Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Agropecuaria ISSN: 2448-6620

USO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN RGB PARA EVALUAR EL EFECTO DE DIFERENTES DOSIS DE PACLOBUTRAZOL EN PLÁNTULAS DE JITOMATE

*Tadeo F. Ramírez-Linares[1]; Cesar L. Aguirre-Mancilla[1]; Felipe de Jesús Martínez-Gaspar[1] y Juan C. Buenavista-Jaralillo[1].

[1]Tecnológico Nacional de México/IT Roque, Celaya, Guanajuato., México, km.8 Carretera Celaya-Juventino Rosas, C. P. 38110. *correo: ramireztadeo225@gmail.com

RESUMEN

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica y agrícola en México, por lo que la producción de plántulas de alta calidad representa una etapa fundamental para garantizar un adecuado establecimiento y rendimiento del cultivo. En este sentido, el uso de reguladores de crecimiento, bioestimulantes y herramientas tecnológicas como los índices de vegetación derivados de imágenes RGB ha cobrado relevancia en la evaluación del crecimiento y vigor vegetal. El objetivo de este estudio fue evaluar la relación entre variables agronómicas e índices de vegetación en plántulas de jitomate sometidas a diferentes tratamientos con paclobutrazol (PBZ) y aminoácidos a base de glicina betaína. El experimento se desarrolló en el laboratorio del Tecnológico Nacional de México campus Roque durante el periodo marzo-mayo de 2026, utilizando plántulas establecidas en charolas de almácigo bajo un diseño completamente al azar con siete tratamientos. Se evaluaron variables agronómicas como altura de planta, diámetro del tallo y número de hojas en tres muestreos, además de los índices de vegetación GLI, GCC, BCCI y RCC obtenidos mediante análisis de imágenes digitales procesadas con el software ImageJ. Los datos fueron analizados mediante correlaciones de Pearson y Spearman. Los resultados mostraron que el índice BCCI presentó las relaciones más consistentes con las variables agronómicas, particularmente con altura de planta y número de hojas, indicando su potencial como indicador indirecto del vigor vegetal. Asimismo, se observaron altas correlaciones entre algunos índices de vegetación, evidenciando posible redundancia entre ellos. En conclusión, los índices de vegetación RGB representan una herramienta accesible y eficiente para el monitoreo no destructivo de plántulas de jitomate y pueden contribuir al desarrollo de estrategias de evaluación más precisas en sistemas de producción agrícola.

Palabras clave: RGB, PBZ, Jitomate y índices de vegetación.

INTRODUCCIÓN

En México, el jitomate tiene una gran relevancia económica, ya que contribuye con aproximadamente el 21.55% de la producción total de hortalizas a nivel nacional, su consumo interno es significativo, ya que el consumo anual per cápita es de 15.2 kg de acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018). El jitomate constituye uno de los principales productos agrícolas de exportación del país, lo que lo posiciona como un cultivo estratégico dentro del sector agroalimentario. Su producción se distribuye en diversas regiones de México bajo distintos sistemas de cultivo, lo que permite su disponibilidad a lo largo del año y favorece su integración en la dieta diaria de la población. Debido a su importancia económica, alimentaria y social, el estudio de este cultivo resulta fundamental para comprender su impacto en el desarrollo agrícola nacional (Morales-Morales, 2022). La producción de plántulas de alta calidad representa una etapa fundamental en el establecimiento exitoso de los cultivos. La generación de plántulas en almácigo permite optimizar el uso de semillas, reducir el tiempo necesario para alcanzar el desarrollo adecuado previo al trasplante y disminuir las pérdidas durante su establecimiento en campo, cuando las plántulas se desarrollan bajo condiciones adecuadas de nutrición, se incrementa su capacidad de adaptación al entorno definitivo, lo que favorece el rendimiento y la productividad del cultivo (Lazcano-Bello, 2021). Los reguladores del crecimiento vegetal son compuestos químicos que intervienen en el control de los procesos de desarrollo y crecimiento de las plantas. Su aplicación en los cultivos permite modificar el equilibrio hormonal, lo que puede favorecer el incremento del rendimiento, mejorar la tolerancia al estrés abiótico y optimizar diversas características fisiológicas. Entre estos compuestos destaca el paclobutrazol (PBZ), perteneciente al grupo de los triazoles. El efecto del PBZ se relaciona con la modificación de los niveles de fitohormonas clave, como las giberelinas, el ácido abscísico y las citoquininas. Este compuesto actúa sobre la vía de los isoprenoides, inhibiendo la síntesis de giberelinas y promoviendo un aumento en las citoquininas, lo que da lugar a una disminución en la elongación del tallo y a cambios en el desarrollo de la planta (Desta y Amare, 2021).

