



INFLUENCIA DEL GROSOR DE LA CUBIERTA PLÁSTICA EN LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA DE UN MODELO DE INVERNADERO

Salvador Rubio García, María Fernanda Rodríguez Rodríguez, Tania Paola Arredondo Cervantes,
Diego Ismael Ortega Hortelano, Mario Alberto Rodríguez Angeles *, Edilberto Murrieta Luna

Departamento de Ingeniería en Plásticos, Universidad Politécnica de Juventino Rosas, calle
Hidalgo 102, Comunidad de Valencia, Santa Cruz de Juventino Rosas, Gto., C.P. 38253, México.

mrodriguez_ptc@upjr.edu.mx

Resumen

La función de un invernadero es generar un microclima con condiciones óptimas para la producción de cultivos. La captación de energía solar en el invernadero debe ser suficiente para que las plantas crezcan. La cubierta del invernadero es fundamental, ya que permite la entrada de luz solar y a la vez aísla al invernadero, impidiendo que el calor escape por convección/conducción. El objetivo de este trabajo es comparar la energía solar captada por un modelo de invernadero con cubiertas fabricadas de hule cristal de diferente grosor. Se elaboró un pequeño invernadero de $0.80 \times 0.80 \times 1.20$ m, donde se realizaron pruebas con cubiertas de plástico de 0.3, 0.5 y 0.8 mm de grosor. El modelo fue colocado en un terreno arcilloso dentro de las instalaciones de la UPJR en horarios entre las 11 y la 1 pm. Al modelo se le trazó una malla de 16 nodos para la medición de temperatura. Las mediciones se realizaron cada 15 min por un lapso de 60 min. Los resultados muestran que el grosor de la cubierta del invernadero altera la cantidad de energía captada, además de la velocidad de calentamiento y el comportamiento térmico del microclima en general.

Palabras clave: Invernadero; cubierta plástica; análisis térmico.



INFLUENCE OF THE THICKNESS OF THE PLASTIC COVER ON THE ENERGY CAPTURE OF A GREENHOUSE MODEL

Abstract

The function of a greenhouse is to generate a microclimate with optimal conditions for crop production. The collection of solar energy in the greenhouse must be sufficient for plants growth. The greenhouse cover is essential, since it allows sunlight to enter and at the same time insulates the greenhouse, preventing heat from escaping through convection/conduction effect. The objective of this work is to compare the solar energy captured by a greenhouse model with covers made of crystal plastic of different thickness. A small greenhouse of $0.80 \times 0.80 \times 1.20$ m was created, where tests were carried out with plastic covers of 0.3, 0.5 and 0.8 mm thickness. The model was placed on clay soil within the UPJR facilities between 11 and 1 pm. A 16-node mesh was drawn for the model to measure temperature. Measurements were carried out every 15 min for a period of 60 min. The results show that the thickness of the greenhouse cover alters the amount of energy captured, in addition to the heating rate and the thermal behavior of the microclimate in general.

Keywords: Greenhouse; plastic cover; thermal analysis.



1. Introducción

Actualmente, satisfacer la demanda alimentaria de la población se ha vuelto un reto cada vez más grande. Primero, aunque la explosión demográfica ha reducido su ritmo, ya se ha superado el límite de los 8 mil millones de habitantes en el mundo, lo cual conlleva una necesidad de producir una mayor cantidad de alimentos con la menor cantidad de recursos necesaria. Segundo, el calentamiento global ha provocado cambios drásticos en el clima del planeta, lo cual se traduce en algunos puntos a grandes pérdidas de cosechas principalmente por las heladas. Debido a estos factores, es necesario proteger las cosechas, para lo cual, una buena cantidad de productores han optado por el uso de invernaderos. Estos constan de extensas estructuras que soportan una cubierta de vidrio o plástico, y tienen como función aislar las plantas cultivadas del ambiente externo, generando un microclima confortable que evita las pérdidas por heladas y reduce el estrés de las plantas aumentando así la producción.

