

# Modelo agrovoltaico simplificado para estimar el nivel de transparencia óptimo de la cubierta de un invernadero solar

Ana M. González<sup>1</sup>, Pedro M. Rodrigo<sup>2</sup>, Arturo Díaz-Ponce<sup>3</sup>, Nivia I. Escalante<sup>4</sup>, Bernardo Almonacid<sup>5</sup>

<sup>1</sup> CONAHCYT- Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., Unidad Aguascalientes, Maestría Interinstitucional en Ciencia y Tecnología, Prol. Constitución No. 607, Fracc. Reserva Loma Bonita C.P. 20200, Aguascalientes, Ags., México, anamariags@cio.mx

<sup>2</sup> Universidad Panamericana. Facultad de Ingeniería. Josemaría Escrivá de Balaguer 101, Aguascalientes, Aguascalientes, 20296, México, prodrigo@up.edu.mx

<sup>3</sup> CONAHCYT- Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución No. 607, Fracc. Reserva Loma Bonita C.P. 20200, Aguascalientes, Ags., México, adiaz@cio.mx

<sup>4</sup> Tecnológico Nacional de México, Campus Pabellón de Arteaga, Laboratorio de Iluminación Artificial, Carretera a la estación de Rincón de Romos Km. 1, C.P. 20670 Pabellón de Arteaga, Ags., México, nivia.eg@pabellon.tecnm.mx

<sup>5</sup> Universidad de Jaén, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Campus las Lagunillas s/n, Fracc. San Gerardo C.P. 23071, Jaén, España, balmona@ujaen.es

## Resumen

Actualmente, la sobrepoblación en el mundo y la demanda de alimentos y de energía eléctrica han sido el motivo por el cual surgen nuevas tecnologías para solventar las necesidades de reducir la competencia por el uso de la tierra. Entre estas tecnologías destacan los sistemas agrivoltaicos, los cuales aún se encuentran en fase de investigación y desarrollo. Este trabajo propone un algoritmo simplificado para estimar el nivel de transparencia óptimo de la cubierta de un invernadero solar de acuerdo con las características del cultivo y del lugar. Los resultados del algoritmo se comparan con datos obtenidos de un modelo dual detallado para el cultivo tomate cebra verde en invernaderos de las ciudades de El Ejido (España), Pachino (Italia), Antalya (Turquía) y Vicente Guerrero (México), reportados en la literatura. Los resultados de validación mostraron una aproximación del factor de transparencia de  $\pm 3\%$  con respecto al modelo detallado, lo cual demuestra que el modelo propuesto tiene un nivel de precisión alto y un costo computacional menor. Una vez validado el algoritmo, se eligieron tres ubicaciones para su aplicación: la ciudad de Aguascalientes, Ciudad de México y Jalapa; así como tres cultivos diferentes: cacahuete, sandía y tomate cebra verde. Las simulaciones demuestran que a mayor radiación global horizontal promedio en una zona, menor es el grado de transparencia óptimo de la cubierta del invernadero. Además, a menor densidad de flujo de fotones fotosintéticos para la saturación de la fotosíntesis en el cultivo, este tolerará mayor sombreado y, por lo tanto, menor será el nivel de transparencia óptimo. Esta investigación permite mejorar el diseño de los invernaderos solares para cualquier ubicación y diferentes cultivos con objeto de maximizar la generación de energía con una pérdida de producción vegetal controlable (inferior al 10%).

**Palabras clave**— Agrivoltaica, fotosíntesis, rendimiento del cultivo, México.

## Abstract

Currently, overpopulation in the world and the demand for food and electrical energy have been the reasons for the emergence of new technologies to address the need to reduce competition for land use. Among these technologies, agrivoltaic systems stand out, which are still in the research and development phase. This work proposes a simplified algorithm to estimate the optimal transparency level of a solar greenhouse cover according to crop and location characteristics. The algorithm's results are compared with data obtained from a detailed dual model for the cultivation of green zebra tomatoes in greenhouses in the cities of El Ejido (Spain), Pachino (Italy), Antalya (Turkey), and Vicente Guerrero (Mexico), as reported in the literature. Validation results showed an approximation of the transparency factor within  $\pm 3\%$  compared to the detailed model, demonstrating that the proposed model has a high level of accuracy and lower computational cost. Once the algorithm was validated, three locations were selected for its application: Aguascalientes, Mexico City, and Jalapa, as well as three different crops: peanuts, watermelon, and green zebra tomato. Simulations demonstrate that the optimal transparency degree of the greenhouse cover is lower in areas with higher average global horizontal radiation. Additionally, with a lower photosynthetic photon flux density for photosynthesis saturation in the crop, it will tolerate more shading, and therefore, the optimal transparency level will be lower. This research allows for improving the design of solar greenhouses for any location and different crops to maximize energy generation with a controllable loss of vegetable production (less than 10%).

**Keywords**— Agrovoltatics, photosynthesis, yield crop, Mexico.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, uno de los problemas globales que afectan al mundo es la sobrepoblación, ya que el crecimiento poblacional es exponencial y en 2022 se alcanzaron 8,000 millones de personas, tal y como se muestra en la Fig. 1, la cual representa la evolución del crecimiento poblacional mundial desde 1950, y su estimación hasta 2100 [1]. La Organización de

las Naciones Unidas (ONU) prevé que la población mundial aumentará 2,000 millones de personas en los próximos 30 años, con la probabilidad de alcanzar un pico de cerca de 11,000 millones de habitantes para 2100 [2].

