

## Relación Entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y el Crecimiento en Tomatillo, Repollo y Chile Habanero

### The Relationship Between Normalized Difference Vegetation Index and Growth of Tomatillo, Cabbage and Habanero Chili Pepper

Mendoza-Pérez Cándido<sup>1</sup>, Valle-Gough Raúl Enrique<sup>2</sup>, Samaniego-Gámez Blancka Yesenia<sup>2</sup>, Ruelas-Islas Jesús del Rosario<sup>3</sup>, Núñez-Ramírez Fidel<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo. 56230, Montecillo, México. <sup>2</sup>Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California (ICA-UABC), Carretera a Delta s/n Ejido Nuevo León, 21705, Mexicali, Baja California, México.

<sup>3</sup>Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte-UAS. Calle 16 y Av. Japaraquí, Juan José Ríos. 81110, Ahome, Sinaloa, México.

Autor para la correspondencia: Fidel Núñez Ramírez; [fidel.nunez@uabc.edu.mx](mailto:fidel.nunez@uabc.edu.mx)

#### Resumen

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI; por sus siglas en inglés) se utiliza en cultivos extensivos para identificar el verdor y área foliar que cubre el suelo, el que a su vez está relacionado con el rendimiento. Sin embargo, su uso en cultivos hortícolas es escaso. Se identificó la relación entre el NDVI y el crecimiento de tomatillo (*Physalis ixocarpa*), repollo (*Brassica oleracea* var. Capitata) y chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). En tomatillo se identificó una relación cuadrática y significativa entre los valores de NDVI y la biomasa ( $R^2 = 0.7072$ ,  $P < 0.001$ ). En repollo se obtuvo una relación lineal entre el NDVI y el área foliar y la biomasa seca ( $R^2 = 0.7617$ ,  $P < 0.001$ ;  $R^2 = 0.8854$ ,  $P < 0.001$ ). En chile habanero cultivado bajo malla sombra, se encontraron relaciones significativas entre el NDVI y el índice de crecimiento y la altura ( $R^2 = 0.5061$ ,  $P < 0.001$ ;  $R^2 = 0.5339$ ,  $P < 0.001$ ). Finalmente, en chile habanero cultivado a cielo abierto, la relación resultó cubica entre el NDVI y el índice de crecimiento ( $R^2 = 0.7187$ ,  $P < 0.001$ ). En conclusión, el NDVI es útil para estimar el crecimiento en los cultivos estudiados.

**Palabras clave:** *Brassica oleracea* var. Capitata, *Capsicum chinense* Jacq., greenseeker, *Physalis ixocarpa*.

#### Abstract

The normalized difference vegetation index (NDVI) is the most widely used index to identify the greenness and leaf area covering the ground for extensive crops, which in turn is related to yield. However, the use in horticultural crops is limited. In this study, relationships between NDVI and growth were identified for three horticultural crops: tomatillo [*Physalis ixocarpa*], cabbage (*Brassica oleracea* var. Capitata), and habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.]. Results showed that a quadratic and high significantly relationship between biomass and NDVI values, was identified for tomatillo ( $R^2 = 0.7072$ ,  $P < 0.001$ ). For cabbage, a linear relationship was obtained between leaf area and dry biomass versus NDVI ( $R^2 = 0.7617$ ,  $P < 0.001$ ;  $R^2 = 0.8854$ ,  $P < 0.001$ ). In habanero pepper cultivated under shade-net, the results showed a high and significantly relationships between growth index and plant height versus NDVI values ( $R^2 = 0.5061$ ,  $P < 0.001$ ;  $R^2 = 0.5339$ ,  $P < 0.001$ ). Finally, for habanero pepper grown under open field conditions, the relationship throughout all growth cycle, was cubic for the growth index and NDVI values ( $R^2 = 0.7187$ ,  $P < 0.001$ ). In conclusion, NDVI as a good tool to estimate the growth in the horticultural crops here evaluated.

**Key words:** *Brassica oleracea* var. Capitata, *Capsicum chinense* Jacq., greenseeker, *Physalis ixocarpa*.

DOI 10.46588/invurnus.v19i1.109

Recibido 11/04/2024

Aceptado 01/07/2024

Publicado 24/08/2024

## Introducción

La aplicación de las tecnologías de innovación como el uso de sensores remotos en el sector agrícola ha generado una gran relevancia, ya que, el uso de las imágenes satelitales de alta resolución ha servido para predecir sobre el comportamiento fenológico, requerimientos hídricos y nutrimentales de los cultivos agrícolas. Una de estas tecnologías es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), el cual involucra la fotogrametría realizada con cámaras de amplio espectro. El NDVI, es uno de los primeros productos analíticos de detección remota utilizados para simplificar las complejidades de las imágenes multispectrales. Actualmente es el índice más popular utilizado para evaluar la cobertura vegetal y el verdor de las plantas (Huang et al., 2021).

