

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ESTUDIO DE EFECTIVIDAD BIOLÓGICA DE OCHO CUBIERTAS DE  
POLIETILENO PARA INVERNADEROS EN EL CULTIVO DE LECHUGA

**Tesis**

Que presenta PERLA ABIGAIL CÁRDENAS ATAYDE  
como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila

Julio 2020

ESTUDIO DE EFECTIVIDAD BIOLÓGICA DE OCHO CUBIERTAS DE  
POLIETILENO PARA INVERNADEROS EN EL CULTIVO DE LECHUGA


**Tesis**

Elaborada por PERLA ABIGAIL CÁRDENAS ATAYDE como requisito parcial  
para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA con la  
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría




---

Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Asesor Principal




---

Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor



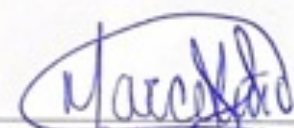
---

Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente  
Asesor



---

Dr. Valentín Robledo Torres  
Asesor



---

Marcelino Cabrera de la Fuente  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a **DIOS** por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi vida, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad, porque hasta aquí me ayudó Jehová.

Doy gracias a mis Padres **CARLOS Y LINA** por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

Agradezco la confianza, apoyo y dedicación de tiempo a mis profesores, los doctores: **ALBERTO, ADALBERTO, MARCELINO, VALENTÍN, SUSANA, ANTONIO Y KARIM**. Por haber compartido conmigo sus conocimientos y apoyarme en cada momento de este proyecto.

A **LIZ, RAFA, VICTOR, LULÚ, PEPE, GERARDO, LUPITA Y MARCO**, por haberse vuelto parte significativa de mi vida, porque en ustedes encontré una amistad incomparable y por haber hecho de esta etapa un trayecto de vivencias que nunca olvidaré, gracias por su apoyo y amistad.

## DEDICATORIAS

A mi madre **Lina Irene Atayde Amaya**

Por haberme dado la vida, impulsarme a emprender nuevos proyectos, por siempre escucharme en los momentos difíciles y darme los mejores consejos. Por ser un ejemplo para mí cada día de tu vida, y por educarme y hacerme la persona que soy ahora. Te amo.

A mi padre **Carlos Cárdenas Salazar**

Por ser un ejemplo de fé y servicio a Dios. Por trabajar cada día de tu vida y darme la educación universitaria que tuve y ahora en esta etapa, tu apoyo e impulso incondicional. Te amo.

A mi tía **María de Jesús Amaya Morales**

Por su inigualable amor y apoyo en cada etapa de mi vida, por regañarme, aconsejarme y divertirse conmigo en muchos momentos. Por ser una de las personas más importantes de mi vida y que siempre ha estado a mi lado. La amo.

A mis hermanas **Karla y Yokebed Cárdenas Atayde**

Por ser un pilar vital en la familia, por su apoyo en este proyecto y porque sé que están orgullosas de mí como yo de ustedes. Las amo.

Al **Ing. Roberto Moctezuma** por impulsarme a ser mejor estudiante y a siempre dar lo mejor de mí en todo lo que haga, por ser un apoyo, una persona incomparable y por alentarme a superar mis expectativas.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Hipótesis.....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Formulaciones clásicas de películas para invernadero.....	3
Nuevas formulaciones de películas para invernadero.....	3
Películas anti-insectos.....	4
Películas refrescantes o películas frías.....	5
Películas térmicas.....	6
Películas fluorescentes.....	7
Formulación de películas con nanopartículas.....	7
Propiedades ópticas de películas plásticas para invernadero.....	8
Opacidad.....	8
Transmisión.....	9
Difusión.....	11
Propiedades mecánicas de películas plásticas para invernadero.....	12
Resistencia al impacto.....	12
Resistencia a la tensión y elongación.....	12
Envejecimiento acelerado.....	13
Influencia de los factores ambientales en el desarrollo y rendimiento de los cultivos.....	14
Efecto de la radiación total.....	14
Radiación fotosintéticamente activa.....	15
Radiación difusa.....	16

Temperatura .....	17
Humedad relativa.....	18
Concentración de CO <sub>2</sub> .....	18
Déficit de presión de vapor .....	19
Influencia de las películas plásticas en el desarrollo y rendimiento de los cultivos.....	20
Modificación del ambiente en el interior de los invernaderos utilizando películas plásticas con diferentes características.....	20
Efecto de la radiación ultravioleta en la vida útil de las películas para invernadero.....	21
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
Descripción del sitio experimental .....	23
Localización .....	23
Clima.....	23
Descripción de las películas evaluadas o tratamientos .....	24
Descripción de Actividades para el establecimiento del estudio .....	26
Diseño y Construcción de Túneles .....	26
Producción de Plántula .....	26
Establecimiento del cultivo .....	26
Riego y fertilización.....	26
Variables Evaluadas .....	27
Radiación Fotosintéticamente Activa ( $\mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{seg}^{-1}$ ) .....	27
Temperatura y humedad relativa .....	27
Conductancia estomática .....	27
Contenido de clorofila .....	27
Número, longitud y ancho de las hojas.....	28
Peso fresco y seco .....	28
Rendimiento.....	28
Análisis de Datos .....	28
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>29</b>
Variables climáticas .....	29

Radiación ( $\mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{seg}^{-1}$ ).....	29
Temperatura ( °C ).....	31
Humedad Relativa (HR).....	33
VARIABLES DE CRECIMIENTO .....	34
Conductancia estomática ( $\text{mmol} / \text{m}^2 / \text{seg}$ ) y Clorofila A, B y total (mg.L).....	34
No. De Hojas, Ancho, Largo y Biomasa .....	36
Rendimiento (gramos por pieza) .....	37
Correlación del peso de lechuga con el porcentaje de sombreado y la LDI.....	39
CONCLUSIONES .....	40
REFERENCIAS .....	41

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Composición de películas a evaluar .....	24
<b>Cuadro 2.</b> Solución nutritiva utilizada.....	26
<b>Cuadro 3.</b> Reducción de la Radiación por las cubiertas de PE .....	31
<b>Cuadro 4.</b> Efecto de las cubiertas sobre la temperatura y la humedad relativa. .....	33
<b>Cuadro 5.</b> Efecto de las películas sobre las variables fisiológicas de la lechuga .....	35
<b>Cuadro 6.</b> Efecto de las películas sobre las variables de crecimiento de la lechuga .....	36
<b>Cuadro 7.</b> Efecto de las películas sobre el rendimiento de la lechuga y su extrapolación a toneladas por ha.....	38



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Efecto de las películas refrescantes .....	6
<b>Figura 2.</b> Efecto de las películas térmicas .....	7
<b>Figura 3.</b> Comportamiento de la radiación solar al topar con una cubierta plástica en función del ángulo de incidencia. ....	10
<b>Figura 4.</b> Efecto de difusión de una película plástica.....	11
<b>Figura 5.</b> Películas plásticas a evaluar .....	24
<b>Figura 6.</b> Diseño del túnel .....	25
<b>Figura 7.</b> Croquis de los tratamientos .....	25
<b>Figura 8.</b> Porcentaje de sombreado de los prototipos evaluados .....	29
<b>Figura 9.</b> Correlación simple del peso de lechuga respecto al porcentaje de sombreado y la Luz Diaria Integrada .....	39

## RESUMEN

ESTUDIO DE EFECTIVIDAD BIOLÓGICA DE OCHO CUBIERTAS DE  
POLIETILENO PARA INVERNADEROS EN EL CULTIVO DE LECHUGA

POR

PERLA ABIGAIL CÁRDENAS ATAYDE

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA  
UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ALBERTO SANDOVAL RANGEL -ASESOR-

Saltillo, Coahuila

Julio 2020

Durante los últimos años la agricultura muestra una tendencia a establecer los cultivos bajo cubierta o invernadero, buscando incrementar la producción, la calidad, ampliar los periodos de cosecha y en suma reducir los efectos negativos de las condiciones climáticas adversas. Con este antecedente, se realizó esta investigación con el propósito de evaluar la efectividad biológica de ocho prototipos de películas de Polietileno (PE) o plásticos para invernadero con aditivos de fósforo, los cuales se compararon con dos películas comerciales en el cultivo de lechuga durante el ciclo otoño-invierno 2019.

Cada película para invernadero constituyó un tratamiento y cada tratamiento se evaluó en 4 repeticiones. Cada repetición consistió en un túnel de 50 m<sup>2</sup> (5×10 m y 3.5 m de altura) con paredes laterales cubiertas con malla antiáfidos. Los túneles fueron distribuidos en un diseño de bloques completos al azar. Las variables que se evaluaron fueron: radiación fotosintéticamente activa, temperatura y humedad relativa, conductancia estomática, contenido de clorofila A, B y total, el número, largo, ancho, peso fresco y seco de las hojas y el peso fresco total a la cosecha. Los resultados obtenidos, mostraron que los prototipos tienen diferente porcentaje de reducción de la radiación fotosintéticamente activa o sombreado ya que los valores oscilaron entre un 12% y un 35% de reducción. Este efecto modificó el crecimiento y productividad de la lechuga. Mientras que la temperatura y humedad relativa no fueron afectadas.

Así mismo, se obtuvieron lechugas con mayor peso en dos de los prototipos evaluados y en el control mexicano, sin embargo, el control mexicano fue el que obtuvo valores óptimos en las diferentes evaluaciones como ancho y largo de la hoja, número de hojas, cantidad de biomasa, etc. El resultado de Luz Diaria Integrada en el control mexicano fue de 19.55 mol.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> el cual se encuentra dentro del rango óptimo para el desarrollo del cultivo de lechuga (Dorais, 2003)

**Palabras clave:** Agricultura protegida, Radiación Fotosintéticamente Activa, Rendimiento, *Lactuca sativa*, Luz Diaria Integrada

**ABSTRACT**

BIOLOGICAL EFFECTIVENESS STUDY OF EIGHT POLYETHYLENE  
COVERS FOR GREENHOUSES IN LETTUCE CULTIVATION

BY

PERLA ABIGAIL CÁRDENAS ATAYDE

MÁSTER OF SCIENCE IN HORTICULTURE  
UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ALBERTO SANDOVAL RANGER –ADVISOR–

Saltillo, Coahuila

July 2020

During the last years agriculture shows a tendency to establish crops under cover or greenhouse, seeking to increase production, quality, extend harvest periods and, in short, reduce the negative effects of adverse climatic conditions. With this background, this research was carried out in order to evaluate the biological effectiveness of eight prototypes of Polyethylene (PE) films or greenhouse plastics with photoselective and phosphorous adherent characteristics, which were compared with two commercial films in the cultivation of lettuce during the autumn-winter 2019 cycle.

Each greenhouse film constituted a treatment and each treatment was evaluated in 4 repetitions. Each repetition consisted of a 50 m<sup>2</sup> tunnel (5 × 10 m and 3.5 m high) with side walls covered with anti-aphid mesh. The tunnels were distributed in a randomized complete block design. The variables that were evaluated were: photosynthetically active radiation, temperature and relative humidity, stomatal conductance, chlorophyll A, B and total content, number, length, width, fresh and dry weight of the leaves and the total fresh weight at harvest. The results obtained showed that the prototypes have a different percentage reduction of photosynthetically active radiation or shading since the values ranged from 12% to 35% reduction. This effect modified the growth and productivity of lettuce. While the temperature and relative humidity were not affected.

