

ANÁLISIS DE LA EXTINCIÓN DE RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA EN TOMATE EN INVERNADERO DURANTE 4 ETAPAS FENOLÓGICAS

Jorge Flores Velázquez^{1*}; Cándido Mendoza Perez¹; Abraham Rojano Aguilar²; Francisco García Herrera¹ y Aranza Navarrete Torres¹

¹Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Km. 36.5 Carr. Mex Tex. Texcoco Edo de México. C.P. 56264. México

jorgelv@colpos.mx – Teléfono: 7772588956

²Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México Texcoco, km. 38.5 Chapingo Estado de México. C.P. 56230. México,

Resumen

La radiación solar es entre las variables climáticas la de mayor impacto en el desarrollo de cultivos, a campo abierto y en invernadero. En cultivos tutorados, existe una reducción de radiación que impacta en el proceso fotosintético en función de la etapa fenológica. El objetivo de ese trabajo fue mostrar el comportamiento de la extinción de la radiación (coeficiente de extinción) en un cultivo de tomate durante las diferentes etapas fenológicas. Se utilizó un septómetro para medir la radiación solar en un cultivo de tomate en tres invernaderos con diferentes fechas de siembra; de tal suerte que entre los cuatro invernaderos se tenían las 4 etapas fenológicas del tomate. Se realizó un análisis estadístico para determinar el comportamiento de la radiación y su impacto en el desarrollo del cultivo. Los resultados indican que entre la etapa de trasplante y cosecha existe una diferencia de hasta 800 micromol m² s⁻² en la parte superior del dosel. Mientras que en la parte inferior la reducción es del 50%, por lo que se estima un coeficiente de extinción de 0.35 durante las 4 etapas fenológicas.

Palabras claves: Energía radiante, Hortalizas, Invernadero, micromol m².

Introducción

En un invernadero de baja y media tecnología, el ambiente interno depende del microclima exterior, su diseño, el material de construcción y el tipo de cultivo (Bartzanas *et al.*, 2004; Sethi, 2009; Mesmoudi *et al.*, 2017; Baxevanou *et al.*, 2018). Las plantas cultivadas necesitan la radiación solar para sus procesos fotosintéticos. La agricultura protegida contribuye con un porcentaje en la producción de cultivos de la agricultura moderna (Wang *et al.*, 2021) y provee alimentos vegetales de calidad. El tomate (*Solanum lycopersicum L.*) bajo invernadero es la hortaliza mayormente cultivada; con mejora de sustrato, control climático y nutrición es posible obtener rendimientos de hasta 250 ton/hectárea (SAGARPA, 2019) siempre y cuando se cuente con condiciones ambientales que favorezcan el crecimiento del cultivo, que para el tomate oscila entre los 10 °C y 30 °C (Tesi, 2001; Castilla, 2004)

El espectro de radiación al incidir sobre una superficie interesa conocer la reflectividad de esta respecto a las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidente de forma diferente lo que permitirá distinguir de los demás si se mide la radiación reflejada. El *agua*, es capaz de transmitir radiación, tiene una reflectividad baja, aunque dependiente de la longitud de onda. Absorbe la radiación que le llega en las bandas del infrarrojo próximo y medio. La eutrofización del agua aumenta su reflectividad en el verde. El *suelo* tiene una reflectividad baja para todas las bandas, aunque aumentando hacia el infrarrojo. La *vegetación* tiene una reflectividad baja en el visible pero con un pico en el color verde debido a la clorofila. La reflectividad es muy alta en el infrarrojo reflejado o próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía. (Montero, 2022)

La reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. Cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta. La **vegetación sana** tiene una reflectividad baja en el visible aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila este pigmento aparece en concentraciones entre 5 y 10 veces mayores que otros como el caroteno. Esto ha sido encontrado debido a factores químicos tales como la pigmentación y contenido de nutrientes. La cantidad de energía de los fotones que viajan con longitudes de onda mayores (infrarrojo cercano) es demasiado baja para ser aprovechada por la vegetación por lo que sólo se absorbe en torno al 5%, el resto se transmite (40%) o refleja (55%). Sin embargo, la energía transmitida acabará llegando a otra hoja situada por debajo, y por tanto el 55% de ese 40% se volverá a reflejar. Este proceso, repetido en diferentes capas hace que se incremente el tanto por ciento de energía reflejada por un dosel vegetal.

