



RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR Y EL NDVI PARA MAÍZ

**Mariana de Jesús Marcial^{1*}; Sergio Iván Jiménez Jiménez¹; Ernesto Sifuentes Ibarra²;
Jaime Macías Cervantes²; Ignacio Sánchez Cohen¹**

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta- Atmósfera (CENID RASPA)-INIFAP, Km. 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento, Gómez Palacio, C.P. 35079, Durango, México.

marcial.marianadejesus@inifap.gob.mx – 7772664423 (*Autor correspondencia)

²Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera México-Nogales Km. 1609, Juan José Ríos, C.P. 81110, Sinaloa, México.

Resumen

El índice de área foliar (IAF) es una variable fundamental en la evaluación del desarrollo y crecimiento de cultivos; además es una variable biofísica ampliamente utilizada en la investigación forestal y agrícola. En grandes zonas agrícolas la determinación espacial del IAF se realizan mediante datos de los sensores remotos con imágenes satelitales. El estudio tiene como finalidad presentar la relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido de las imágenes satelitales Sentinel 2 y el IAF medido en el sitio durante el desarrollo del cultivo de maíz. En análisis se realizó en 12 lotes con un área total de 2 ha; los valores de NDVI se obtuvieron con la herramienta VICAL (Global Calculator to Estimate Vegetation Indices for Agricultural Areas) y los valores del IAF se midieron *in situ* con un ceptómetro. Los resultados obtenidos muestran una fuerte relación exponencial entre el NDVI y el IAF con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.84 y un coeficiente de correlación (R) de 0.92. La relación NDVI-IAF se encuentran directamente relacionado con el desarrollo de la planta y permite estimar la variabilidad espacial y temporal del IAF.

Palabras claves: IAF, Sentinel-2, VICAL.



Introducción

La disponibilidad de información sobre el desarrollo de los cultivos durante la temporada de crecimiento puede ser importante para optimizar la producción de cultivos. El índice de área foliar (IAF), es la relación entre el área foliar y el área del suelo, reportada en metros cuadrados por metro cuadrado, es una característica biofísica de la vegetación comúnmente utilizada. El IAF se puede subdividir en componentes fotosintéticamente activos y fotosintéticamente inactivos. El IAF determina las tasas de transpiración, interceptación y absorción de la radiación solar por parte de la vegetación y es una variable importante en numerosos modelos de superficie terrestre (Oleson & Bonan, 2000; Van den Hurk et al., 2003).

El IAF es el índice que muestra el estado actual de desarrollo de los cultivos para el período concreto de vegetación señalando problemas presentes y puntos débiles en el manejo del cultivo. El IAF es uno de los índices más aplicados a la experimentación para la predicción del rendimiento de los cultivos y al balance hídrico en el sistema suelo-agua-atmosfera (Kiniry et al., 1996); también se utiliza en diferentes modelos matemáticos de simulación de procesos biofísicos cultivos, que tienen como objetivo ayudar al manejo agronómico adecuado del cultivo.

El IAF puede medirse directa o indirectamente mediante varios métodos (Gower et al., 1999; Bréda, 2003). Los métodos directos son los más precisos, pero presenta el inconveniente de ser destructivos, laboriosos y requieren alta inversión de tiempo para adquirir la información. Los métodos indirectos, son generalmente más rápido, modificables a la automatización y, por lo tanto, permiten adquirir un área de muestra más grande, sin embargo, es necesario la validación de los datos a partir de los métodos directos (Jonckheere et al., 2004). La distribución espacial y temporal del IAF se obtiene utilizando datos de los sensores remotos.

Actualmente, el método más utilizado para estimar la variabilidad espacial del IAF es a partir de los sensores remotos mediante índices de vegetación (IV) obtenidas de las imágenes satelitales o aéreas; los datos de sensores remotos son útiles para ajustar las propiedades de los cultivos y el suelo teniendo en cuenta las condiciones locales (Guérif & Duke, 2000). Los IV se transforman en IAF utilizando una relación estadística calibrada sobre medidas experimentales (Viña et al., 2011) o sobre simulaciones del modelo de transferencia radiactiva (Haboudane et al., 2004). La forma más sencilla y práctica es investigar las relaciones entre los valores del IAF y los IV por medio de modelos de regresión. El objetivo específico de este estudio es explorar la relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) derivado de las imágenes satelitales Sentinel 2 y el IAF para determinar una función de modelo de predicción y estimar el IAF del maíz.

Materiales y Métodos

Ubicación de la zona de estudio

El estudio se realizó durante el ciclo otoño-invierno (OI) 2020-2021 en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado frente a Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa a la altura del km 1609 de la carretera internacional México-Nogales, en la parte norte del Estado en las coordenadas 25° 48' 53" N y 109° 01' 32" O, dentro del Distrito de Riego 075 Río Fuerte. El CEVAF cuenta con suelo plano de textura arcillosa con humedad aprovechable (HA) de 0.16 cm³/cm³, pobre en materia orgánica y sin problemas de sales.

