



EL TIEMPO TÉRMICO EN LA DINÁMICA DEL INDICE DE ÁREA FOLIAR EN EL CULTIVO DE COLIFLOR (*Brassica Oleracea* var. *Botrytis*)

Gabriel Alonso-Sebastian¹; Antonio Martinez-Ruiz^{2*}; Joel Pineda-Pineda³; Agustín Ruiz-García⁴

amartinezr8393@gmail.com.mx – 5951070923 (*Autor de correspondencia)

¹Licenciatura en Agronomía en Horticultura Protegida, ³Departamento de Suelos, ⁴Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5 Carretera México-Texcoco, ^{2*}Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), CIRGCO- Sitio Experimental Tecamachalco, Puebla.

Resumen

La coliflor es una planta bianual perteneciente a la Familia de las Crucíferas, género *Brassica*, especie (*Brassica oleracea* var. *Botrytis*) de la que se aprovecha la inflorescencia de color blanco, denominada pella, que se forma en la base del tallo de la planta. A nivel nacional se establecen al año unas 2,500 ha con un rendimiento promedio de 19 t/ha. Los principales estados productores en México son: Hidalgo, Guanajuato y Aguascalientes. En la presente investigación se modeló el índice de área foliar (IAF) del cultivo de la coliflor, aplicando el concepto tiempo térmico, que se obtuvo a partir de las temperaturas umbrales y óptimas mediante una función beta, para después correlacionarla con el IAF mediante una función de crecimiento. El diseño experimental fue un diseño en parcelas divididas donde las parcelas grandes correspondieron a 4 dosis de fertilización y las parcelas pequeñas a tres densidades de plantación y 4 repeticiones. El índice de área foliar (LAI) se midió sobre una superficie plana, mediante fotografías de las hojas tomadas por un dispositivo móvil y analizándolos con el software (Image J) cada fotografía se escaló con una línea de referencia de 5 cm. Para la calibración se emplearon datos correspondientes a una densidad alta (30,000 plantas/ha), encontrándose los siguientes estadísticos de ajustes: sesgo (0.0047), RMSE (0.1152 m² m⁻²), y EF (0.994). En la validación se emplearon datos recabados en una densidad baja (26,000 plantas/ha) y se encontraron los siguientes estadísticos de ajuste: BIAS (-0.3541), RMSE (0.6774 m² m⁻²) y EF (0.8358).

Palabras claves: Expansión foliar, unidades calor, GDD



Introducción

La coliflor es una planta bianual perteneciente a la familia de las crucíferas, género *Brassica*, especie *Brassica oleracea L.*, var *botrytis*, de la que se aprovecha la inflorescencia de color predominantemente blanco, denominada pella, que se forma en la base del tallo de la planta (Fernández de Sousa & García González de Lena, 2016). A nivel nacional se establecen al año unas 2,500 ha con un rendimiento promedio de 19 t/ha.

Los principales estados productores en México son: Hidalgo, Guanajuato y Aguascalientes (Zamora, 2016). La temperatura es una de las principales fuerzas impulsoras para el crecimiento y el desarrollo de los cultivos y varios estados fenológicos se manifiestan a través de su desarrollo (Salazar Gutierrez, 2006; Salazar-Gutierrez & Chaves Cordoba, 2013). Las plantas de coliflor requieren condiciones ambientales más específicas que otros tipos de coles; su cultivo en un medioambiente inadecuado requiere modificaciones del clima para alcanzar los requerimientos de las diferentes etapas de crecimiento de la planta (Elahi et al., 2015).

Considerando que las hojas son las responsables de interceptar la radiación, se ha encontrado una relación entre la intensidad relativa de luz e índice de área foliar acumulado, teniéndose que la luz se extingue exponencialmente en función del incremento del área foliar (Alberto et al., 2008).

Uno de los métodos más ampliamente utilizado es la acumulación de temperatura media diaria por encima de una temperatura base (T_b), conocido como tiempo térmico, grados-día de crecimiento o desarrollo (GDC), unidades de calor (Ángel López et al., 2010; Ruiz Corral et al., 2002). o tiempo fisiológico, y se define como la cantidad de grados día necesarios para finalizar un determinado proceso de desarrollo o fase fenológica (Trudgill et al., 2005). Se han desarrollado modelos agroclimáticos que relacionan las diferentes fases fenológicas con el tiempo térmico o tiempo fisiológico de la planta (Parra Coronado et al., 2015). El objetivo del presente trabajo fue calibrar y validar un modelo matemático que permita estimar la dinámica de IAF con base en el tiempo térmico para dos densidades de cultivo de coliflor.