El uso de aminoácidos ha cobrado relevancia en el manejo de plántulas; estos compuestos participan en procesos metabólicos esenciales, como la síntesis de proteínas y fitohormonas, así como en la respuesta ante condiciones de estrés. Su aplicación favorece la reducción del daño celular, mejora la disponibilidad de nutrimentos esenciales y promueve el desarrollo de sistemas radicales más vigorosos, incrementando el vigor de las plántulas y su capacidad de establecimiento en campo (Queiroz, 2024), lo que aunado a herramientas como los índices de vegetación (IV) pueden hacer más eficiente los ciclos productivos.

Los IV son herramientas utilizadas para evaluar el estado fisiológico y el desarrollo de las plantas mediante el análisis de la información espectral capturada en imágenes. Estos índices se basan en la combinación matemática de diferentes bandas del espectro electromagnético, lo que permite resaltar características como el vigor, la cobertura vegetal y el contenido de clorofila. En particular, los índices derivados de imágenes RGB

han adquirido relevancia debido a su bajo costo, facilidad de adquisición y procesamiento, lo que los convierte en una alternativa accesible para el monitoreo de cultivos (Feng et al., 2020; Yamaguchi et al., 2021).

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto de diferentes tratamientos, incluyendo aminoácidos y reguladores de crecimiento (paclobutrazol), en el desarrollo de plántulas de jitomate mediante el uso de índices de vegetación derivados de imágenes RGB.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en el laboratorio de posgrados del TecNM campus Roque, durante el periodo comprendido entre marzo y mayo de 2026. Para el desarrollo del experimento se utilizaron plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) establecidas en charolas de almácigo, las cuales fueron mantenidas bajo condiciones controladas durante el periodo de evaluación.

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, en el cual se evaluaron siete tratamientos diferentes distribuidos en cuatro charolas de almácigo. Cada tratamiento estuvo conformado por más de 20 plántulas, consideradas como unidades experimentales para la obtención y análisis de las variables agronómicas e índices de vegetación. Los tratamientos aplicados consistieron en diferentes dosis de paclobutrazol (PBZ) y aminoácidos a base de glicina betaína. Las dosis correspondientes a cada tratamiento serán especificadas de acuerdo con las concentraciones empleadas durante el desarrollo experimental.

Los tratamientos evaluados consistieron en diferentes concentraciones de paclobutrazol (PBZ) y glicina-betaína (GB). El tratamiento testigo (T0) se mantuvo sin aplicación de PBZ ni glicina-betaína. Los tratamientos aplicados fueron: T1 (0 mM PBZ y 0 mM GB), T2 (0.090 mM PBZ y 0 mM GB), T3 (0.170 mM PBZ y 0 mM GB), T4 (0 mM PBZ y 5 mM GB), T5 (0 mM PBZ y 10 mM GB), T6 (0.090 mM PBZ y 5 mM GB) y T7 (0.170 mM PBZ y 10 mM GB).

Con el propósito de evaluar el crecimiento y desarrollo de las plántulas, se realizaron tres muestreos durante el periodo experimental. En cada uno de los muestreos se registraron variables agronómicas como altura de planta, diámetro del tallo y número de hojas. La altura de planta se determinó mediante medición directa desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento, mientras que el número de hojas se obtuvo mediante conteo visual de hojas completamente desarrolladas. Para la medición del diámetro del tallo se utilizó un vernier, permitiendo obtener valores más precisos de esta variable estructural.

Para la obtención de los índices de vegetación, se capturaron imágenes digitales de las plántulas utilizando una cámara digital. Posteriormente, las imágenes obtenidas fueron procesadas y analizadas mediante el software

ImageJ, a partir del cual se calcularon los índices de vegetación GLI, GCC, BCCI y RCC. Estos índices fueron utilizados con la finalidad de evaluar el comportamiento fisiológico, el vigor vegetal y las variaciones en la respuesta espectral de las plántulas durante su desarrollo.