El híbrido de maíz se estableció el 23 de diciembre del 2020 en un terreno de 2 ha distribuidos en 12 lotes, con una densidad de siembra de 100,000 semilla/ha, con una separación entre surcos de 0.8 m con longitud de 100 m., manejado con el método de riego por gravedad tecnificado. Previo a la siembra se aplicó un riego de asiento por gravedad para uniformizar la humedad en la zona radical. Las láminas y volúmenes de riego se calcularon con la plataforma IRRIMODEL© del INIFAP; el manejo de plagas y enfermedades se hizo de acuerdo a recomendaciones de investigadores del CEVAF.

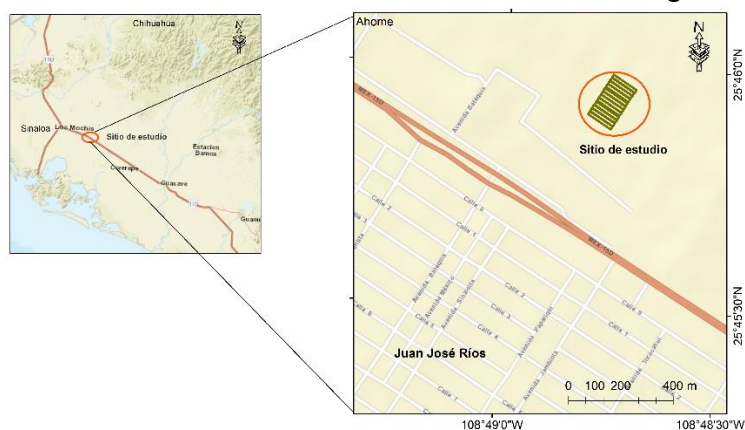


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Monitoreo del Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF) se midió con ceptómetro modelo AccuPAR modelo LP-80 de forma transversal, el cual consta de una barra de 80 cm de longitud con sensores de radiación fotosintéticamente activa (RFA) y un sensor de radiación independiente. El ceptómetro estima el IAF en función de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) que llega por encima (RFAa) y debajo del follaje (RFA_d) de la planta, mediante la siguiente relación propuesta por Campbell & Norman (2012):

$$IAF = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K} \right) f_b - 1 \right] \ln \left(\frac{RFA_d}{RFA_a} \right)}{A(1 - 0.47f_b)} \quad (1)$$

Donde, IAF en m^2/m^2 , K es el coeficiente de extinción de la planta obtenido de $K = 1/(2 \cos \nu)$, siendo ν el ángulo cenital, f_b es la fracción de la radiación directa con respecto a la radiación solar recibida y A es un coeficiente de absorción general del dosel igual a 0.86.

Las mediciones con el ceptómetro se realizaron en cada lote bajo condiciones de días despejados, entre las 11 y las 14 horas, de esta forma el factor f_b correspondió siempre a fracciones elevadas de radiación solar directa, lo que permitió obtener datos más homogéneos.

índice de vegetación

Los enfoques empíricos para estimar el IAF utilizan comúnmente los índices de vegetación que combinan la reflectancia en las longitudes de onda visible e infrarrojo cercano (NIR) como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). La reflectancia en la región visible ayuda a controlar el efecto de perturbación del suelo de fondo, mientras que la reflectancia en el NIR permite un amplio rango dinámico de detección (Pinty et al., 2009). El NDVI es el índice más utilizado en la literatura; sin embargo, es necesario considerar que el NDVI es sensible a la reflectancia del suelo y se satura a un LAI relativamente bajo.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

Los valores del NDVI para el periodo analizado se obtuvieron automáticamente dentro de la herramienta VICAL (Jiménez-Jiménez et al., 2022) que a su vez se encuentra soportada por la plataforma Google Earth Engine (GEE). Dentro de VICAL se digitalizaron los lotes y de los 23 índices de vegetación (IV) disponibles se seleccionó el NDVI calculado con imágenes Sentinel-2 (10 m de resolución). Los datos se obtuvieron desde la siembra (23 diciembre del 2020) hasta la madurez fisiológica (18 de junio del 2021).

La estimación de IAF consistió en desarrollar un modelo de regresión simple utilizando las mediciones IAF in situ (ceptómetro) y el NDVI derivado del Sentinel 2.