Materiales y Métodos

Ubicación del experimento

El sitio experimental se ubicó en la localidad de Xochimilco perteneciente al municipio de Tecamachalco en el estado de Puebla, con coordenadas $18^{\circ} 50' 34.7''$ de latitud Norte y $97^{\circ} 44' 40.4''$ de longitud Oeste. Se estableció un cultivo de coliflor (*Brassica Oleracea L.*) a cielo abierto en el terreno de un productor cooperante de la localidad antes mencionado. Con ayuda de maquinaria agrícola e implementos se realizó el barbecho, y se dieron dos pasos de rastreo y posteriormente se surcó el terreno y se continuó con la formación de



las camas de cultivo, los cuales tuvieron una separación entre camas de 0.9 m y longitudes de aproximadamente 100 m. Las características de la cintilla de riego utilizados fueron los siguientes 16 mm ID, calibre 6 mil, espaciado de 10 cm, 1 lph @ 0.55 BAR, longitud de 3,050 metros de la marca Rivulis®. La cintilla se colocó solamente en una sola hilera y sujetadas con estacas de madera al final de cada cama de cultivo.

Diseño del experimento

La parcela experimental consistió en una longitud de cien metros de largo, por veinticinco metros de ancho, el experimento abordó cuatro tratamientos, con distintas dosis de fertilización (F1, F2, F3, F4). Posteriormente la unidad experimental se dividió en cuatro partes, a cada una de estas partes se denominó “repetición” por lo que hubo cuatro repeticiones (R1, R2, R3, R4). Cada repetición de igual manera se dividirá en doce partes, a los cuales se les denominó “densidades” estos tuvieron una longitud de 8 metros de largo por 5.4 metros de ancho, se consideraron tres densidades: D1= 25,000 plantas/ha (43 cm separación entre plantas), D2= 28,000 plantas/ha (40 cm), D3= 30,000 plantas/ha (37 cm), de manera horizontal se representaron las densidades, y de forma vertical los tratamientos (F1,F2,F3,F4), obteniéndose las siguientes combinaciones: (F1xD1, F1xD2, F1xD3), (F2xD1, F2xD2, F2xD3), (F3xD1,F3xD2, F3xD3) y (F4xD1,F4xD2, F4xD3), con 4 repeticiones, cada unidad experimental tuvo un ancho de 5.4 m y 8 m de longitud (área de 43.2 m²). De estas combinaciones solo se consideró para modelar el índice de área foliar las combinaciones (F3xD1 y F3D3), consistente en una dosis de fertilización media alta y densidades baja y alta. La aplicación de la fertilización se realizó de manera fraccionada en tres aplicaciones: de fondo (33.3%), al mes de trasplante (33.3%) y al mes y medio (33.3%).

Medición de variables

Variables de cultivo

El índice de área foliar (IAF) se midió en gabinete y se utilizó una superficie plana en la cual se marcó una línea de referencia de cinco centímetros que posteriormente sirvió de apoyo para el escalamiento de las imágenes mismo que se aplicó a cada fotografía de las hojas empleando el software (Image J). Cada planta tuvo que ser desojada cuidadosamente. Estas hojas se colocaron sobre una superficie plana, de una manera estratégica, de tal forma de cubrir el área expuesta de cada hoja por cada fotografía tomada, así como con su respectiva etiqueta de identificación. Para tal efecto se instaló una base vertical (trípode) que fue útil para sostener la cámara para la captura de las imágenes.

Medición de la temperatura

Durante el ciclo de cultivo se instaló una estación climática marca HOBO (HOBO Onset Bourne, Massachusetts, EUA) en el que se registró la temperatura de aire, mediante la utilización de un sensor modelo STM-B-M008 (HOBO, Onset), estos se midieron cada minuto y se promedió a nivel horario.

