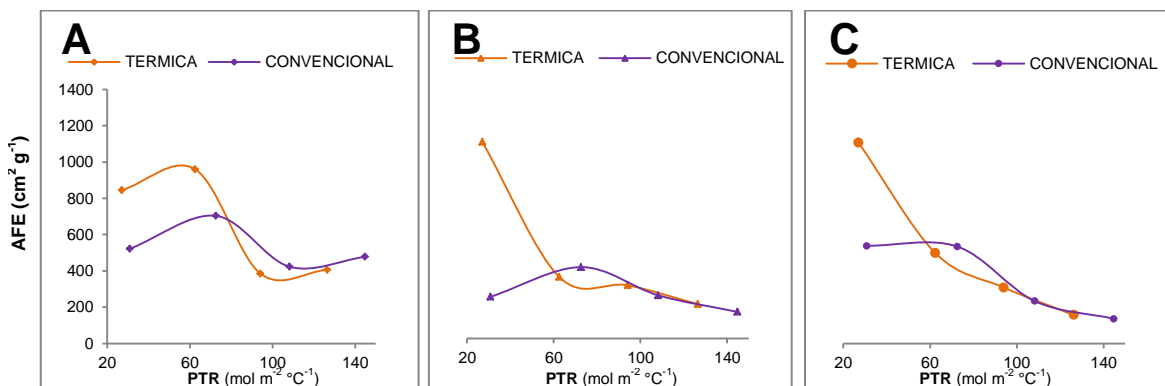


Gráfico 3-16 Comportamiento del parámetro AFE en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera

▪ TASA DE CRECIMIENTO RELATIVO (TCR)

La TCR presentó el comportamiento típico para este índice, mostrando valores altos al inicio del periodo de medición y disminuyendo a medida que aumenta la acumulación de materia seca (Gráfico 3-17). Se observaron diferencias significativas debidas a la cubierta en la variedad Lollo Rosso, donde los valores obtenidos en la cubierta convencional son

menores que los obtenidos en la cubierta térmica y que los registrados por Archila *et al.* (1998) y Carranza *et al.* (2009).

Los valores obtenidos para las tres variedades cultivadas bajo cubierta térmica, muestran que el incremento de materia seca en este tipo de cubierta es más acelerado que en la cubierta convencional hasta los 95 mol m⁻² °C⁻¹ (sexta semana) para las variedades Lollo Rosso y Casabela y hasta los 55 mol m⁻² °C⁻¹ para la variedad Vera, desde donde disminuye la acumulación de materia seca, presentando variaciones de 0,14 g g⁻¹ d⁻¹ para la variedad Vera y 0,09 g g⁻¹ d⁻¹ para las variedades Lollo Rosso y Vera.

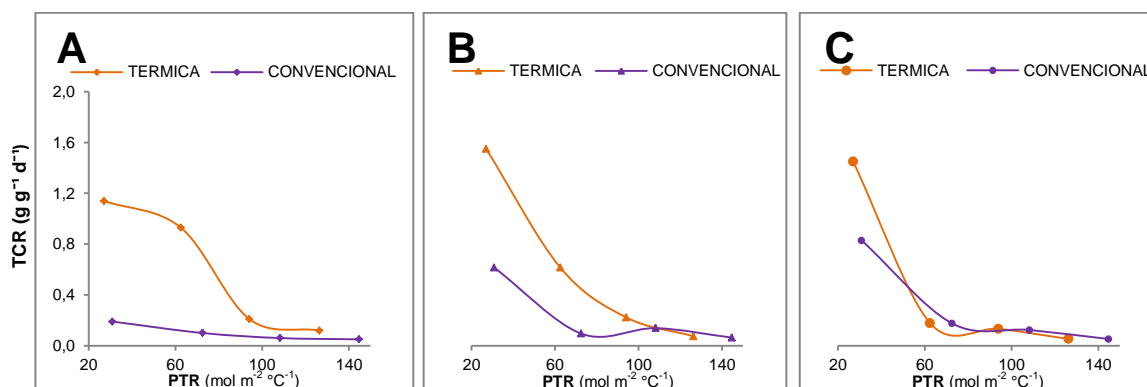


Gráfico 3-17 Comportamiento del parámetro TCR en las variedades de lechuga durante el crecimiento en función de PTR acumulada. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera

Bajo la cubierta convencional se presentan los menores valores de TCR, llegando a presentarse diferencias entre cubiertas para este índice de 83% para la variedad Lollo Rosso, 60% para la variedad Casabela y 42% para la variedad Vera en la segunda semana después del transplante. La variedad Lollo Rosso presenta la menor acumulación de materia seca a lo largo del ensayo (0,09 g g⁻¹ d⁻¹ en la segunda semana -73 mol m⁻² °C⁻¹- y 0,01 g g⁻¹ d⁻¹ en la séptima semana -132 mol m⁻² °C⁻¹-).

Estos resultados corroboran lo presentado por De Grazia *et al.* (2001), donde encontraron que la radiación es el factor determinante del crecimiento, y con Choudhury (2000) quien resalta que la acumulación de materia seca está fuertemente determinada por la fracción difusa de la irradiancia incidente.

La disminución de la TCR después de los 95 y 55 mol m⁻² °C⁻¹ en la cubierta térmica, se traduce en la disminución de materia seca acumulada presentada por las variedades al finalizar las 8 semanas del ensayo.

▪ EFICIENCIA FOTOSINTÉTICA

La relación entre la fluorescencia variable (Fv) y la fluorescencia máxima (Fm) presentada en las plantas se ha considerado desde hace tiempo como un indicador apropiado para determinar la eficiencia fotosintética en las plantas (Murchie & Lawson, 2013). Teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la USDA para evaluar el estrés a partir de la relación Fv/Fm, se observa que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango considerado como normal sin presencia de estrés -entre 0,74 y 0,83 documentado por Ritchie (2006)-.

Las investigaciones realizadas por Havaux citada por Baker y Rosenqvist (2004) señalan que la disminución en los valores del parámetro Fv/Fm denotan una disminución de la acción del fotosistema II (PSII) y por lo tanto una disminución en la eficiencia de la fotosíntesis debida a factores abióticos.

En esta investigación se observa en el gráfico 3-18 cómo el tipo de cubierta influyó de manera significativa la respuesta de la variedad Lollo Rosso. En esta variedad se presenta una tendencia decreciente del parámetro a medida que transcurren los días después del trasplante, también se observa que los valores obtenidos en la cubierta convencional son menores que los alcanzados en la cubierta térmica, infiriendo que la acumulación de antocianinas, debida al incremento de este pigmento como estrategia de protección de la planta a la radiación UV, interfiere en la eficiencia fotosintética.