El envejecimiento de la planta conlleva también una reducción en la reflectividad en el infrarrojo. Las variaciones en la estructura interna de las hojas son la causa principal de que los patrones de respuesta espectral sean diferentes de unas especies a otras. En cuanto al infrarrojo medio, el agua presente en los tejidos vegetales absorbe la radiación en diversas longitudes de onda que afectan incluso a las longitudes de onda vecinas de aquellas en las

que se produce máxima absorción. En general cuanto menor sea el contenido de agua de una planta, mayor será su reflectividad en el infrarrojo medio.

La reflectancia multispectral puede también ser utilizado para el estudio de la patología del cultivo ya que disturbios metabólicos de origen patológico los que deterioran la habilidad de la clorofila para absorber luz visible lo cual deteriora el metabolismo y por lo tanto, la reflectancia en el espectro visible se incrementa. En el infrarrojo cercano (NIR) la reflectancia decrece, aunque esto también se asocia a la caída de las hojas.

La reflectancia del infrarrojo cercano esta principalmente influenciada por le contenido de clorofila, el contenido de agua, la estructura interna y la materia seca, como resultado del trabajo de Ceccato et. al. (2001) el cual encontró también que las hojas de tomate dañadas tienen una reflectancia menor en las regiones del infrarrojo cercano, localizado entre los 800 y 1100 nm, que las hojas saludables. La reflectancia de estas longitudes de onda, generalmente se incrementan cuando las hojas están estresadas. las propiedades ópticas de las hojas son el resultado de la estructura externa e interna de las hojas, del contenido de agua y a su contenido en la concentración bioquímica. Durante el proceso de senescencia los componentes de las células (proteínas, lípidos, etc.) se degradan progresivamente y el cambio del contenido de agua es dinámico. Estudios relacionados indican que la reflectancia decrece sustancialmente en los rangos de 800 a 1300 nm, sin embargo en longitudes de onda de 1300 nm, los espectros son función de la absorción de agua y la estructura interna del dosel.

las características espectrales son una herramienta en la detección y análisis de hojas de tomate ante daños por minador. La respuesta de reflectancia (R_s) es claramente visible entre las hojas sanas y las dañadas por efecto del minador, las causas aún son motivo de investigación. Si se quiere estimar la radiación que llega a la superficie del follaje se tiene que considerar el porcentaje de radiación que se absorbe o refleja al atravesar la cubierta del invernadero y el aire sobre el follaje. El total de radiación que llega a la superficie de la atmosfera es cercano a $30 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (constante solar), pero disminuye por atenuación atmosférica al llegar a la superficie terrestre teniendo valores de $15\text{-}25 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para días soleados y de $5\text{-}15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para días nublados y lluviosos. Al atravesar la cubierta del invernadero y llegar al dosel vegetal, la radiación disminuye dependiendo de la transmisividad de la cubierta y de humedad ambiental del invernadero. La radiación fotosintéticamente activa está directamente relacionada con el desarrollo y rendimiento de los cultivos, ya que es en presencia de esta cuando se realiza la fotosíntesis, si los demás factores que interviene están presentes.

El objetivo de ese trabajo fue mostrar el comportamiento de la extinción de la radiación (coeficiente de extinción) en un cultivo de tomate cultivado en invernadero de plástico en la región de Chapingo México, durante las diferentes etapas fenológicas.

Materiales y Métodos

El trabajo experimental se desarrolló en la región de Chapingo México. Se eligieron 4 invernaderos con características similares de cobertura y dimensiones, cada uno tenía un

cultivo de tomate en 4 etapas fenológicas, trasplante, desarrollo vegetativo, floración y cosecha. Entre los cuatro invernaderos se integra el ciclo total del cultivo. Se uso un **Ceptómetro (ACCUPAR LP-80, 0 a 2,500 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$, Pullaman, Wa. USA)** con una resolución en la medición de $1 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ y espacial de 1 cm capaz de operar entre 0-50 °C (32-122 °F), 0-100% humedad relativa. Se midió la la fracción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por la vegetación y la que llega a la superficie del suelo. Las medidas se hicieron a la misma hora durante las 8 semanas del verano (Julio-agosto) en que se colectaron los datos.