Simulación del índice de área foliar (LAI)

Para simular esta variable se realizó una modificación a las funciones que en un principio utilizaba el modelo HORTSYST (Martinez-Ruiz 2019 y 2021), con la finalidad que pudiera extenderse a cultivos a campo a cielo abierto, como en el caso del cultivo que se analiza. Esta variable se obtuvo multiplicando el TT ($^{\circ}\text{C d}$), obtenido con una ecuación de Gompertz, por la densidad de plantación (d). Para ello, se calculó el tiempo térmico (TT , $^{\circ}\text{C}$), aplicando la función beta (Zhou & Wang, 2018), definido como la relación entre la tasa de crecimiento y las condiciones de la temperatura real, óptima y temperatura base. Como se describe a continuación.

$$LAI_{j+1} = LA_j * d \quad \text{Ec (1)}$$

con

$$LA_j = p5 * \exp\left(-\exp\left(p6 - (p7 * TT_{j+1})\right)\right) \quad \text{Ec (2)}$$

$$TT_{i+1} = \begin{cases} 0; & T_{a,i+1} < T_b \\ \frac{(T_{a,i+1}-T_b)}{(T_o-T_b)} \frac{(T_u-T_{a,i+1})}{(T_u-T_o)} \frac{(T_u-T_o)}{(T_u-T_b)} (T_o - T_b); & T_b \leq T_{a,i+1} \leq T_u \\ 0; & T_u < T_{a,i+1} \end{cases} \quad \text{Ec (3)}$$

$$TT_{j+1} = [\sum_{i=1}^{24} TT_{i+1}]/24 \quad \text{Ec (4)}$$

donde, LA_j es el área foliar en el día j -ésimo, TT_{i+1} y TT_{j+1} representa tiempo térmico en la hora $i + 1$ y del día $j + 1$ siguiente, LAI_{j+1} es el índice de área foliar del día siguiente, d es la densidad de plantación, $T_{a,i+1}$, T_b , T_o , T_u es la temperatura del aire en la hora siguiente, temperatura base ($T_b=10^{\circ}\text{C}$), temperatura óptima inferior y temperatura óptima superior, respectivamente. Los parámetros $p5$, $p6$ y $p7$ se estimaron durante la calibración, aplicando el método de mínimos cuadrados no lineales.

Este modelo para predecir el índice de área foliar se calibro con una densidad alta de 30,000 plantas/ha y se validó para una densidad de 26,000 plantas/ha.



Resultados y Discusión

La figura 1 muestra la temperatura del aire promedio diario durante el ciclo de cultivo de coliflor, se observa una temperatura mínima a los 5 días después del trasplante de 12 °C que corresponde al mes de febrero, así como una temperatura máxima de 25 °C para el mes de mayo y una temperatura promedio de 18 °C. El descenso de temperatura de 12 °C que se registró es debido a que el mes de febrero pertenece a la estación de invierno, por lo tanto, los días son susceptibles a cambios bruscos de temperatura, de hecho, el invierno concluye a los 40 días después del trasplante y posterior a esos días se observó el incremento de temperatura con la entrada de la primavera.

La figura 2^a, muestra la calibración de IAF simulado respecto a IAF medido, se observa que la curva simulada tiene una tendencia precisa respecto a los valores medidos. Por otra parte, en la figura 2B se puede apreciar mediante la línea de 45° (línea 1:1) donde los puntos de los datos simulados se encuentran sobre esta línea por la precisión del proceso de calibración.

Para la validación del modelo se observa en la figura 2C que la curva simulada de LAI respecto a los puntos de IAF medido existe un sesgo aproximadamente a los 70 DDT y 85 DDT, esta anomalía se puede identificar claramente mediante la línea de 45°. En la figura 2D el IAF simulado dado por el modelo tiende a sobrestimar respecto a los medidos. El error sistemático que se observa de IAF medido puede ser una causa de un error de muestreo al momento de la selección de las plantas.

Para el modelo estudiado se encontraron los siguientes estadísticos de ajuste del modelo: En la calibración se encontraron un valor para el BIAS de 0.0047, RMSE (0.1152) y EF (0.994), y en la validación de: BIAS (-0.3541), RMSE (0.6774) y EF (0.8358). en la calibración el resultado cercano a cero para el indicador BIAS demuestra que no existe sesgo considerable y los valores pronosticados son precisos, contrario a la validación en la que se obtuvo un resultado negativo, el cual indica que el IAF está siendo sobreestimado por el modelo.