El NDVI tiene una amplia correlación entre los tipos de estrés y el estado de crecimiento de las plantas (Tenreiro et al., 2021). Este índice, se ha utilizado ampliamente en cultivos de extensivos como trigo (*Triticum aestivum*) (Santillano-Cázares, 2013), cebada (*Hordeum vulgare*) (Coelho et al., 2019), maíz (*Zea mays*) (Seo et al., 2019), sorgo (*Sorghum vulgare*) (Moges et al., 2007), algodón (*Gossypium hirsutum*) (Dalezios et al., 2001), arroz (*Oryza sativa*) (Son et al., 2014) entre otros. Así mismo, se ha empleado como predictor de estrés hídrico en los cultivos agrícolas (Zhao et al., 2016), en la nutrición mineral de los vegetales (Li et al., 2021), enfermedades (Kumar et al., 2016) y/o ataque de plagas (Elliott et al., 2015), entre otros.

Los valores de NDVI representan la condición de crecimiento de los cultivos. Esto incluye la asociación entre el crecimiento o desarrollo *versus* verdor complementado con la cobertura vegetal sobre la superficie del suelo (Govaerts et al., 2010). El NDVI es un índice no dimensional, y por lo tanto sus valores van de  $-1$  a  $+1$ . Los valores por debajo de  $0.1$ , indican cuerpos de agua o suelo desnudo, mientras que valores por encima de  $0.1$  indican cobertura vegetal con actividad fotosintética alta (Meneses-Tovar, 2011). Los valores de NDVI resultan del cálculo de las mediciones de la reflectancia de luz en los cultivos, en el rango de luz roja e infrarrojo cercano del espectro (Red y NIR, por sus siglas en inglés). La fórmula para obtenerlo es  $NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$ . Donde  $R_{NIR}$  es la reflectancia de la radiación NIR y  $R_{Red}$  es la reflectancia de la radiación del rojo visible.

Inicialmente, la medición del NDVI se ha realizado a través de imágenes satelitales. Para ellos se han aprovechado los valores de NDVI obtenidos de algunos sensores satelitales (Landsat y Sentinel 2) (Kowalski et al., 2020). Sin embargo, las fotografías satelitales tienen la desventaja en la resolución de las mismas por efecto de la altitud o condiciones climáticas (Fan and Liu, 2016). Por tal motivo, se han desarrollado sensores de uso manual y fácil para obtener con mayor precisión valores de NDVI. Así mismo, se han realizado comparaciones para validar la efectividad de cada uno de ellos obteniendo resultados muy prominentes (Gozdowski et al., 2020).

En cultivos extensivos la utilidad del NDVI ha sido documentada considerando la relación que existe entre las plantas y su cobertura foliar o estado fenológico (Gutierrez et al., 2012; de la Casa and Ovando, 2007). Sin embargo, estudios específicos sobre algunos cultivos hortícolas intensivos y de importancia económica, que relacionen el crecimiento con valores de NDVI son escasos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue identificar la relación entre el crecimiento y los valores de NDVI en tres cultivos comúnmente manejados en el valle de Mexicali, Baja California, México, como lo son tomatillo (*Physalis ixocarpa*), repollo (*Brassica oleracea* var. *capitata*) y chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Se consideró como



parámetros de crecimiento el área foliar, biomasa seca, altura, índices de crecimiento y, condiciones de ambiente de producción como cielo abierto y malla sombra.

## Materiales y métodos

En el cultivo de tomatillo, el estudio se llevó a cabo en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicado en el valle de Mexicali, B.C. (32°24'09" N, 115°11'45" O). El material vegetal fue la variedad Esmeralda (Semillas Harris Moran Mexicana S.A. de C.V.). La siembra de semilla se realizó el 16 de febrero de 2016; el trasplante de las plántulas se hizo en forma manual a los 25 días después de la siembra (dds). El trasplante se realizó sobre camas separadas a una distancia de 1.60 m. Se instalaron dos hileras de plántulas en cada cama separadas a 60 cm. La densidad de población fue de 3.3 plantas m<sup>2</sup>. El cultivo se fertilizó con una dosis de 250-85-100 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno, fósforo y potasio. Se utilizó un sistema de riego presurizado utilizando cintilla (Toro, Aqua-Traxx, San Nicolás de los Garza, N. L. México) con goteos separados cada 20 cm (Q=1 L h<sup>-1</sup>). Las plagas y malezas se controlaron en forma convencional.

Durante el ciclo de crecimiento (130 dds) y en forma secuencial se seleccionaron grupos de diez plantas y se les tomó nueve lecturas con el sensor GreenSeeker (Sunnyvale, CA, EUA). El sensor se colocó aproximadamente a 80 cm por encima de la cabeza de las plantas. Ese mismo grupo de plantas fueron recolectados para determinar la biomasa fresca. Posteriormente, las plantas fueron colocadas por 48 h una estufa de secado a aire forzado a una temperatura de 70° C, hasta obtener peso constante. Finalmente se midió su peso en una balanza digital de precisión (MCS-LV; Marquez, España).

Para el cultivo de repollo, el estudio se realizó en el mismo Campo Experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California. Se cultivó repollo de la variedad Charmant (Grupo Sakata México S.A. de C.V.). Se utilizaron plántulas de 45 días de edad, las cuales fueron producidas en charolas de poliestireno de 288 celdas. El trasplante se realizó el 29 de septiembre del 2016, sobre camas separadas a 1.60 m. Las camas contenían dos hileras de plantas. La densidad de población fue de 3.3 plantas m<sup>2</sup>. Se utilizó un sistema de riego por goteo con gasto de 0.5 L h<sup>-1</sup> de cada emisor. La fertilización del cultivo fue de 170 y 70 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno y fósforo respectivamente. Ambos fertilizantes se aplicaron a través del sistema de riego en forma fraccionada de acuerdo a la absorción de nutrientes propuesta por Welch et al. (1985).