La variable más importante en un invernadero es la temperatura y, para estabilizarla, se deben controlar los flujos

de energía que entran y salen del invernadero, lo cual, por supuesto, no es una tarea fácil, ya que la transferencia de calor dependerá de un gran número de parámetros presentes (Choab y col., 2019).

Para suministrar el calor necesario al invernadero, varios autores han propuesto el uso de diferentes fuentes de calor, por ejemplo, el uso de combustión de biomasa (Rodríguez e Iriarte, 2002), colectores solares (Pérez-Ortega y col., 2019, Viegas y col., 2020) e incluso energía geotérmica (Adaro y col., 2000). Estas opciones pueden funcionar en zonas de clima muy frío, sin embargo, requieren un costo extra de inversión y mantenimiento, en cualquier caso, la energía solar directa combinada con un buen aislamiento térmico y ventilación adecuada sigue siendo la mejor opción.

Los invernaderos más avanzados cuentan con sistemas automatizados que permiten mejorar las condiciones del invernadero mediante el control de las variables principales que afectan el clima como la temperatura y la humedad (Martínez y Roca, 2011). Para lograr esto, muchos investigadores han trabajado por años en el desarrollo de modelos matemáticos para



predicción del clima en el invernadero (Katzin y col. 2022), generando desde modelos sencillos que incluyen únicamente parámetros térmicos (Abdel-Ghany y Al-Helal, 2011) hasta complejos modelos que incluyen singularidades de la zona geográfica en donde se encuentra el invernadero (Rasheed y col., 2018, Ahamed y col., 2018-1, Ahamed y col., 2018-2). Con la combinación de estos modelos y tecnología electrónica, se ha elaborado sistemas de control que han logrado demostrar un incremento en la cosecha de vegetales (Nadal y col., 2016) y que incluso pueden ser controlados de forma remota (Ullah y col., 2022). Desafortunadamente, muchas de estas tecnologías aun no son accesibles para la mayoría de los productores debido a los altos costos, y es por eso que muchos de los invernaderos utilizados siguen siendo operados manualmente.

Para los invernaderos manuales, las condiciones climáticas son controladas por las características de la cubierta del invernadero. El material y el grosor de la cubierta cumplen un papel crítico en el acondicionamiento de los invernaderos (Maraveas, 2019) ya que influyen en la cantidad y tipo de la radiación que llega a

las plantas. Es posible elaborar las cubiertas con un material selectivo que reduzca la cantidad de rayos UV, mientras que la cantidad de radiación se controla por la transmitancia del material que puede ser modificada por el tipo de material o por el grosor de la película (Papadakis y col., 2000). Por otro lado, la cantidad de calor que sale del sistema se puede controlar por entrada de aire fresco o por convección/conducción a través de la cubierta. Por ejemplo, si la temperatura en el interior del invernadero es excesivamente alta, se pueden crear ductos de ventilación simplemente quitando algún panel de la cubierta que permita la entrada de aire (He y col., 2018); mientras que, si se desea que el flujo de calor al exterior se reduzca, se puede utilizar una cubierta gruesa.

Algunos estudios sobre el efecto que tienen las cubiertas de los invernaderos sobre producción de vegetales como el pepino (Alsadon y col., 2016), lechuga (Legarrea y col., 2014) y tomate (Papaioannou y col., 2019), han demostrado que la selección del tipo de material de la cubierta tiene influencia directa sobre el crecimiento de los cultivos,



sin embargo, poco se habla sobre del grosor que deben tener estas cubiertas.

El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio del aprovechamiento térmico en un modelo de invernadero, considerando diferentes cubiertas elaboradas con el mismo material, pero de diferente grosor. Las mediciones para el incremento de la temperatura se realizaron en diferentes días, pero considerando que las condiciones climatológicas fueran muy parecidas. El aprovechamiento térmico fue calculado con base en la energía incidente disponible y la acumulación de energía térmica.

2. Metodología

Un invernadero capta la energía proveniente de la radiación solar y la convierte en energía térmica que utiliza para generar un microclima en su interior. El suelo juega un papel muy importante en este proceso puesto que la radiación solar atraviesa las paredes y los techos translúcidos casi sin disminución y es en el suelo en donde se absorbe, calentando la superficie de este. El aumento en la temperatura del piso provoca

posteriormente la transferencia de calor al aire atrapado dentro del invernadero por convección.