Para el indicador RMSE en la calibración resultó de un valor pequeño no así para la validación, no obstante, el valor de este estadístico es aceptable estadísticamente hablando ya que se encuentra por arriba del 80%. Por otro lado, el indicador EF tanto en la calibración como en la validación ambos resultaron en valores aceptables, lo que indica que la estimación de los parámetros se realizó con una excelente eficiencia computacional. Este hecho concuerda con lo que menciona Zhou & Wang, (2018) que los cálculos precisos de los grados de días de desarrollo (GDD) son importantes en los modelos que simulan el crecimiento de los cultivos y para la gestión de los cultivos de campo. Donde dichos autores encontraron que el uso de GDD mejoró enormemente la descripción y la predicción de eventos fenológicos en comparación con otros enfoques, como la época del año o el número de días, especialmente para describir la fenología de cultivos y la etapa de desarrollo.

Por otro lado, Ángel López et al. (2010) mencionan que los modelos fenológicos son herramientas diseñadas para conocer y predecir el desarrollo de las plantas y usaron el método de Euler para la simulación de nudos y el desarrollo fenológico de la planta través del tiempo térmico. Quienes encontraron un valor de RSME = 0,28. Trudgill et al. (2005) propusieron un modelo fenológico para la feijoa cv. Quimba, en el que se estima la temperatura base (T_b) para cuatro períodos fenológicos reproductivos diferentes y su duración en términos de GDC, para predecir las fechas de antesis, cuaje de fruto y cosecha. Además de relacionar el área foliar con el tiempo térmico otros autores como Kresnatita et al. (2020) encontraron que el área foliar está fuertemente relacionada con el peso seco de las plantas de coliflor ($R^2 = 96$ y 97%). Los valores de los parámetros encontrados durante el proceso de calibración fueron: $p_5 = 3$, $p_6 = 2.2112$ y $p_7 = 0.0025$.

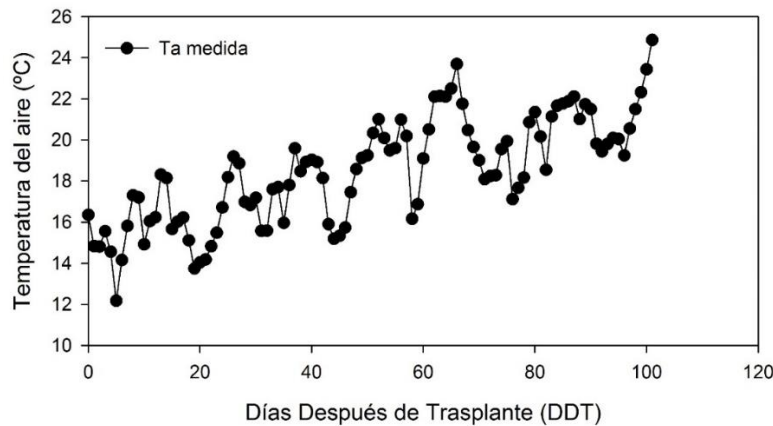


Figura 1. Temperatura del aire promedio del sitio experimental Xochimilco, Puebla.