Desde los 25 a los 68 días después del trasplante (ddt), se seleccionaron grupos de diez plantas y se tomaron diez lecturas de NDVI con el sensor GreenSeeker® (Trimble, Colorado, U.S.A.). Para la toma de esta variable, se siguió el mismo criterio realizado en el cultivo de tomatillo. Posteriormente, las plantas fueron cosechadas para determinar el área foliar, peso fresco y seco. El área foliar se determinó utilizando un medidor de área Licor-3100C (LI-COR Biosciences, Nebraska E.U.). Posteriormente, para obtener el peso seco, las muestras de las plantas se colocaron en bolsa de papel y se sometieron a un horno de secado a una temperatura de 70°C por 72 horas hasta obtener peso constante.

El estudio en el cultivo de chile habanero crecido bajo condiciones de malla sombra, se realizó durante el periodo del 15 de marzo al 30 de mayo de 2018, en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias de Mexicali, Baja California, México (32°32'29" N, 115°24'51" O). Se establecieron siete materiales genéticos de chile habanero dentro una casa de malla anti-



áfidos (Núñez-Ramírez et al., 2022). Las fluctuaciones de temperatura dentro de la malla sombra durante este experimento fueron de 20 °C (mínimo) y 46 °C (máximo), y la humedad relativa osciló entre 60 al 80%. El cultivo se estableció en camas de arena y se irrigaron con solución nutritiva (200-40-235-185-45 mg L<sup>-1</sup> de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio). La densidad de población fue de 3.3 plantas m<sup>2</sup>.

A los 62 ddt, a los siete materiales genéticos (10 plantas por material) se les tomó una lectura de NDVI con el sensor GreenSeeker. Se siguió el mismo criterio de medición realizado en el tomatillo. Así mismo, a cada una de las plantas se les midió la altura desde el suelo hasta el ápice de la planta. También se midió el índice de crecimiento de acuerdo al criterio de (Altland et al., 2003). Esta variable incluyó la siguiente fórmula: (altura + ancho de cobertura foliar [este a oeste] + ancho de cobertura foliar [norte a sur]) /3. Ambas determinaciones se realizaron con una cinta métrica.

Para el cultivo de chile habanero cultivado a cielo abierto, el estudio se realizó durante los meses de junio a octubre de 2016, en el Ejido San Jacinto en Ensenada Baja California, en el valle denominado el Agua Blanca (31°28'10.1" N; 116°09'38.5" O). Se establecieron tres materiales genéticos de chile habanero variedades Orange (Westar Ca. U.S.A.), Chichen Itza (Seminis Oxnard Ca. U.S.A.), y Helios (Lark seed, Oxnard Ca. U.S.A.), las cuales se distribuyeron bajo un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. El cultivo se estableció en surcos separados a 1.0 m. Se irrigó con riego presurizado utilizando cintilla (Netafim Co., Sinaloa, México) con goteos separados cada 20 cm (Q=0.6 L h<sup>-1</sup>). Se fertilizó con una dosis de 180, 50 y 90 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente. Las dosis totales fueron fraccionadas en forma semanal. El control de malezas y plagas se realizó de acuerdo con el manejo realizado por el productor.

A los 62, 84 y 105 ddt, a los tres materiales genéticos (20 plantas por material) se les tomaron lecturas de NDVI con el sensor GreenSeeker siguiendo el mismo criterio de medición que los cultivos anteriormente mencionados. Así mismo, a cada planta se le tomó medidas del índice de crecimiento (Altland et al., 2003). Inicialmente, la comparación entre el crecimiento y los valores de NDVI se realizó por fechas y después se agruparon para obtener un modelo dentro del tiempo.

### **Análisis comparativo**

En los tres cultivos estudiados se realizaron análisis de regresión para la validación del NDVI como medida de crecimiento. Se utilizó el modelo que mejor ajustó a la R<sup>2</sup>. La medida de crecimiento se colocó en el eje de las Y (dependiente), mientras que en el eje de las X se colocó los valores de NDVI (variable independiente). Para la realización de los modelos y el análisis de varianza, se utilizó el programa MINITAB 14 (Minitab 14; <https://www.minitab.com/es-mx/>), mientras que los gráficos resultantes se realizaron en hoja de cálculo Excel 2016 (Microsoft Office Professional Plus 2016).

## **Resultados y Discusión**

La Figura 1, muestra los resultados obtenidos a relacionar los valores de NDVI con la biomasa seca de plantas de tomatillo. En ella se observa que existe una relación positiva cuadrática entre ambos valores. La biomasa de las plantas de tomatillo estuvo en el orden de los 80 a los 900 g m<sup>2</sup>, mientras que los valores de NDVI estuvieron en el rango de 0.22 a 0.68. La ecuación que resultó del modelo obtenido fue del tipo cuadrática. El modelo de línea resultante agrupó los valores más pequeños de biomasa a los valores más



pequeños de NDVI. El grado de asociación entre ambos factores (biomasa *versus* NDVI) fue altamente significativa ( $P < 0.001$ ) y estuvo en el orden del 70 % ( $R^2 = 0.7072$ ).