Se planteó el análisis de varianza para determinar las variaciones temporales de la Radiación fotosintéticamente activa (PAR) en cultivo de tomate en invernadero durante las diferentes etapas fenológicas. Se sentido se planteó un diseño en bloque completamente aleatorizados con dos factores para seguir la extinción de la luz hacia el dosel de la planta durante sus 4 etapas fenológicas más representativas (Trasplante, Desarrollo vegetativo, floración, y fructificación), donde cada etapa del cultivo está representado por un invernadero, en este caso constituye un bloque así los errores son producidos por las diferencias en el interior de cada bloque, y por otro lado se tiene la aleatorización total proveniente de las diferencias existentes en el conjunto del ensayo.

Análisis de la Varianza y test de rangos múltiples para el ensayo

Se tomaron medidas de radiación fotosintéticamente activa en la parte aérea del cultivo y en la base del tallo (variable) y en el centro del pasillo (testigo), cada una de las medidas con tres repeticiones durante 8 semanas, las etapas fenológicas se enuncian en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Distribución estratégica del experimento.

Tratamiento	Etapas Fenológicas		DDT
	Inicial	Final	
T1	Desarrollo vegetativo	Floración	34, 41, 48, 55, 63, 77, 93, 103)
T2	Floración	Llenado de fruto	47, 54, 61, 68, 76, 90, 106, 116
T3	Llenado de fruto	cosecha	54,61,68,75,83,97,113,123
T4	Trasplante	Desarrollo vegetativo	8,15,22,29,37,51,67,77

Para el diseño experimental fueron seleccionados 4 invernaderos cuyas características ambientales fueron similares, tratando desde luego de eliminar diferencias entre estos; análogamente dentro de estos, tomate tipo *saladete* fue cultivado variando la fecha de siembra de tal forma que al momento de hacer la toma de datos se tiene tomate en las cuatro etapas fenológicas representativas con el fin de hacer una evaluación en un ciclo productivo.

Análisis estadístico.

Para la realización del análisis estadístico se utilizó el paquete informático STATGRAPHICS V 4.0 para Windows. Reduciendo el análisis básicamente a dos aspectos:

Test de mínimas diferencias significativas, se muestran los valores números y en función de la letra la significancia estadística para $p < 0,05$

La figura 1 muestra los valores de radiación en las 8 semanas que se realizó la medición y su evolución durante este tiempo. Cada línea representa cada etapa fenológica (o invernadero) notando que la variación de la radiación en el dosel del cultivo permanece constante.

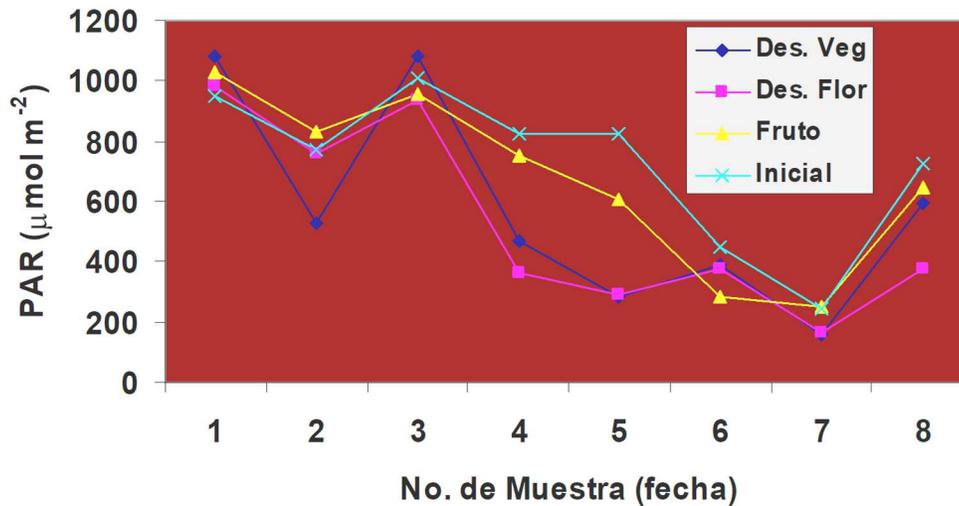


Figura 1. Evolución de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) sobre el dosel del cultivo en cada una de las etapas del cultivo, durante el tiempo de muestreo.