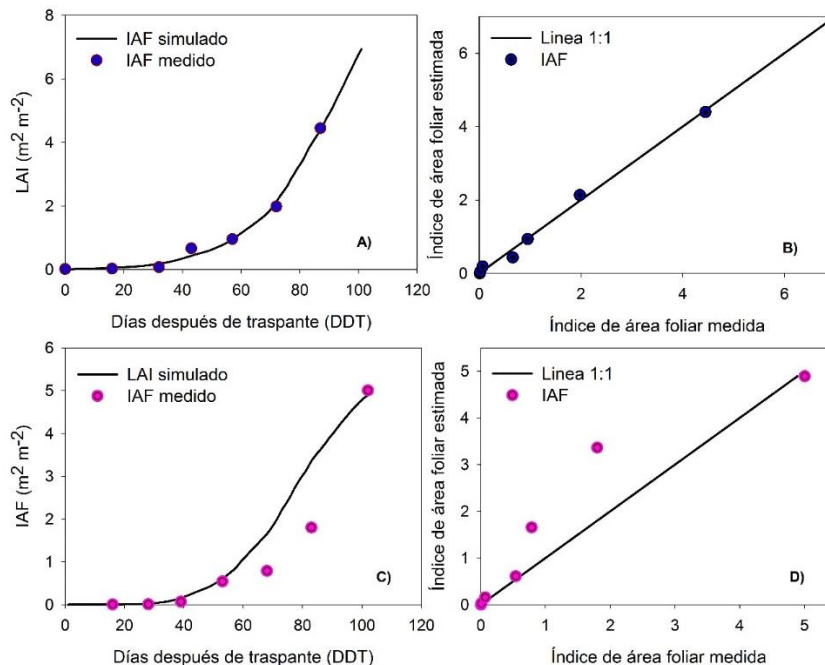


Figura 2. Simulación del índice de área foliar del cultivo de coliflor A) calibración, C) validación, B y D) línea 1:1



Conclusiones

La calibración y validación del modelo matemático presenta un buen ajuste para las condiciones de estudio, aunque se recomienda su evaluación en otras localidades con diferentes condiciones medioambientales. Por último, es importante asegurarse en cada muestreo que las plantas seleccionadas sean representativas de todo el campo, de lo contrario, el ajuste del modelo puede no ser el esperado para su aplicación para condiciones más generales. El tiempo térmico para dar seguimiento a los cambios de etapas fenológicas, es un concepto bastante preciso y aceptable su robustez.

Referencias Bibliográficas

- Alberto, C., Alfaro, T., Ramírez Fonseca, A., Farías, E. V., & Corral, A. R. (2008). Arreglo espacial de híbridos de maíz, índice de área foliar y rendimiento * stand arrangement of maize hybrids, leaf area index and seed yield. In *Agricultura Técnica en México* (Vol. 34).
- Ángel López, M. M., Chaves, B., Julio Flórez, V. R., & Ruth Salazar, M. (2010). Modelo de aparición de nudos en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Delphi cultivado en sustratos. *Agronomía Colombiana*, 28(1), 47–54.
- Elahi, E., Wali, A., Ayub, G., Ahmed, S., Huma, Z., Ahmed, N., & Ehsan Elahi, C. (2015). Response of cauliflower (*Brassica oleracea* L. botrytis) cultivars to phosphorus levels. *Pure Appl. Biol*, 4(2), 187–194.
- Fernández de Sousa, M., & García González de Lena, G. (2016). *Cultivo de la coliflor*.
- Kresnatita, S., Ariffin, Hariyono, D., & Sitawati. (2020). A cauliflower-sweet corn intercropping system in high-temperature conditions. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 26(1), 15–27. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2019.09.014>.
- Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., Pineda-Pineda, J., & Prado-Hernández, J. V. (2019). HortSyst: A dynamic model to predict growth, nitrogen uptake, and transpiration of greenhouse tomatoes. *Chilean journal of agricultural research*, 79(1), 89-102.
- Martínez-Ruiz, A., Ruiz-García, A., Prado-Hernández, J. V., López-Cruz, I. L., Valencia-Islas, J. O., & Pineda-Pineda, J. (2021). Global sensitivity analysis and calibration by differential evolution algorithm of HORTSYST crop model for fertigation management. *Water*, 13(5), 610.
- Parra Coronado, A., Fischer, G., & Chaves Cordoba, B. (2015). Tiempo térmico para estados fenológicos reproductivos de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). *Acta Biologica Colombiana*, 20(1), 153–162. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n1.42756>.



- Ruiz Corral, M., López, F., Díaz, R., & Eguiarte, G. (2002). Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz h-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia*, 36, 569–577. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236508>.
- Salazar Gutierrez, M. R. (2006). *Un modelo simple de producción potencial de uchuva (Physalis peruviana L.)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Salazar-Gutierrez, M. R., & Chaves Cordoba, B. (2013). Relationship of base temperature to development of winter wheat. In *Article in International Journal of Plant Production*. <https://www.researchgate.net/publication/256252017>.
- Trudgill, D., Honek, A., Li, D., & van Straalen, N. (2005). Thermal time - concepts and utility. *Annals of Applied Biology*. *Ann Appl Biol*, 146(1), 1–14.
- Zamora, E. (2016). *El cultivo de la coliflor*.
- Zhou, G., & Wang, Q. (2018). A new nonlinear method for calculating growing degree days. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28392-z>.