Utilizar medidas de crecimiento en tomatillo es importante debido a que, a los primeros 28 después de establecido el cultivo, este parámetro se encuentra íntimamente relacionado con el rendimiento de fruta. Al respecto, Díaz-Pérez et al., (2005) realizaron muestreos de plantas de dos variedades de tomatillo y encontraron que por cada 1.0 g de peso seco que incrementó cada planta, el rendimiento de fruta se aumentó en 0.215 kg por planta. Además, encontraron que el peso seco se correlacionaba positivamente con el peso fresco de estas plantas. Con los resultados encontrados en el presente estudio, se podría estimar el crecimiento de las plantas de tomatillo de una forma más rápida y sin necesidad de realizar muestreos de crecimiento de tipo destructivo.

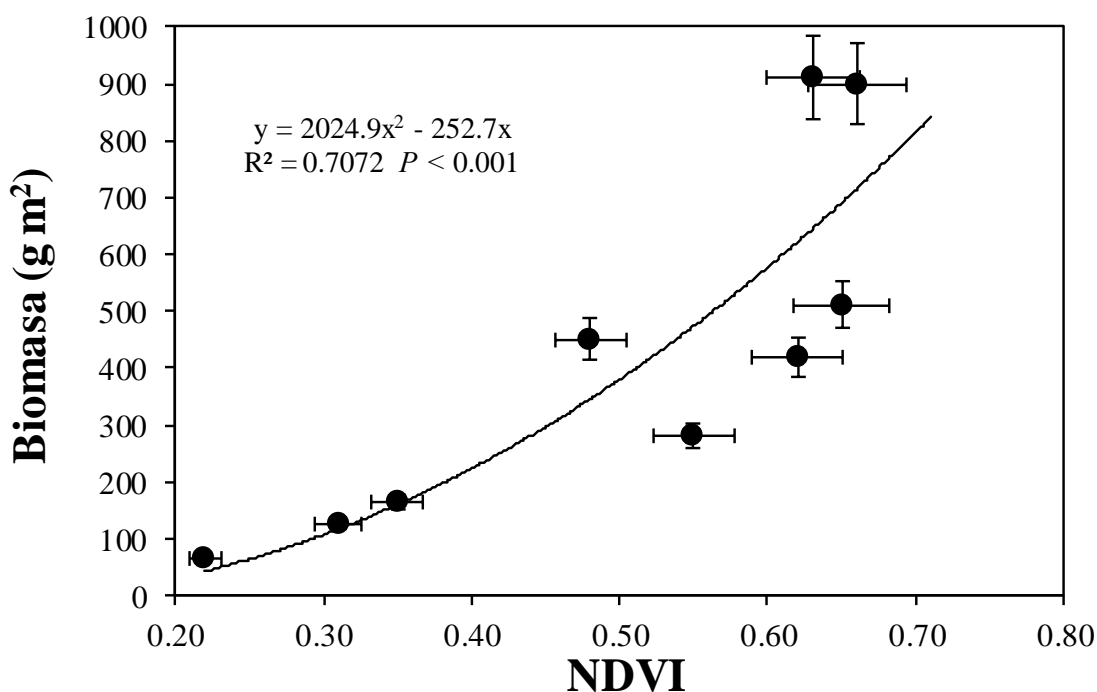


Figura 1. Relación entre la biomasa fresca del cultivo de tomatillo y los valores NDVI obtenidos con el GreenSeeker.

La Figura 2 presenta la relación entre el área foliar y el peso seco de plantas de repollo *versus* los valores de NDVI. El área foliar mostró un valor de correlación menor que el de la biomasa seca ( $R^2 = 0.7617$  *versus*  $R^2 = 0.8854$ ). Sin embargo, ambas relaciones resultaron estadísticamente significativas ( $P < 0.001$ ). Para el caso de la relación área foliar *versus* NDVI, por cada incremento de una unidad de NDVI (expresada como decimal), el modelo mostró una predicción de incremento del área foliar en 327.85 cm<sup>2</sup> planta. Por otro lado, el modelo que resultó para la biomasa seca, indicó que por cada incremento de una unidad de NDVI, el incremento de la biomasa fue de 7.30 g planta<sup>2</sup>.

El conocimiento del área foliar en este cultivo es importante ya que este tiene estrecha relación con el rendimiento total y con el peso individual del repollo. Kibar et al., (2014) realizaron un estudio con catorce líneas de mejoramiento genético de repollo en el cual relacionaron varios parámetros de crecimiento y



encontraron que la determinación del área foliar se asociaba en un 85% con el peso fresco de cada repollo, y en un 83% con el rendimiento total del cultivo. Por otro lado, Brito et al., (2012) mencionan que el conocimiento de la acumulación de biomasa seca en este cultivo indica una mayor absorción de nitrógeno. Lo anterior permitiría una mejor planeación de la fertilización nitrogenada en este cultivo (Ji et al., 2017).