Likewise, lettuces with greater weight were obtained in two of the prototypes evaluated and in the Mexican control, however, the Mexican control was the one that obtained optimal values in the different evaluations such as width and length of the leaf, number of leaves, quantity biomass, etc. The result of Integrated Daily Light in the Mexican control was 19.55 mol.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> which is within the optimal range for the development of the lettuce crop (Dorais, 2003)

**Key words:** Protected agriculture, Photosynthetically Active Radiation, Yield, *Lactuca sativa*, Integrated Daily Light

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años la agricultura muestra una tendencia a establecer los cultivos bajo cubierta o invernadero, buscando incrementar la producción, la calidad, ampliar los periodos de cosecha y en suma reducir los efectos negativos de las condiciones climáticas adversas (SIAP, 2017). Debido a que los materiales de cobertura tienen una influencia directa en el desarrollo y producción de los cultivos, por lo tanto es importante considerar la utilización de materiales adecuados para proporcionar las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas y obtener un mejor rendimiento y calidad de las cosechas.

En México la construcción de invernaderos ha tenido un incremento importante y a la fecha la superficie construida oscila entre las 12 a 15 mil has (Iglesias, 2017, Sagarpa, 2018), con una amplia gama de tecnologías para ambiente protegido: vidrio, polietileno y malla sombra, provenientes de países como Alemania, Israel, Holanda, España, Canadá entre otros, todas estas tecnologías se han tratado de adecuar a las necesidades climáticas existentes en cada lugar.

Esto ha ocasionado también un incremento en la demanda de insumos y en particular de cubiertas de polietileno (PE) comúnmente denominado plástico, esto a su vez a derivado en el aumento de empresas ofertantes de películas plásticas, que, en la competencia por el mercado, están realizando diversas innovaciones y mejoras en el producto, con énfasis en el estudio y desarrollo de cubiertas que controlen la radiación incidente en los invernaderos pues la intensidad y la calidad de la radiación (balance espectral), son factores clave ya que modifican la temperatura interna del invernadero y las respuestas morfológicas y fisiológicas de las plantas (Benavides, 1998, Samaniego, 2002).

Estos plásticos antes de ser puestos en el mercado, es necesario que se verifique su eficiencia y una forma de realizarlo, son los estudios de efectividad biológica, que consisten en pruebas de campo bajo rigor científico (Castilla, 2017., DOF, 2013).

Se eligió el cultivo de lechuga porque es una de las especies más importantes del grupo de las hortalizas de hoja, es una verdura cultivada al aire libre en zonas

templadas, pero actualmente su producción en invernadero ha ido en constante crecimiento, debido a la reducción de los ciclos de producción y sobre todo la calidad obtenida bajo estos sistemas (Balsam *et al.*, 2013).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar ocho prototipos de polietileno para cubierta de invernadero en el cultivo de lechuga.

### **Objetivo general**

Evaluar la transmisión de radiación fotosintética activa en diferentes formulaciones de las películas para invernadero desarrolladas por la empresa Merck KgaA.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar el desarrollo fenológico y fisiológico de un cultivo bajo cubierta con los prototipos de películas para invernadero enviadas por Merck KgaA.
- Comparar el desarrollo de las películas desarrolladas on una película comercial en México.

### **Hipótesis**

La capacidad fotoselectiva de los prototipos de películas plasticas de la empresa Merck KgaA mejorará las características morfológicas y bioquímicas del cultivo de lechuga, así como el rendimiento y dicho efecto se incrementará con al menos uno de los prototipos.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Formulaciones Clásicas de Películas para Invernadero**

Los materiales plásticos empleados como cubiertas de invernadero se pueden clasificar en filmes flexibles, placas rígidas y mallas, aunque la superficie cubierta con los primeros supera a las otras dos opciones.

Las películas plásticas utilizadas para cubierta de invernadero normalmente tienen espesores comprendidos entre 80 y 220 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). Entre los polímeros más utilizados en la elaboración de películas plásticas para invernadero se encuentran, el polietileno de baja densidad (LDPE) y los polímeros de etileno y acetato de vinilo (EVA) y acrilato de butilo (EBA), el polímero de cloruro de vinilo (PVC) y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) (Velásquez, 2004).

Antes de la introducción de los estabilizadores a la luz tipo amina impedida (HALS), las combinaciones absorbentes UV (UVA) y complejos de níquel fueron las alternativas de estabilización para películas agrícolas. Incluso hoy, todavía se usa ampliamente este paquete UV en películas agrícolas, especialmente cuando se están aplicando pesticidas con base en azufre. La combinación de filtro UV/complejo de níquel, aunque es muy resistente a los pesticidas, presenta sus limitaciones en la reducción de la transmisión de la luz, debido al color verde del complejo de níquel (Ruiz, 2014).

Otra forma tradicional de obtener películas plásticas para cubiertas de cultivo, es agregar al polímero compuestos de sílice. Esto produce una filtración al paso de radiaciones infrarrojas, pero va en detrimento de la transmisión de luz fotosintética activa (PAR) (Velásquez, 2014).

### **Nuevas formulaciones de películas para invernadero**

Los plásticos empleados como cubierta de los invernaderos son derivados del petróleo obtenidos a través de un proceso industrial (Díaz *et al.*, 2001), siendo los aditivos que llevan estos materiales los que les van a dar las cualidades mecánicas o físicas y las cualidades radiométricas u ópticas.



Las oportunidades tecnológicas en materiales plásticos para la cubierta de invernaderos pasan por el desarrollo y utilización de nuevas películas que permitan un mejor control del clima del invernadero y una mayor productividad para poder obtener las cosechas en las épocas más ventajosas económicamente.

La aparición del plástico de coextrusión ha abierto las puertas a la posibilidad de contar con películas que combinan las características técnicas de dos o más plásticos diferentes (multicapas). En la práctica eso significa que cada zona, cada tipo de cultivo, o cada estilo de agricultor puedan contar con el plástico que mejor responda a sus exigencias. La especialización creciente de la agricultura ha recibido un fuerte impulso con estos plásticos capaces de responder de manera cada vez más específica a las necesidades del agricultor profesional (López, 2013).

El diseño de nuevas películas agrícolas con aspectos muy particulares ha complicado enormemente la formulación ya que con los diferentes tipos existentes, actualmente en el mercado se ha dado respuesta a la demanda cada vez más exigente, todo esto influye directamente en el precio final de las películas debido a que el costo de los aditivos es alto en comparación con el polímero base, polietileno de baja densidad o copolímero de etilen-vinil-acetato (Catalina *et. al.*, 2012).

Los desarrollos de nuevas formulaciones se dirigen hacia una mejora de las propiedades mecánicas y ópticas, las cuales pueden reducir el volumen de residuo (mediante materiales más duraderos) y el uso de fitosanitarios. Los nuevos materiales tratan de mejorar las propiedades de: duración, efecto anti goteo, termicidad, difusión y transmisión. La eficacia de estos materiales va a depender también en parte de la geometría de la cubierta del invernadero y de la localización del mismo (López, 2013).

### **Películas anti-insectos**

Su modo de acción está basado en el bloqueo de la transmisión de radiación UV al interior del invernadero. Este proceso dificulta el desarrollo de plagas o

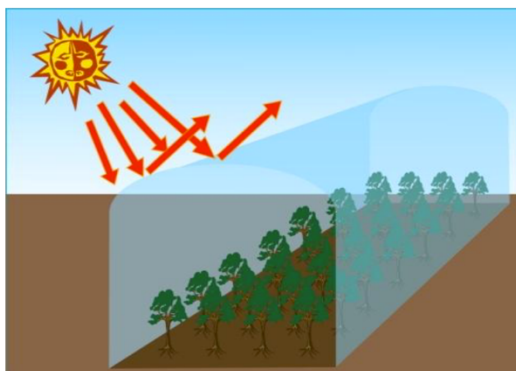
enfermedades causadas por hongos o por virus transmitidos por insectos que por algún motivo son sensibles a la disminución o ausencia de este tipo de radiación. Los plásticos anti insectos no actúan matando la plaga, su funcionamiento consiste en impedir la entrada de la radiación UV que los insectos necesitan para ver dentro del invernadero, sin afectar a la radiación PAR que necesitan las plantas. Dependiendo de la plaga el efecto será mayor o menor, siendo más importante en aquellas plagas que necesitan mayor cantidad de radiación UV. Plagas como mosca blanca, *Bemisia tabaci*, se ven altamente afectadas por estos materiales. Si la mosca blanca vuela por los alrededores del invernadero no es capaz de reconocer el cultivo, también la incidencia el *Thrips tabaci* se ha reducida bajo estos materiales comparándolos con polietilenos normales (Pérez *et al.*, 2017).

Los polietilenos anti insectos han demostrado que reducen la presencia de plagas frente a los polietilenos normales, y junto con un buen manejo de las colmenas polinizadoras, pueden ser una herramienta complementaria a técnicas de control biológico (Soler *et. al.*, 2019).

### **Películas refrescantes o películas frías**

Los invernaderos situados en las zonas tropicales o desérticas pueden sufrir problemas al estar sometidos a las temperaturas excesivas prácticamente a todo lo largo de un ciclo de cultivo. El sobrecalentamiento es debido al exceso de la radiación solar principalmente en el rango del infrarrojo cercano (NIR). Los agricultores suele solucionar este problema utilizando mallas de sombreado o mediante el blanqueo de las cubiertas. Ambos métodos solucionan el efecto de la transmisión de energía térmica en el infrarrojo cercano que es aproximadamente un 45 por ciento del total, pero también disminuye la trasmisión de la PAR. Las cubiertas ideales para este tipo de clima serian aquellas que filtren la NIR, para mantener fresco el invernadero sin reducir la PAR, estas películas con las conocidas como refrescantes o antitérmicos (Espí *et al.*, 2012).

Estas películas son impermeables a las radiaciones de longitudes de ondas cortas (NIR 770 a 3,000 nm) durante el día, y permeables a las radiaciones de longitud larga (LIR 6,000 a 14,000 nm) durante la noche (Figura, 1) (Olivera, 2008). Las cubiertas con estas características será sin duda un buen complemento a otras técnicas de refrigeración, como el encalado, la nebulización, entre otras. Será necesario desarrollar cubiertas específicas para diferentes climas y cultivos, ya que tanto el bloqueo NIR como la reducción en la transmisión PAR que a veces lleva asociada, deben ser ajustadas a las condiciones climáticas locales, permitiendo cultivos en zonas tropicales o desérticas o en épocas calurosas en otras zonas, donde eran antieconómicos con otras tecnologías.