La variedad Casabela muestra un incremento constante de la eficiencia fotosintética a medida que transcurren los días después del trasplante, este comportamiento se presenta en las dos cubiertas, mientras que en la y variedad Vera el parámetro Fv/Fm permanece dentro de un rango que oscila entre los 0,80 y 0,82, considerados dentro de los límites más altos de eficiencia.

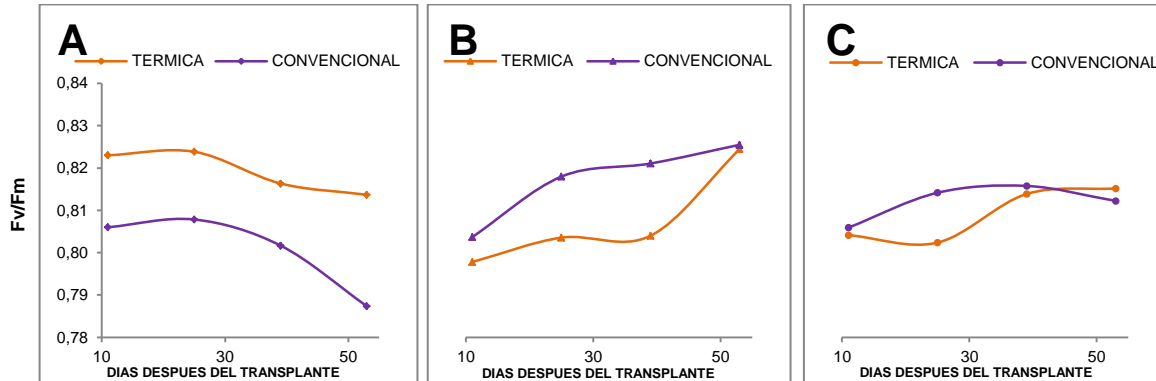


Gráfico 3-18 Comportamiento del parámetro Fv/Fm en las variedades de lechuga durante el estudio. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera

Tsormpatsidis *et al.* (2010) evaluaron el efecto de la radiación ultravioleta en variedades de lechuga verdes y rojas, encontrando que su eficiencia fotosintética no se ve alterada porque activan sus diferentes mecanismos de aclimatación, sin embargo observaron que si se alteran las condiciones de radiación a las cuales se ven expuestas (como ser trasladadas de un ambiente con radiación total a otro con filtro UV) se produce una disminución de la eficiencia fotosintética, traducida en la reducción del valor del parámetro Fv/Fm, observándose la disminución en la acumulación de biomasa seca y una reducción importante en los niveles de antocianinas en las variedades de hojas rojas.

Winsel (2002) señala que para incrementar la eficiencia fotosintética es necesario mejorar la captación de luz roja, controlando la proporción de rojo lejano; además de, para cultivos determinados, la región azul del espectro luminoso.

▪ COLOR DE LA HOJA

Para evaluar el color de la hoja se empleó el parámetro índice de color IC, los valores de IC entre -20 a -2 relaciona coloraciones que van del verde profundo al verde amarillento, mientras que los valores positivos superiores a 20 representan valores que van desde el rojo hasta el morado intenso (ACTIA, 2001). En el gráfico 3-16 se observa a través del índice de color de la hoja la afectación del tipo de cubierta en la variedad Lollo Rosso.

En esta variedad se vio disminuida su coloración morada característica en el cultivo bajo -cubierta térmica, debido a que la radiación UV es esencial para la expresión de la pigmentación debida a las antocianinas y la biosíntesis de flavonoides (Shiohita *et al.*, 2007), estos son considerados protectores del daño fotooxidativo debido al exceso de luz

y radiación UV. Tsormpatsidis *et al.* (2008) encontraron que los contenidos de antocianinas y flavonoides presentes en la variedad Lollo Rosso disminuyen cuando se bloquean las bandas del espectro UV. Gazula *et al.* (2007) encontraron que existe relación entre la cantidad de antocianinas y el color rojo en nueve variedades de lechuga.

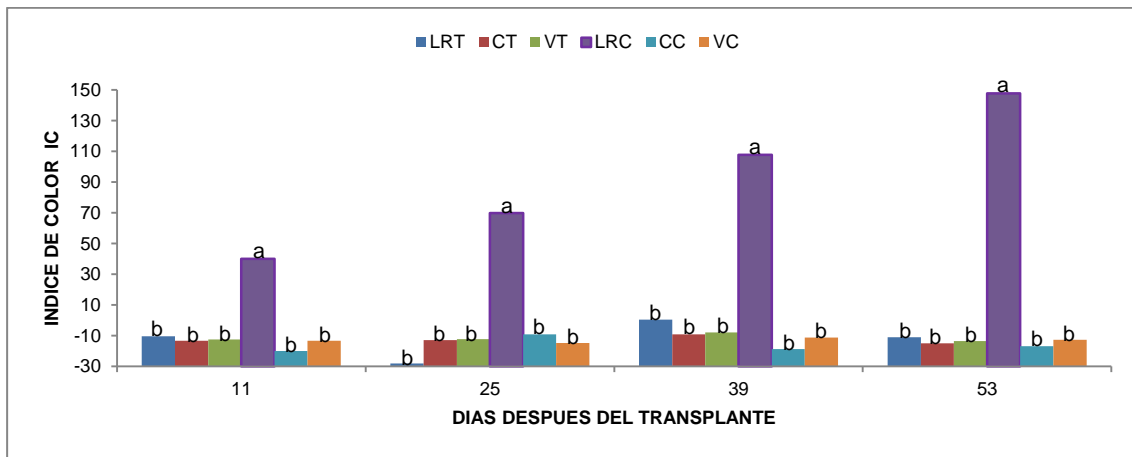


Gráfico 3-19 Índice de color obtenido por variedad

LRT: Lollo Rosso cubierta térmica, CT: Casabela cubierta térmica, VT: Vera cubierta térmica, LRC: Lollo Rosso cubierta convencional, CC: Casabela cubierta convencional, VC: Vera cubierta convencional

En la imagen 3-1 se observa las diferencias de color presentadas en la variedad Lollo Rosso, las cuales empezaron a ser significativas a partir de la tercera semana después del trasplante y se incrementaron a medida que transcurría la investigación.

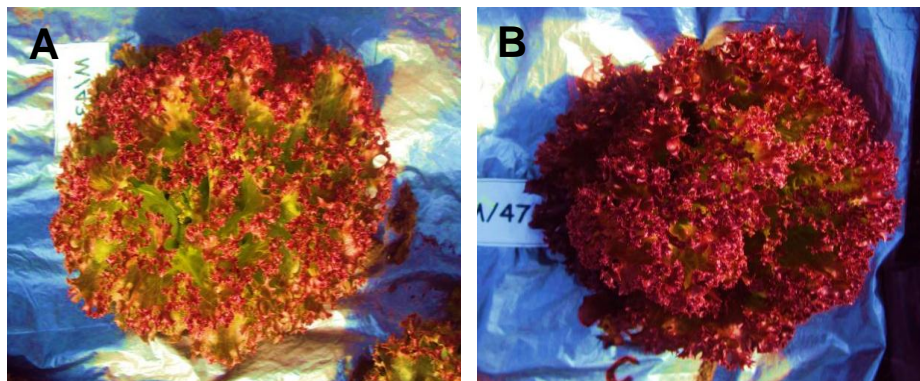


Imagen 3-1 Variación de color en la variedad Lollo Rosso en la cuarta semana después del trasplante. A Térmica, B convencional.