A medida que el número de habitantes aumenta, la demanda de alimentos también lo hace, por lo cual se ha generado una crisis alimentaria mundial. Casi mil millones de personas padecen de mal nutrición y 400 millones están subnutridas [3].

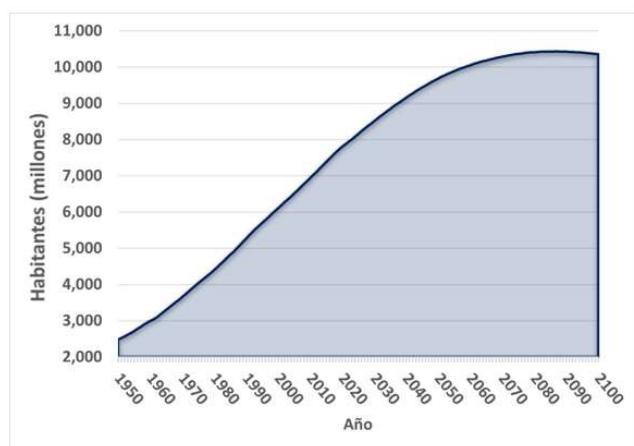


Fig. 1 Evolución de la población mundial y estimación hasta 2100 [1]

La brecha alimenticia empeora si tomamos en cuenta la degradación de las tierras, la falta de área de cultivo, el uso no efectivo de fertilizantes, la desigualdad en la producción y distribución de alimentos, urbanización excesiva, etc. Para cubrir las necesidades alimentarias de una población mundial de 9 mil millones en 2050, la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) estima que la producción de alimentos deberá elevarse en un 70% [4]. Garantizar sustentabilidad alimenticia requiere de múltiples acciones y no debería entrar en especulación al tratarse de uno de los problemas globales actuales.

Un invernadero es una instalación que consiste en una estructura de cemento, madera o aluminio, cubierta por materiales semitransparentes o traslucidos, cuyo objetivo es captar la mayor radiación solar y crear un ambiente controlado para proteger los cultivos de un clima no favorable (lluvias, bajas temperaturas, sequía, heladas, entre otros) [5]. Los invernaderos con paneles fotovoltaicos son una tecnología potencial cuyo desarrollo ha ido ganando terreno en los últimos años debido a las ventajas que implica su implementación, ya que además de reducir costos de producción, producen energía sostenible y aumentan el uso del terreno. Estos invernaderos representan un gran avance de la energía agrivoltaica, pues el tejado deja de ser un espacio sin uso y se construye una cubierta con paneles solares [6]. Los invernaderos solares tienen ventajas importantes frente a la agricultura convencional, entre ellas destacan las siguientes:

- Reducción de la presión sobre los recursos de la tierra: en la agricultura convencional se presentan problemas como la erosión, pérdida de fertilidad, contaminación química del suelo por uso de aguas residuales [7].
- Cultivos con mayor contenido nutricional: el riego con aguas residuales en la agricultura convencional podría tener un impacto negativo sobre la salud [7].
- Disminución en el uso de plaguicidas y pesticidas: la agricultura convencional utiliza todo tipos de agroquímicos para control de plagas, malezas y fertilización de cultivos.
- Reducción del uso del agua: la necesidad de riego puede reducirse hasta en un 30% [8].
- Cosecha en cualquier época del año: a diferencia de la agricultura convencional, un invernadero solar permitiría la

recolección de cualquier cultivo durante todo el año. El rendimiento de un invernadero respecto a la radiación solar es descrito por el parámetro de transmitancia, que se define como la relación entre la potencia luminosa que logra atravesar un cuerpo y la potencia luminosa que incide sobre él. Esta magnitud permite conocer el porcentaje de energía que absorbe un panel solar y cuánto lo traspasa, siendo un factor crítico para el desarrollo y crecimiento de las plantas en el invernadero [9].

Un sistema agrivoltaico (APV, por sus siglas en inglés) es la combinación de dos elementos: la agricultura y la energía fotovoltaica, donde conviven en máxima sinergia los paneles fotovoltaicos y los cultivos. Básicamente consiste en la instalación de paneles fotovoltaicos sobre los mismos terrenos de cultivo, de manera que se aprovecha la misma superficie para generar energía eléctrica y para la producción de alimentos. Estos sistemas surgen como respuesta al incremento de la población, el calentamiento global, la escasez de agua, el uso excesivo de plaguicidas y pesticidas, así como la demanda de riego y maquinaria en el sector agrícola, problemáticas que se han hecho presentes desde hace algunas décadas [10]. En los sistemas agrivoltaicos existen diferentes diseños de módulos fotovoltaicos. De acuerdo con lo reportado en [11] y en [12], los módulos construidos en formación de tablero de ajedrez permiten una mejor distribución de la radiación solar, demostrando una mejora en el crecimiento del cultivo. Lo contrario ocurre en módulos dispuestos en formación recta, donde el sombreado disminuyó la calidad del desarrollo del cultivo. También se reportó en [11], [12] y [13] que una sombra severa (mayor o igual al 50%) afecta al rendimiento del cultivo de cebollas, mientras que [14] y [4] reportaron que un factor de transparencia de alrededor del 60% no perjudica significativamente al cultivo de tomate.