La figura 2 muestra la variación de la radiación en la zona del dosel de la planta tanto en la zona de la línea del cultivo como la zona del pasillo. Nótese que no existe diferencia entre las etapas fenológicas

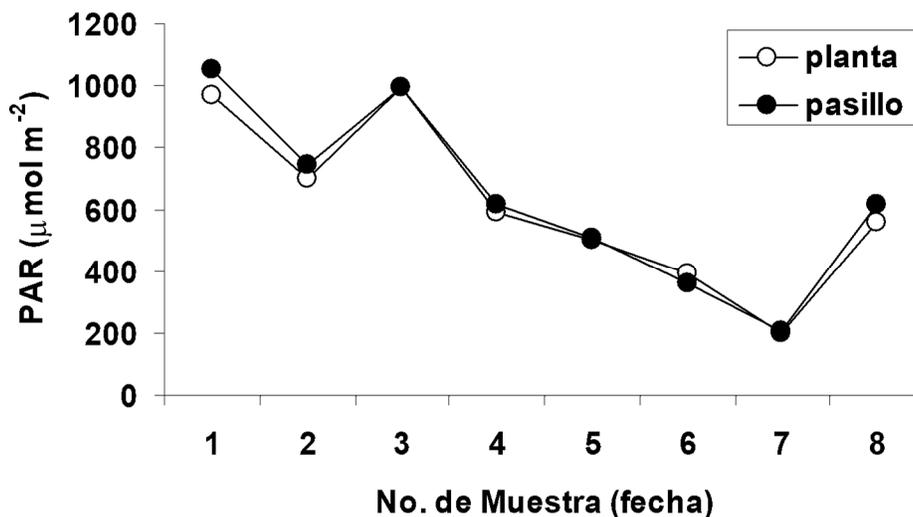


Figura 2. Variación de la PAR entre la parte aérea del cultivo y el pasillo a la misma altura.

Estadísticamente, la figura 3 coincide con los resultados de la figura 3 al mostrar las varianzas de las medidas de radiación en la parte del dosel de la planta

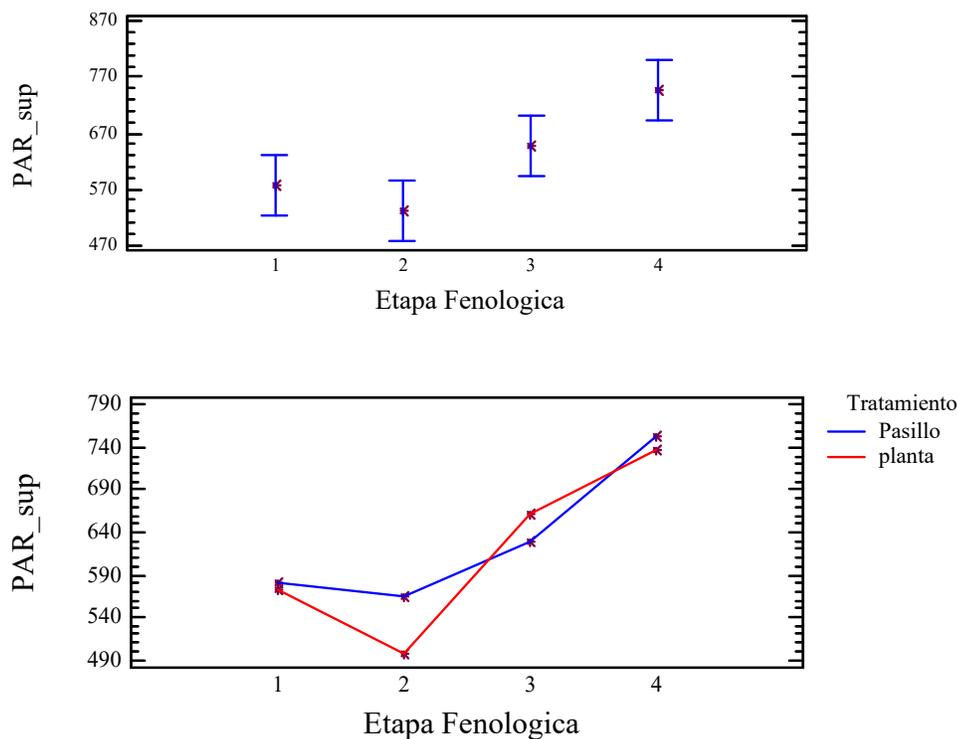


Figura 3. Representación esquemática de la significancia estadística para las diferentes etapas fenológicas entre el la planta y el pasillo, (promedio de los 8 datos) A) 95% de significancia prueba LSD y B) Interacción

Los resultados obtenidos de la radiación en la parte del dosel de la planta es ta principalmente influenciado por las características del invernadero, su cubierta y su posición, La influencia del cultivo aun no se hace patente, debido a que, en la parte superior de la planta, independientemente de su área foliar y su altura, la variación de la radiación no presenta diferencias estadísticamente significativas. No obstante, esta medida será la base para conocer el punto de entrada de la radiación en la planta y con ello estimar el coeficiente de extinción por etapa fenológica.