Al evaluar el impacto de los factores ambientales en la calidad de vegetales cultivados en invernadero, Gruda (2005) encontró que el uso de cubiertas foselectivas produce un color verde más claro en lechuga variedad crispa, en este estudio no se encontraron variaciones significativas entre los colores obtenidos en las variedad Casabela y Vera cultivadas bajo los dos tipos de cubiertas.

El parámetro delta de color ΔE evalúa la igualdad de color entre dos muestras. En Colombia este parámetro está regulado para producción litográfica, más no para su uso en alimentos, por esta razón se analizó el valor obtenido de ΔE por medio de una gráfica tipo telaraña, en donde se aprecia de manera clara si las diferencias son apreciables o no. En el gráfico 3-17 se observan los valores obtenidos en los parámetros $L^*a^*b^*$ y los valores de ΔE generado entre cubiertas. Se observa que las variedades Casabela y Vera presentan valores de ΔE inferiores a 10, al superponerse las gráficas se ratifica que no se presentan diferencias significativas entre los valores obtenidos. Para la variedad Lollo Rosso se observa que las gráficas obtenidas en los dos invernaderos no se superponen, ratificando las diferencias presentadas entre cubiertas. Teniendo en cuenta estos resultados se puede establecer que para lechugas, valores de ΔE superiores a 10 muestran diferencias de color apreciables, que se traducen en disminución de la calidad.

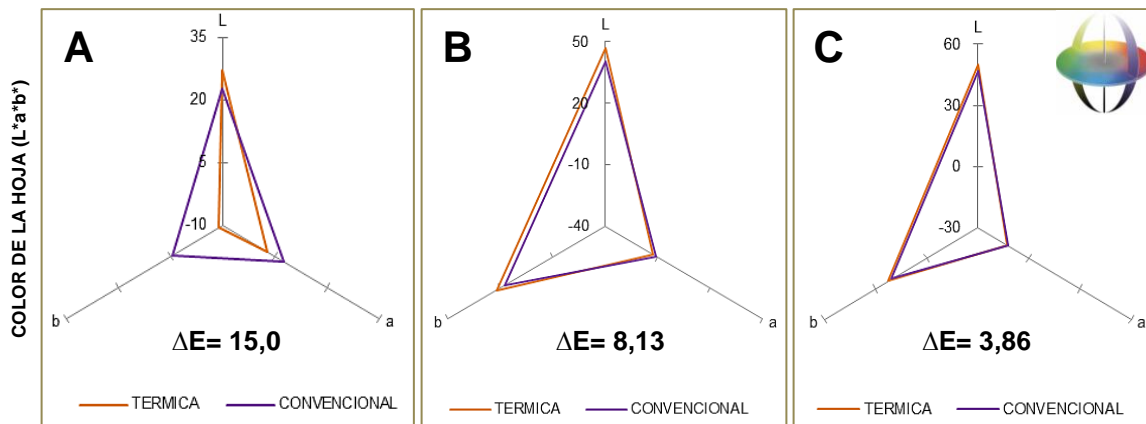


Gráfico 3-20 Comportamiento del parámetro color de la hoja en las variedades de lechuga durante el estudio. A Lollo Rosso, B Casabela, C Vera

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Al realizar el seguimiento de variables climáticas y propias del cultivo, con el fin de obtener el análisis comparativo de la respuesta de 3 variedades de lechuga (*Lactuca sativa*) tipo gourmet a la producción bajo ambientes protegidos en la Sabana de Bogotá, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- En el caso de los grados día, al no existir un modelo unificado para su obtención y al emplear diversos rangos de temperatura de cultivo dependiendo del modelo aplicado, los valores generados se ven sesgados y dificultan su réplica en otras investigaciones, siendo el método residual modificado el que maneja de manera más integral y sencilla la relación planta-ambiente.
- La respuesta de las variables morfogénicas del cultivo obedece a una relación de luz y calor que acelera o retrasa la producción (ciclo vegetativo).
- La respuesta obtenida con referencia a la biomasa fresca y seca indica que, bajo las condiciones del estudio, las diferencias fueron dependientes del balance espectral y no de la radiación PAR.
- No se recomienda el uso de cubiertas con filtro UV para la producción de lechugas variedad Lollo Rosso debido a que este tipo de cubiertas afecta la coloración propia de la variedad, disminuyendo su atractivo comercial.
- Para las variedades verdes el empleo de cubiertas térmicas con filtro UV para disminuir el tiempo de producción de cabezas comercializables.

- Para zonas de alta radiación lumínica se pueden permitir niveles más bajos de temperatura, mientras que en zonas con alta nubosidad, los valores de temperatura necesarios para producción deben ser un poco mayores. Esto explica el por qué las diferencias en niveles de producción y ciclo de cultivo bajo una misma zona (por ejemplo Sabana de Bogotá - Norte y Occidente).
- Valores del índice ΔE (diferencia de color) superiores a 10 en lechuga sugieren diferencias significativas en la coloración de las hojas.

4.2 Recomendaciones

Se hace necesario reflexionar sobre la ubicación de los sensores de medida de condiciones climáticas en los invernaderos, teniendo en cuenta la gran diferencia existente entre las condiciones a nivel del cultivo, y a un nivel diferente para favorecer lectura de datos. Se debe recordar que se trata de medir la respuesta del cultivo frente a las condiciones climáticas y no de medir las condiciones climáticas para tomar decisiones de manejo de cultivo. En este sentido, si no es posible ubicar los sensores a nivel del dosel porque se interfiere en las actividades de manejo del cultivo, es necesario modificar la lectura mediante factores que tengan en cuenta el calor latente y sensible producido por el mismo. Herramientas como las simulaciones climáticas mediante elementos finitos, o el uso de imágenes termográficas, ofrecen una aproximación más acertada frente a las condiciones de clima en las proximidades del cultivo, que la actual toma de datos manual.