En 2022, los investigadores de la Universidad de Jaén, en España, desarrollaron un modelo dual que calcula el índice de transmitancia óptimo en un sistema APV. El algoritmo tiene un alto grado de precisión; sin embargo, el costo computacional es elevado por lo que se dificulta implementarlo en sistemas embebidos de bajo costo [4].

Por lo anterior, en este trabajo se propone un algoritmo simplificado para estimar el nivel de transparencia óptimo de la cubierta de un invernadero solar de acuerdo con las características del cultivo y del lugar; dicho algoritmo es de bajo costo computacional y tiene alto grado de precisión. Con el modelo simplificado se pretende promover la tecnología de invernaderos solares en México, contribuir a impulsar la soberanía alimentaria y, al mismo tiempo, al aprovechamiento de energías renovables.

## II. METODOLOGÍA

El desarrollo del algoritmo propuesto se realizó a través de los siguientes pasos: A) Caracterización del proceso de fotosíntesis de las plantas, B) Modelo simplificado de producción de vegetales bajo invernadero solar, y C) Optimización del nivel de transparencia de la cubierta del invernadero solar. En las siguientes subsecciones se brindan los detalles de cada proceso.

### A. Caracterización del proceso de fotosíntesis de las plantas

Licor LI-6800 es un equipo analizador de gas infrarrojo que dispone de una fuente de luz formada por dos diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés) azul y rojo, cuya intensidad puede ajustarse. Dicha luz se hace incidir sobre la planta bajo estudio y el dispositivo mide la cantidad de CO<sub>2</sub> que absorbe mediante fotosíntesis. Al variar la intensidad de los LEDs, variará también la cantidad de CO<sub>2</sub>, originándose una curva característica del proceso de fotosíntesis de dicha planta.

La Fig. 2 muestra, a modo de ejemplo, las curvas de absorción características experimentales del cacahuate, sandía y tomate cebrá verde, las cuales relacionan la densidad de flujo fotosintético de fotones (PPFD, por sus siglas en inglés), es decir, los micromoles de fotones con longitudes de onda entre 400 y 700 nm emitidos hacia la planta por unidad de área y por unidad de tiempo, y la tasa de fotosíntesis (PSN, por sus siglas en inglés). En estas curvas se aprecia que a medida que crece la intensidad de la fuente, crece proporcionalmente la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbido, es decir la relación entre el PPFD y el PSN es positiva, hasta llegar a un punto de saturación, a partir del cual la cantidad de CO<sub>2</sub> permanece aproximadamente constante, aunque se aumente la intensidad de la fuente y como puede observarse las plantas tienen diferentes niveles de saturación. Sin embargo, más allá de este punto de saturación, incrementos adicionales en el PPFD pueden no tener un efecto significativo en la mejora de la fotosíntesis e incluso pueden resultar en una disminución del PSN. Esto se debe a factores como la fotoinhibición, que se produce cuando el aparato fotosintético de la planta se sobrecarga con un exceso de energía lumínica. Esto puede reducir la eficiencia fotosintética y a un posible daño a la planta [15].

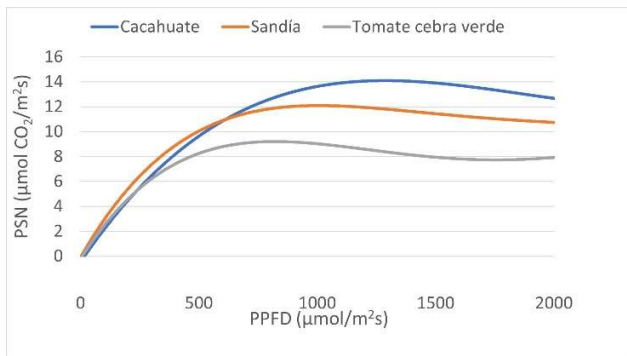


Fig. 2 Curva característica del proceso de fotosíntesis del cacahuate, sandía y tomate cebrá verde.

En un análisis realizado por [4], se caracterizaron 15 tipos de plantas midiendo el PSN mediante la función (1),

$$PSN = f(PPFD). \quad (1)$$

Las funciones para obtener el PSN de las plantas caracterizadas se ajustaron con polinomios de grado 4 y los valores de los coeficientes para cada polinomio ( $a_0, a_1, a_2, a_3$  y  $a_4$ ) se reportaron en [4]. El ajuste se expresa matemáticamente según (2),

$$PSN = a_0 + a_1 \cdot PPFD + a_2 \cdot PPFD^2 + a_3 \cdot PPFD^3 + a_4 \cdot PPFD^4. \quad (2)$$

La PPFD se puede expresar matemáticamente en función del espectro de luz emitido por la fuente del Licor ( $E_{Licor}(\lambda)$ , en W/(m<sup>2</sup> nm)) como en (3), donde  $\lambda$  representa la longitud de onda,  $N_A$  corresponde al número de Avogadro,  $h$  es la constante de Planck y  $c$  representa la velocidad de la luz,

$$PPFD = \int_{400}^{700} \frac{E_{Licor}(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{N_A \cdot h \cdot c} \cdot 10^{-9} \left[ \frac{n}{nm} \right] \cdot 10^6 \left[ \frac{\mu mol}{mol} \right] \\ = \int_{400}^{700} \frac{E_{Licor}(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{119.6 \left[ \frac{J \cdot nm}{\mu mol} \right]} \quad (3)$$