Con el fin de conocer el proceso de extinción de la radiación en el cultivo, análogamente se hace un análisis de varianza con los datos de radiación medios en la parte del tallo de la planta (a la altura del primer brote) y su similar sobre el pasillo. Esta comparativa va a permitir conocer valores experimentales sobre la extinción de la luz durante el proceso de crecimiento del índice de área foliar (IAF) (Cuadro 3).

Valores de Radiación (PAR) en la parte inferior del cultivo (mmol m-2)

Cuadro 3. Resultados obtenidos en los parámetros de radiación fotosintéticamente activa (PAR) en la base del tallo del cultivo, así como en el centro del pasillo, durante las distintas etapas fenológicas.

Etapa Fenológica	No. De Muestra (Fecha*)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Des. Veg.	425.7ab	152.1b	252a	128.8b	44b	29.8c	11.3c	58.2b
Des-Flor	416.5b	242.7a	157.7b	66.1c	43b	75.8a	34a	83.7a
Fruto	184.7c	54.1c	78.3c	59c	44.5b	36.5c	32a	79a
Inicial	482.5a	225.3a	186.5b	147.7a	131a	57b	18.3b	35c
Isd	58.9	38.3	40.8	15.1	20.4	11	2.6	9.1
P-value	0	0	0	0	0	0	0	0
planta	368.7a	145.58b	155.2a	103.25a	59.1a	50.4a	20.8b	63.3a
pasillo	385.9a	191.6a	182a	97.58a	72.6a	49.2a	27a	64.6a
mds	41.6	27.1	28.9	10.7	14.4	7.8	1.8	6.5
P-value	0.3951	0.0024	0.0672	0.2783	0.0651	0.7381	0	0.6883

Test de mínimas diferencias significativas, se muestran los valores números y en función de la letra la significancia estadística para $p < 0,05$

A pesar de no tener la misma escala, de manera comparativa entre la figura 1 y la figura 4, es posible notar a la vista la diferencia entre los valores experimentales medidos en el dosel del cultivo (Figura 1) y en la zona del primer brote de la planta (Figura 3). En la zona del primer brote, la radiación oscila los 400 micromoles m^{-2} al inicio de la etapa fenológica y en 8 semanas se reduce hasta los 100 micromoles m^{-2} , 300 micromoles es la evolución de la extinción.

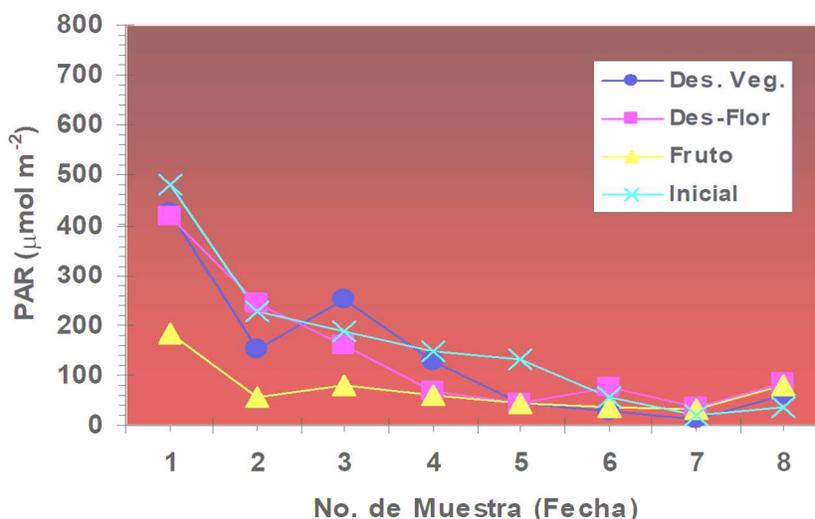


Figura 4 Evolución temporal de la PAR (micromol m-2) en la parte aérea de la planta durante las 4 etapas fenológicas.