La manipulación del espectro lumínico y la radiación total incidente que se genera a partir del empleo de cubiertas fotoselectivas, puede ser un gran aliado para el mejoramiento de las características morfogénicas en los cultivos. Es conveniente evaluar diferentes tipos de cubiertas para establecer las mejores condiciones de producción para los cultivos, debido a que dichas variaciones pueden traducirse en incremento en el rendimiento o en compuestos funcionales. Además, la exposición controlada del cultivo a estrés de tipo abiótico puede generar beneficios poscosecha traducidos en la disminución del pardeamiento y prolongar la calidad en mostrador (Hodges & Toivonen, 2008), los cuales deben ser estudiados.

La respuesta del cultivo de Lechuga a variación de condiciones climáticas obedece a una relación de luz y calor (radiación térmica y radiación lumínica o PAR). Por esta razón el concepto de grados día, es insuficiente para determinar apropiadamente la posible duración de un ciclo de cultivo, sin contar con el hecho de tener diferentes métodos de cálculo que generan respuesta diferente y por ende, llevar a errores de manejo de producción. Es necesario trabajar con conceptos como el de Luz Diaria Integrada – LDI, especialmente para variedades que dependan de la luz para mantener su color, como la Lollo Rosso, y si se quiere ser más precisos, con el concepto de Relación Fototérmica - PTR.

Si se establecen las relaciones sobre la concentración de antocianinas y flavonoides con la coloración medida con un instrumento portátil como el cromámetro, se podría realizar el análisis del costo metabólico debido a la fotoprotección a nivel de campo, ya que las variedades de color morado derivan cierta cantidad de energía producida en la fotosíntesis para realizar la síntesis de compuestos fenólicos. Además, la relación generada derivaría en obtener de manera ágil los valores de estos elementos, disminuyendo los recursos empleados para su obtención y facilitando investigaciones futuras.

Para aplicar la teoría de control óptimo, es necesario generar un modelo dinámico que describa la evolución de las variables de estado que influyen en el crecimiento de cultivos en invernadero. Este modelo se obtiene a partir de la realización de un balance de energía entre los parámetros involucrados en el crecimiento (relación agua, suelo, planta, ambiente) desde un enfoque más complejo, ya que las aproximaciones generalmente empleadas para deducir el crecimiento a partir de una sola variable climática son imprecisas y no reflejan el comportamiento real del cultivo.

Este trabajo se ejecutó como parte del proyecto “Análisis comparativo de la respuesta de hortalizas a la producción bajo ambientes protegidos en la Sabana de Bogotá”, código HERMES 20641, en el marco de la convocatoria del programa nacional de proyectos para el fortalecimiento de la investigación, la creación y la innovación en posgrados de la Universidad Nacional de Colombia 2013-2015,

Parte de los resultados obtenidos en esta investigación fueron presentados en dos eventos internacionales:

- *“Incidencia de dos películas plásticas en el crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa*) variedad Lollo Rosso bajo invernadero”*. XI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - Cancún, México. Octubre de 2014.
- *“Incidencia de las películas plásticas en la variación de factores abióticos para producción de lechuga en ambientes protegidos”*. VI edición de la conferencia científica internacional sobre desarrollo agropecuario y sostenibilidad AGROCENTRO 2014 - Las Villas, Cuba. Abril de 2014.

Así mismo, resultados derivados de la investigación se publicaron en el volumen 2 de la revista Amaranto ISSN: 2215-7654 *“Cultivo de lechuga bajo cubierta”*, publicación patrocinada desde el Programa Gestión de Proyectos como apoyo a los grupos estudiantiles de la Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá.

A. Anexo: resumen valores estadísticos

A continuación se presentan los valores del estadístico t de Student para la comparación de medias de las variables climáticas y de las medias de cada parámetro junto con los resultados de la prueba de contrastes LSD de Fisher para las medidas morfofisiológicas.

Valores del estadístico t de Student para la comparación de datos tomados a 1,5 m de altura vs datos a nivel de dosel de cultivo

| TEMPERATURA | TDT | TDC | TNT | TNC | TMAXT | TMAXC | TMINT | TMINC |
|------------------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| CICLO 1 | -6,70 ‡ | -7,80 ‡ | -1,14 ns | -4,11 ‡ | -6,90 ‡ | -8,03 ‡ | 1,35 ns | 3,61 ‡ |
| CICLO 2 | -7,23 ‡ | -4,81 ‡ | -1,01 ns | -2,74 ‡ | -7,28 ‡ | -5,13 ‡ | -0,00 ns | -2,32 ‡ |
| HUMEDAD RELATIVA | HRDT | HRDC | HRNT | HRNC | HRMAXT | HRMAXC | HRMINT | HRMINC |
| CICLO 1 | -0,72 ns | 1,43 ns | 1,07 ns | -1,46 ns | -0,64 ns | -0,00 ns | 1,58 ns | 0,30 ns |
| CICLO 2 | 2,47 ns | 0,04 ns | -0,26 ns | -0,70 ns | 1,88 ns | 0,74 ns | 1,07 ns | 1,84 ns |

‡: p<0,01, †: p<0,05, ns: no significativo

TDT: temperatura promedio diurna cubierta térmica, TDC: temperatura promedio diurna cubierta convencional, TNT: temperatura promedio nocturna cubierta térmica, TNC: temperatura nocturna promedio cubierta convencional, TMAXT: temperatura máxima cubierta térmica, TMAXC: temperatura máxima cubierta convencional, TMINT: temperatura mínima cubierta térmica, TMINC: temperatura mínima cubierta convencional, HRDT: humedad relativa promedio diurna cubierta térmica, HRDC: humedad relativa promedio diurna cubierta convencional, HRNT: humedad relativa promedio nocturna cubierta térmica, HRNC: humedad relativa promedio nocturna cubierta convencional, HRMAXT: humedad relativa máxima cubierta térmica, HRMAXC: humedad relativa máxima cubierta convencional, HRMINT: humedad relativa mínima cubierta térmica, HRMINC: humedad relativa mínima cubierta convencional

Valores del estadístico t de Student para la comparación de datos tomados entre cubiertas a 1,5 m de altura vs datos a nivel de dosel de cultivo

| PARAMETRO | TMAX1,5 | TMAXD | TMIN1,5 | TMIND | TD1,5 | TDD | TN1,5 | TND |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CICLO 1 | -1,45 ns | -0,66 ns | 1,61 ns | -3,05 ‡ | -0,91 ns | -0,45 ns | -0,97 ns | 2,03 † |
| CICLO 2 | 0,61 ns | -0,45 ns | 1,17 ns | 3,77 ‡ | -0,28 ns | 0,77 ns | 1,59 ns | -2,13 † |
| PARAMETRO | HRD1,5 | HRDD | HRMAX1,5 | HRMAXD | HRMIN1,5 | HRMIND | HRN1,5 | HRND |
| CICLO 1 | -1,54 ns | -0,13 ns | -0,3 ns | -1,41 ns | 1,84 ns | 1,41 ns | 0,23 ns | -1,52 ns |
| CICLO 2 | -1,61 ns | 0,87 ns | 0,03 ns | 1,43 ns | 0,3 ns | 1,07 ns | 0,25 ns | 0,77 ns |