Si al espectro de luz solar real incidente sobre la planta se le llama  $E_{plant}(\lambda)$ , los micromoles absorbidos por la planta en el rango 400-700 nm se pueden calcular mediante (4), donde  $PPFD_{Abs}$  es el PPFD absorbido por la planta,

$$PPFD_{Abs} = \int_{400}^{700} \frac{E_{plant}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{119.6 \left[ \frac{J \cdot nm}{\mu mol} \right]}, \quad (4)$$

donde  $QY(\lambda)$  es la función espectral de absorción cuántica. Esta función general, propuesta por [16], es aproximadamente válida para todas las plantas, e indica el porcentaje de los fotones incidentes que son absorbidos por la planta para cada longitud de onda.

Para establecer una relación entre  $E_{Licor}(\lambda)$  y  $E_{plant}(\lambda)$  se considera que, en un determinado instante, el exterior de la planta es irradiada por un espectro  $E_{plant}(\lambda)$ . La ecuación (5) describe qué espectro debe tener la fuente del Licor en el interior para que la planta esté absorbiendo la misma cantidad de fotones que en el exterior.

$$\int_{400}^{700} \frac{E_{plant}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{119.6 \left[ \frac{J \cdot nm}{\mu mol} \right]} = \int_{400}^{700} \frac{E_{Licor}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{119.6 \left[ \frac{J \cdot nm}{\mu mol} \right]} \quad (5)$$

Por lo tanto, la PPFD se puede expresar en función del espectro solar real incidente sobre la planta mediante (6),

$$PPFD = \frac{\int_{400}^{700} E_{Licor}(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{\int_{400}^{700} E_{Licor}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda} \cdot \int_{400}^{700} \frac{E_{plant}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{119.6 \left[ \frac{J \cdot nm}{\mu mol} \right]} \quad (6)$$

Sustituyendo la relación entre  $E_{Licor}(\lambda)$  y  $E_{plant}(\lambda)$  en (5), resulta (7),

$$PPFD = \frac{\int_{400}^{700} E_{Licor}(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{\int_{400}^{700} E_{Licor}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda} \cdot \int_{400}^{700} \frac{E_{plant}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{119.6 \left[ \frac{J \cdot nm}{\mu mol} \right]} \quad (7)$$

Si al primer cociente en (7) lo denominamos  $MM_{Licor}$  resulta (8)

$$PPFD = MM_{Licor} \cdot \int_{400}^{700} \frac{E_{plant}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{119.6 \left[ \frac{J \cdot nm}{\mu mol} \right]}, \quad (8)$$

donde  $MM_{Licor}$  es el factor de desajuste espectral de cultivos y se puede calcular conociendo el espectro normalizado de la fuente de luz del Licor y la función espectral de absorción cuántica de las plantas ( $QY(\lambda)$ ). Ambas funciones se representan en la Fig. 3, en azul el espectro de la fuente luminosa del Licor, el cual, presenta dos picos, uno para la longitud de onda del color rojo y otro para el azul (LEDs azul y rojo). La curva naranja representa la función espectral de absorción cuántica de las plantas, se observa una concavidad para la longitud de onda del color verde ya que es una zona de poca absorción, mientras que para el color rojo y azul se incrementa el nivel de absorción.

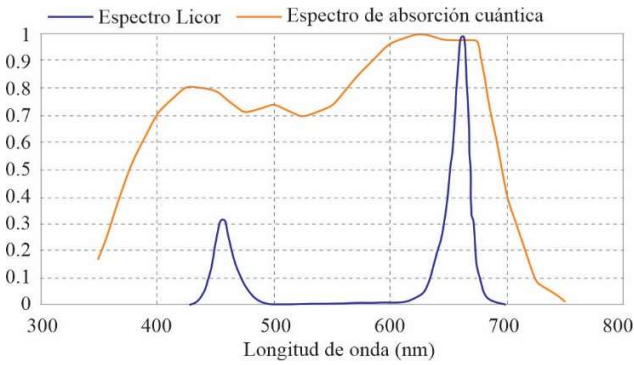


Fig. 3 Espectro normalizado de la fuente de luz del Licor y la función espectral de absorción cuántica de las plantas.

Calculando el cociente de las funciones anteriores, se obtiene (9):

$$MM_{Licor} = 1.0763. \quad (9)$$

### B. Modelo simplificado de producción de vegetales bajo invernadero solar

Una vez que se obtuvo la caracterización de la fotosíntesis de las plantas y se calculó el valor de la constante  $MM_{Licor}$ , se procedió a calcular el factor global de transparencia, (TRF por sus siglas en inglés) de la cubierta de un invernadero, obteniéndose (10),

$$TRF = \tau_{transp} \cdot TAF, \quad (10)$$

donde TAF es el factor de área transparente y se define como el cociente entre el área transparente de cubierta y el área total de cubierta (el área total de cubierta está compuesta por una parte transparente y una parte opaca que son las celdas fotovoltaicas).  $\tau_{transp}$  es la transmitancia del área transparente de cubierta, correspondiendo a un número ligeramente menor que 1, donde 0 corresponde a una cubierta completamente opaca y 1 corresponde a una cubierta completamente transparente. El modelo propuesto asume la simplificación de que la distribución espectral de la luz solar es siempre equivalente al espectro estándar ( $E_{STC}(\lambda)$ ), por lo que  $E_{plant}(\lambda)$  puede calcularse mediante (11),