El terreno en donde se encuentra la Universidad Politécnica de Juventino Rosas cuenta con un suelo muy parecido al que se tiene en los invernaderos, ya que anteriormente esos terrenos se utilizaban como tierras de cultivo. Debido a esto, la zona de suelo arcilloso dentro de la universidad es un lugar adecuado para llevar a cabo la experimentación con el invernadero.

2.1. Modelo de invernadero

Un invernadero puede tener diferentes formas geométricas sobre todo en la parte del techo, las cuales ayudan a reducir la fricción con el viento exterior y facilitan la entrada y salida de aire al interior del invernadero para refrescarlo (Choab y col., 2019). En este caso de estudio, el interés principal es poder medir la energía que entra y se acumula, por lo cual se utilizó una geometría más simple que los invernaderos comunes. De esta manera, se construyó una estructura en forma de prisma con base cuadrada de 0.8 m de lado



y una altura de 1.2 m, la armazón se construyó de PVC de 0.0125 m de diámetro nominal.

Los invernaderos deben ir recubiertos por materiales flexibles o rígidos que permitan libremente el paso de la luz solar para que esta pueda ser aprovechada de la mejor manera por los cultivos (Echazu y Quiroga, 2016). El material más utilizado debido a su bajo costo es el polietileno (PE), aunque también se puede utilizar etil vinil acetato (EVA), policloruro de vinilo (PVC) o policarbonato (PC) (Bialar, 2020). En este caso se optó por utilizar para la experimentación “hule cristal”, el cual es una película delgada y flexible de PVC, este material, además de tener un bajo costo, es fácil de conseguir en diferentes grosores. Aunque este material no es utilizado para cubiertas de invernaderos debido a su peso, el interés de este trabajo es calcular la variación de aprovechamiento energético contra el cambio en el grosor de la película, y no el valor global de este aprovechamiento, el cual pudiera verse afectado al utilizar otro tipo de polímero en la cubierta. Se utilizaron entonces películas de hule cristal de 0.8, 0.5 y 0.3 mm de grosor, con las cuales se elaboraron cubiertas para el

invernadero. El modelo fabricado se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Modelo de invernadero utilizado.

2.2. Medición de temperaturas

El invernadero fue colocado en una zona arcillosa dentro de las instalaciones de la UPJR, lejos de cualquier árbol u objeto que pudiera interferir con la captación de la energía solar. Se realizaron pequeñas perforaciones en las paredes del invernadero por donde se introdujo un termopar para realizar las medidas de la temperatura interna. Las perforaciones eran lo suficientemente pequeñas para no interferir con el experimento (menores a 2 mm de diámetro) y además fueron cubiertas durante el experimento y solo descubiertas al momento de realizar la medición. Se establecieron 12 puntos de medición de temperatura, 3 en cada pared,



horizontalmente centrados y con una separación vertical de 0.3 m, Como se muestra en la Figura 2.

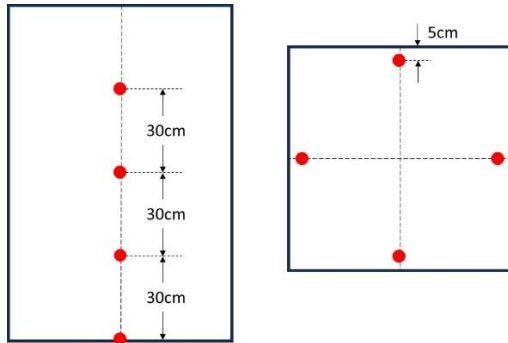


Figura 2. Distribución de nodos de medición de temperaturas, vista frontal (izquierda) y superior (derecha)

Las mediciones de temperatura se realizaron introduciendo el termopar una profundidad de 0.05 m a partir de la pared. También se establecieron 4 nodos de medición de temperaturas para el suelo, uno en cada pared, a 0.05 m de retirado de ella y penetrando el termopar a una profundidad de 0.01 m en el suelo.