‡: p<0.01, †: p<0.05, ns: no significativo

TMAX1,5: temperatura máxima a 1,5 metros, TMIN1,5: temperatura mínima a 1,5 metros, TD1,5: temperatura promedio diurna a 1,5 metros, TN1,5: temperatura promedio nocturna a 1,5 metros, TMAXD: temperatura máxima en dosel, TMIND: temperatura mínima en dosel, TDD: temperatura promedio diurna en dosel, TND: temperatura promedio nocturna en dosel, HRD1,5: humedad relativa promedio diurna a 1,5 metros, HRDD: humedad relativa promedio diurna en dosel, HRMAX1,5: humedad relativa máxima a 1,5 metros, HRMAXD: humedad relativa máxima en dosel, HRMIN1,5: humedad relativa mínima a 1,5 metros, HRMIND: humedad relativa mínima en dosel, HRN1,5: humedad relativa promedio nocturna a 1,5 metros, HRND: humedad relativa promedio nocturna en dosel.

Valores de comparación de medias para las variables morfofisiológicas

| CUBIERTA | VARIEDAD | ALTURA (cm) | DIAMETRO (cm) | AREA FOLIAR (cm ²) | PESO FRESCO (g) | PESO SECO (g) |
|--------------|-------------|-------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------|--------------------|------------------|
| TERMICA | Lollo Rosso | 10,19 c | 17,00 bc | 843,9 c | 627,08 | 3,33 bc |
| CONVENCIONAL | Lollo Rosso | 10,59 bc | 17,38 bc | 1284,7 a | 836,16 | 2,84 c |
| TERMICA | Casabela | 10,70 bc | 15,92 c | 941,2 bc | 618,75 | 4,14 b |
| CONVENCIONAL | Casabela | 10,96 bc | 16,87 c | 833,3 c | 866,63 | 5,20 a |
| TERMICA | Vera | 11,98 a | 22,75 a | 1157,3 ab | 748,45 | 5,84 a |
| CONVENCIONAL | Vera | 11,34 ab | 19,05 b | 916,4 c | 648,62 | 5,97 a |
| CUBIERTA | VARIEDAD | AFE (cm ² g ⁻¹) | IAF | TCR (g g ⁻¹ d ⁻¹) | Fv/Fm | COLOR |
| TERMICA | Lollo Rosso | 405,86 a | 5,03 ab | 0,417 a | 0,822 ab | -16,43 b |
| CONVENCIONAL | Lollo Rosso | 477,50 a | 5,38 a | 0,073 b | 0,808 c | 108,44 a |
| TERMICA | Casabela | 214,23 b | 5,06 ab | 0,288 ab | 0,805 c | -13,62 b |
| CONVENCIONAL | Casabela | 165,71 b | 3,83 bc | 0,097 b | 0,827 a | -18,50 b |
| TERMICA | Vera | 181,60 b | 2,43 c | 0,138 ab | 0,809 c | -12,83 b |
| CONVENCIONAL | Vera | 154,50 b | 3,40 c | 0,135 ab | 0,813 bc | -12,60 b |

Letras distintas en las columnas significan diferencias significativas (LSD p<0,05)

B. Anexo: Salidas estadísticas del software Statistix 8.0

Se presentan las salidas del software Statistix 8.0 del análisis estadístico realizado para las temperaturas máximas en las unidades experimentales (comparación de dos muestras por medio de la distribución t de Student), y el análisis de varianza factorial (ANOVA) obtenido para el análisis del Índice de área Foliar (IAF).

Las salidas del programa para cada uno de los parámetros analizados se encuentran en el archivo de CD.

TEMPERATURAS EXTREMAS A NIVEL DE DOSEL EN EL CICLO 1

Statistix 8.0

TMAX DOSEL C1

Two-Sample T Tests for TERM vs CONVEN

| Variable | Mean | N | SD | SE |
|------------|---------|----|--------|--------|
| TERM | 30.977 | 53 | 3.7660 | 0.5173 |
| CONVEN | 33.589 | 53 | 4.9777 | 0.6837 |
| Difference | -2.6113 | | | |

Null Hypothesis: difference = 0

Alternative Hyp: difference <> 0

| Assumption | T | DF | P | 95% CI for Difference | |
|-------------------|-------|-------|--------|-----------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| Equal Variances | -0.66 | 104 | 0.5098 | -0.7769 | 0.3882 |
| Unequal Variances | -0.66 | 104.0 | 0.5098 | -0.7769 | 0.3882 |

| Test for Equality of Variances | F | DF | P |
|--------------------------------|------|--------|--------|
| | 1.01 | 52, 52 | 0.4907 |

Cases Included 106 Missing Cases 0

Statistix 8.0

TMIN DOSEL C1

Two-Sample T Tests for TERM vs CONVEN

| Variable | Mean | N | SD | SE |
|------------|---------|----|--------|--------|
| TERM | 10.079 | 53 | 1.5099 | 0.2074 |
| CONVEN | 10.274 | 53 | 1.5148 | 0.2081 |
| Difference | -0.1943 | | | |

Null Hypothesis: difference = 0

Alternative Hyp: difference <> 0

| Assumption | T | DF | P | 95% CI for Difference | |
|-------------------|-------|------|--------|-----------------------|---------|
| | | | | Lower | Upper |
| Equal Variances | -3.05 | 104 | 0.0029 | -4.3115 | -0.9111 |
| Unequal Variances | -3.05 | 96.8 | 0.0030 | -4.3130 | -0.9096 |

| Test for Equality of Variances | F | DF | P |
|--------------------------------|------|--------|--------|
| | 1.75 | 52, 52 | 0.0233 |

Cases Included 106 Missing Cases 0

INDICE DE AREA FOLIAR

Statistix 8.0

IAF

Analysis of Variance Table for IAF

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|-------------------|----|---------|---------|-------|--------|
| REPETICIO | 5 | 8.4914 | 1.6983 | | |
| CUBIERTA | 1 | 0.0110 | 0.0110 | 0.01 | 0.9314 |
| VARIEDAD | 2 | 32.7063 | 16.3532 | 11.22 | 0.0003 |
| CUBIERTA*VARIEDAD | 2 | 7.7490 | 3.8745 | 2.66 | 0.0899 |
| Error | 25 | 36.4518 | 1.4581 | | |
| Total | 35 | 85.4096 | | | |

Grand Mean 4.1881 CV 28.83

Statistix 8.0

IAF

LSD All-Pairwise Comparisons Test of IAF for CUBIERTA*VARIEDAD

| CUBIERTA | VARIEDAD | Mean | Homogeneous Groups |
|----------|------------|--------|--------------------|
| CONVENC | LOLLOROSSO | 5.3833 | A |
| TERMICA | CASABELA | 5.0567 | AB |
| TERMICA | LOLLOROSSO | 5.0300 | AB |
| CONVENC | CASABELA | 3.8300 | BC |
| CONVENC | VERA | 3.4033 | C |
| TERMICA | VERA | 2.4250 | C |

Alpha 0.05 Standard Error for Comparison 0.6972

Critical T Value 2.060 Critical Value for Comparison 1.4358

Error term used: REPETICIO*CUBIERTA*VARIEDAD, 25 DF

There are 3 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

C. Anexo: Correlaciones de Pearson para las variables morfofisiológicas

Se presentan las salidas del software Statistix 8.0 de las correlaciones de Pearson realizadas a las variables morfofisiológicas obtenidas con los resultados de la variedad Casabela cultivada bajo cubierta convencional.