Resultados y Discusión

NDVI en el desarrollo del cultivo

Se obtuvieron 53 fechas con datos del NDVI de las cuales se consideraron 50, debido a que los datos obtenidos en 3 fechas solo mostraban una pequeña zona del área de estudio por la nubosidad presentada. Los datos de NDVI se obtuvieron y supervisaron desde la herramienta VICAL; además, con estos datos se generó la curva de desarrollo del NDVI (Figura 2); los valores promedio del NDVI en el área total fluctuaron entre 0.14 y 0.68, presentándose el valor máximo a los 106 días después de la siembra (DDS), con un mayor número de datos durante la floración.

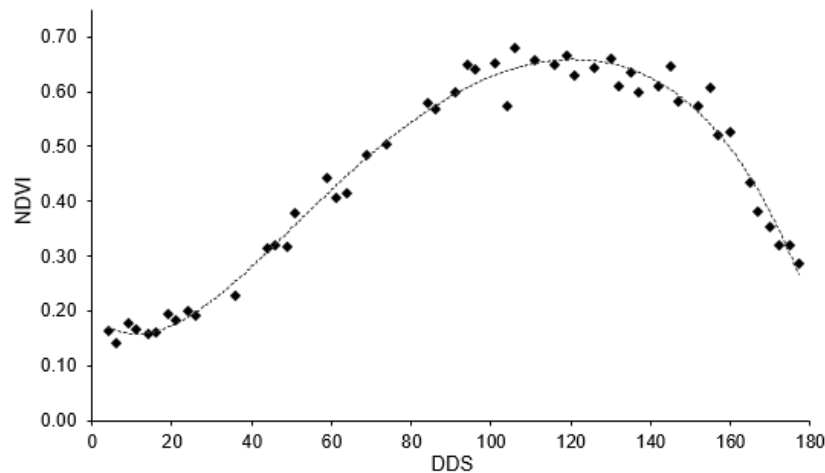


Figura 2. Curva del NDVI obtenido durante el desarrollo del cultivo.

Relación NDVI-IAF

El IAF y el NDVI se encuentran directamente relacionado con el desarrollo de la planta. Los resultados obtenidos muestran un valor máximo y mínimo promedio del IAF de 5.40 m²/m² y 0.60 m²/m², respectivamente; estos valores son considerados como el rango de aplicación de la relación NDVI-IAF. El NDVI mostró una fuerte relación exponencial con IAF con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.84 y un coeficiente de correlación (R) de 0.92 (figura 3). Estos coeficientes son mayores que los reportados por Báez-González et al. (2005) con un R^2 de 0.53 para imágenes satelitales Landsat-7 (30 m de resolución) y Soria-Ruiz et al. (2012) con un R^2 de 0.51 para imágenes SPOT 5 (10 m de resolución) en estudios realizados en el estado de Sinaloa.

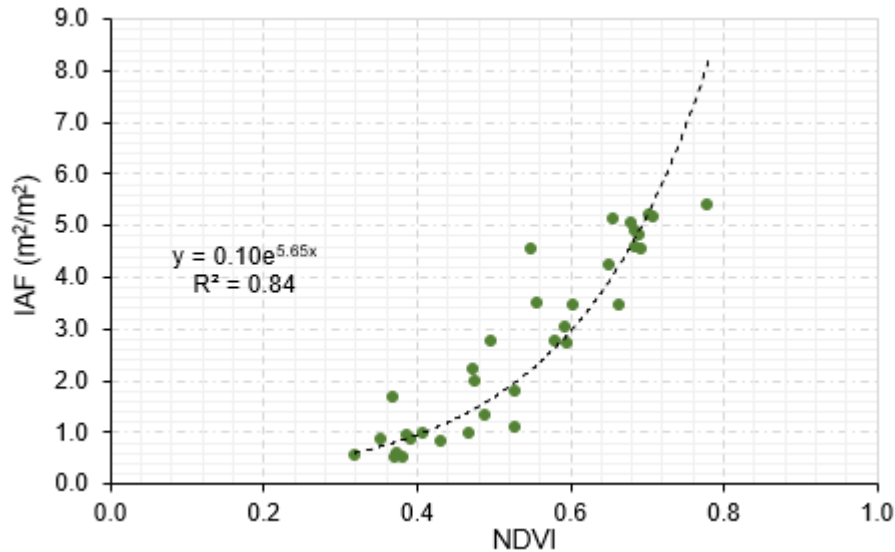


Figura 3. Relación del IAF-NDVI

Estimando el IAF con el modelo propuesto (NDVI-IAF) se presenta los valores desde la siembra hasta la madurez fisiológica del cultivo para uno de los lotes analizados, generado en la herramienta VICAL, como se observa en la figura 4. Tres de los datos del NDVI que se observan consideran una parte del lote debido a la nubosidad.