Para la colocación del invernadero se seleccionaron días soleados con condiciones similares cada vez. Antes de comenzar la experimentación, se midió la temperatura y humedad del ambiente con un termómetro digital modelo TER-150 y la velocidad del aire con un anemómetro modelo HER-440, ambos de la marca

Steren. Estos parámetros se vigilaron también durante cada experimento para asegurarse que no hubiera cambios extremos en las condiciones ambientales, en caso de que esto ocurriera, todas las mediciones realizadas ese día eran descartadas. En todos los experimentos realizados se colocó el modelo siempre en la misma posición, marcando la cara frontal exactamente de frente al sol y se comenzó a tomar las temperaturas en los puntos de medición marcados cada 15 min por un lapso de 60 min. Todas las tomas de temperatura se llevaron a cabo entre las 11am y 1 pm ya que es un horario cerca del cenit y se obtiene una mayor cantidad de radiación. Además, el ángulo de inclinación de los rayos solares cambia poco entre estas horas, este fue medido y considerado en los cálculos finales.

2.3. Cálculo del aprovechamiento térmico

Aunque se realizaron pruebas con el invernadero por más de un mes, algunas fueron eliminadas por errores de medición o bien por cambios de clima extremos e imprevistos, las pruebas restantes se agruparon y se realizó un promedio de los valores obtenidos de cada experimento.



Con las temperaturas promedio registradas se realizó el cálculo del calor absorbido por el aire y el suelo, utilizando la Ecuación 1:

$$Q = mCp\Delta T \quad (1)$$

Donde Q es el calor absorbido, m la masa calculada dentro del espacio del invernadero, Cp el calor específico del material y ΔT la diferencia de temperatura desde el inicio hasta el final del experimento.

Adicionalmente, se calculó la energía disponible debido a la radiación incidente sobre la superficie del invernadero utilizando la Ecuación 2:

$$E = RA t \sin \theta \quad (2)$$

Donde E es la energía que cae sobre el invernadero, R es la radiación solar promedio incidente sobre el invernadero, A es el área del invernadero expuesta a esta radiación, t es el tiempo de exposición y θ es el ángulo entre el rayo incidente y la normal del área expuesta. La radiación promedio para cada día y hora de medición fue obtenida de Weather Spark, la cual es una página que ofrece una amplia base de datos climatológicos confiables.

A partir de los valores obtenidos para la energía incidente y absorbida por el invernadero, se calculó el porcentaje de aprovechamiento energético para cada caso.

3. Resultados

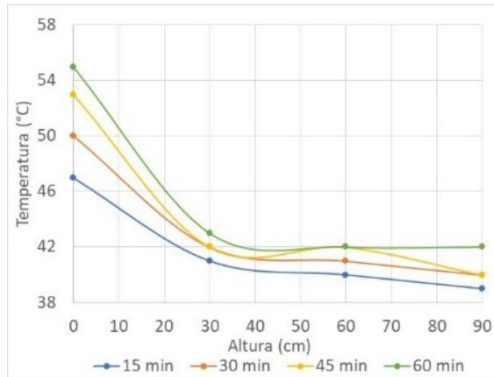
3.1. Análisis del proceso de captación de energía.

En la Figura 3 se muestran los resultados de las mediciones de temperatura sobre la cara frontal del invernadero. El punto marcado en 0 m corresponde a la medición en el suelo, los demás puntos son las mediciones sobre el ambiente a diferentes alturas.

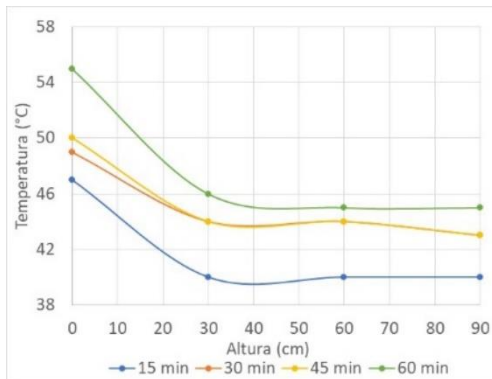
Como se puede observar, el suelo siempre es el punto más caliente debido a la absorción de la radiación. En este punto, el aire comienza a calentarse y asciende, por lo que es de esperarse que la temperatura del aire más alta sea la más cercana al piso. Por otro lado, la diferencia de temperaturas entre el suelo y la primera marca del aire es de entre 6 y 7 °C para todos los experimentos realizados, mientras que la diferencia de temperaturas entre la marca