En promedio las diferencias entre la zona del cultivo a la zona del pasillo, durante las 4 etapas fenológicas oscila de los 400 a los 50 micromol m^{-2} entre el inicio y fin de la etapa (Ej.

Trasplante-desarrollo vegetativo) (Figura 5). Esta diferencia de 350 micronesoles m^{-2} es similar a la observada en las 8 semanas de muestreo

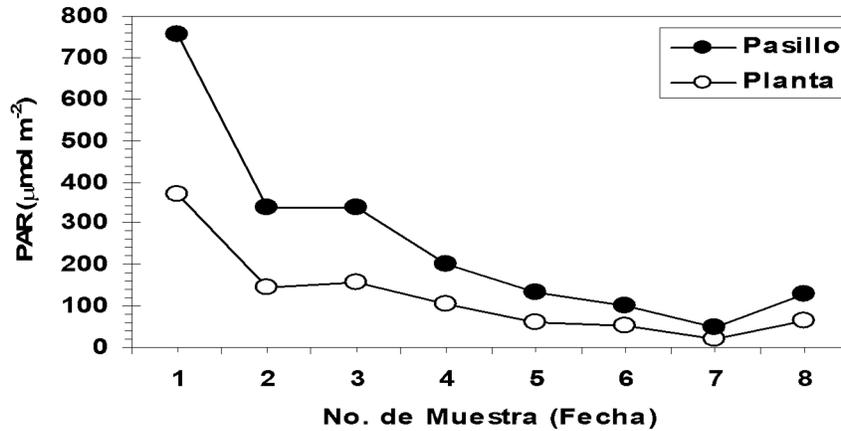


Figura 5. Comportamiento temporal de la PAR en la parte inferior de la planta y a la misma altura en el pasillo.

La figura 6 muestra las variancias en las mediciones de la zona del primer brote de la planta: a diferencia de la zona del dosel o superior, aquí se muestra mayor diferencia y variación temporal. Esta característica indica el impacto del dosel del cultivo sobre la radiación entre ambos puntos (dosel-primer brote).

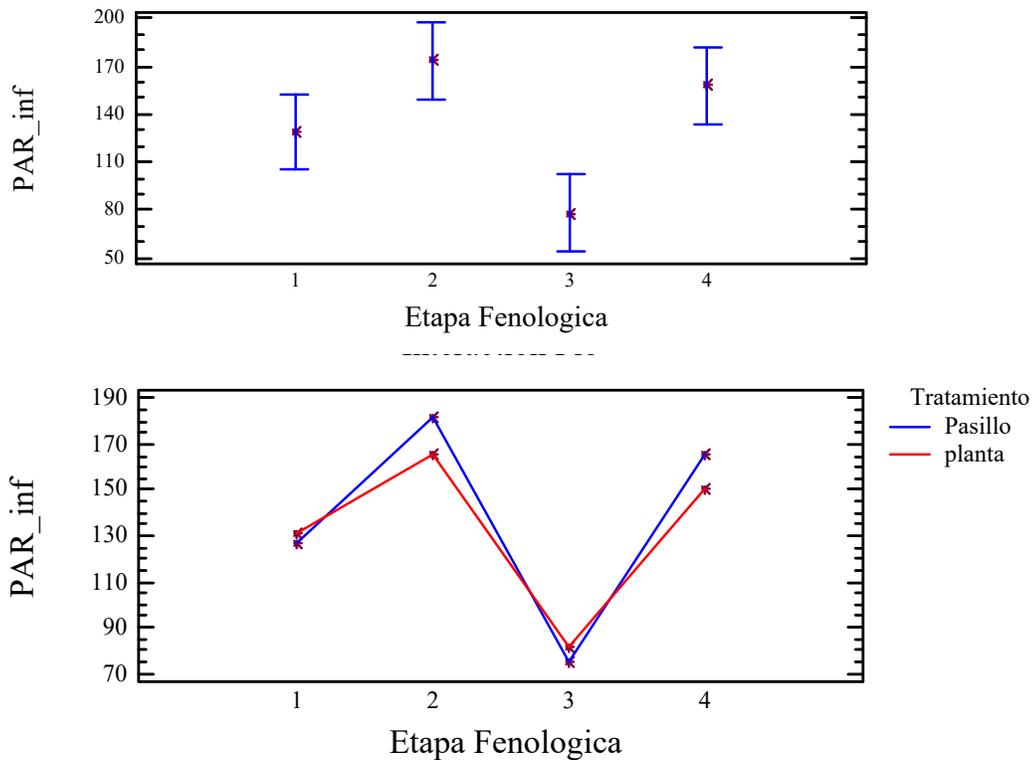


Figura 6. Esquema de la significancia estadística temporal de la PAR en la base del tallo, A) 95% de significancia prueba LSD y B) Interacción.