Finalmente, los datos generados tanto de las variables agronómicas como de los índices de vegetación fueron sometidos a análisis de correlación de Pearson y Spearman, con el objetivo de determinar el grado de asociación existente entre las variables evaluadas y analizar la relación entre el crecimiento de las plántulas y la respuesta obtenida mediante los índices de vegetación RGB.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las correlaciones obtenidas entre las variables agronómicas y los índices de vegetación mostraron diferentes niveles de asociación durante los muestreos realizados (Figuras 1–5). En el caso de la altura de planta (ALT), el índice GCC presentó correlaciones negativas moderadas a fuertes (-0.54 a -0.65), lo que indica que conforme aumentó la altura de las plántulas, los valores de GCC tendieron a disminuir.

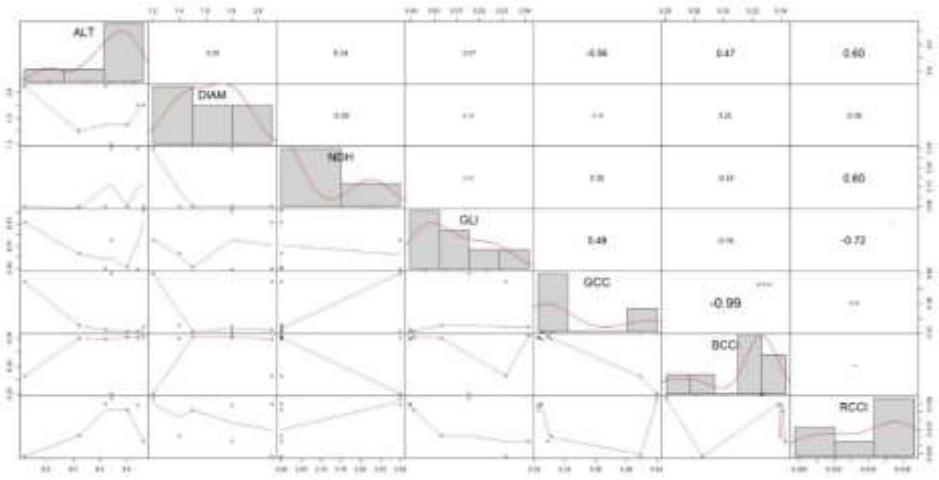

Figura 1. Matriz de correlación de Coeficiente de correlación de Pearson entre variables agronómicas e índices de vegetación durante el primer muestreo.

Por otro lado, el índice BCCI mostró correlaciones positivas moderadas y fuertes con la altura de planta (0.47 a 0.71), sugiriendo una mayor sensibilidad de este índice ante el crecimiento vegetativo de las plántulas, como puede observarse en las matrices de correlación de las Figuras 1 y 2. Estos resultados indican que el BCCI podría utilizarse como un indicador indirecto del vigor y desarrollo vegetal. En contraste, el índice RCCI presentó correlaciones positivas bajas a moderadas con la altura, mientras que GLI mostró asociaciones débiles o negativas, indicando una menor capacidad para explicar las variaciones en esta variable agronómica.

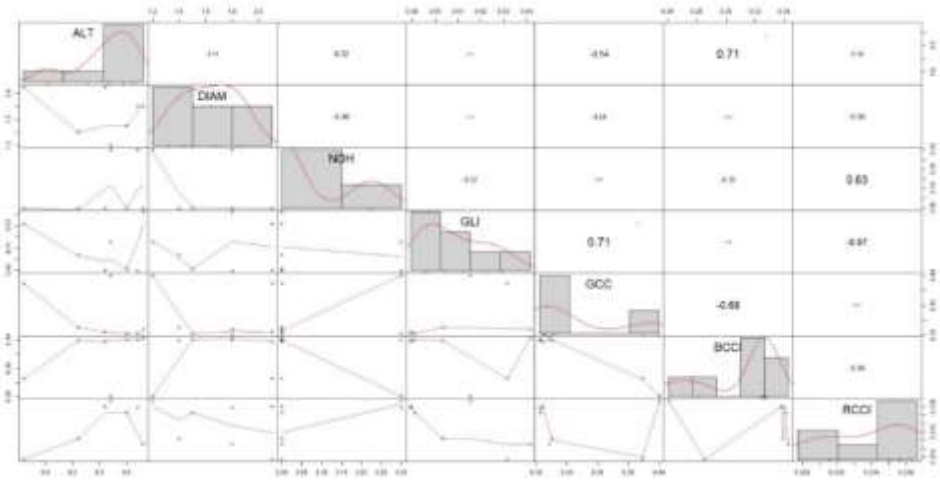

Figura 2. Matriz de correlación de Coeficiente de correlación de Spearman entre variables agronómicas e índices de vegetación durante el primer muestreo.