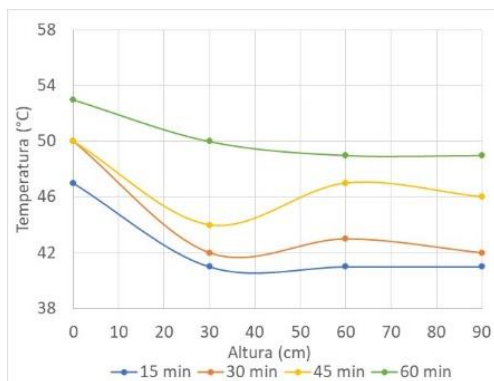
de 0.3 m y las superiores es en promedio de solo 1°C.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. Temperaturas promedio en la cara frontal del invernadero con cubierta de a) 0.8, b) 0.5 y c) 0.3 mm de grosor

Estos resultados indican que existe un buen mezclado del aire provocado por la convección.

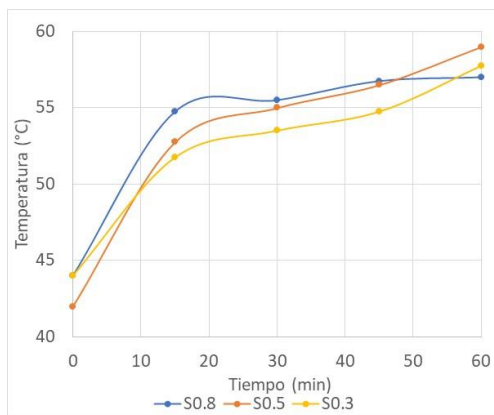
De esta manera, se puede deducir que el mayor cambio de temperatura entre el suelo y el aire ocurre dentro de espacio relativamente pequeño, por lo que resulta una buena aproximación el considerar la temperatura promedio dentro del invernadero para el cálculo de la energía absorbida por el aire.

Comparando las tres gráficas de la Figura 3, se puede observar que las líneas correspondientes a los 15 min son muy parecidas tanto en comportamiento como en valores, sin embargo, estos valores difieren notablemente con el avance temporal. Para la Figura 3a, la temperatura del suelo se incrementó 8°C, mientras que la temperatura promedio del aire solo se incrementó 2°C. En contraste, para la Figura 3c, la temperatura del suelo se incrementó 6°C, mientras que la temperatura promedio del aire se incrementó 8°C. Estos comportamientos son típicos para todos los experimentos realizados, es decir, que difieren en los valores numéricos, pero la tendencia de las gráficas permanece igual, lo que indica

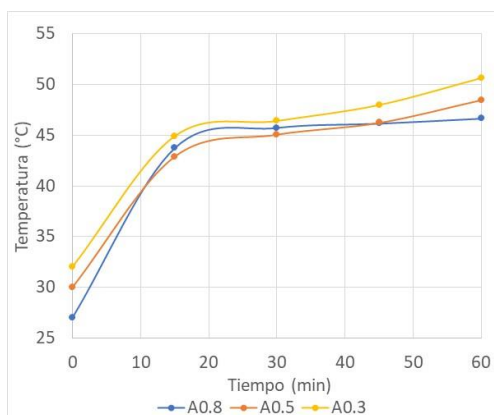


que el grosor de la cubierta del invernadero está afectando el proceso de calentamiento.

En la Figura 4 se presentan los gráficos correspondientes al promedio de la temperatura del suelo y el aire dentro del invernadero con respecto del tiempo. Se puede observar que los comportamientos promedio siguen el mismo comportamiento general, pero con ciertas diferencias características.



