



ESTIMACION DEL ÍNDICE DEL ÁREA FOLIAR APARTIR DEL PORCENTAJE DE COBERTURA EN EL CULTIVO DE BRÓCOLI (*Brassica Oleracea* var. *italica*)

María Luisa Ramírez-Flores¹; Antonio Martínez-Ruiz^{2*}; Jorge Víctor Prado-Hernández³,
Cándido Mendoza-Pérez⁴

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

¹Licenciatura en Agronomía en Horticultura Protegida, ³Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5 Carretera México-Texcoco, C.P. 56230 ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), CIRGCO- Sitio Experimental Tecamachalco, Puebla, C.P. 75486, ⁴Colegio de Postgraduados, Hidrociencias, Campus Montecillo, Texcoco-Estado de México, C.P.56230.

Resumen

EL índice de área foliar (IAF) es una de las variables agronómicas difíciles de determinar en particular en cultivos pertenecientes a la familia de las brassicaceae, por el hábito de crecimiento arrosado que presenta. Por lo que en esta investigación se enfocó en determinar el IAF considerando la cobertura del cultivo. El IAF de las plantas se midió mediante fotografías tomados con un dispositivo móvil, en hojas colocadas sobre una superficie plana y posteriormente las imágenes se escalan con una marca de 5 cm, para después cuantificar el área de cada hoja con el programa Image J. Para obtener el porcentaje de cobertura en campo se construyó un marco de 1 m², mismo que se colocó sobre la cama de cultivo y se tomaron fotografías a una altura de 2 m. Posteriormente se determinó el porcentaje del espacio dentro del marco ocupado por el follaje. Se buscaron curvas que mejor representaran la correlación entre el porcentaje de cobertura (PC) y el IAF utilizando el software Curve Expert 1.4. Los resultados indicaron que el modelo de crecimiento cuyas predicciones del IAF fueron más aceptable fue la función Gompertz, con un error estándar (S= 0.2466) y coeficiente de correlación (r = 0.9816), y para la validación se encontraron los siguientes resultados: R² = 0.9697, RMSE = 0.37 m² m⁻², sesgo = 0.079, EF = 0.97. Con esto queda claro que es posible predecir el IAF en campo a partir de la cobertura del follaje del cultivo.

Palabras claves: Modelado de cultivo, BIAS, eficiencia de modelado



Introducción

El brócoli es una planta anual, difieren principalmente de las coliflores, en que rematan sus tallos principales en una masa globulosa de yemas hipertrofiadas, lateralmente en las axilas de las hojas, pueden desarrollar brotes hipertrofiados de yemas florales, de tamaño menor que el de la cabeza principal. Perteneciente al grupo de las dicotiledóneas y a la familia *cruciferae*, (*Brassica oleracea var. Itálica*) (Toledo H., 2003).

En México la superficie cultivada es de 32,755 ha, teniendo un rendimiento promedio de 18 t/ha, cuyo principal estado productor es Guanajuato (SADER,2020). El área foliar es una variable importante en la mayoría de los estudios agrícolas y fisiológicos involucrados en el crecimiento vegetal, captación de luz, eficiencia fotosintética, respiración, transpiración y respuesta al riego y a la fertilización (Blanco & Folegatti, 2005).

Se realiza generalmente mediante métodos directos, en los cuales las hojas tomadas de las plantas en los experimentos, se analizan con la ayuda de un medidor de área electrónico integrado. Éste, además de ser un método destructivo, se restringe a la disponibilidad del equipo. Los métodos indirectos son de gran utilidad cuando no se dispone de equipos especializados, cuando se necesita realizar mediciones no destructivas o para llevar a cabo estudios con especies vegetales nativas, que crecen lejos de centros de investigación o universidades que poseen los equipos necesarios (Blanco & Folegatti, 2005). Sin embargo, estos son muy caros y complejos para estudios básicos y sencillos. Por el contrario, la estimación no destructiva del área foliar es simple y ahorra tiempo en comparación con los métodos anteriores (Abajingin & Ajayi, 2015).

Como una variante a método destructivo, el modelo de estimación del área foliar tiene como objetivo predecir el área foliar de forma no destructiva, puede proporcionar a los investigadores muchas ventajas en los experimentos agrícolas. Permite a los investigadores realizar mediciones del área foliar en las mismas plantas a lo largo del estudio, y esto da como resultado una variabilidad experimental reducida (Abajingin & Ajayi, 2015). El objetivo del presente trabajo fue calibrar y validar un modelo matemático que permita estimar la dinámica de IAF con base en el porcentaje de cobertura para dos densidades de cultivo brócoli.