Respecto al diámetro del tallo (DIAM), las correlaciones obtenidas con los índices de vegetación fueron generalmente bajas, lo que sugiere que dichos índices no reflejan adecuadamente los cambios asociados con esta variable estructural. Sin embargo, se observó una correlación negativa fuerte entre el diámetro y el número de hojas (NDH), alcanzando valores de hasta -0.89 (Figura 5). Este comportamiento podría estar asociado con una redistribución fisiológica del crecimiento de las plántulas, donde el incremento en una variable ocurre a expensas de otra.

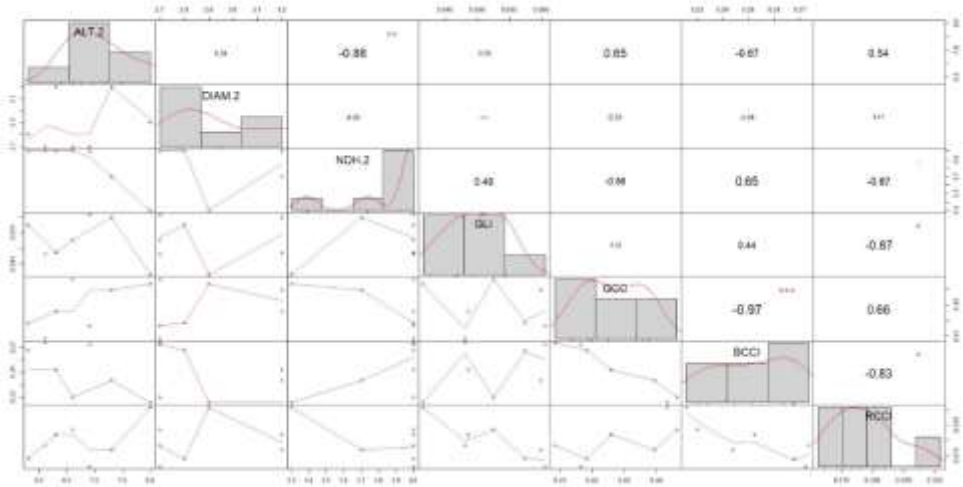

Figura 3. Matriz de correlación de Pearson entre variables agronómicas e índices de vegetación durante el segundo muestreo.

En relación con el número de hojas, el índice BCCI presentó correlaciones positivas moderadas a fuertes (0.65–0.67), evidenciando nuevamente su capacidad para responder a cambios relacionados con el vigor vegetal. Por el contrario, RCCI mostró correlaciones negativas moderadas a fuertes con NDH, mientras que GCC presentó

asociaciones negativas, lo cual podría estar relacionado con modificaciones en la pigmentación y cobertura foliar conforme avanzó el desarrollo de las plántulas.

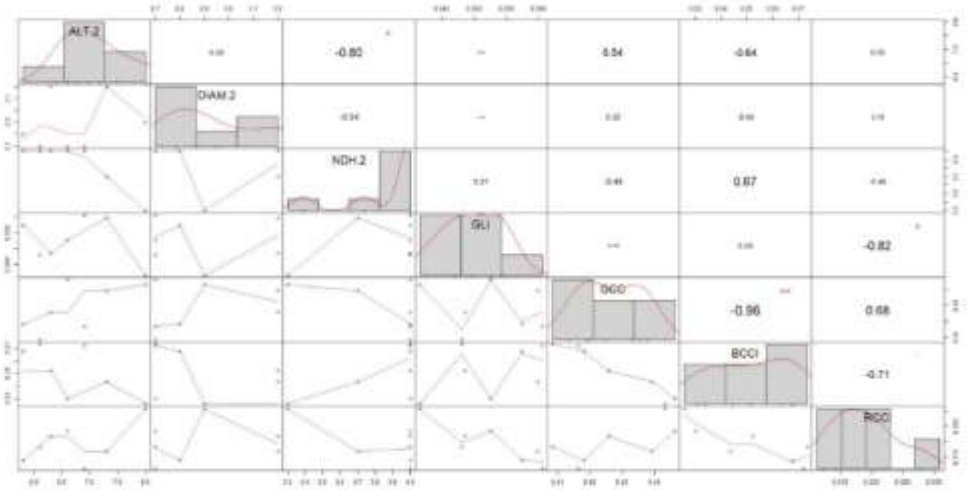

Figura 4. Matriz de correlación de Spearman entre variables agronómicas e índices de vegetación durante el segundo muestreo.