Las salidas del programa para cada una de las variedades y tipos de cubierta analizados se encuentran en el archivo de CD.

Statistix 8.0

CASABELA CONVENCIONAL

Correlations (Pearson)

| | AFE | ALTURA | AREA_FOLI | BFRESCA | BSECA | DIAMETRO | IAF | TCR |
|-----------|------------|---------------|------------------|----------------|--------------|-----------------|------------|------------|
| ALTURA | -0.7859 | | | | | | | |
| P-VALUE | 0.2141 | | | | | | | |
| AREA_FOLI | -0.6622 | 0.9257 | | | | | | |
| | 0.3378 | 0.0743 | | | | | | |
| BFRESCA | -0.7159 | 0.8608 | 0.9735 | | | | | |
| | 0.2841 | 0.1392 | 0.0265 | | | | | |
| BSECA | -0.7419 | 0.8793 | 0.9757 | 0.9990 | | | | |
| | 0.2581 | 0.1207 | 0.0243 | 0.0010 | | | | |
| DIAMETRO | -0.6931 | 0.9902 | 0.9391 | 0.8545 | 0.8695 | | | |
| | 0.3069 | 0.0098 | 0.0609 | 0.1455 | 0.1305 | | | |
| IAF | -0.5181 | 0.8741 | 0.9839 | 0.9378 | 0.9346 | 0.9119 | | |
| | 0.4819 | 0.1259 | 0.0161 | 0.0622 | 0.0654 | 0.0881 | | |
| TCR | -0.1099 | -0.5154 | -0.6384 | -0.4925 | -0.4794 | -0.6294 | -0.7591 | |
| | 0.8901 | 0.4846 | 0.3616 | 0.5075 | 0.5206 | 0.3706 | 0.2409 | |
| FvFm | -0.1937 | 0.7506 | 0.8211 | 0.6866 | 0.6829 | 0.8350 | 0.8958 | -0.9531 |
| | 0.8063 | 0.2494 | 0.1789 | 0.3134 | 0.3171 | 0.1650 | 0.1042 | 0.0469 |

Bibliografía

- Acuña, J. F. (2009). *Grupo de Investigación en Tecnología de Invernaderos y Agroplasticultura*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Aguilar-García, L., Escalante-Estrada, J., Fucikovsky-Zak, L., Tijerina-Chávez, L., & Mark Engleman, E. (julio-septiembre de 2005). Area foliar, tasa de asimilación neta, rendimiento y densidad de población en girasol. (A. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Ed.) *Terra Latinoamericana*, 23(3), 303-310.
- Ahmed, M., & Hassan, F.-u. (2011). Cumulative Effect of Temperature and Solar Radiation on Wheat Yield. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39(2), 146-152.
- Archila , J., Contreras , U. H., Pinzon, H., Laverde , H., & Corchuelo , G. (1998). Analisis de crecimiento de cuatro materiales de lechuga (*Lactuca sativa*). *Agronomía colombiana*, 16(1), 68-75.
- Ardila , G., Fischer, G., & Balaguera-López, H. E. (2011). Caracterización del crecimiento del fruto y producción de tres híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tiempo fisiológico bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(1), 44-56.
- Arellano-García, M. A., Valera-Martínez, D., Urrestarazu-Gavilán, M., Quezada-Martín, M. d., Murguía-López, J., & Zermeño-González, A. (octubre-diciembre de 2011). ventilación natural y forzada de invernaderos tipo almería y su relación con el rendimiento de tomate. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 379-386.
- Association de Coordination Technique pour l' Industrie Agroalimentaire -ACTIA-. (2001). *Sensory evaluation, Guide of good practice*. Paris: Imprimerie de l'Indre at Argenton-sur-Creuse.
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal 2 edición*. (E. U. Barcelona, Ed.) Barcelona: McGraw-Hill interamericana.
- Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (agosto de 2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403), 1607–1621.

- Becker, C. (2014). Doktorin der Naturwissenschaften. *Impact of radiation, temperature and growth stage on the concentration of flavonoid glycosides and caffeic acid derivatives in red leaf lettuce*. Berlin, Alemania: Technischen Universität Berlin.
- Benavides-Mendoza, A. (1998). Doctor en ciencias biológicas con especialidad en botánica. *Modificación en los ambientes espectrales de crecimiento y su efecto sobre el comportamiento fisiológico y productividad de Lactuca sativa L., y Spinaca oleracea L.* Monterrey, Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Benavides-Mendoza, A. (julio de 2004). *web de Dr. Adalberto Benavides Mendoza*. Recuperado el 20 de febrero de 2015, de Respuestas y adaptación de las plantas a la irradiancia y el balance espectral: http://abenmen.com/publi_arbitradas_2014.htm
- Benavides-Mendoza, A., Maiti, R. K., Verde, M. J., Foroughbakhch, R., Gámez, H., & Badii, M. (1998). Agroplasticultura: del control microambiental al control del metabolismo y la morfogénesis. *Ciencia UANL*, 1, 135-140.
- Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*, 13, 1-10.
- Brunini, O., Lisbao, R., Bernardi, J., & Pedro Junior, M. (junio de 1976). Temperatura-base para alface cultivar "white boston", em um sistema de unidades térmicas. *Bragantia - Revista científica do Instituto Agronômico do Estado de Sao Paulo*, 35(19), 213-219.
- Carranza, C., Lancho, O., Miranda, D., & Chaves, B. (2009). Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) 'Batavia' cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 27(1), 41-48.
- Castillo Lopez, E. P. (2000). Ingeniero Agrónomo. *Análisis comparativo de modelos para el cálculo de grados día*. Chile: Universidad de Talca.
- Cemek, B., Demir, Y., Uzun, S., & Ceyhan, V. (2006). The effects of different greenhouse covering materials on energy requirement, growth and yield of aubergine. *Energy*, 31, 1780-1788.
- Curtis, P. S., & Läuchli, A. (1986). The role of leaf area development and photosynthetic capacity in determining growth of kenaf under moderate salt stress. *Australian Journal of Plant Physiology*, 18, 553-565.
- Choudhury, B. J. (2000). A sensitivity analysis of the radiation use efficiency for gross photosynthesis and net carbon accumulation by wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101, 217-234.