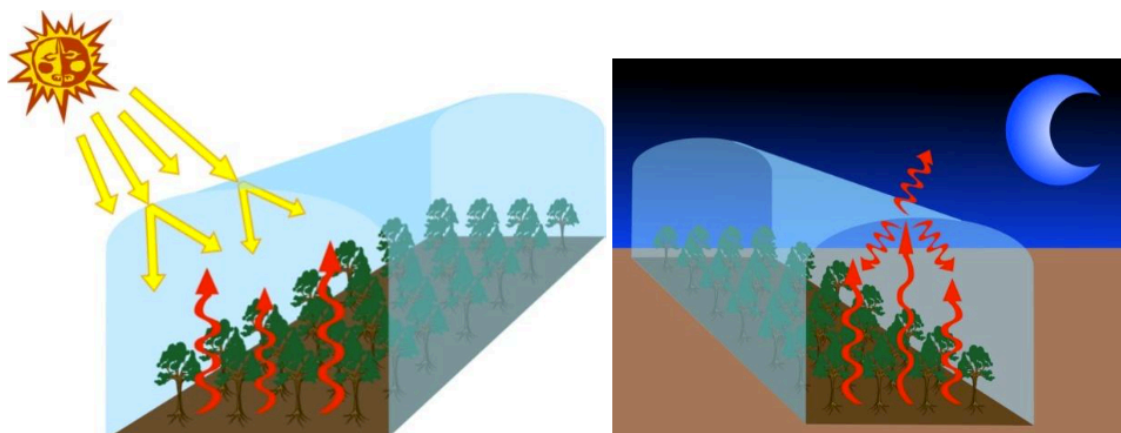
**Figura 1.** Efecto de las películas refrescante (Fuente: Olivera, 2008).

### **Películas térmicas**

La banda del espectro de radiación en el rango de infrarrojo cercano (NIR) es la zona del espectro electromagnético comprendida entre los 2.5  $\mu\text{m}$  y los 25  $\mu\text{m}$  y es en este rango en donde se sitúa la mayor parte de emisión de radiación terrestre y de los objetos que hay sobre ella. Los plásticos térmicos son adecuados para zonas frías o propensas a largos periodos fríos o heladas. Durante el día se busca que el calor acumulado dentro del invernadero no sobrepasa la temperatura máxima crítica para el adecuado desarrollo de los cultivos. Este calor es retenido durante la noche debido al efecto termoaislante,

que se alcanza por ser opacos a la radiación NIR, especialmente entre los 7 y 14  $\mu\text{m}$  (Espí *et al.*, 2012).

Las películas térmicas son permeables a las radiaciones de longitudes de ondas cortas (NIR) absorbidas durante el día por la planta y el suelo, e impermeables a las radiaciones de longitud que son emitidas por el suelo y las plantas durante la noche (Figura 2.). De esa manera mantienen la temperatura dentro del invernadero aún en momentos en que la temperatura exterior es muy baja.



**Figura 2.** Efecto de las películas térmicas (Fuente: Olivera, 2018).

### **Películas fluorescentes**

Modifican la calidad de la luz solar, en cuanto a su distribución espectral, en la parte ultravioleta y visible del espectro, absorbiendo longitudes de onda poco útiles para la planta (ultravioleta y verde) y emitiéndola en otras más aprovechables para la fotosíntesis (azul y roja), con lo que se conseguirían aumentos de producción y mejora de la calidad de la cosecha (Acuña, 2017).

### **Formulación de películas con nanopartículas**

La nanotecnología es un término antepuesto por el sufijo nano, que proviene del griego y significa diminuto consiste en manipular materiales a niveles atómicos y moleculares para crear nuevas estructuras moleculares conocidas como “nanomateriales”, las cuales poseen características únicas y nuevas diferentes a las de los materiales originales de los que se derivan. Estos materiales pertenecen a diferentes clases que varían entre sí en numerosas características

básicas como la persistencia, reactividad y comportamiento en los sistemas biológicos, a tal punto que se hace imposible formular generalizaciones sobre sus propiedades (Molins, 2018).

En la protección ambiental, la nanotecnología a permitiendo aplicaciones en fotocatalisis, un proceso en el que la luz fomenta una reacción entre compuestos como residuos de plaguicidas y el nano material, sin que este se consuma. Este proceso sería útil en la descontaminación del agua para consumo humano y agrícola. Por ejemplo, se ha estudiado con éxito en diversos ámbitos la eliminación de aceites, agroquímicos y productos de desecho inclusive de contaminantes biológicos como los virus vía fotocatalisis, usando nanomateriales de óxido de titanio. En inocuidad de alimentos, la fotocatalisis podría aplicarse en la superficie de las frutas y hortalizas frescas para eliminar los residuos de agroquímicos tóxicos y destruir las bacterias (Thayer, 2012). Por otra parte, los nanocompuestos son una tecnología de materiales que está causando una revolución industrial en el mundo. Han sido desarrollados para mejorar las características mecánicas y físicas de los plásticos comerciales mediante la dispersión de partículas de tamaño nanométricos en su interior, siendo las arcillas como la montmorillonita las más usadas para este propósito.

### **Propiedades ópticas de películas plásticas para invernadero**

La propiedad óptica es la respuesta de un material expuesto a una radiación electromagnética, en particular a la luz visible. Los materiales no metálicos pueden ser transparentes a la luz visible según su estructura, por este motivo es importante considerar parámetros como el porcentaje de transmisión (Calliste, 2017).

Las características ópticas de la cubierta plástica puede modificar significativamente la calidad y transmisión de la luz, afectando a los cultivos, principalmente en cuanto a la eficiencia en el uso de la radiación y a sus efectos fotomorfogenéticos.

### **Opacidad**

Opacidad es la propiedad de un material de absorber la luz que lo traspasa, por la cual llegado a un cierto punto un medio es opaco, es decir, no transparente. Los pigmentos son bien conocidos como agentes de opacidad en las películas plásticas. El negro de carbono exhibe una elevada capacidad de opacidad, esto es, una gran capacidad de absorción de la luz a través de las películas (Acuña, 2017).

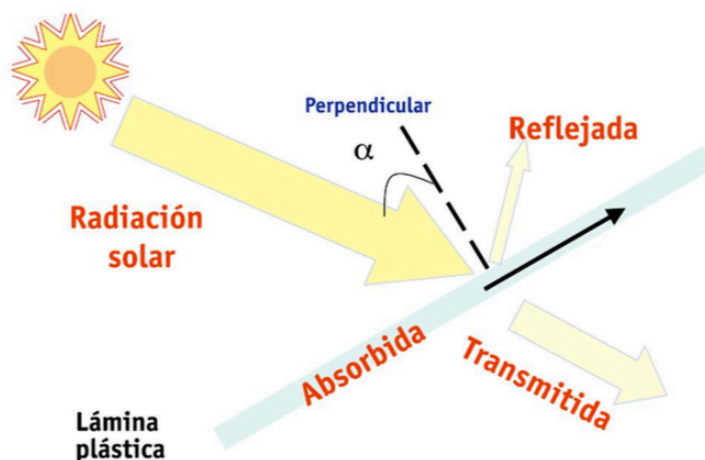
Para algunas aplicaciones la opacidad de las películas es un parámetro clave. Por ejemplo, algunas películas agrícolas deben poseer un cierto nivel de opacidad para prevenir el crecimiento de las malas hierbas como en el caso de acolchados, mientras que las películas utilizadas para recubrimiento de invernaderos deben tener muy poca opacidad. La transmisión de la luz a través de las películas es una forma de medir la opacidad. A mayor cantidad de luz transmitida con respecto de la luz incidente, menor opacidad (Hemming, 2018).

### **Transmisión**

Es la propiedad de los materiales de dejar pasar la radiación solar, se expresaría como la relación entre la radiación en el interior del invernadero y la medida simultáneamente en el exterior. La radiación solar que incide sobre una lámina de plástico que cubre un invernadero puede ser transmitida (atravesando dicha lámina), reflejada por dicha lámina o absorbida. El estudio de la transmisión de la radiación solar de los invernaderos, es provechoso para poder establecer mejoras que permitan una mayor penetración de la radiación, que posibiliten la máxima productividad y las mayores ganancias de energía cuando los invernaderos son utilizados como colectores solares (Iglesias *et al.*, 2017).

La calidad de la luz es afectada al atravesar la lámina plástica. En caso de radiación directa, la transmisión dependerá también del ángulo de incidencia, que forman los rayos solares con la línea perpendicular a la superficie de la lámina (Figura 3.). Cuando la radiación solar que incide sobre la lámina es difusa, no cabe hablar de ángulos de incidencia, al provenir la radiación de toda la bóveda celeste (Hernández, 2012).

Un material de cubierta debe de transmitir la máxima radiación de onda corta, ya que es en ésta donde se encuentra la fracción de radiación PAR. De la radiación transmitida, parte será difusa y parte directa, dependiendo del material de cubierta. Una proporción elevada de radiación difusa evitará posibles quemaduras y especialmente en cultivos de porte alto permitirá que las hojas localizadas en niveles inferiores reciban más radiación, ya que las hojas del primer nivel interceptan la mayor parte. La radiación difusa cuando incide sobre un objeto lo hace en todas las direcciones (como una bóveda) con lo que apenas se producen sombras. Una forma sencilla de identificar un material con elevada proporción de radiación difusa, es simplemente observando si existen sombras bien definidas dentro del invernadero (López, 2013).



**Figura 3.** Comportamiento de la radiación solar al topar con una cubierta plástica en función del ángulo de incidencia (Fuente: Hernández, 2012).

Los valores de transmitancia que proporcionan las casas comerciales están referidos a condiciones que no se presentan en la práctica, es decir, cuando la luz incide perpendicularmente sobre la cubierta, así, son valores normales de más del 90% en transmisión a la luz visible (Montero et al., 2011).

## Difusión

La radiación difusa es la que proviene de diversas direcciones al haber sido reflejados, desviados o dispersados los rayos solares por las nubes, la turbidez atmosférica, los accidentes topográficos o simplemente difundidos al atravesar un material transparente o traslúcido (Hernández, 2012).

Es la propiedad que tienen las cubiertas de cambiar la dirección de los rayos solares distribuyéndola equitativamente por toda el área para beneficiar a todo el invernadero en su conjunto y a la vez impedir que lleguen directamente a la planta. Este factor permite el desarrollo armónico del cultivo y ayuda a obtener frutos más homogéneos y sanos.

La luz puede hacerse difusa mediante las películas de recubrimiento para los invernaderos. Dichas películas contienen pigmentos micro o macro estructurados en la superficie que son capaces de transformar la luz directa entrante en luz difusa. Dependiendo el diseño de los pigmentos o de la estructura de la superficie, se dispersa la luz entrante y se cambia el ángulo de incidencia. Los pigmentos o estructuras de la superficie hacen la luz difusa, sin reducir la transmisión de la radiación total (Hemming, 2018).



**Figura 4.** Efecto de difusión de una película plástica (Fuente: Hernández, 2012)



## **Propiedades mecánicas de películas plásticas para invernadero**

### **Resistencia al impacto**

En muchas operaciones de manufactura, así como durante la vida de servicio de los componentes los materiales están sujetos a cargas por impacto (cargas dinámicas), por lo que las pruebas de impacto son particularmente útiles, los materiales que tienen una elevada resistencia de impacto son comúnmente aquellos que tiene una elevada resistencia y ductilidad, por tanto una elevada tenacidad. La sensibilidad a los defectos superficiales reduce significativamente la tenacidad al impacto (Serope, 2012).

Las propiedades de impacto de los materiales poliméricos están relacionadas con la tenacidad del material. La tenacidad se define como la habilidad de un polímero para absorber energía. El área bajo la curva esfuerzo tensión es directamente proporcional a la tenacidad del material. La resistencia al impacto se define como la habilidad del material para resistir a la ruptura bajo un shock de carga o la habilidad de resistir a la fractura ante un esfuerzo aplicado a alta velocidad (Hemming, 2018).