$$E_{plant}(\lambda) = TRF \cdot \frac{E_{STC}(\lambda)}{G_{STC}} \cdot GHI, \quad (11)$$

donde  $G_{STC}$  es la irradiancia estándar ( $1,000 \text{ W/m}^2$ ) y GHI el valor de irradiancia global horizontal en el instante considerado. Por lo tanto, al sustituir (11) en (8), se obtiene el PPFD en función de la GHI y el TRF con (12),

$$PPFD = MM_{Licor} \cdot \int_{400}^{700} \frac{TRF \cdot \frac{E_{STC}(\lambda)}{G_{STC}} \cdot GHI \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{119.6 \left[ \frac{\text{J}\cdot\text{nm}}{\mu\text{mol}} \right]}, \quad (12)$$

simplificando resulta (13),

$$PPFD = \frac{MM_{Licor}}{119.6 \left[ \frac{\text{J}\cdot\text{nm}}{\mu\text{mol}} \right] G_{STC}} \cdot \left( \int_{400}^{700} E_{STC}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda \right) \cdot TRF \cdot GHI. \quad (13)$$

La integral en (13) se puede calcular conociendo el espectro estándar, que se puede descargar, por ejemplo, desde el software libre Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (SMARTS) [17] y el espectro de absorción cuántica de las plantas propuesto por [16]. Entonces, dicha integral genera a (14),

$$\int_{400}^{700} E_{STC}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda = 196.215 \left[ \frac{\text{W}\cdot\text{nm}}{\text{m}^2} \right], \quad (14)$$

sustituyendo (14) en (13) y tomando en cuenta el valor de  $MM_{Licor}$  en (9), se obtiene (15),

$$PPFD = \frac{1.0763}{119.6 \left[ \frac{\text{J}\cdot\text{nm}}{\mu\text{mol}} \right] G_{STC}} \cdot 196.215 \left[ \frac{\text{W}\cdot\text{nm}}{\text{m}^2} \right] \cdot TRF \cdot GHI, \quad (15)$$

y, por lo tanto, resulta (16)

$$PPFD = K \cdot TRF \cdot GHI, \quad (16)$$

donde  $K$  igual a (17),

$$K = \frac{1.0763 \cdot 196.215 \left[ \frac{\text{W}\cdot\text{nm}}{\text{m}^2} \right]}{119.6 \left[ \frac{\text{J}\cdot\text{nm}}{\mu\text{mol}} \right] G_{STC}} = 1.7658 \left[ \frac{\mu\text{mol}}{\text{J}} \right]. \quad (17)$$

Las ecuaciones (16) y (17) permiten obtener el PPFD sobre las plantas en un instante en el que la irradiancia global horizontal es GHI, para un invernadero con una configuración de la cubierta dada por (10) y para ese mismo instante el PSN de una determinada planta se calcula mediante la aproximación polinomial en (2).

El rendimiento anual del cultivo ( $Y_{crop}$  en  $\text{mol CO}_2/\text{m}^2$ ) de la planta se obtiene mediante la sumatoria (18),

$$Y_{crop} = \sum_i^{year} PSN_i \cdot 10^{-6} \left[ \frac{\text{mol}}{\mu\text{mol}} \right] \cdot 3600 \left[ \frac{\text{s}}{\text{h}} \right] \cdot \Delta t, \quad (18)$$

donde  $\Delta t$  es igual a 1 hora y los valores horarios de GHI se pueden obtener para una determinada ubicación descargando el archivo Typical Meteorological Year (TMY) de alguna base de datos de radiación solar. Por ejemplo, desde Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [18].

### C. Optimización del nivel de transparencia de la cubierta del invernadero solar

Mediante el modelo descrito en la sección B se puede obtener la curva de optimización del TAF de la cubierta de un

invernadero, empleando (19) para la elaboración de esta,

$$Y_{crop} = f(TAF), \quad (19)$$

es decir, se realiza un barrido de TAF desde 0 hasta 1, y para cada valor de TAF se calcula el valor correspondiente de  $Y_{crop}$ .

En la Fig. 4 se representa gráficamente el valor óptimo de TAF ( $TAF_{opt}$ ) y el valor correspondiente de  $Y_{crop}$  ( $Y_{crop, opt}$ ) para el cultivo tomate cebrá verde (con una PPF de saturación de  $750 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ), en un invernadero en el municipio el Ejido, localizado en la provincia de Almería, en España, cuya latitud y longitud son  $36.7^\circ$  y  $-2.8^\circ$  respectivamente, y cuenta con un nivel de GHI de  $1925 \text{ kWh}/\text{m}^2$ . El valor de  $Y_{crop, max}$  es de  $107.63 \text{ mol}(\text{CO}_2)/\text{m}^2$  y el de  $Y_{crop, opt}$  de  $96.86 \text{ mol}(\text{CO}_2)/\text{m}^2$ , que corresponde al 90% del  $Y_{crop, max}$ , y para el cual, el valor del  $TAF_{opt}$  es de 0.600. En este estudio, siguiendo las recomendaciones descritas en [4], se considera que la cubierta óptima es aquella que reduce la tasa anual de fotosíntesis en un 10% respecto a su máximo valor, con objeto de obtener la máxima cantidad de energía fotovoltaica con una afectación muy pequeña al rendimiento del cultivo vegetal.