- Dahlgren, J. P., Von Zeipel, H., & Ehrlén, J. (2007). Variation in vegetative and flowering phenology. *American Journal*, *94*, 1570-1576.
- De Grazia, J., Tittonell, P. A., & Chiesa, A. (2001). Efecto de la época de siembra, radiación y nutrición nitrogenada sobre el patrón de crecimiento y el rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Investigación agraria. Producción y protección vegetal*, *16*(3), 355-365.
- De Sá Andrade, J. W., Farias Junior, M., Araújo de Sousa, M., & Correa Rocha, A. (2011). Utilizacao de diferentes filmes plásticos como cobertura de abrigos para cultivo protegido. *Acta Scientiarum Agronomy*, *33*(3), 437-443.
- Demmig-Adams, B., & Adams, W. W. (enero de 1996). The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant Science*, *1*(1), 21-26.
- Demming-Adams, B., & Adams, W. (1992). Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, *43*, 599-629.
- Dorais, M. (2003). The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. *Canadian Greenhouse Conference*.
- Dufault, R. J., Ward, B., & Hassell, R. L. (2009). Dynamic relationships between field temperatures and romaine lettuce yield and head quality. *Scientia Horticulturae*, *120*, 452-459.
- Erhioui, B. M., Gosselin, A., Hao, X., Papadopoulos, A. P., & Dorais, M. (2002). Greenhouse covering materials and supplemental lighting affect growth, yield, photosynthesis and leaf carbohydrate synthesis of tomato plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *5*, 819-824.
- Ferentinos, K. P., Albrigh, L. D., & Ramani, D. V. (2000). Optimal Light Integral and Carbon Dioxide Concentration Combinations for Lettuce in Ventilated Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering*, *77*(3), 309-315.
- Flores, V., Miranda, D., Chaves, B., Chaparro, L., Cárdenas, C., & Farias, A. (2006). Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo en suelo y en sustrato. En V. Flórez, A. D. Fernández, D. Miranda, B. Chaves, & J. M. Guzmán (Edits.), *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Gazula, A., Kleinhenz, M. D., Scheerens, J. C., & Ling, P. P. (abril de 2007). Anthocyanin Levels in Nine Lettuce (*Lactuca sativa*) Cultivars: Influence of Planting Date and

- Relations among Analytic, Instrumented, and Visual Assessments of Color. *HortScience*, 42(2), 232–238.
- Grube, E., & Calatayud, A. (2012). Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticultural research: a review. *Scientia Horticulturae*, 138, 24–35.
- Gruda, N. (2005). Impact of Environmental Factors on Product Quality of Greenhouse Vegetables for Fresh Consumption. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24, 227–247.
- Grupo de investigación Color y Calidad de Alimentos. (2003). *El Color: Fundamentos y Aplicaciones*. Universidad de Sevilla.
- Hesketh, J. D., & Moss, D. N. (1963). Variation in the response of photosynthesis to light. *Crop Science*, 3, 107-10.
- Hodges, D. M., & Toivonen, P. M. (2008). Quality of fresh-cut fruits and vegetables as affected by exposure to abiotic stress. *Postharvest Biology and Technology*, 48, 155–162.
- Hoyos C, V., Rodriguez, M., Cárdenas-Hernández, J. F., & Balaguera-López, H. E. (2009). Análisis del crecimiento de espinaca (*spinacia oleracea* L.) bajo el efecto de diferentes fuentes y dosis de nitrógeno. *Revista colombiana de ciencias hortícolas*, 3(2), 175-187.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-. (1994). *Norma Técnica Colombiana NTC 1064. Frutas y hortalizas frescas. lechuga*. Comité Técnico 111003 Frutas, legumbres, hortalizas y tubérculos frescos. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2007). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo*. (F. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias, Ed.) Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Ioslovich, I. (2009). Optimal control strategy for greenhouse lettuce: Incorporating supplemental lighting. *Biosystems Engineering*, 103, 57–67.
- Kitaya, Y., Niu, G., Kozai, T., & Ohashi, M. (1998). Photosynthetic Photon Flux, Photoperiod, and CO₂ Concentration Affect Growth and Morphology of Lettuce Plug Transplants. *HortScience*, 33(6), 988-991.
- Kittas, C., & Baille, A. (1998). Determination of the Spectral Properties of Several Greenhouse Cover Materials and Evaluation of Specific Parameters Related to

- Plant Response. (S. R. Institute, Ed.) *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71, 193-202.
- Kittas, C., Baille, A., & Giaglaras, P. (1999). Influence of Covering Material and Shading on the Spectral Distribution of Light in Greenhouses. (S. R. Institute, Ed.) *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73, 341-351.
- Kittas, C., Tchamitchian, M., Katsoulas, N., Karaiskou, P., & Papaioannou, C. (2006). Effect of two UV-absorbing greenhouse-covering films on growth and yield of an eggplant soilless crop. *Scientia Horticulturae*, 110, 30–37.
- Lambers, H., Pons, T. L., & Chapin, S. (2008). *Plant physiological ecology 2nd edition*. New York: Springer Verlag.
- Legarrea, S., Velázquez, E, Aguado, P, Fereres, A, Morales, I, Rodriguez, D, . . . Viñuela, E. (2014). Effects of a photoselective greenhouse cover on the performance and host finding ability of *Aphidius ervi* in a lettuce crop. *Bio Control*(59), 265-278.
- Liu, B., & Heins, R. D. (1997). Is plant quality related to the ratio of radiant energy to thermal energy? *Acta Horticulturae (ISHS)*, 171-182.
- Liu, B., & Heins, R. D. (2002). Photothermal ratio affects plant quality in "Freedom" poinsettia. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(1), 20-26.
- Mascarini, L., Lorenzo, G. A., & Burgos, M. L. (2013). Fotocontrol de la productividad y elongación de tallos de tres cultivares de Rosa x hybrida L. bajo cubiertas de polietileno fotoselectivas. *La Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo*, 45(1), 11-25.
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (abril de 2000). Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *Journal of experimental Botany*, 51(345), 659-668.
- Meca Abad, D. E. (junio de 2012). Máster Producción Vegetal En Cultivos Protegidos . *Evaluación de un plástico fotoselectivo nir como material de cubierta de invernadero*. Almería, España: Universidad de Almería.
- Miranda Villagomez, E. (2012). Postgrado de recursos genéticos y productividad fruticultura. *Producción hidropónica de Freesia x hybrida bajo diferentes cubiertas plásticas*. Montecillo, Texcococ, México: Colegio de postgraduados.
- Moller, M., Tanny, J., Cohen, S., & Teitel, M. (2003). *Micrometeorological Characterisation in a Screenhouse* (Vol. 614). Acta Hortorticulturae (ISHS) 614.