Las propiedades al impacto de los distintos polímeros pueden ser fácilmente modificables por el simple agregado de otros polímeros. La adición de plastificantes también modifica las propiedades de impacto a expensas de la rigidez. En materiales poliméricos tales como el nylon, los cuales son poco resistentes al impacto, puede lograrse una mejora en sus propiedades mediante la orientación de las moléculas, o mediante el agregado de cargas fibrosas las cuales actúan como medios de transferencia (Serope, 2012).

### **Resistencia a la tensión y elongación**

Es la prueba más común para determinar las propiedades mecánicas de los materiales como la resistencia, ductilidad, tenacidad, módulo elástico y endurecimiento por deformación (Serope, 2002). Esta prueba nos permite determinar la capacidad de resistencia de un plástico al ser sometido a una fuerza de tensión y es particularmente útil para conocer la fuerza aplicada antes de la

ruptura del plástico, en el caso de las cubiertas de invernadero es necesario aplicar tensión al momento de colocarlas en las estructuras de tal forma que se estire al máximo sin romperse. Entre mayor sea la resistencia a la tensión y tenga mayor porcentaje de elongación se facilitara el manejo al momento de su colocación en las estructura del invernadero (Shackelford, 2019).

La cantidad de elongación que presenta una muestra bajo tensión durante un ensayo proporciona un valor de la ductilidad de un material. La ductilidad de los materiales comúnmente se expresa como porcentaje de la elongación. En general, a mayor ductilidad (más deformable es el material), mayor será el porcentaje de la elongación. Este valor es importante porque no solo es una medida de la ductilidad del material, sino también porque da una idea acerca de la calidad del mismo. En caso de que haya porosidad o inclusiones en el material o si ha ocurrido algún daño por un sobrecalentamiento del mismo, el porcentaje de elongación de la muestra puede decrecer por debajo de lo normal.

### **Envejecimiento acelerado**

Las películas de polietileno se deterioran por tensiones originadas por la acción de los vientos, del granizo, de las variaciones de temperatura, su propio peso y los anclajes de la estructura que lo sostiene. Es necesario, por lo tanto, usar materiales resistentes y que ofrezcan garantías de estabilidad, pero que al mismo tiempo no disminuyan la iluminación (Alpi y Tognoni, 2011).

Se considera que un material plástico está envejecido después de su exposición a la radiación solar, o en equipos de envejecimiento acelerado, y por lo tanto no es apto para su uso, cuando retiene el 50% o menos de las propiedades ópticas o mecánicas evaluadas (Ramírez *et al.*, 2015).

La prueba de envejecimiento acelerado ayuda a conocer el potencial de duración y comportamiento de una pieza o producto acabado, cuando están sometidos a un ambiente o condiciones determinadas. Dependiendo de la estructura del plástico y del medio en el que se encuentre, éste se comportará de forma diferente. Utilizando cámaras de ensayo (niebla salina, cámara climática y de envejecimiento a la luz) se puede reproducir la influencia de la radiación solar, la

temperatura, la lluvia, la humedad, y comprobar si el material se degrada, cambia de color, si presenta tensiones en su estructura.

## **Influencia de los factores ambientales en el desarrollo y rendimiento de los cultivos**

### **Efecto de la radiación total**

La energía solar es la energía radiante producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión. Llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre.

La tasa a la cual la radiación es recibida por una superficie por unidad de área se denomina irradiación, la misma que se expresa en unidades de potencia por unidad de área,  $W m^2$ . Teóricamente, un cuerpo negro capta toda la radiación a la que está expuesta. Sin embargo, en la práctica sólo se cuentan con cuerpos opacos los cuales solamente son capaces de captar una parte de la radiación total. No obstante, a partir de consideraciones termodinámicas es posible emplear estos cuerpos opacos para estimar la radiación solar instantánea sobre una región determinada. La energía aprovechable de la radiación solar proviene de la región del espectro visible e infrarrojo cercano, que son las ondas electromagnéticas que producen el incremento de la energía interna de un cuerpo (Guevara, 2013).

La energía consumida en casi todos los procesos atmosféricos proviene del Sol. Esta energía se transfiere a través de la radiación del calor en forma de ondas electromagnéticas. La radiación solar total que incide en un dosel de los cultivos, tiene un intervalo de longitud de onda de 0.300 a 4.00  $\mu m$  para la fotosíntesis la planta utiliza solo la radiación de 0.400 a 0.700  $\mu m$  , definida como la radiación fotosintética activa (PAR) y corresponde aproximadamente al 48 % de la radiación total incidente, el resto de la radiación solar absorbida por las la hojas induce efectos térmicos, afectando la temperatura foliar y la tasa de transpiración (Gallo y Daughy, 2016)

### **Radiación fotosintéticamente activa**

Para la fotosíntesis la planta utiliza solo la radiación de 0.400 a 0.700  $\mu\text{m}$  que constituye el rango de absorción de las clorofilas y los pigmentos, definida como la radiación fotosintética activa (PAR) y corresponde aproximadamente al 48 % de la radiación total incidente (Jones, 1992). El resto de la radiación solar absorbida por las hojas induce efectos térmicos, afectando la temperatura foliar y la tasa de transpiración; Sin embargo, la incidencia de la radiación lumínica sobre los organismos vivos no es homogénea ni en su calidad ni en su intensidad. Ésta depende en primer lugar de la latitud, de la altitud, del tipo de ambiente y de su claridad o transparencia.

De entre todos los factores ambientales que afectan a las plantas quizá sea la luz el de mayor importancia. En una formación vegetal más o menos densa las hojas se superponen en niveles o capas sombreándose unas a otras. La luz es rápidamente absorbida por las primeras capas de hojas y lo que consigue penetrar hasta las capas más bajas (1 a 2% de la luz incidente) es una luz no sólo progresivamente menos intensa, sino empobrecida en aquellas longitudes de onda que ya han sido absorbidas más arriba. Esta desigual distribución en la luz que llega a las distintas partes de las plantas tiene consecuencias directas en la composición pigmentaria de las mismas. Dicho de otro modo, en un día soleado se podría asumir que todas las hojas de la planta están recibiendo un exceso de energía lumínica; sin embargo, esta es distinta tanto para las diferentes partes de la planta como entre plantas. Además en un día totalmente soleado a medida que cambia el ángulo de incidencia solar, cambia la intensidad con la que esta llega a las hojas (Manrique, 2013).

Yao *et al*, (2010), realizaron trabajos sobre pimiento en los que encontraron que los cambios en los diámetros del fruto están estrechamente relacionados con la radiación, observándose que en frutos ubicados a la sombra los cambios fueron mayores que aquellos desarrollados en lugares más iluminados. Los autores concluyeron que aquellos factores que afectan la transpiración foliar, tales como la radiación solar, el déficit de vapor de agua, la temperatura del aire y el estrés hídrico, afectan el crecimiento del fruto.

### **Radiación difusa**

La energía solar absorbida por la Tierra en forma de radiación lumínica y posteriormente disipada como radiación infrarroja, determina el calentamiento o enfriamiento del aire, la cantidad de agua evaporada o precipitada, y la diferencia de presión que determinan vientos y brisas. La radiación solar, al atravesar la atmósfera terrestre, es en parte reflejada, difundida y absorbida por el polvo y moléculas de gases disueltos en ella como el ozono (O<sub>3</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el vapor de agua entre otros. La magnitud de esta alteración depende de la composición de la atmósfera y de la longitud de camino óptico de los rayos del sol (Falcón *et al.*, 2011).

La radiación difusa es la que se recibe del Sol, después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro, aun de día, como sucede por ejemplo en la Luna. La radiación que proviene de objetos terrestres es la radiación terrestre. Se conoce como radiación total, la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie.

Para muchos cultivos hortícolas la luz difusa significa crecimientos más uniformes de plantaciones y en muchos casos mayor calidad de los frutos de las plantas de vivero. La luz difusa llega a las plantas desde más ángulos pudiendo penetrar a los niveles más bajos del cultivo lo que ayuda a la planta a mantener más homogénea la fotosíntesis en todos los estratos del dosel. Si se utilizan plásticos con propiedades difusoras de la radiación solar directa como cobertura de invernaderos, se alteran de manera directa las proporciones de la luz directa y difusa dentro del invernadero, y por consecuencia la respuesta de los cultivos (Papasseit, 2019).

En invernaderos la luz incidente es dispersada por el material lo que hace que el flujo luminoso se distribuya con más uniformidad, disminuyendo las sombras en el interior del invernadero y homogenizando la luz en el dosel de las plantas (Orden *et al.*, 1997). El agregado de aditivos para mejorar la calidad del plástico

puede disminuir la transmisión de la radiación, pero también puede aumentar la difusión de luz en el invernadero (Alpi y Tognoni, 2011).

### **Temperatura**

Las plantas controlan su temperatura mediante la transpiración, disipando hasta un 50 % de la energía que absorbe. Todas las especies responden a un rango de temperatura, dado que las relaciones bioquímicas están controladas por enzimas sensitivas al calor (Leskovar, 2011).

La temperatura también afecta la actividad metabólica celular, la absorción de agua y nutrientes, el intercambio gaseoso, la producción y gasto de carbohidratos y reguladores del crecimiento, entre otros (Tognoni, 2010). Los procesos de fotosíntesis, respiración, división celular y expansión celular, se ven modificados, también por la temperatura, el déficit de presión de vapor, luz y CO<sub>2</sub>. El metabolismo de las plantas puede ser afectado por la temperatura, la tasa de crecimiento para muchos cultivos expuestos a frío se puede incrementar al aumentar la temperatura en 10 °C (López, 2011).

Cuando la temperatura desciende por debajo de 10 ó 12°C, las especies termófilas entre las que podemos considerar la mayoría de las hortalizas que se cultivan bajo protección, pueden presentar una reducción del crecimiento, disminución de la tasa de asimilación neta, depresión de la respiración, reducción del transporte y distribución de asimilados, disminución de la absorción de agua y sales, cambios anatómicos y morfológicos, pérdida de fertilidad y envejecimiento precoz del tejido fotosintético por necrosis celular (Lorenzo, 2010).

En ambientes protegidos donde se alcanzan altas temperaturas, para reducir la radiación solar y atenuar la temperatura en un invernadero se utilizan pantallas térmicas, malla sombra y aplicación de carbonato de calcio sobre las cubiertas. Esta última práctica reduce la vida útil del polietileno, ya que el encalado extrae los aditivos de las películas y afecta sus propiedades mecánicas. Además, el uso de estos materiales, equipos y tecnologías eleva en forma considerable los

costos de producción, por su precio, instalación, funcionamiento y mantenimiento (Samaniego, 2012).

### **Humedad relativa**

Este parámetro climático, en vinculación con la temperatura, es responsable del grado de actividad metabólica de los cultivos y muchas veces no se considera la importancia de su rol por las dificultades prácticas de su medición y manejo.

En ambientes protegidos, el aire es enriquecido con vapor de agua proveniente de la evaporación desde el suelo y por transpiración de las plantas, esta última es realizada por las plantas porque es el mecanismo que da origen al transporte de nutrimentos, así también para refrigerarse y para regular su crecimiento. La transpiración depende del déficit de saturación entre los estomas y el aire. Cuando los déficits de saturación son demasiado altos o demasiado bajos influyen en la fisiología del cultivo y en su desarrollo. Si la humedad ambiental es demasiado alta, el intercambio gaseoso queda limitado y se reduce la transpiración y por consiguiente la absorción de nutrientes, si es demasiado baja se cierran los estomas y se reduce la tasa de fotosíntesis (Huerta, 2018).