(a)



(b)

Figura 4. Registro de temperaturas promedio en a) el suelo y b) el aire del invernadero

El calentamiento del invernadero se da por acumulación de la energía, la cual es función de la diferencia entre la energía que entra por radiación y la energía que sale por convección/conducción a través de las paredes plásticas y conducción a través del piso. La combinación de estos efectos ocasiona que el calentamiento del invernadero se divida en 2 fases: una acelerada y otra de estabilización, tal como se aprecia en la Figura 4. Durante la primera fase, la radiación solar es captada por el suelo y transmitida al aire, debido a que no existe intercambio de aire fresco, se produce un rápido aumento en la temperatura de ambas zonas, esto ocurre durante los primeros 20 minutos después de haber colocado el invernadero. A medida que la temperatura sube en el interior del invernadero, también se incrementa la diferencia entre esta y la temperatura del exterior, por lo cual el flujo de calor del invernadero hacia el ambiente también aumenta; esto produce una disminución de la rapidez del calentamiento del invernadero después de los primeros 20 minutos.

El grosor de la cubierta del invernadero puede tener 2 efectos en el proceso de calentamiento, por un lado, puede producir



una mayor resistencia al flujo de calor que sale del invernadero, mejorando con esto el aislamiento, pero, por otro lado, al aumentar el grosor puede disminuir la transmitancia de la cubierta, generando un menor flujo de la energía solar que entra al invernadero. Estos efectos son los que producen el cambio en las pendientes de las gráficas mostradas.

En la Figura 4, se observa que la cubierta de mayor grosor presenta una pendiente ligeramente mayor a las otras 2 durante la primera fase, lo que significa una mayor velocidad de calentamiento; sin embargo, durante la segunda fase, esta cubierta mantiene su temperatura promedio constante, mientras que en las otras dos continúa incrementando. Este comportamiento puede deberse a que durante la fase acelerada, el grosor de la película presenta una resistencia considerable al flujo de calor que intenta salir del invernadero, sin embargo, con el incremento de la temperatura, la resistencia finalmente es superada y el flujo de calor se incrementa. Durante la fase de estabilización, el grosor ahora juega un papel en contra del flujo de calor entrante, pues este es una función inversa de la temperatura del suelo del invernadero,

de esta manera, la menor transmitancia del material más grueso toma una importancia relevante en la recepción del calor. El incremento del flujo de energía a la salida y reducción del flujo de entrada origina los cambios de pendientes en las gráficas mostradas.

3.2. Cálculo del aprovechamiento térmico

Para el cálculo de la energía captada por el invernadero se tomaron en cuenta 5 experimentos para cada cubierta. Se calculó el volumen del suelo y del aire que se tiene dentro del invernadero. El volumen de aire es igual al volumen del invernadero. Para calcular el volumen de suelo se requiere conocer la profundidad a la que el calor penetra. Se realizaron varios experimentos consistentes en medir la temperatura del suelo a varias profundidades durante el calentamiento del invernadero. Los resultados mostraron que después de 0.04 m, no se percibía aumento de temperatura del suelo. Debido a esto se concluyó que la energía solo es aprovechada por esta pequeña parte, por lo que el volumen del suelo fue tomado como un prisma de $0.80 \times 0.80 \times 0.04$ m. Para calcular la masa de cada componente, se



requirió la densidad del material a la temperatura promedio de operación en cada caso, y finalmente para determinar el valor del calor, según la Ecuación 1 mostrada en la Sección 2.3. Los calores específicos y las densidades requeridas fueron obtenidas de Cengel y Ghajar (2011). En la Tabla 1 se muestran los valores de estos parámetros.

Tabla 1. Valores en los parámetros utilizados para el cálculo de la ecuación 1.

Material	ρ kg/m ³	V m ³	m kg	Cp J/kgK
Aire	1.127	0.768	0.866	1007
Suelo	1500	0.026	38.4	1900

El cálculo de la energía captada por el invernadero se dividió en dos partes, la primera para el periodo de calentamiento acelerado, considerando los primeros 15 minutos de los experimentos, y la segunda para el resto del tiempo. La Tabla 2 muestra los resultados para cada tipo de cubierta.