- Murchie, E. H., & Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 64(13), 3983–3998.
- Paradiso, R., Meinen, E., Snel, J. F., De Visser, P., Van Ieperen, W., Hogewoning, S. W., & Marcelis, L. F. (2011). Spectral dependence of photosynthesis and light absorptance in single leaves and canopy in rose. *Scientia Horticulturae*, 127, 548–554.
- Pearson, S., Wheldon, A. E., & Hadley, P. (1995). Radiation, transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62, 61-70.
- Pedroza, M., Corchuelo, G., & Angarita, A. (1997). Análisis de crecimiento de *Limonium sinuatum* Mill cv. Midnight Blue propagada sexual y asexualmente a partir de yemas vegetativas y florales. *Agronomía Colombiana*, 14(1), 1-12.
- Pigliucci, M. (2001). *Phenotypic Plasticity: Beyond Nature and Nurture*. Baltimore: John Hopkins University Press.
- Piscia, D. (diciembre de 2012). Analysis of night-time climate in plastic-covered greenhouses. *Tesis doctoral*. (D. d. Tèrmics, Ed.) Terrassa, España: Universitat Politècnica de Catalunya .
- Poorter, H., & De Jong, R. (1999). A comparison of specific leaf area, chemical composition and leaf construction costs of field plants from 15 habitats differing in productivity. *New Phytologist*, 143, 163-176.
- Qadir, G., Ahmad, S., Hassan, F., & Cheema, M. A. (2006). Oil and fatty acid accumulation in sunflower as influenced by temperature variation. *Pakistan urnal of Botany*, 38(4), 1137-1147.
- Ritchie, G. A. (2006). *Chlorophyll Fluorescence: What Is It and What Do the Numbers Mean?* USDA Forest Service , Proceedings RMRS-P-43. Rocky Mountain Research Station Publications.
- Sadras, V. O., Echarte, L., & Andrade, F. H. (2000). Profiles of Leaf Senescence During Reproductive Growth of Sunflower and Maize. *Annals of Botany*, 85, 187–195.
- Salazar, M. R., Jones, J. W., Chavez, B., & Cooman, A. (2007). A model for the potential production and dry matter distribution of cape gooseberry (*Phisalis peruviana*). *Scientia Horticulturae*, 115, 142-148.
- Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (2000). *Fisiología de las plantas* (Vol. Desarrollo de las plantas y fisiología ambiental). México: Grupo editorial Iberoamericana.

- Sandermann, H. J. (1996). Tissue localization of UV-B screening pigments and of chalcone synthase mRNA in needles of Scots pine seedlings. *New Phytologist*, 132, 247-258.
- Sant'anna, V., Gurak, P. D., Marczak, L. D., & Tessaro, I. C. (2013). Tracking bioactive compounds with colour changes in foods - a review. *Dyes and pigments*, 98(3), 601-608.
- Seginer, I. (2003). A dynamic model for nitrogen-stressed lettuce. *Annals of Botany*, 91, 623-635.
- Seginer, I., Albright, L. D., & Ioslovich, I. (2006). Improved Strategy for a Constant Daily Light Integral in Greenhouses. (S. R. Institute, Ed.) *Biosystems Engineering*, 93(1), 69-80.
- Sherry, R. A., Zhou, X. H., & Gu, S. L. (2007). Divergence of reproductive phenology under. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United*, 104, 198-202.
- Shiohita, R., Enoka, J., Aiona, D., & Wall, M. (2007). Coloration and growth of red lettuce grow under UV radiation transmitting and no-transmitting covers. *Acta Horticulturae ISHS*, 761, 221-225.
- Smith, R., Cahn, M., Daugovish, O., Koike, S., Natwick, E., Smith, H., . . . Turini, T. (2011). *Leaf lettuce production in California*. University of California , Agriculture and Natural Resources. Publicación 7216.
- Staghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management*. Wageningen: Instituut voor mechanisatie, arbeid en gebouwen.
- Sumathy, K. (1999). Effect of spectral quality on horticultural plant propagation in a greenhouse. *Applied Energy*, 64, 175-180.
- Tanny, J. (enero de 2013). Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review. *Biosystems Engineering*, 114(1), 26-43.
- Tanny, J., Cohen, S., & Teitel, M. (2003). Screenhouse Microclimate and Ventilation: an Experimental Study. (S. R. Institute, Ed.) *Biosystems Engineering*, 84(3), 331-341.
- Tei, F., Scaife, A., & Aikman, D. P. (1996). Growth of Lettuce, Onion, and Red Beet. 1. Growth Analysis, Light Interception, and Radiation Use Efficiency. *Annals of Botany*, 78, 633-643.
- Thomas, B., Murphy, D. J., & Murray, D. (Edits.). (2003). *Encyclopaedia of applied plant sciences*. London: Academic Press.

- Torres, A. P., & Lopez, R. G. (2010). *Medición de Luz Diaria Integrada en Invernaderos*. Purdue University, Departamento de Horticultura y Arquitectura de Áreas Verdes. Purdue extension.
- Tsormpatsidis, E., Henbest, R. G., Battey, N. H., & Hadley, P. (2010). The influence of ultraviolet radiation on growth, photosynthesis and phenolic levels of green and red lettuce: potential for exploiting effects of ultraviolet radiation in a production system. *Annals of Applied Biology*, 357-366.
- Tsormpatsidis, E., Henbest, R. G., Davis, F. J., Battey, N. H., Hadley, P., & Wagstaffe, A. (2008). UV irradiance as a major influence on growth, development and secondary products of commercial importance in Lollo Rosso lettuce 'Revolution' grown under polyethylene films. *Environmental and Experimental Botany*, 63, 232–239.
- Van Henten, E. J. (1994). Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. *Agricultural Systems*, 45(1), 55-72.
- Villagrán, E. A., Gil, R., Acuña, J. F., & Bojacá, C. R. (2012). Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispan greenhouse. *Agronomía Colombiana*, 30(2), 282-288.
- Wang, T. Y. (1960). A Critique of the Heat Unit Approach to Plant Response Studies. *Ecology*, 41(4), 785-790.
- Winsel, M. (2002). Light manipulating additives extend opportunities for agricultural plastic films. *Plastics Additives & Compounding*, 20-24.
- Yzarra, W., Trebejo, I., & Noriega, V. (2009). Evaluación de unidades térmicas para el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz amarillo duro (*Zea mays*, L.) en la costa central del Perú. *Revista Peruana Geo-Atmosférica*, 1, 1-10.
- Zhang, Y., Gauthier, L., de Halleux, D., Dansereau, B., & Gosselin, A. (1996). Effect of the covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82, 227-224.