La humedad alta puede dificultar la polinización puesto que el polen húmedo puede quedar pegado en los órganos masculinos. Esta humedad ambiental puede favorecer el desarrollo de enfermedades. Si la temperatura del cultivo disminuye por debajo de la temperatura del rocío del aire, se condensa el agua y se favorece el desarrollo de enfermedades por hongos.

### **Concentración de CO<sub>2</sub>**

En plantas, la fijación y reducción de dióxido de carbono tiene lugar en el estroma del cloroplasto. Se consideran dos etapas o fases en la fotosíntesis: la fase fotoquímica que conduce a la formación de ATP y NADPH, y la fase bioquímica, en la que el ATP y el NADPH son utilizados para fijar CO<sub>2</sub> atmosférico y reducirlo para sintetizar carbohidratos. Se trata de un conjunto de reacciones que se denominan reacciones del carbono o metabolismo del carbono en la fotosíntesis (Pérez, 2019).

El dióxido de carbono de la atmósfera es una de las materias primas imprescindibles de la función fotosintética de las plantas. El enriquecimiento de la atmósfera del invernadero con CO<sub>2</sub>, es muy interesante en muchos cultivos, tanto en hortalizas como en flores. La concentración normal de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es del 0.03%. Este índice debe aumentarse a límites de 0.1 a 0.2%, cuando los demás factores de la producción vegetal sean óptimos, si se desea el aprovechamiento al máximo de la actividad fotosintética de las plantas.

El efecto que produce la fertilización con CO<sub>2</sub> sobre los cultivos hortícolas, es el de aumento de la precocidad de aproximadamente un 20% y aumento de los rendimientos en un 25 a 30%, mejora la calidad del cultivo así como la de su cosecha.

### **Déficit de presión de vapor**

La diferencia entre la presión máxima de vapor de aire y la presión de vapor actual se le denomina déficit de presión de vapor (DPV), el cual representa la presión de succión del aire con respecto a otros cuerpos que retienen humedad. El DPV puede ser utilizado para estimar la evapotranspiración (Baille *et al.*, 2014). El déficit de presión de vapor es una de las variables de entrada para la estimación de la evapotranspiración de referencia según el método patrón Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). Humedad alta, próxima a saturación, pueden disminuir la ETc e inhibir la absorción de nutrientes, particularmente el calcio, así como acarrear problemas de enfermedades.

Andrade *et al.*, (2016) en un estudio realizado en un cultivo de Pitahaya (*Hylocereus undatus*) menciona que un valor bajo de DVP reduce la pérdida de agua de los tejidos porque disminuye la conductancia de vapor de agua. Muños (2015), en un experimento realizado en pimiento determino que un DPV bajo permite alcanzar buenos valores de producción total y que la calidad del fruto se puede ver afecta al aumentar el DVP, generando fisiopatías como la pudrición apical. Por otra parte Sánchez, (2017) en un cultivo de vid observo que en ambientes con bajo DVP las plantas reducen considerablemente la tasa fotosintética debido al cierre estomático.



### **Influencia de las películas plásticas en el desarrollo y rendimiento de los cultivos**

En el desarrollo de cultivos, el microclima y sus variaciones influyen en los procesos de intercambio de gases y relaciones hídricas (Nilsen y Orcutt, 2016). Estas variaciones no se pueden controlar en campo, pero en numerosos rubros hortícolas y ornamentales se ha evitado mediante el cultivo en invernadero. Las plantas necesitan un ambiente favorable en el que sean capaces no sólo de vivir sino también de producir.

Las películas de polietileno usadas comúnmente para cubiertas de invernadero presentan alta transmisión de radiación térmica, especialmente cuando no hay condensación. Las cubiertas utilizadas para los invernaderos deben responder a requerimientos de alguna manera contrapuestos: mientras por un lado es conveniente que presenten altos valores de transmisión a la radiación solar, particularmente la radiación fotosintéticamente activa (PAR), por otro lado deben presentar bajos valores de transmisión de la radiación infrarroja térmica.

### **Modificación del ambiente en el interior de los invernaderos utilizando películas plásticas**

La transmisión de la radiación solar a través de la cubierta influye tanto en el balance energético del invernadero como en la actividad fotosintética del cultivo, ya que el material de cobertura provoca una reducción en la intensidad de la radiación y una modificación en la distribución espectral (Goldberg *et al.*, 2016). Esta reducción depende principalmente del material utilizado como cobertura y también de los materiales utilizados en la estructura. El material de recubrimiento tiene que favorecer la entrada de la radiación solar incidente y al mismo tiempo limitar, especialmente en horas nocturnas, la pérdida de la energía térmica acumulada. Por ello es importante establecer para cada material la transparencia a la radiación fotosintéticamente activa y al infrarrojo, así como poder inferir su comportamiento a lo largo del tiempo, al ser expuesto a las condiciones ambientales características del lugar y al manejo del cultivo.

La fracción de radiación solar global transmitida dentro de un invernadero es designada como transmisión global del invernadero. La transmisión es función, entre otros factores, de las condiciones climáticas, de la posición del sol en el cielo, de la geometría de la cubierta del invernadero, de su orientación, del material de recubrimiento y de los elementos estructurales y equipos del invernadero que limitan, al sombrear, la radiación dentro del mismo (Zabeltitz, 2018).

La aparición en el mercado de cubiertas plásticas más transmisivas a la radiación solar (multicapa), que las cubiertas convencionales de polietileno normal, larga duración y térmico (Montero *et al.*, 2010), confirman el interés de aumentar la radiación dentro del invernadero en lugares con baja incidencia de radiación. Lavar las cubiertas plásticas y evitar en lo posible el blanqueo en los invernaderos, junto con una elección adecuada de la cubierta plástica permite una mayor disponibilidad de la radiación dentro del invernadero (Morales *et al.*, 2010).

### **Efecto de la radiación ultravioleta en la vida útil de las películas para invernadero**

Existen distintos factores que afectan el tiempo de vida útil de una película para invernadero, estos factores pueden dividirse en forma general, en dos clases, los relacionados con la formulación y los relacionados con el ambiente donde se encuentra el invernadero. Uno de los factores más importantes relacionados con el lugar donde se encuentra el invernadero es la radiación, en particular la radiación ultra violeta. La resistencia intrínseca a la radiación UV del polímero o de la mezcla de polímeros usada y su compatibilidad con los estabilizantes UV, conducirán a distintos tiempos de duración de la película en campo, típicamente una película formulado con EVA tendrá una duración ligeramente más larga que una película elaborado únicamente con PE (Cruz, 2012).

La radiación UV representa únicamente un 4.6 % del espectro solar, pero causa la mayor parte del daño en el material polimérico. El espectro de la radiación solar ultravioleta se encuentra entre los 280 y los 400 nanómetros; sin embargo, la

parte más agresiva es la UVB, cuyas longitudes de onda son las más cortas y están comprendidas entre los 280 y los 315 nanómetros.

La gran mayoría de los materiales plásticos sufren un envejecimiento que lleva asociado una merma en sus propiedades cuando son sometidos durante largos periodos de tiempo a la radiación luminosa. Este envejecimiento se atribuye a una reacción de foto-oxidación térmica en cadena producida por la radiación luminosa de mayor energía, en la que se generan grupos carbonilo, grupos responsables que desencadenan reacciones de degradación del plástico (Arandilla *et al.*, 2017).

Los aditivos UV necesitan tener una elevada estabilidad inherente a la luz, baja volatilidad y no deberían interactuar con otros ingredientes en el paquete de estabilización (agentes antiniebla, aislantes térmicos). El término medio de vida de un paquete de estabilización se puede acortar si los aditivos son demasiado volátiles, son insolubles o presentan una excesiva migración en la matriz polimérica (Stretanski, 2019).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del sitio experimental

#### Localización

El estudio se realizó en la Parcela 17, del ejido el Pilar antes la Gloria, municipio de General Cepeda Coahuila en las coordenadas 25° 22' 35" N 101° 28' 30" O y a una altitud de 1,410 metros sobre el nivel del mar, y en el Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Durante el periodo de marzo a diciembre del 2019.

#### Clima

De acuerdo a la clasificación climática de Köeppen y modificada por García (1987) el clima de General Cepeda corresponde a un seco estepario, con fórmula climática BSoK (x') (e').

Donde:

Bs: Seco (árido y semiárido)

BSo: Es el clima más seco de los BS.

K: Templado con verano cálido, siendo la temperatura media anual entre 12 y 22 °C, y la temperatura media del mes más caluroso de 22 °C.

(x'): Régimen de lluvias intermedias entre verano e invierno.

(e'): Extremoso con oscilaciones entre 7 y 14 °C.

En general la temperatura y a precipitación pluvial media anual son de 18 °C y 365 mm respectivamente, los meses más lluviosos son principalmente entre Julio y septiembre, concentrándose la mayor parte en el mes de Julio. La evaporación promedio mensual es de 178 mm, presentándose las más altas en los meses de Mayo y Junio con 236 y 234 mm respectivamente.

### Descripción de las Películas Evaluadas o Tratamientos

Se evaluaron ocho prototipos de PE para cubierta de invernadero y se compararan con dos PE comerciales. Cada PE constituyó un tratamiento y cada tratamiento se evaluó en cuatro repeticiones.

**Cuadro 1.** Composición de las películas a evaluar.

---

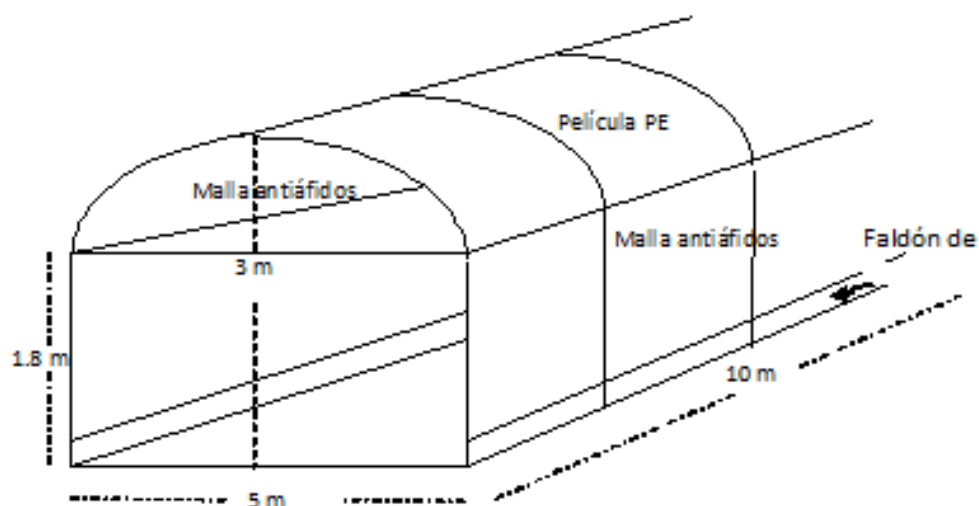
TRATAMIENTO	POLIETILENO
1	Ruby 2%
2	Ruby 4%
3	Cazo 2%
4	Cazo 4%
5	MTO 2%
6	MTO 4%
7	YMT 2%
8	YMT 4%
9	Control Alemán
10	Control Mexicano