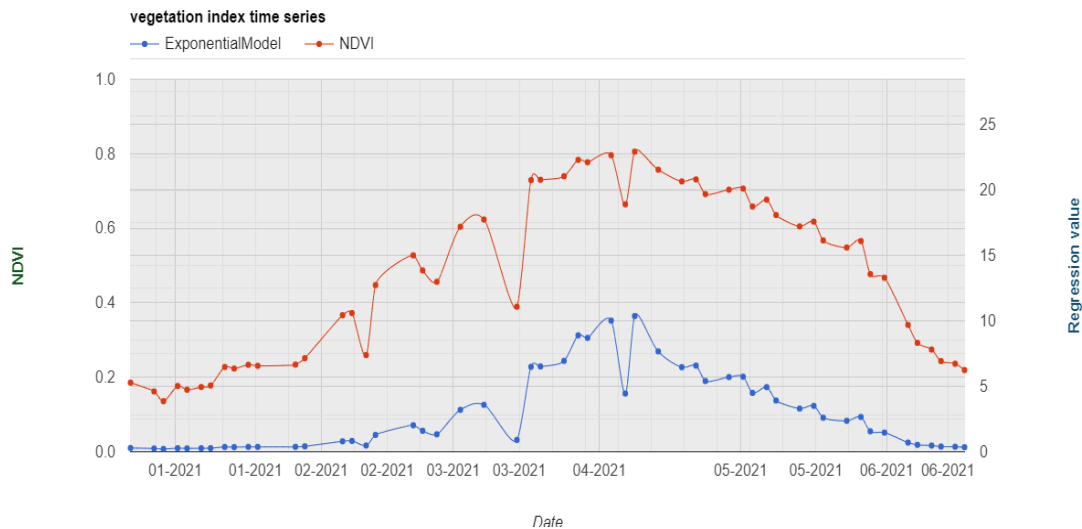


Figura 4. Valores estimados del IAF en un lote, extraído de VICAL.

Conclusiones

La alta correlación (R^2 de 0.84) entre el NDVI y IAF del cultivo de maíz, indica que se puede estimar el IAF a partir de los datos del NDVI obtenidos de las imágenes satelitales Sentinel 2 con variabilidad espacial y temporal; además, el ajuste de esta relación depende de los datos medidos del IAF, debido a que los datos del NDVI se obtienen



forma rápida y sencilla con la herramienta VICAL. Una limitación presentada en el estudio es la cantidad de datos medidos in situ en el ciclo agrícola analizado.

Referencias Bibliográficas

- Baez-Gonzalez, A. D., Kiniry, J. R., Maas, S. J., Tiscareno, M. L., Macias C, J., Mendoza, J. L., ... & Manjarrez, J. R. (2005). Large-area maize yield forecasting using leaf area index based yield model. *Agronomy Journal*, 97(2), 418-425.
- Bréda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2403-2417.
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (2012). *An introduction to environmental biophysics*. Springer Science & Business Media.
- Gower, S. T., Kucharik, C. J., & Norman, J. M. (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote sensing of environment*, 70(1), 29-51.
- Guérif, M., & Duke, C. L. (2000). Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 81(1), 57-69.
- Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90(3), 337-352.
- Jiménez-Jiménez, S. I., Marcial-Pablo, M. D. J., Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Inzunza-Ibarra, M. A., & Sánchez-Cohen, I. (2022). VICAL: Global Calculator to Estimate Vegetation Indices for Agricultural Areas with Landsat and Sentinel-2 Data. *Agronomy*, 12(7), 1518.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and forest meteorology*, 121(1-2), 19-35.
- Kiniry, J. R., Sanderson, M. A., Williams, J. R., Tischler, C. R., Hussey, M. A., Ocumpaugh, W. R., Read, J. C., Van Esbroeck, G., & Reed, R. L. (1996). Simulating AlaKimo switchgrass with the ALMANAC model. *Agronomy Journal*, 88(4), 602-606.



- Oleson, K. W., & Bonan, G. B. (2000). The effects of remotely sensed plant functional type and leaf area index on simulations of boreal forest surface fluxes by the NCAR land surface model. *Journal of Hydrometeorology*, 1(5), 431-446.
- Pinty, B., Lavergne, T., Widlowski, J. L., Gobron, N., & Verstraete, M. M. (2009). On the need to observe vegetation canopies in the near-infrared to estimate visible light absorption. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 10-23.
- Soria-Ruiz, J., Fernandes-Ordonez, Y., Quijano-Carranza, A., Macías-Cervantes, J., Saucedo, P., Gonzalez, D., & Quintana, J. (2012). Remote Sensing and Simulation Model for Crop Management. *Proceedings of the PIERS Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia*, 27-30.
- Van den Hurk, B. J., Viterbo, P., & Los, S. O. (2003). Impact of leaf area index seasonality on the annual land surface evaporation in a global circulation model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D6).
- Viña, A., Gitelson, A. A., Nguy-Robertson, A. L., & Peng, Y. (2011). Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3468-3478.