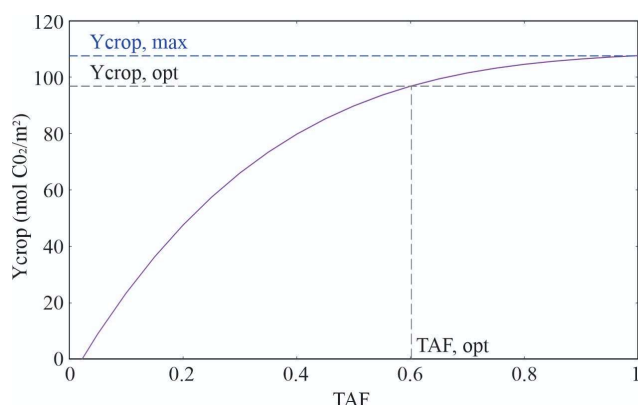


Fig. 4 Optimización gráfica del TAF de la cubierta de un invernadero en el Ejido para el cultivo tomate cebrá verde.

### III. VALIDACIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO PROPUESTO

Para validar el modelo simplificado propuesto, se obtuvieron valores del factor de transparencia óptimo para invernaderos donde se cultiva tomate cebrá verde, localizados en las ciudades de el Ejido (España, con un nivel de GHI de  $1925 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ), Pachino (Italia, con un nivel de GHI de  $1838 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ), Antalya (Turquía, con un nivel de GHI de  $1853 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ) y Vicente Guerrero (México, con una GHI de  $2099 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ). El cultivo y las ubicaciones bajo estudio se han elegido porque existen datos publicados en [4] contra los que se puede validar el modelo simplificado.

En la Fig. 5 se muestran las curvas de optimización del TAF de la cubierta del invernadero en la ciudad de Vicente Guerrero y para el cultivo tomate cebrá verde. La curva punteada en color rojo corresponde a la optimización gráfica del TAF obtenida con el modelo de referencia en [4]; la curva morada corresponde a la optimización gráfica del TAF obtenida con el modelo simplificado propuesto en este artículo. De acuerdo con [4], el valor del factor de transparencia para el invernadero de la

ciudad de Vicente Guerrero es de 0.570 y el valor del  $Y_{crop, opt}$  es de  $99.6 \text{ mol}(\text{CO}_2)/\text{m}^2$ , mientras que el valor obtenido con el modelo simplificado para el factor de transparencia fue de 0.567 y para el  $Y_{crop, opt}$  fue de  $96.41 \text{ mol}(\text{CO}_2)/\text{m}^2$ . Para este caso se tuvo un error del -0.5% en el factor de transparencia y de -3.21% en el  $Y_{crop, opt}$ .

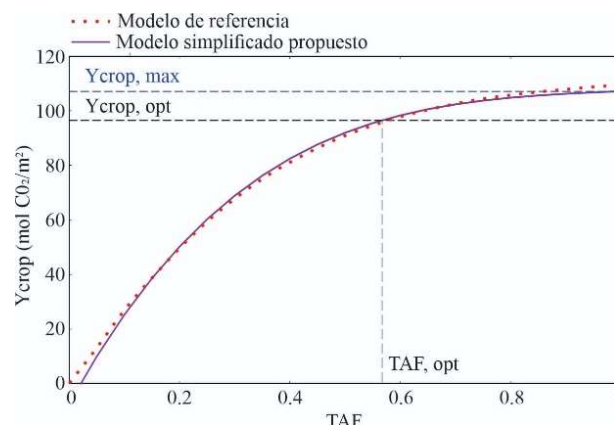


Fig. 5 Curvas de optimización del TAF de la cubierta del invernadero en la ciudad de Vicente Guerrero para el cultivo tomate cebrá verde: comparación entre el modelo de referencia y el modelo simplificado.

En la tabla I se presenta la comparación de los datos obtenidos con el modelo simplificado y los reportados en [4].

TABLA I  
COMPARACIÓN DEL FACTOR DE TRANSPARENCIA

Ciudad	TAF obtenido con modelo de referencia	TAF obtenido con modelo simplificado propuesto	Error (%)
El Ejido	0.600	0.601	0.245
Pachino	0.620	0.605	-2.438
Antalya	0.610	0.593	-2.860
Vicente Guerrero	0.570	0.567	-0.477

Como puede verse en la Tabla I, los valores de TAF obtenidos con el modelo de referencia publicados en [4] están dentro del rango entre 0.570 (Vicente Guerrero) y 0.620 (Pachino). Vicente Guerrero es la ciudad con mayor nivel de GHI por lo que su TAF óptimo es el menor (se puede bloquear más irradiación sin afectar al crecimiento del cultivo); de manera contraria, Pachino es la ciudad con menor nivel de GHI, por lo que el cultivo requiere un TAF mayor. Los resultados de validación mostrados en la tabla arrojan unos valores similares para el modelo simplificado propuesto. Vicente Guerrero sigue siendo la ciudad con menor TAF (0.567), mientras que Pachino es la de mayor TAF (0.605), mostrando una tendencia muy parecida a la de los valores del modelo de referencia. Observando los errores entre el modelo propuesto y el de referencia, puede verse que oscilan entre el 0.2% (El Ejido) y el -2.9% (Antalya). Los errores están dentro de un rango de  $\pm 3\%$ , lo cual demuestra que el modelo simplificado propuesto tiene un nivel de precisión suficientemente alto y a un menor costo computacional.