---



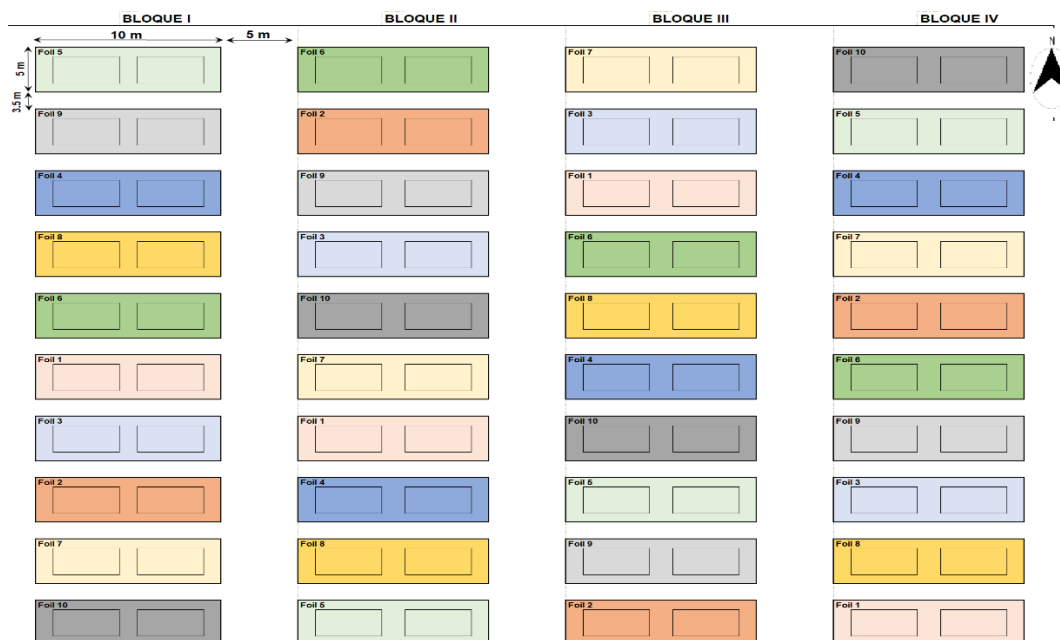
**Figura 5.** Películas plásticas a evaluar.

Cada repetición constó de un túnel de 50 m<sup>2</sup> (5 m de ancho por 10 m de largo) y 3.0 M de altura, de acuerdo al diseño propuesto de la figura 6.



**Figura 6.** Diseño del túnel

En campo se distribuyeron de acuerdo al siguiente croquis.



**Figura 7.** Croquis de los tratamientos.

## Descripción de Actividades para el Establecimiento del Estudio

### Diseño y Construcción de Túneles

Los túneles se diseñaron y construyeron durante el periodo de mayo a julio del 2019.

### Producción de Plántula

El material vegetal utilizado fue lechuga (*Lactuca sativa*) tipo romana Scala F1 de la casa semillera Nunhems seeds, la cual se produjo en charolas de poliestireno de 200 cavidades y como sustrato se utilizó turba. La siembra se realizó el día 15 de septiembre del 2019.

### Establecimiento del cultivo

El trasplante se realizó el 10 de octubre a los 25 días después de la siembra, en bolis de fibra de coco con una separación de 30 cm entre cada planta.

### Riego y fertilización

El riego y la fertilización se realizó mediante fertiirrigación con estaca y se utilizó la solución que se muestra en el Cuadro 2 al 50% de concentración, con drenaje de 25%.

Solución o cultivo	EC (ms.cm <sup>-1</sup> ) 1)	meq L <sup>-1</sup>							mgL <sup>-1</sup>					
		NH <sub>4</sub>	K	Ca	Mg	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
lechuga	2.6	1.25	11.0	9.0	2.0	19.0	2.2	2.0	2.20	.50	.26	.32	.05	.05

Adaptado de Cahahia, 1998; Burgueño, 1998; Fernández et al., 1999; Sonneveld, 1994; Urrestarasu, 2004.

**Cuadro 2.** Solución nutritiva utilizada

## **Variables Evaluadas**

### **Radiación Fotosintéticamente Activa ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{seg}^{-1}$ )**

La radiación fue medida con un piranómetro portátil Quantum (Apogee®, modelo SM-700). Este sensor tiene una celda de silicón en la parte superior y está calibrado para medir el espectro de la radiación PAR, las unidades de medición están dadas en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Los datos fueron tomados por una semana consecutiva a las 8:00, 14:00 y 18:00 horas de forma directa en el interior y exterior de cada túnel. Con estos datos se calculó el porcentaje de sombreado y la Luz Diaria Integrada LDI.

### **Temperatura y humedad relativa**

Para la medición de estos parámetros se utilizaron sensores tipo HOBO modelo U 23-001 de la marca Onset. Los datos fueron tomados por **una** semana consecutiva al igual que para la radiación, a las 8:00, 14:00 y 18:00 horas de forma directa en el interior y exterior de cada túnel.

### **Conductancia estomática**

Se midió la conductancia estomática, usando la técnica del Estado Estacionario con un Porómetro de Hoja Marca Leaf Porometer Decagon Modelo SC-1 Para ello se eligieron las hojas exteriores de la lechuga. Se midió a los 25 días después del trasplante

### **Contenido de clorofila**

A los 20 días después del trasplante se determinó el contenido de clorofila a, b y total en hojas por el método propuesto por Arnon (194) modificado por Munira *et al.* (2015), en el cual se pesó 1 g de cortes finos de la muestra (hoja), los cuales se homogeneizaron en mortero, se le agregó 5 ml de acetona al 90% y se re-homogeneizó, y se le adicionó 1 g de carbonato de magnesio, posteriormente se tomaron 2 mL del homogenato y se colocó en tubo eppendorf, se centrifugó por 5 minutos a 10,000 rpm a 4° C, se extrajo el sobrenadante, y se leyeron las absorbancias de clorofila “a” y “b” a 663 y 645 nm respectivamente, el contenido



de clorofila se expresa como  $\text{mg g}^{-1}$ , y se determinó usando las siguientes formulas:

$$\text{Clorofila a } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = 25.38\cdot A_{663} + 3.64\cdot A_{645}$$

$$\text{Clorofila b } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = 30.38\cdot A_{645} - 6.58\cdot A_{663}$$

$$\text{Clorofila total } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = 18.8\cdot A_{663} + 34.02\cdot A_{645}$$

### **Número, longitud y ancho de las hojas**

A los 20 días después del trasplante se muestrearon cuatro lechugas de cada tratamiento, dando un total de 40 lechugas que fueron muestreadas; de las cuales se midió el número total de hojas, y la longitud y ancho de la hoja seleccionada.

### **Peso fresco y seco**

El peso fresco se midió a los 20 días después del trasplante y se determinó en una báscula OHAUS modelo CS-5000 con capacidad de 5 kg. Para obtener el peso seco de planta (PSP) y de raíz (PSR), las muestras fueron colocadas en papel estraza y sometidas a  $65^{\circ}\text{C}$  durante 48 horas en una estufa de secado Yamato modelo DX-602, y posteriormente se pesaron en la báscula antes mencionada.

### **Rendimiento**

El rendimiento se midió a los 40 días después del trasplante, para ello se cortaron las 40 plantas de cada repetición y se eliminaron las hojas extendidas, posteriormente se pesaron en una báscula OHAUS modelo CS-5000 con capacidad de 5 kg. Con estos datos y la densidad recomendada en la literatura se realizó una extrapolación para sacar rendimiento por hectárea.

### **Análisis de Datos**

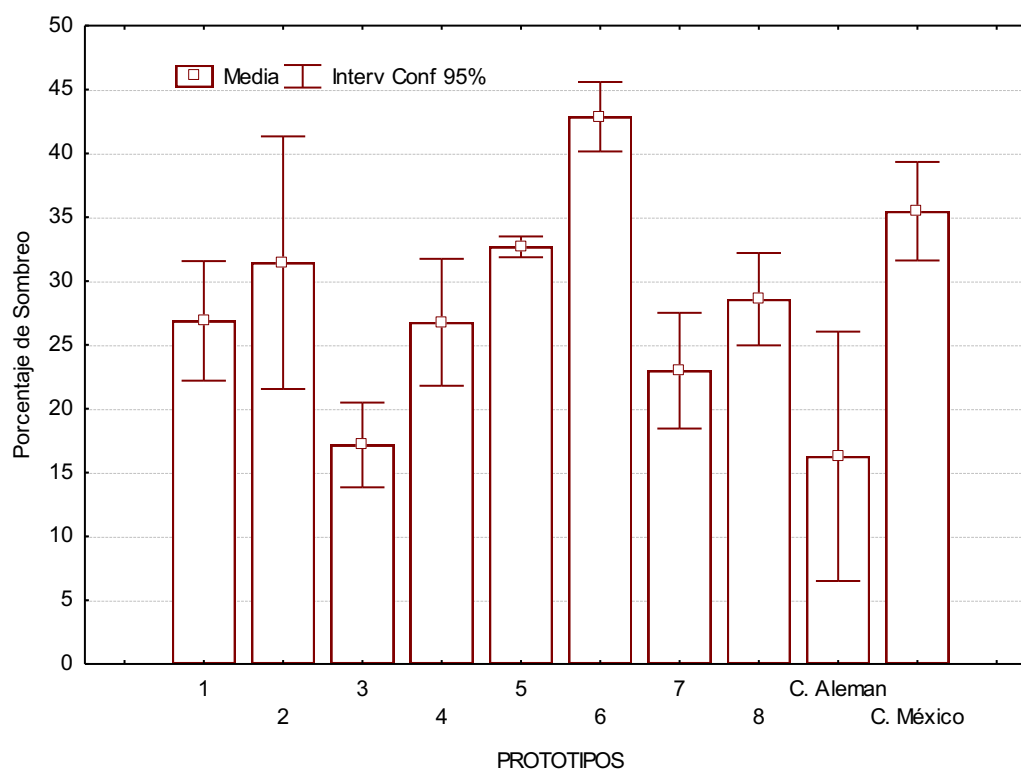
Los datos fueron analizados bajo el modelo de bloques al azar (Zar, 1999), con repeticiones diferentes de acuerdo con la variable de estudio, y prueba de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Se utilizó en paquete estadístico STATISTICA Versión 7.0. año 2003

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variables climáticas

#### Radiación ( $\mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{seg}^{-1}$ )

Los prototipos de PE para cubiertas de invernaderos que fueron evaluados tuvieron diferente transmitancia de la radiación fotosintéticamente activa al interior del invernadero, por lo tanto, el porcentaje de reducción de la radiación o sombreado también fue diferente y osciló en el rango de 12 a 42.87% (Figura 8, cuadro 2).