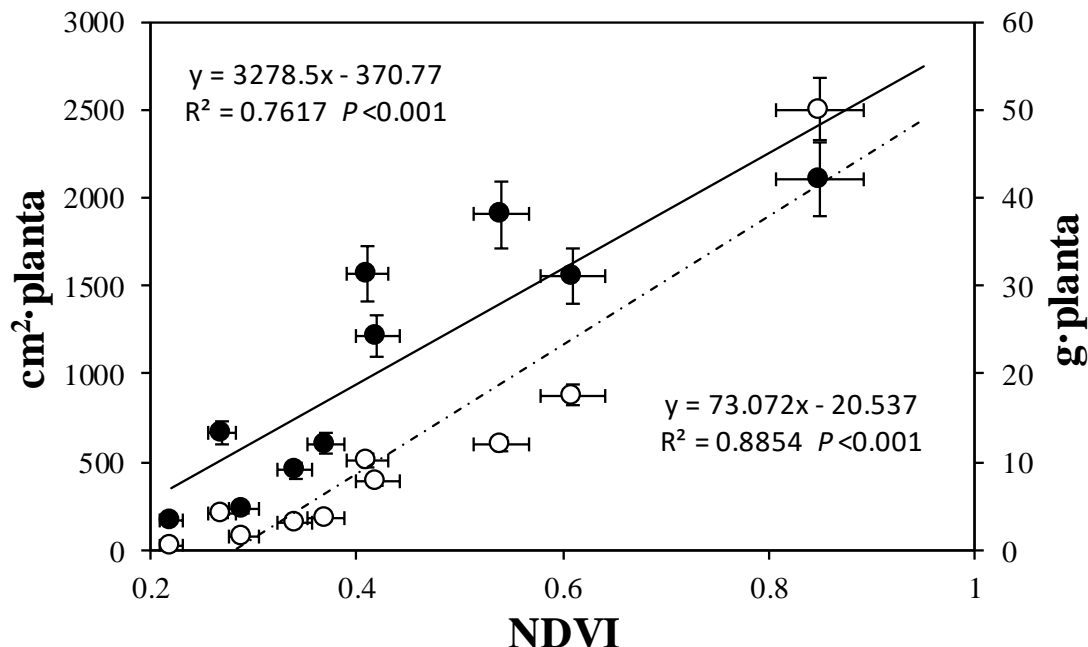


Figura 2. Relación entre el área foliar, [(●) (línea continua)] y la biomasa seca [(○) (línea fraccionada)] del cultivo de repollo y valores de NDVI.

La Figura 3 muestra la relación encontrada entre el índice de crecimiento y la altura, *versus* los valores de NDVI en el cultivo de chile habanero cultivado bajo condiciones de malla sombra. La relación obtenida en ambos análisis fue de forma lineal positiva, y la probabilidad encontrada entre los modelos y la distribución de los puntos resultó altamente significativa ( $P < 0.001$ ). Sin embargo, en ambas determinaciones los valores del coeficiente de determinación resultaron bajos ( $R^2 \leq 0.5339$ ). De acuerdo con (Cornell, 1987), los bajos valores obtenidos en los modelos de regresión (sobre todo los de forma lineal), obedecen a la forma de obtener los datos o al diseño experimental. En el caso del presente estudio, pudiera haber sido por la variabilidad del hábito de crecimiento (determinados e indeterminados) de los siete materiales evaluados (Núñez-Ramírez et al., 2022).