IV. RESULTADOS

El modelo simplificado propuesto en este artículo fue aplicado para encontrar el valor del TAF óptimo en invernaderos para tres ciudades de México y para tres cultivos en específico. Las ciudades seleccionadas fueron: Aguascalientes (con un nivel de GHI de 2329 kWh/m<sup>2</sup>), Ciudad de México (con un nivel de GHI de 2102 kWh/m<sup>2</sup>) y Jalapa (con un nivel de GHI de 2000 kWh/m<sup>2</sup>). Los cultivos elegidos tienen diferente nivel de saturación de luz y estos fueron: cacahuate (con una PPFD de saturación de 1150 μmol/m<sup>2</sup>s), sandía (con una PPFD de saturación de 900 μmol/m<sup>2</sup>s) y tomate cebrá verde (con una PPFD de saturación de 750 μmol/m<sup>2</sup>s), cuyos valores de los coeficientes para los polinomios (a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub> y a<sub>4</sub>) están reportados en [4].

La Fig. 6 muestra un ejemplo de la curva de optimización del TAF obtenida con el modelo simplificado propuesto, para un invernadero ubicado en la ciudad de Aguascalientes y para el cultivo de estudio tomate cebrá verde. El valor del TAF óptimo es de 0.497, el de  $Y_{crop,max}$  de 109.73 mol (CO<sub>2</sub>)/m<sup>2</sup> y el de  $Y_{crop,opt}$  es de 98.76 mol (CO<sub>2</sub>)/m<sup>2</sup>. Como se puede observar, el aumento del TAF mejora el rendimiento del cultivo, pero a su vez implica una menor generación de energía fotovoltaica, al haber menos área de paneles instalados. Por esta razón, el criterio de optimización de ajustar la transparencia para que  $Y_{crop}$  alcance el 90% de  $Y_{crop,max}$ , lo que permite incrementar la generación fotovoltaica con un pequeño decremento de la producción vegetal del 10%.

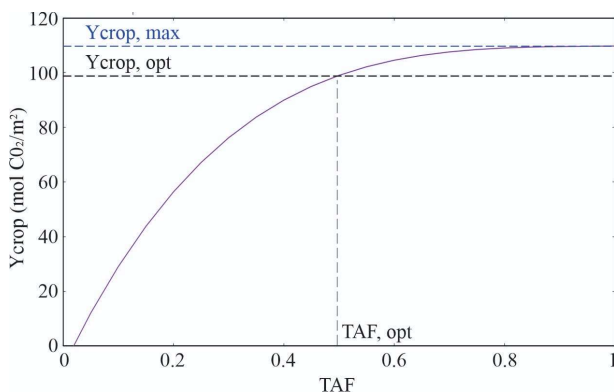


Fig. 6 Curva de optimización del TAF de la cubierta del invernadero en la ciudad de Aguascalientes para el cultivo tomate cebrá verde

La Tabla II muestra los resultados del TAF para los cultivos y ubicaciones bajo estudio. En general, se puede afirmar que a mayor radiación global horizontal promedio en un lugar, menor es la transparencia de la cubierta del invernadero requerida. De acuerdo con los valores obtenidos del TAF para los cultivos en Aguascalientes (que es la ciudad con mayor radiación solar de las ubicaciones de estudio) que van desde 0.497 hasta 0.723, se puede observar que son menores comparados con las otras dos ciudades de estudio, en donde la ciudad de Jalapa al tener menor radiación solar presenta los valores de TAF más altos (desde 0.584 hasta 0.759) para cada cultivo bajo estudio.

El tipo de cultivo también afecta el TAF, ya que de acuerdo con [4], dicha afectación se puede explicar considerando el flujo de fotones en el que los diferentes cultivos alcanzan su

tasa máxima de fotosíntesis. Por ejemplo, de acuerdo con la tabla II, los TAF más bajos corresponden al cultivo tomate cebrá verde (con un valor de PPFD máximo para alcanzar la saturación de 750 μmol/m<sup>2</sup>s), con valores de 0.497, 0.539 y 0.584 para las ciudades de Aguascalientes, Ciudad de México y Jalapa, respectivamente. Por otro lado, los TAF más altos corresponden al cultivo de cacahuate (con un valor de PPFD máximo para alcanzar la saturación de 1150 μmol/m<sup>2</sup>s), obteniéndose un valor de 0.723 para Aguascalientes, 0.745 para Ciudad de México y 0.769 para Jalapa. Entonces cuanto menor sea la PPFD de saturación del cultivo, este tolerará mayor sombreado y, por lo tanto, menor será el TAF óptimo.