**Figura 8.** Porcentaje de sombreado de los prototipos evaluados

La radiación solar se puede considerar como el factor ambiental más importante en los cultivos bajo invernadero, pues influye en procesos relacionados con la fotosíntesis, los balances de agua y energía, el crecimiento, desarrollo y calidad de los cultivos (Díaz, 2012). Los cultivos para su óptimo desarrollo tienen diferente requerimiento de luz, medido como Luz Diaria Integrada (LDI), que

corresponde a la cantidad de luz en moles en un día en un metro cuadrado ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), entre 3 a 6 se considera bajo, de 6 a 12 medio, de 12 a 18 alto, y aquellos que requieren más de  $18 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  son considerados de muy alto requerimiento de luz (Torres & López, 2010). En el caso particular del cultivo de lechuga se desarrolla bien en un rango de 15 a 25 moles.  $\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  (Dorais, 2003), basado en esta información, todos los prototipos se encuentran dentro del rango recomendado. En regiones secas templadas en verano, que es el clima del área de estudio, la LDI es de 35 a 40 moles.  $\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  al aire libre (Torres, 2010). Por esta razón se utilizan plásticos con un porcentaje de sombreado de 25 a 30%. (Cemek et al., 2006), considerando este rango, los prototipos 1, 3, 7 y el testigo alemán, no cumplen con esta recomendación.

**Cuadro 3.** Reducción de la radiación por las cubiertas de PE o plásticos a las 14:00 horas del día 29 de octubre y Luz Integrada por Día (LDI) considerando los valores medios de las 8:00, 14:00 y 18:00 horas.

No	Prototipos de PE	Radiación promedio por día ( $\mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{seg}^{-1}$ )			LDI
		Exterior	Interior	% de Reducción	( $\text{mol} / \text{m}^2 / \text{día}^{-1}$ )
1	Prototipo 1	775.08±20.84	624.79±23.44 ab	19.36±3.13	23.16
2	Prototipo 2	813.08±21.28	601.66±18.43 ab	25.90±3.06	22.30
3	Prototipo 3	741.79±19.74	639.95±4.46 a	13.61±3.74	23.72
4	Prototipo 4	805.45±16.90	597.75±8.25 ab	25.70±3.41	22.16
5	Prototipo 5	776.95±2.70	561.41±9.21 ab	27.74±1.14	20.81
6	Prototipo 6	782.29±19.29	506.58±15.89 c	35.26±2.05	18.78
7	Prototipo 7	779.08±2.52	617.75±17.72 ab	20.70±2.48	22.90
8	Prototipo 8	774.87±8.49	573.12±12.49 ab	26.02±1.83	21.25
9	Testigo Aleman	751.70±21.44	656.04±16.41 a	12.74±3.08	24.32
10	Testigo México	768.50±19.67	527.25± 12.73b	31.18±4.55	19.55
	$F_c \geq F_\alpha$	1.06-0.042	20.676-0.007	3.30 - 0.005	
		NS	*	*	

Las literales a,b,c indican una diferencia estadística ( $P \leq 0.05$ ). LDI = Luz Diaria Integrada. PE, NS= No significativo

### Temperatura (° C )

Las cubiertas de PE no afectaron la temperatura, aun y cuando el porcentaje de reducción de la radiación o sombreado fue muy variable. La temperatura al igual que la radiación es otro factor de suma importancia en la producción de cultivos, dado que es el catalizador del metabolismo, y esta está estrechamente relacionada a la radiación (Salisbury y Ross, 1994). En un invernadero, la luz del sol, se compone de diferentes longitudes de onda, algunas de las cuales están en el espectro visible e infrarrojo, sólo la luz en el espectro visible puede penetrar

en el invernadero, mientras que la luz infrarroja entrante, que también se conoce como radiación de calor, está bloqueada por el vidrio o el plástico.

Dentro del invernadero, la luz visible es absorbida por las plantas y el suelo y se convierte en calor, que luego es emitido por las plantas y el suelo en forma de radiación infrarroja. Debido a que la cubierta bloquea esa radiación de calor, la mayor parte no puede escapar, y las temperaturas dentro del invernadero aumentarán constantemente (Díaz, 2012, Biernbaum, 2013). En este estudio, no se observó el “efecto invernadero”, debido al tamaño y diseño de los túneles, porque las paredes estaban cubiertas por malla antiafidos que les proporcionó una alta ventilación y desplazamiento del aire caliente.

La temperatura óptima para el crecimiento de la lechuga es de 23°C disminuyendo hasta 10°C por las noches (Cantwell, et al, 2016), aún y cuando en los túneles se registraron temperaturas de 28 a 30 °C, al no haber diferencia estadística, el posible efecto negativo fue el mismo en todos los tratamientos.

**Cuadro 4.** Efecto de las cubiertas sobre la temperatura y la humedad relativa.

No	PELÍCULA	Temperatura °C		Humedad Relativa %	
		Interior	Exterior	Interior	Exterior
1	Prototipo 1	30.38 ±0.62	30.27 ±0.49	40.33±1-16	39.75±0.96
2	Prototipo 2	30.14 ±0.54	30.24 ±0.54	40.37±0.69	40.25±0.67
3	Prototipo 3	30.48 ±0.96	30.41 ±1.11	40.12±1.74	39.79±1.40
4	Prototipo 4	30.25 ±1.36	30.40 ±1.20	40.58±3.42	39.45±3.91
5	Prototipo 5	29.87 ±0.16	30.04 ±0.05	40.79±0.15	40.37±0.47
6	Prototipo 6	30.02 ±0.19	30.12 ±0.05	40.58±0.79	40.58±0.91
7	Prototipo 7	30.21 ±0.91	30.27 ±0.96	40.79±1.39	39.62±1.02
8	Prototipo 8	29.93 ±1.73	30.02 ±1.68	41.91±3.85	41.41±3.77
9	Testigo Alemania	30.58 ±1.36	30.59 ±1.25	39.83±2.50	39.91±1.92
10	Testigo México	28.89 ±2.39	29.15 ±2.13	44.16±5.2	42.66±4.33
	Fc≥Fα	0.60-0.78	0.47-0.88	1.09-1.39	0.82-0.65
		NS	NS	NS	NS

NS= No significativo

### Humedad Relativa (HR)

Al igual que la temperatura, la humedad relativa no se vio afectada. El estudio de Buckley (2017) menciona que la humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener, y está relacionada directamente con la temperatura, es decir el aire caliente puede retener mayor cantidad de agua. La humedad relativa es importante porque regula el estado hídrico de la planta, al afectar la apertura y cierre de estomas y por lo tanto la transpiración y absorción de CO<sub>2</sub>.

La humedad relativa adecuada para el óptimo desarrollo de la lechuga es 60 a 80% (Buckley, 2017), en este estudio estuvo por debajo del óptimo, sin embargo,

al igual que la temperatura fue igual en todos los túneles por lo cual el efecto positivo o negativo fue igual para todos los tratamientos.

## **Variables de crecimiento**

### **Conductancia estomática ( $\text{mmol} / \text{m}^2 / \text{seg}$ ) y Clorofila A, B y total (mg.L)**

En este ensayo, la conductancia estomática fue diferente en los prototipos evaluados: Fue medida con un porómetro usando la técnica del estado estacionario, el cual mide la presión de vapor y el flujo de vapor sobre la superficie de la hoja, esta información por sí misma un indicador del estrés hídrico porque existe una estrecha relación entre el cierre estomático y la falta de agua en el suelo o sustrato, y esto a su vez está relacionado con el aumento de la temperatura y la disminución de la humedad relativa, que son modificadas a su vez por la radiación (Dow, 2014). Así mismo, la conductancia estomática es una función de la densidad, tamaño y grado de apertura de los estomas; al tener mayor cantidad de estomas abiertos se obtiene una mayor conductancia, la cual indica, subsecuentemente, que las tasas de fotosíntesis y transpiración son potencialmente más altas (Pask, et al., 2013).

La luz del sol determina la apertura de las estomas ya que, al incrementar la temperatura, se acelera la velocidad de transpiración. Cuando la humedad relativa es alta, la pérdida de agua es mucho más lenta por lo que la conductancia estomática es menor, y por último cuando la temperatura es alta, la presión osmótica de la planta baja mucho, y el ácido giberélico impide que la planta se deshidrate impidiendo el funcionamiento de la bomba de  $\text{H}^+$  y provocando el cierre de las estomas por lo que la conductancia estomática se reduce (Dow, 2014).

Por lo cual, al no haber variación en la temperatura, humedad relativa, las diferencias en la conductancia estomática pudieron deberse a la radiación dentro del invernadero.

Los prototipos de cubierta para invernadero, también afectaron el tipo y contenido de clorofila. sin observarse una correlación directa entre la luz diaria integrada y el contenido de clorofila excepto en el testigo alemán. Considerando que la fotosíntesis en las plantas depende de la captura de la energía de la luz en el pigmento clorofila, y en particular, la clorofila a.

Esta clorofila reside principalmente en los cloroplastos y da a las hojas su color verde. Los picos de absorción están a 430 nm y 662 nm, mientras que la clorofila b tiene una absorbancia máxima a los 453 nm y 642 nm (Gitelson, A., *et al.*, 2013). Por lo tanto, si la radiación al interior del túnel fue la única variante, pero al no haber una relación directamente proporcional con la LDI este efecto puede atribuirse al tipo de luz que permiten pasar los plásticos y a su vez esto está relacionado al diseño de las películas.

**Cuadro 5.** Efecto de las películas sobre las variables fisiológicas de la lechuga

No	PELÍCULA	Conductancia estomática (mmol/m <sup>2</sup> /seg)	Clorofila (mg.L)		
			A	B	Total
1	Prototipo 1	0.66 b	0.66 c	0.35 c	1.01 c
2	Prototipo 2	0.97 a	0.97 ab	0.60 bc	1.56 ab
3	Prototipo 3	0.80 ab	0.80 b	0.52 b	1.33 b
4	Prototipo 4	0.82 b	0.82 b	0.50 b	1.33 b
5	Prototipo 5	1.08 a	1.08 ab	0.99 a	2.07ab
6	Prototipo 6	0.91 b	0.91 abc	0.57 abc	1.48 abc
7	Prototipo 7	0.81 ab	0.81 b	0.65 ab	1.46 b
8	Prototipo 8	0.90 b	0.90 a	0.66 ab	1.57 a
9	Testigo Alemania	1.16 a	1.16 a	1.04 a	2.21 a
10	Testigo México	0.94 b	0.94 a	0.61 ab	1.56 a
	<b>Fc≥Fα</b>	13.09-0.001	7.37– 0.02	11.24-0.09	9.99-0.001

Literales diferentes en la misma columna a, b, c... indican diferencia estadística ( $P \leq 0.05$ )



### Número de Hojas, Ancho, Largo y Biomasa

Los prototipos afectaron de forma diferente el crecimiento de la lechuga, medido como número de hojas, ancho y largo de la hoja y el peso fresco y seco, evaluado a los 25 días después del trasplante y se observó mayor crecimiento de la lechuga del tratamiento de México (Tabla 6). La lechuga es un cultivo de hoja y por lo tanto su productividad está directamente asociada al desarrollo de las hojas o acumulación de biomasa, entonces para lograr un buen rendimiento, es necesario lograr un rápido crecimiento inicial de las plantas jóvenes, incrementando substancialmente la superficie foliar, debido a que entre más hojas y de mayor tamaño se traducirán en mayor recepción de luz y de fotosíntesis, lo cual se traducirá en un mayor rendimiento (Challa et al., 2015).