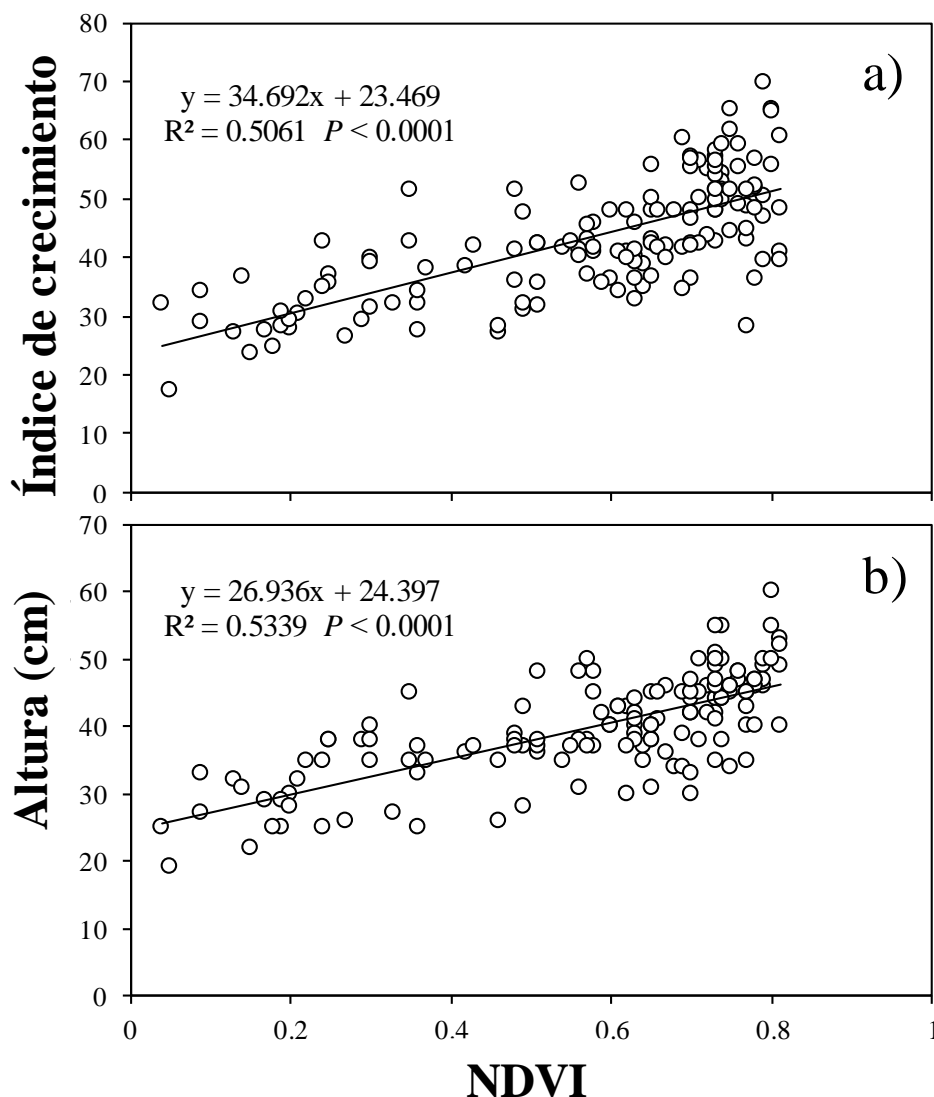


Figura 3. Relación entre a) índice de crecimiento (altura + ancho de cobertura foliar [este a oeste] + ancho de cobertura foliar [norte a sur]) / 3) versus el NDVI; y b) la altura y el NDVI en el cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) cultivados en malla sombra.

Para el caso del cultivo de chile habanero cultivado a cielo abierto, cuando se tomaron los valores en las tres fechas de evaluación, la distribución de los datos obtenidos *versus* los valores de NDVI resultaron de forma lineal y altamente significativos al modelo propuesto ( $P < 0.001$ ). Sin embargo, los valores del coeficiente de determinación obtenido a 62 ddt resultó mayor ( $R^2 \leq 0.6803$ ) que los encontrados a los 84 y 105 ( $R^2 \leq 0.3364$ ). Por lo tanto, los valores del índice de crecimiento de las tres fechas se juntaron en una sola corrida. El modelo resultante, se ajustó mucho mejor y presentó una curva del tipo polinomial ( $P < 0.001$ ) y con un el coeficiente de determinación alto ( $R^2 = 0.7187$ ).

Cuando se realizaron medidas a los 62 ddt, los valores del NDVI variaron entre 0.20 y 0.80, mientras que el índice de crecimiento estuvo entre 10 y 30. A los 84 ddt, la variación de los valores de NDVI fue



menor y estuvo entre 0.40 y 0.78, mientras que el índice de crecimiento fue de 22 a 52. Finalmente, a los 105 ddt, los valores de NDVI fueron 0.65 a 0.82, mientras que el índice de crecimiento fue 38 y 68 (Figura 4). La variación en los rangos obtenidos en el índice de crecimiento entre las tres fechas evaluadas pudo deberse a que dicho valor involucró la altura de las plantas, y dicha altura no resultaron proporcionales al ancho de las plantas al transcurrir el tiempo.

El conocimiento detallado del crecimiento de las plantas de chile habanero, es importante ya que ayuda a predecir el rendimiento de las mismas. Al respecto, se ha identificado que cuando las plantas de chile habanero se encuentran en etapa de juvenil y llegan hasta la aparición de flores y frutos (0 a 60 ddt), es cuando expresan una mayor acumulación de biomasa. Posteriormente, durante la floración y llenado del fruto el aumento de biomasa es consecuencia del número de frutos que produce la planta (Garruña et al., 2014). De acuerdo con Bojórquez et al. (2017) entre mayor sea el índice de crecimiento en etapas tempranas de las plantas de chile habanero, mayor es la precocidad de producción de las plantas y en consecuencia mayor es el rendimiento.

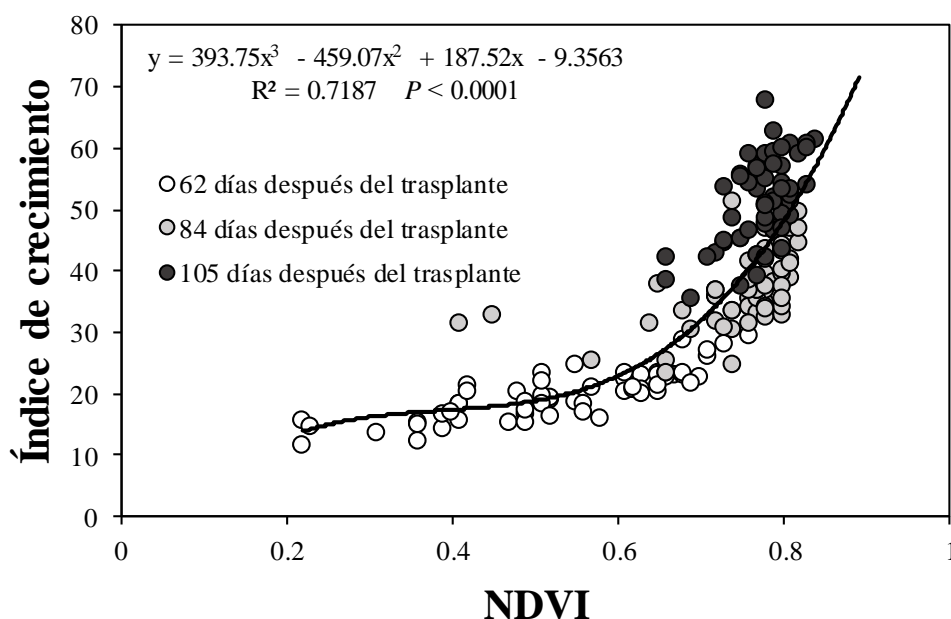


Figura 4. Relación entre el índice de crecimiento y los valores de NDVI en plantas de chile habanero cultivadas a cielo abierto a lo largo de su ciclo de crecimiento.