Para el cálculo de la energía radiante incidente sobre el invernadero, se consideró que las únicas caras del invernadero expuestas directamente a los rayos solares fueron la frontal y la superior.

Tabla 2. Captación de calor en el invernadero

Grosor (mm)	Calor captado (kW)		
	Minuto 0-15	Minuto 15-60	Total
0.8	726.50	129.50	856.00
0.5	730.76	516.97	1247.72
0.3	659.65	432.82	1092.47

Según la página de Weather Spark, para los días en que se realizaron los experimentos, la radiación solar se mantuvo estable, con un valor promedio de 0.84 kW/m² entre las 11 am y la 1pm. El ángulo de los rayos solares con respecto al piso para el periodo de prueba varió entre 36° al inicio y 52° al final de los experimentos. Se calculó que la primera fase de los calentamientos ocurrió con un ángulo promedio de 38.76°, mientras que la fase de estabilización tuvo un ángulo promedio de 45.9°. Bajo estas circunstancias, se calculó que se tuvo una radiación incidente del invernadero de 868.84 kW durante los primeros 15 minutos y de 2557.57 kW para el resto del experimento, para un total de 3426.41 kW a lo largo de todo el experimento.

En la Tabla 3 se muestra el aprovechamiento térmico promedio para



cada cubierta del invernadero. Se observa que existe una caída drástica en la captación de energía después de los 15 minutos del experimento, lo cual es aún más notorio para la cubierta de mayor grosor.

Tabla 3. Aprovechamiento térmico del invernadero

Grosor (mm)	% de energía captada		
	Minuto 0-15	Minuto 15-60	Total
0.8	83.62	5.06	24.98
0.5	84.11	20.21	36.41
0.3	75.92	16.92	31.88

Los valores finales muestran que la cubierta con el grosor intermedio tiene un mejor rendimiento en la captación de energía, mientras que la peor es la de mayor grosor, habiendo una diferencia de más del 10% entre ellas. Esta diferencia porcentual puede incrementarse para un tiempo más prolongado, esto debido a que las gráficas de calentamiento indican que la temperatura en el invernadero se incrementará por otro lapso para la cubierta de 0.5 mm, mientras que permanecerá constante para la cubierta de 0.8 mm.

4. Conclusiones

Se presentó el estudio comparativo del aprovechamiento térmico en un invernadero utilizando diferentes grosores en la cubierta del mismo material. Los resultados generales indican que durante los primeros 15 minutos de calentamiento, las cubiertas permiten una alta entrada de energía por radiación y reducen la salida de calor por convección/conducción del sistema, sin embargo, después de este tiempo, se reduce la entrada por radiación y aumenta la salida por convección/conducción, cambiando la velocidad de calentamiento. La cubierta con mayor grosor favorece la acumulación durante la primera fase, pero produce una alta reducción en la segunda fase. El grosor de cubierta que permitió una mayor acumulación de energía en el invernadero fue la de 0.5mm, observándose un balance entre los efectos en la resistencia a la radiación y a la conducción. El comportamiento de la acumulación de energía en este proyecto diferirá de un invernadero lleno de plantas puesto que estas a ayudarán a bajar la temperatura al absorber la energía para realizar la fotosíntesis, sin embargo, los efectos del grosor de la cubierta serán los mismos.



Realizando el mismo experimento para diferentes tipos de cubiertas se puede llegar a realizar una optimización del tipo y grosor de cubierta acorde a los requerimientos energéticos de los cultivos.

Referencias bibliográficas

Abdel-Ghany, A.M. & Al-Helal, I.M. (2011). Solar energy utilization by a greenhouse: general relations. *Renewable Energy*, 36, 189-196.

Adaro, J., Caracoche, F. & Galimberti, P. (2000). Estudio térmico de invernadero con calentamiento geotérmico y doble techo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4, 75-80.

Ahamed, S., Guo, H. & Tanino, K. (2018). Development of a thermal model for simulation of supplemental heating requirements in Chinese_style solar greenhouses. *Computer and Electronics in Agriculture*, 150, 235-244.

Ahamed, S., Guo, H. & Tanino, K. (2018). A quasi-steady state model for predicting the heating requirements of conventional greenhouses in cold regions. *Information Processing in Agriculture*, 5, 33-46.