TABLA II  
FACTOR DE TRANSPARENCIA POR CIUDAD Y CULTIVO

Ciudad	Cultivo	TAF
Aguascalientes	Cacahuate	0.723
	Sandía	0.596
	Tomate cebrá verde	0.497
Cd. de México	Cacahuate	0.745
	Sandía	0.630
	Tomate cebrá verde	0.539
Jalapa	Cacahuate	0.769
	Sandía	0.664
	Tomate cebrá verde	0.584

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó un algoritmo simplificado diseñado para calcular el nivel de transparencia óptimo de la cubierta de un invernadero solar, considerando las especificaciones particulares del cultivo y del lugar. Con dicho modelo se ajusta el valor del TAF de tal manera que la producción del cultivo no se reduzca más del 10% y con ello los módulos fotovoltaicos no interfieran considerablemente en el crecimiento de este. La validación del algoritmo se realizó comparando datos obtenidos de TAF con un modelo dual detallado, obteniendo una desviación de ±3% en el TAF con respecto al modelo de referencia, por lo que el modelo simplificado propuesto ha demostrado ser preciso y eficiente, a un menor costo computacional, lo que le permite ser implementado en sistemas embebidos económicos.

La estimación del TAF con el modelo simplificado se llevó a cabo para los cultivos de cacahuate, sandía y tomate cebrá verde en las ubicaciones de Aguascalientes, Ciudad de México y Jalapa. Los resultados indican que el incremento del TAF implica una mejora en el rendimiento del cultivo; no obstante, esto resulta en una menor producción de energía fotovoltaica debido a la reducción del área de paneles instalados. Por otro

lado, el tipo de cultivo y la radiación global horizontal promedio en determinada ubicación bajo estudio, tienen un impacto notable en el TAF óptimo. A medida que la radiación solar aumenta, la transparencia de la cubierta del invernadero requerida disminuye y si la PPF para la saturación de la fotosíntesis en el cultivo es menor, el nivel óptimo de TAF será menor.

#### REFERENCIAS

- [1] EpData, “Evolución de la población mayor de 80 años en el mundo”. *EpData*. [En línea]. Disponible en: <https://www.epdata.es/datos/tendencias-poblacion-mundo-datos-graficos/411?accion=2>. [Consultado: 19-sep-2023]
- [2] United Nations, “Población | Naciones Unidas”. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/globalissues/population#:~:text=Se%20espera%20que%20la%20poblaci%C3%B3n,de%2011.000%20millones%20para%202100>. [Consultado: 11-nov-2022]
- [3] “Crecimiento demográfico y crisis alimentaria”, *Fao.org*. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/u3550t/u3550t04.htm>. [Consultado: 03-nov-2022].
- [4] E. F. Fernández et al., “Global energy assessment of the potential of photovoltaics for greenhouse farming”, *Appl. Energy*, vol. 309, núm. 118474, p. 118474, 2022.
- [5] H. M. Orozco, “Proyecto fotovoltaico sustentable para invernadero de producción de jitomate”, Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, México, 2015.
- [6] “Los invernaderos solares, el futuro de la energía agrovoltaica”, *EcoInventos*, 15-jul-2022. [En línea]. Disponible en: <https://ecoinventos.com/invernaderos-solares-energia-agrovoltaica/>. [Consultado: 25-sep-2022].
- [7] O. X. C. E. y H. S. Rojas, “Instituto Mexicano de Tecnología del Agua”, 20-dic-2016. [En línea]. Disponible en: [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/riego-drenaje/reuso-aguas-residuales.pdf](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/reuso-aguas-residuales.pdf). [Consultado: 11-oct-2022].
- [8] A. Rojano et al., “La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada”, *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 5, núm. 2, pp. 177-183, 2014.
- [9] A. Flores Ortega, G. Martínez Soto, J. C. Quiroz Ramírez, F. R. Díaz Serrano, y M. E. Romero Valdez, “Análisis de la transmitancia de luz en un invernadero para producción de jitomate”, *Acta Univ.*, vol. 22, núm. 1, pp. 5–10, 2012.
- [11] A. Yano y M. Cossu, “Energy sustainable greenhouse crop cultivation using photovoltaic technologies”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 109, pp. 116–137, 2019.
- [12] M. Kadowaki, A. Yano, F. Ishizu, T. Tanaka, y S. Noda, “Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth”, *Biosyst. Eng.*, vol. 111, núm. 3, pp. 290–297, 2012.
- [13] J. Vourdoubas, “Co-production of vegetables and electricity in agricultural greenhouses in Crete, Greece. Is it feasible?”, *J. Agric. Life Sci.*, vol. 7, núm. 1, 2020.
- [14] M. Friman-Peretz et al., “Energy partitioning and spatial variability of air temperature, VPD and radiation in a greenhouse tunnel shaded by semitransparent organic PV modules”, *Sol. Energy*, vol. 220, pp. 578–589, 2021.
- [15] B. Demmig-Adams y W. W. Adams III, “Photosynthesis and partitioning | Photoinhibition”, en *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, Elsevier, 2003, pp. 707–714.
- [16] K. J. McCree, “The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants”, *Agric. Meteorol.*, vol. 9, pp. 191–216, 1971.
- [17] “No title”, *Nrel.gov*. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/smarts.html>. [Consultado: 01-sep-2023].
- [18] “Photovoltaic geographical information system (PVGIS)”, *EU Science Hub*. [En línea]. Disponible en: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en). [Consultado: 26-Ago-2023].