Los análisis de regresión en las ciencias agrícolas son importantes debido a que intentan explicar de forma objetiva (a través de una ecuación), la manera en que las plantas crecen y se desarrollan (Shimizu and Gonçalves, 2023). Existen muchos modelos que pueden explicar el crecimiento de las plantas (Jane et al., 2019; Shimizu and Gonçalves, 2023) no obstante, los modelos presentados en este estudio, fueron seleccionados por su simplicidad en la interpretación.

Usualmente, el crecimiento de las plantas se obtiene midiendo el NDVI y los valores obtenidos se asocian al rendimiento, permitiendo predecir el comportamiento futuro de los cultivos. Sin embargo, cuando el NDVI es obtenido por fotografía satelital se deben de integrar otras variables como el ambiente (Dalezios





et al., 2001). En el presente este estudio, se utilizó el sensor GreenSeeker portátil por su facilidad de uso. Así mismo, el crecimiento fue expresado de formas fáciles de obtener como fue el caso de la altura, biomasa e índice de crecimiento. Más estudios serán necesarios que incluyan factores de primer orden como los son las densidades de población, presencia de malezas, así como factores orden como lo son el tipo de acolchado (orgánico o inorgánico) o el color del acolchado plástico que se utilice.

## Conclusiones

Se identificó la relación entre valores de NDVI y el crecimiento en tres cultivos hortícolas: tomatillo, repollo y chile habanero. Los grados de asociación entre el NDVI y el crecimiento variaron grandemente entre los cultivos. El cultivo que presentó el mejor grado de asociación fue repollo, seguido por el chile habanero cultivado a cielo abierto y finalmente el tomatillo. La variable de crecimiento mejor asociada a los valores de NDVI fue la biomasa seca, seguida por el área foliar, y finalmente la altura de las plantas. Se concluye que el uso del NDVI es una herramienta que identifica efectivamente el crecimiento del tomatillo, repollo y chile habanero.

## Agradecimientos

Al Instituto de Ciencias Agrícolas (ICA) y al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias de Mexicali (INIFAP) por las facilidades otorgadas para la realización de las mediciones. Así mismo, a los grupos de alumnos de las carreras de Ingeniero Agrónomo y de Ingeniería Agronómica, del ICA, por el apoyo en la toma de datos.

## Referencias

1. Altland, J.E., Gilliam, C.H., Keever, G.J., Edwards, J.H., Sibley, J.L., Fare, D.C., 2003. Rapid determination of nitrogen status in pansy. *HortScience* 38, 537–541. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.38.4.537>
2. Bojórquez, A.I.T., Maza, A.M., Contreras, R.L.G., Díaz, L.C., 2017. Foliar iron and plastic mulch in *Capsicum chinense* Jacq. infected with tospoviruses. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8, 369-380.
3. Brito, L., Amaro, A.L., Mourão, I., Moura, L., 2012. Yield and nitrogen uptake of white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) with organic and inorganic fertilisers. *Acta Hort.* 933, 107–113. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.933.11>
4. Coelho, A.P., Faria, R.T. de, Leal, F.T., Barbosa, J. de A., Dalri, A.B., Rosalen, D.L., 2019. Estimation of irrigated oats yield using spectral indices. *Agric. Water Manag.* 223, 105700. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105700>
5. Cornell, J.A., 1987. Factors that influence the value of the coefficient of determination in simple linear and nonlinear regression models. *Phytopathology* 77, 63. <https://doi.org/10.1094/Phyto-77-63>
6. Dalezios, N.R., Domenikiotis, C., Loukas, A., Tzortzios, S.T., Kalaitzidis, C., 2001. Cotton yield estimation based on NOAA/AVHRR produced NDVI. *Phys. Chem. Earth Part B Hydrol. Oceans Atmosphere* 26, 247–251. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00247-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00247-1)
7. de la Casa, A., Ovando, G., 2007. Integración del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) y del ciclo fenológico de maíz para estimar el rendimiento a escala departamental en Córdoba, Argentina. *Agric. Téc.* 67. <https://doi.org/10.4067/S0365-28072007000400004>
8. Díaz-Pérez, J.C., Phatak, C.S., Giddings, D., Bertand, D. 2005. Root zone temperature, plant growth, and fruit yield of tomatillo as affected by plastic film mulch. *Hortscience* 40, 1312-1319.
9. Elliott, N.C., Backoulou, G.F., Brewer, M.J., Giles, K.L., 2015. NDVI to detect sugarcane aphid Injury to grain sorghum. *J. Econ. Entomol.* 108, 1452–1455. <https://doi.org/10.1093/jee/tov080>