**Cuadro 6.** Efecto de las películas sobre las variables de crecimiento de la lechuga

No	PELÍCULA	Hoja			Biomasa	
		No	Ancho (cm)	Largo (cm)	Fresco (g)	Seco (g)
1	Prototipo 1	11.25 ab	17.70 bc	12.95 b	56.25 b	5.20 ab
2	Prototipo 2	9.750 b	15.80 c	12.57 c	89.00 a	6.22 ab
3	Prototipo 3	11.00 ab	17.35 bc	12.20 ab	58.75 b	4.37 b
4	Prototipo 4	11.25 ab	17.02 bc	12.87 ab	57.75 b	4.35 b
5	Prototipo 5	9.000 b	15.35 c	11.65 bc	63.75 ab	5.25 ab
6	Prototipo 6	9.750 b	15.75 bcd	10.90 bc	57.25 b	4.17 b
7	Prototipo 7	10.00 b	15.22 abc	12.05 b	65.50 ab	5.25 b
8	Prototipo 8	10.50 b	16.70 ab	13.72 ab	60.25 b	4.75 b
9	Test Alem	9.500 b	14.60 d	10.47 c	71.50 a	5.25 b
10	Test Méx	12.75 a	18.67 a	14.60 a	89.75 a	6.30 a
	Fc≥Fα	3.08-.009	13.07-0.00	11.49-0.00	3.91-0.02	3.91-0.02

Literales diferentes en la misma columna a, b, c... indican diferencia estadística ( $P \leq 0.05$ )

**Rendimiento (gramos por pieza)**

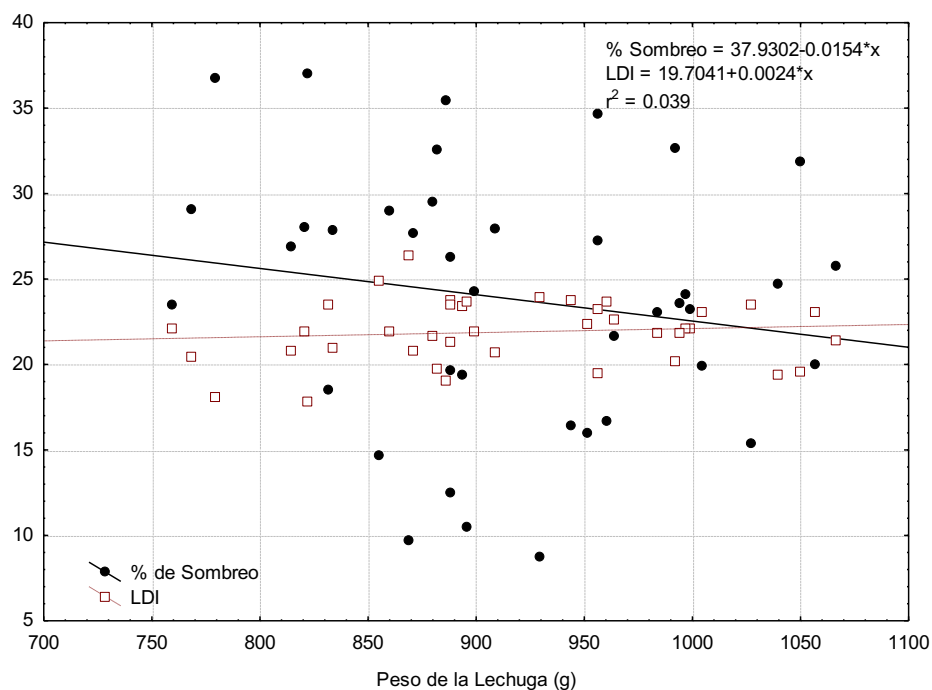
Finalmente, los prototipos tuvieron un efecto diferente sobre la productividad del cultivo de la lechuga, pero no superaron a los controles o testigos (Cuadro 7). En lechuga los componentes del rendimiento son; la cantidad de plantas por unidad de superficie, el tamaño y peso de la pieza o unidad (Abubakari *et al.*, 2011), las lechugas con mayor peso se obtuvieron en los Prototipos 1, 7 y control mexicano y las lechugas con menos desarrollo en los Prototipos 5 y 6. La densidad de plantación recomendada para lechuga en sustrato hidropónico, es de 10 a 12 plantas por m<sup>2</sup>, (Khazaei *et al.*, 2013) por lo tanto el rendimiento estimado para lechuga romana se muestra en la tabla 7. Entonces para lograr un buen rendimiento, es importante lograr un rápido crecimiento inicial de las plantas jóvenes, debido a que entre más hojas y de mayor tamaño se traducirán en una mayor recepción de luz y de fotosíntesis, lo cual se traducirá en un mayor rendimiento (Challa *et al.*, 2015). En la práctica para esta región se recomienda utilizar plástico con el 30% de sombreo y película de color blanco, que son las características del PE que se utilizó como control mexicano.

**Cuadro 7.** Efecto de las películas sobre el rendimiento de la lechuga.

No	PELÍCULA	Peso por pieza (g)	Rendimiento (kg/m <sup>2</sup> ) (11 lechugas/m <sup>2</sup> )
1	Prototipo 1	0.947 a	10.41
2	Prototipo 2	0.898 ab	9.878
3	Prototipo 3	0.930 ab	10.23
4	Prototipo 4	0.910 ab	10.01
5	Prototipo 5	0.858 b	9.438
6	Prototipo 6	0.859 b	9.449
7	Prototipo 7	0.948 a	10.428
8	Prototipo 8	0.927 ab	10.197
9	Testigo Alemania	0.892 ab	9.812
10	Testigo México	0.946 a	10.406
	Fc≥Fα	2.48-0.029	

Literales diferentes en la misma columna a, b, c... indican diferencia estadística ( $P \leq 0.05$ ).

### Correlación del peso de lechuga con el porcentaje de sombreo y la LDI



**Figura 9.** Correlación simple del peso de la lechuga respecto al % de sombreo y la Luz Diaria integrada.

Al realizar una correlación simple de Spearman ( $P \leq 0.05$ ), se observa que al aumentar el porcentaje de sombreo el peso de la lechuga se reduce (-0.21), mientras que al aumentar la LDI aumenta (0.10).

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, mostraron que los prototipos tienen diferente porcentaje de reducción de la radiación fotosintéticamente activa o sombreo ya que los valores oscilaron entre un 12% y un 35% de reducción. Este efecto modificó el crecimiento y productividad de la lechuga. Mientras que la temperatura y humedad relativa no fueron afectadas.

Así mismo, se obtuvieron lechugas con mayor peso en dos de los prototipos evaluados y en el control mexicano, sin embargo, el control mexicano fue el que obtuvo valores óptimos en las diferentes evaluaciones como ancho y largo de la hoja, número de hojas, cantidad de biomasa, etc.

## REFERENCIAS

- Abubakari, A. H., G. Nyarko, and M. Sheila. (2011). Preliminary studies on growth and fresh weight of lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by clay pot irrigation and spacing. *Pakistan J. Biol. Sci.* 14: 747-751.
- Apogee (2018). Apogee Instruments. Quantum Meter, Owners manual. In: [https://www.apogeeinstruments.com/content/BQM\\_webmanual.pdf](https://www.apogeeinstruments.com/content/BQM_webmanual.pdf). Consultado 20 de abril del 2020.
- Biernbaum, J. (2013). Hoophouse, Environment Management: Light, Temperature, Ventilation. MSU Horticulture. Disponible en: <https://www.canr.msu.edu/hrt/uploads/535/78622/HT-LightTempManagement-2013-10pgs.pdf>
- Buckley, T., Scoffoni, C., Sack, L., (2017). The sites of evaporation within leaves. *Plant Physiol* 173: 1763–1782
- Challa, H., Heuvelink, E., Van Meeteren, U. (2015). Crop growth and development. Long-term responses. Crop growth. In: Bakker, J.C.; Bot, G.P.A.; Challa, H.; Van de Braak, N.J. Greenhouse climate control: an integrated approach. Wageningen: Wageningen Pers.
- Castilla, P., (2017). Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. (Ed.) Mundi-Prensa, 2a ed.
- Cantwell, M., Suslow, T. (2017) Lettuce: Cispthead or Iceberg. Department of Plant Sciences, University of California, Davis.
- 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.
- Decagon Device (2011) Disponible en: <http://www.decagon.com/> (acceso: 11 Agosto 2011).
- Diario Oficial de la Federación (2013) NMX-E-114-CNCP-2013. Industria del plástico-película formulada con polietileno de baja densidad tratada para usarse como cubierta de invernaderos y túneles-especificaciones y métodos de ensayo
- Díaz, V. S. G., (2012). Efecto de la Radiación en el Desarrollo Fenológico, Rendimiento y Calidad en Policultivo: Chile, Jitomate, Maíz, Frijol y Amaranto en condiciones de Invernadero. Universidad de Querétaro. Tesis MC. Querétaro, México. 52 p.

- Dorais, M. (2003). The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. Canadial Greenhouse Conference.
- Dow, G.J. et al. (2014) An integrated model of stomatal development and leaf physiology. *New Phytol.* 201, 1218–1226
- Espí, E., Salmeron, A., Garcia, Y. y Catalina. F. (2012). Pigmentos de inferencia como modificadores del espectro de transmisión de filmes agrícolas. *Revista de plásticos modernos*. Vol. 83: 50-56.
- Gitelson, A.A., Gritz, Y., Merzlyak, M.N., (2013). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiol.* 160, 271–282. doi:10.1078/0176-1617-00887
- He, X., Wang, J., Guo, Shirong., Zhang, J., Wei, B., Sun, J., Shu, Sheng., (2017) Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. College of Horticulture, China.
- Iglesias, N., Muños, A., (2017). Comparacion de la transmission de la radiacion fotosinteticamente activa en invernaderos del norte de la Patagonia. *Horticultura Argentina*. Rio negro Argentina 26(60): 10-16.
- Khazaei, I., R. Salehi, A. Kashi, and S. M. Mirjalili. 2013. Improvement of lettuce growth and yield with spacing, mulching and organic fertilizer. *Int. J. Agric. Crop Sci.* 6: 1137-1143.
- Lambers, H., Pons, T. L., & Chapin, S. (2008). *Plant physiological ecology* 2nd edition. New York: Springer Verlag.
- López, H.J., (2013). Evolución de las estructuras y cubiertas para invernadero en el sureste español. *Técnicas de Producción en cultivos protegidos*. Tomo dos. Caja rural intermediterranea, Cajamar. Madrid España: 5541-544.
- Munira, S.; Hossain, M.M.; Zakaria, M.; Ahmed, J.U & Islam, M.M (2015). Evaluation of potato varieties against salinity stress in Bangladesh. *International Journal of Plant & Soil Science*, 6(2): 73-81
- Pask, A.J.D., Pietragalla, J., Mullan, D.M., Chávez-Dulanto P.N. y Reynolds, M.P. (2013) *Fitomejoramiento Fisiológico II: Una Guía de Campo para la Caracterización Fenotípica de Trigo*. México, D.F.: CIMMYT.
- Salisbury, B., (1994). *Fisiología Vegetal*. Respuestas del crecimiento a la temperatura. 4da. Edición. Grupo editorial Iberoamérica. SA de CV. Pp 539-561.

SAGARPA (2018). Anuario estadístico de la producción agrícola. Disponible en <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA (2017). Agricultura protegida: el valor de la producción bajo esta técnica creció 47.9% en 2016. Disponible en <https://www.gob.mx/siap/articulos/agricultura-protegida-el-valor-de-la-produccion-bajo-esta-tecnica-crecio-47-9-en-2016?idiom=es>

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.

Zar, J., (1999). Biostatistical analysis. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.