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° 50` 34.7" de latitud Norte y 97° 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 a utilizar fueron los siguientes 16 mm ID, calibre 6 mil, espaciamiento de 10 cm, 1 lph @ 0.55 BAR, longitud de 3,050 metros de la marca Rivulis®. Una 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 dividió 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.

Con base en la información recabada en la literatura con relación a la extracción nutrimental de N, P, K, Ca y Mg del cultivo de brócoli, se realizó el cálculo de requerimiento nutricional para los distintos tratamientos, para cada tratamiento se considerará un aumento en porcentaje del incremento esperado del rendimiento sobre de la dosis de fertilización F1 (testigo: estimado a partir del rendimiento promedio de la zona), F2 (20%), F3 (40%) y F4 (60%).

Las fuentes de fertilizantes que se utilizaron fueron las siguientes: nitrato de calcio, DAP (fosfato diamónico), urea, sulfato de magnesio y cloruro de potasio. 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 (ÍÁF) 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. El porcentaje de cobertura en campo; consistió en colocar un marco de madera de 1 m², sobre las camas de cultivo de los surcos centrales y al cual se le tomara una fotografía con ayuda de un dispositivo móvil.

Estimación del índice de área foliar (ÍAF)

Con la información obtenida para las variables de PC e ÍAF, en el software Curve Expert 1.4 se buscaron curvas de crecimiento con respecto a la correlación de estas dos variables, siendo más aceptable la función de Gompertz (ecuación 1):

$$IAF = a * \exp(-\exp(b - c * PC)) \quad (1)$$

Donde IAF es el índice de área foliar de cultivo, a , b , c , son los valores de los parámetros obtenidos a partir de la calibración mediante la estimación de parámetros por método de mínimos cuadrados no lineales.

En este modelo para predecir el índice de área foliar se calibró con una densidad alta de 60,000 plantas por ha y se validó para una densidad de 50,000 plantas por ha.

Resultados y Discusión

Al sustituir los valores en la ecuación 1 y realizar los gráficos, la figura 1A) ilustra las simulaciones de PC e ÍAF con el modelo Gompertz, las cuales siguieron una tendencia a los valores medidos. Se observa cómo se correlacionan con alta precisión el ÍAF y PC medidos, a pesar de que en los últimos dos muestreos estén un poco más dispersos, las primeras predicciones son cercanos a los valores reportados en los muestreos, resultando valores de los ajustes estadísticos siguientes: coeficiente de correlación de $r=0.9816$ y un error estándar $S=0.2466$.

En la figura 1 C) compara los valores medidos y predichos por el modelo durante el ciclo del cultivo, observando que el ajuste de datos fue satisfactorio en la mayoría de toma de muestras. El error observado pudo haber sido ocasionado en los muestreos realizados, a la hora de la selección de plantas. En la figura 1 B) y D) se muestran gráficos 1:1 (línea de 45°), los valores simulados por el modelo calibrado y los medidos, deben estar lo más cercano a la línea para juzgar que la calidad predictiva del modelo seleccionado es

precisa además que este gráfico permite. Además, apreciar en que muestreos se cometieron más errores. De a calibración se obtuvieron los siguientes valores de los parámetros: $a = 3.7622$, $b = 1.6010$, $c = 0.0256$, al respecto Farahani et al, (2009) mencionan que la calibración de un modelo es ante todo para garantizar una predicción sólida de la cobertura del dosel. Los resultados de este estudio proporcionan un conjunto de primeras estimaciones para estos parámetros difíciles de determinar para pruebas adicionales y uso del modelo en otros lugares, rendimiento a un modelo.

De acuerdo con los estadísticos evaluados durante la validación del modelo resultaron lo siguiente: Sesgo con un valor de 0.079, RMSE de $0.37 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ y EF de 0.97. El valor positivo del sesgo de las simulaciones del modelo fue un valor positivo cercano a cero lo que demuestra que no existe sesgo considerable y que los valores pronosticados son precisos. Para el RMSE resultó con un valor bajo, el valor arrojado es aceptable estadísticamente hablando ya que se acerca a cero queriendo decir que no hay gran diferencia entre los datos observados y los predichos. Para saber que tan eficiente es el modelo que se utilizó, se ocupa la variable de EF que resulto en un valor excelente.