10. Fan, X., Liu, Y., 2016. A global study of NDVI difference among moderate-resolution satellite sensors. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 121, 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.008>
11. Garruña, R., Orellana, R., Larque-Saavedra, A., Canto, A., 2014. Understanding the physiological responses of a tropical crop (*Capsicum chinense* Jacq.) at high temperature. *PloS One* 9, e111402. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111402>
12. Govaerts, B., Verhulst, N., Ponce, M.F., Verlust, N. Fuentes, M.P. 2010. Sensor portátil GreenSeeker™ para la medición del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI): Una herramienta para la evaluación integral de las prácticas agronómicas. Parte A: Conceptos y estudios de caso. México, D.F.; CIMMYT. <https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/cc134225-0a52-436d-9fd8-5a9c8f87ec5a/content>
13. Gozdowski, D., Stępień, M., Panek, E., Varghese, J., Bodecka, E., Rozbicki, J., Samborski, S., 2020. Comparison of winter wheat NDVI data derived from Landsat 8 and active optical sensor at field scale. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 20, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100409>
14. Gutierrez, M., Norton, R., Thorp, K.R., Wang, G., 2012. Association of spectral reflectance indices with plant growth and lint yield in upland cotton. *Crop Sci.* 52, 849–857. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.04.0222>
15. Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P., Wang, Y., Shao, G., 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.* 32, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
16. Jane, S.A., Fernandes, F.A., Silva, E.M., Muniz, J.A., Fernandes, T.J., 2019. Comparison of polynomial and nonlinear models on description of pepper growth. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár.* 14, 1–7. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i4a7180>
17. Ji, R., Min, J., Wang, Y., Cheng, H., Zhang, H., Shi, W., 2017. In-season yield prediction of cabbage with a hand-held active canopy sensor. *Sensors* 17, 2287. <https://doi.org/10.3390/s17102287>
18. Kibar, B., Karaağaç, O., Kar, H., 2014. Correlation and path coefficient analysis of yield and yield components in cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 13, 87–97.
19. Kowalski, K., Senf, C., Hostert, P., Pflugmacher, D., 2020. Characterizing spring phenology of temperate broadleaf forests using Landsat and Sentinel-2 time series. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 92, 102172. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102172>
20. Kumar, Suneel, Röder, M.S., Singh, R.P., Kumar, Sundeep, Chand, R., Joshi, A.K., Kumar, U., 2016. Mapping of spot blotch disease resistance using NDVI as a substitute to visual observation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Mol. Breed.* 36, 95. <https://doi.org/10.1007/s11032-016-0515-6>
21. Li, G.-S., Wu, D.-H., Su, Y.-C., Kuo, B.-J., Yang, M.-D., Lai, M.-H., Lu, H.-Y., Yang, C.-Y., 2021. Prediction of plant nutrition state of rice under water-saving cultivation and panicle fertilization application decision making. *Agronomy* 11, 1626. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081626>
22. Meneses-Tovar, C.L. 2012. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque Unasylva 238, 62, 39-46.
23. Moges, S.M., Girma, K., Teal, R.K., Freeman, K.W., Zhang, H., Arnall, D.B., Holtz, S.L., Tubaña, B.S., Walsh, O., Chung, B., Raun, W.R., 2007. In-season estimation of grain sorghum yield potential using a hand-held optical sensor. *Arch. Agron. Soil Sci.* 53, 617–628. <https://doi.org/10.1080/03650340701597251>
24. Núñez Ramírez, F., Ramírez, M.M., Morales, M.A., Samaniego-Gámez, B.Y., Valle, R.E., Mendoza-Gómez, A., Escobosa-García, I., Bazante-González, I., Suarez, H.A.M. 2022. Crecimiento, desarrollo y rendimiento de genotipos de chile habanero. *OMNIASCIENCE* 60 pp. <https://doi: 10.3926/oms412>
25. Santillano-Cázares, J., 2013. Uso de sensores ópticos para la fertilización de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Rev. TERRA Latinoam.* 31, 95–103.
26. Seo, B., Lee, J., Lee, K.-D., Hong, S., Kang, S., 2019. Improving remotely-sensed crop monitoring by NDVI-based crop phenology estimators for corn and soybeans in Iowa and Illinois, USA. *Field Crops Res.* 238, 113–128. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.015>
27. Shimizu, G.D., Gonçalves, L.S.A., 2023. AgroReg: main regression models in agricultural sciences implemented as an R Package. *Sci. Agric.* 80, e20220041. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2022-0041>



28. Son, N.T., Chen, C.F., Chen, C.R., Minh, V.Q., Trung, N.H., 2014. A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation. *Agric. For. Meteorol.* 197, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.06.007>
29. Tenreiro, T.R., García-Vila, M., Gómez, J.A., Jiménez-Berni, J.A., Fereres, E., 2021. Using NDVI for the assessment of canopy cover in agricultural crops within modelling research. *Comput. Electron. Agric.* 182, 106038. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106038>
30. Welch, N.C., Tyler, K.B., Ririe, D., 1985. Cabbage yield and nutrient uptake. *California Agriculture* July-August, 30-31.
31. Zhao, T., Stark, B., Chen, Y., Ray, A., Doll, D., 2016. More reliable crop water stress quantification using small unmanned aerial systems (sUAS). 2016. IFAC-Pap., 5th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture AGRICONTROL 2016 49, 409–414. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.075>