Bajo las condiciones ensayadas, el coeficiente de extinción de la radiación fue estimado en 0.35, el cual podría ser usado como un indicador de la reducción de radiación que un cultivo de tomate o un cultivo con área foliar similar puede ocurrir durante el crecimiento del mismo. En cultivo de tomate es particularmente importante debido a que se ha documentado (Marcelis, 2019) que el racimo del fruto es principalmente alimentado por dos ramificaciones inferiores y una superior; es decir, en cada racimo, la radiación que llega a las hojas son la fuente principal para alimentar cada nivel del cultivo.

Conclusiones

La orientación del invernadero además de influir en el intercambio de aire, también contribuye en la transmisividad y la uniformidad de la radiación dentro del invernadero; un invernadero a dos aguas con orientación este-oeste reciben globalmente mayor cantidad de radiación en los meses de otoño e invierno que aquel que se orienta Norte-Sur. En función de la latitud y fecha de siembra podrá ser estimada la radiación que podrá ser gestionada al interior del invernadero, principalmente si se busca homogeneizar su distribución, Así, un invernadero orientados E-O presentan menor uniformidad de radiación que los orientados N-S. Esta característica es más marcada en los meses de otoño e invierno, cuando la elevación solar es menor.

Referencias Bibliográficas

- Anis Rabiou, Wook-Ho Na, Timothy Denen Akpenpuun, Adnan Rasheed, Misbaudeen Aderemi Adesanya, Qazeem Opeyemi Ogunlowo, Hyeon Tae Kim, Hyun-Woo Lee. 2022. Determination of overall heat transfer coefficient for greenhouse energy-saving screen using Trnsys and hotbox, *Biosystems Engineering*, 217, 83-101. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.03.002>.
- Bartzanas, T., T. Boulard, and C. Kittas. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering*, 88(4). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006>
- Baxevanou, C., D. Fidaros, T. Bartzanas, and C. Kittas. 2018. Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149(August 2016), 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>
- Castilla, N. 2004. *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo*. 2a edición. Madrid: Editorial Mundiprensa, 462 pp.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., Grégoire, J-M. 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain, *Remote Sensing of Environment*, 77(1)22-33 [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00191-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00191-2).
- Hao Wang, Maoyuan Zhang, Ze Yang, Zhaozheng Wang, Xu Li, Yijia Lu, Linhong Ji a, Zhong Lin Wang, Jia Cheng. (2021). Energy from greenhouse plastic films. *Nano Energy*. 89, (A). 106328. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106328>

- Mesmoudi, K., K. H. Meguallati, and P. E. Bournet. 2017. Effect of the greenhouse design on the thermal behavior and microclimate distribution in greenhouses installed under semi-arid climate. *Heat Transfer - Asian Research*, 46(8), 1294–1311. <https://doi.org/10.1002/htj.21274>
- Montero Torres, J. (2022). Relación de la radiación solar con la producción de plantas: agroproductivas: Julio Montero Torres. *Revista De Investigación E Innovación Agropecuaria Y De Recursos Naturales*, 9(1), 52–66. <https://doi.org/10.53287/oqym7033yy88k>
- SIAP-SAGARPA. 2019. Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera- Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca. (Consultado en 2019) https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018
- Sethi, V. P. 2009. On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation, *Sol. Energy*. 83 21–38.
- Tesi, R. 2001. Medios de protección para la hortofloro-fruticultura y el viverismo. Mundi-Prensa, Madrid, 288 pp.
- Xu H.R., Ying Y. B., Fu X.P., Zhu S.P.. 2007. Near-infrared spectroscopy in detecting Leaf Miner Damage on Tomato Leaf . *Biosystem Engineering*, 96 (4), 447-454.