De la Casa et al, (2011) mencionan que la estimación de \hat{IAF} en papa a partir de datos de la cobertura del cultivo (f) mostró ser un método adecuado, con la ventaja que supone emplear sólo fotografías digitales para su aplicación. Mientras las estimaciones de IAF que se obtienen al invertir la Ley de Beer a partir de t y ki son muy similares a las lecturas que produce el interceptómetro. Otro de los métodos aplicados para estimar el IAF es el tiempo térmico el cual puedes complementar a este análisis como lo menciona (Ángel López et al. 2010) estos resultados es información valiosa cuando se deseen usar el modelo AquaCrop para modelar el IAF. Nielsen et al., (2012) mencionan que las relaciones pueden ser reescritas de tal manera que IAF es una función de CC para que LAI pueda ser estimado de forma rápida y económica a partir de fotografías digitales de CC con una cámara digital de bajo costo.

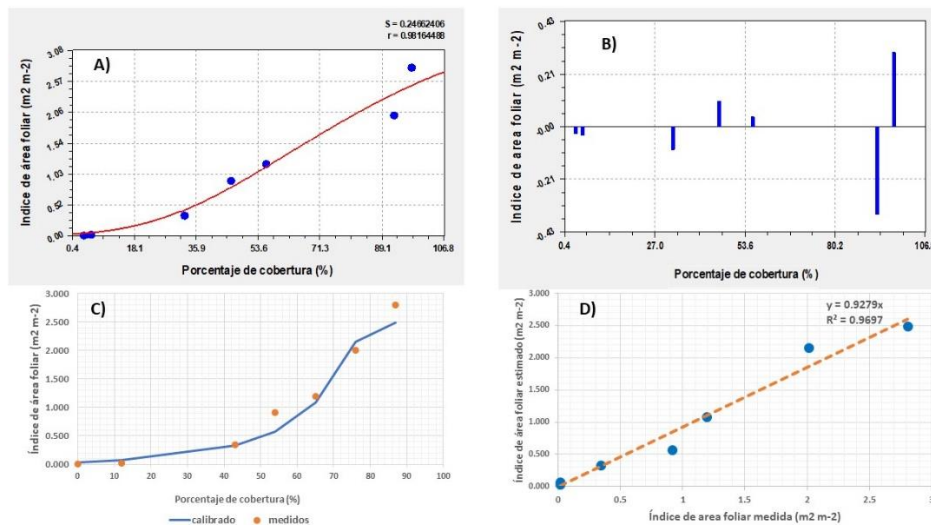


Figura 1. Simulación del índice de área foliar del cultivo de Brócoli A) calibración, C) validación, B y D) línea 1:1



Conclusiones

En general el IAF es la variable más complicada de predecir ya que para llegar a un resultado el proceso es muy laborioso y destructivo. Por eso un modelo es más fácil para predecir dicha variable, pero para llegar a datos confiables el modelo debe pasar por un proceso de calibración y la validación. El modelo utilizado en este trabajo resultó ser muy eficaz en el caso de la correlación del IAF y PC. Pero para llegar a una eficiencia alta en todo trabajo se debe de cerciorar que la toma de datos en campo sea confiable para disminuir el error.

Referencias Bibliográficas

- Abajingín, D. D., & Ajayi, N. O. (2015). *Non-destructive Method for Estimation of Leaf Area of Clerodendrum Volubile , a West African Non-conventional Vegetable*. 3(2), 38–42. <https://doi.org/10.12691/plant-3-2-3>.
- Blanco, F. F., & Folegatti, M. V. (2005). Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. *International Water and Irrigation*, 25(4), 34–37. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162005000400001>.
- De la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., & Rodríguez, A. (2011). Eficiencia en el uso de la radiación en papa estimada a partir de la cobertura del follaje. *AgriScientia*, 28(1), 21–30. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v28.n1.2777>.
- Farahani, H. J., Izzi, G., & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and evaluation of the aquacrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101(3), 469–476. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0182s>.
- Nielsen, D. C., Miceli-García, J. J., & Lyon, D. J. (2012). Canopy cover and leaf area index relationships for wheat, triticale, and corn. *Agronomy Journal*, 104(6), 1569–1573. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0107n>.
- Sinclair, T. R., & Seligman, N. G. (1996). Crop Modeling: From Infancy to Maturity. *Agronomy Journal*, 698–704.
- Toledo H., J. (2003). Cultivo del brócoli. In *Instituto Nacional de Investigación Agraria* (Vol. 1).