Alsadon, A., Al-Helal, I., Ibrahim, A., Abdel-Ghany, A., Al-Zaharani, S. & Ashour, T. (2016). The effects of plastic greenhouse covering on cucumber (*cucumis sativus* L.) growth. *Ecological Engineering*, 87, 305-312.

Bialar (2020). Tipos de Invernadero. Clasificación y características. Construcción y equipamientos: Recuperado el 18 de septiembre de 2023, de <https://www.bialarblog.com/tipos-de-invernadero-clasificacion-caracteristicas>.

Cengel, Y.A. & Ghajar, A.J. (2011). Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones. México D.F.: Mc Graw Hill.

Choab, N., Allouhi, A., Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S. & Jamil, A. (2019). Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, 191, 109-137.

Echazu, R. D. & Quiroga, M.A. (2016). Invernaderos y energía solar. En M.A. Laborde y R.J.J. Williams (Eds.). *Energía Solar* (pp. 89-112). Buenos Aires: ANCEF. N.



- He, X., Wang, J., Guo, S., Zhang, J. Wei, B., Sun, J. & Shu, S. (2018). Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 16-25.
- Katzin, D., van Henten, E.J. & van Mourik, S. (2022). Process-based greenhouse climate models: Genealogy, current status, and future directions. *Agricultural Systems*, 198, 1-26.
- Legarrea, S., Velázquez, E., Aguado, P., Fereres, A., Morales, I., Rodríguez, D., Del Estal, P. & Viñuela, E. (2014). Effects of photosensitive greenhouse cover on the performance and host finding ability *Aphidius ervi* in a lettuce crop. *Biocontrol*, 59, 265-278.
- Maraveas, C. (2019). Environmental sustainability of greenhouse covering materials. *Sustainability*, 11(21), 1-24.
- Martínez, P.F., & Roca, D. (2011). El control del clima de los invernaderos de plástico: un enfoque actualizado. En V.J. Flórez (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (pp. 181-247). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Nadal, A., Cueva, E., Cerón, I., Josa, A. & Rieradevall, J. (2016). Comportamiento térmico de un invernadero integrado en azotea en una ciudad mediterránea: resultados preliminares. Actas del congreso internacional Towards Green Cities. Mérida, provincia de Badajoz.
- Papadakis, G., Briassoulis, D., Mugnozza, G. S., Vox, G., Feuilloley, P. & Stoffers, J.A. (2000). Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, Greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(1), 7-38.
- Papaioannou, C., Katsoulas, N., Maletsika, P., Siomos, A. & Kittas, C. (2012). Effects of a UV-absorbing greenhouse covering film on tomato yield and quality. *Agricultural Engineering*, 10(4), 959-966
- Pérez-Ortega, E.C., Chavira Álvarez, A. & Esparza-Delgado, María del Carmen. (2019). Invernadero utiliza energía solar para el control de temperatura. *Revista del Desarrollo Tecnológico*, 3(10), 17-23.
- Rasheed, A., Lee, J.W. & Lee, H.W. (2018). Development and optimization of a building energy simulation model to



study the effect of greenhouse design parameters. *Energies*, 11(8), 1-19.

Rodríguez, C. & Iriarte, A. (2002). Sistemas auxiliares para acondicionamiento de invernaderos y secaderos solares utilizando biomasa como combustible. Memorias del Congreso Regional de ciencias y Tecnología NOA 2002.

Ullah, I., Fayaz, M., Aman, M. & Kim, D. (2022). An optimization scheme for IoT based Smart greehhouse climate control with efficient energy consumption. *Computing*, 104, 433-457.

Viegas, G.M., Jodra, J.I., Discoli, C.A. & San Juan, G.A., (2020). Estabilización térmica de espacios agro-productivos a partir de un sistema solar pasivo modular con variaciones de la masa térmica. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 21(3), 1-13.

Wheather Spark. (2023). Tiempo durante todo el año en cualquier lugar del mundo. Recuperado el 20 de septiembre de 2023, de es.weatherspark.com.