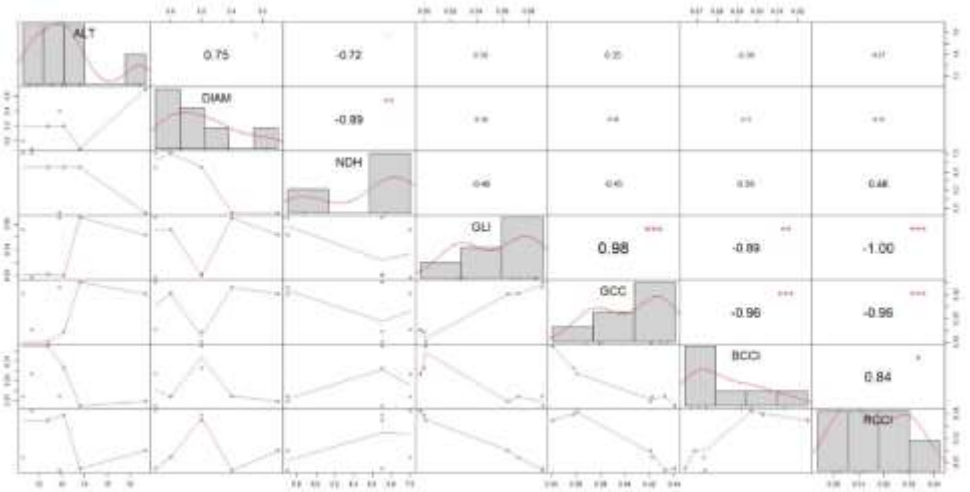

Figura 5. Matriz de correlación de Pearson entre variables agronómicas e índices de vegetación durante el tercer muestreo.

En términos agronómicos, los resultados obtenidos sugieren que el índice BCCI fue el que presentó mayor relación con las variables asociadas al crecimiento de las plántulas, particularmente altura y número de hojas, por lo que podría considerarse como uno de los índices más útiles para el monitoreo del vigor vegetal en etapas tempranas del cultivo de jitomate. Además, la alta relación observada entre varios índices de vegetación indica que algunos de ellos podrían aportar información redundante, lo que permitiría simplificar futuros análisis y modelos estadísticos mediante la selección de índices más representativos.

CONCLUSIONES

Entre los índices analizados, BCCI presentó las relaciones más consistentes con las variables agronómicas, especialmente con la altura de planta y el número de hojas, lo que demuestra su potencial como indicador indirecto del vigor vegetal en etapas tempranas del cultivo. El uso de imágenes RGB y de índices de vegetación representa una herramienta accesible, rápida y no destructiva para el monitoreo de plántulas de jitomate, permitiendo identificar índices con mayor sensibilidad al crecimiento vegetal y contribuyendo al desarrollo de estrategias de evaluación más precisas en sistemas de producción agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Desta, B., & Amare, G. (2021). Paclobutrazol as a plant growth regulator. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 8(1), 1.

Feng, A., Zhou, J., Vories, E. D., Sudduth, K. A., y Zhang, M. (2020). Yield estimation in cotton using UAV-based multi-sensor imagery. Biosystems Engineering, 193, 101-114.

Gaytán-Ruelas, M., Vargas-Espinoza, E., Rivera-Arredondo, M. y Morales-Félix, V. de J. (2016). Efecto del raleo de frutos en el rendimiento de jitomate (Lycopersicon esculentum Mill.) bajo invernadero. Revista Análisis Cuantitativo y Estadístico, 3(7), 18-25.

Lazcano-Bello, M. I., Sandoval-Castro, E., Tornero-Campante, M. A., Hernández-Hernández, B. N., Ocampo-Fletes, I., & Díaz-Ruíz, R. (2021). Evaluación de sustratos, solución nutritiva y enraizador en producción de plántulas de jitomate. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 12(1), 61-76.

Morales-Morales, E. J. (2022). Manejo agronómico y poscosecha de jitomate en función de urea NBPT, fosfito de potasio y alginato de sodio.

Queiroz, D. A. D. (2024). Uso de bioestimulantes à base de aminoácidos na agricultura.

Rangel, P. P., Castillo, G. A. B., Torres, J. L. T., Shibata, J. K., Chávez, L. T., y Garza, A. M. (2002). Nitrógeno y potasio en la producción de plántulas de melón. Terra Latinoamericana, 20(3), 267-276.

SIAP. (2019). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Atlas Agroalimentario. https://www.gob.mx/siap

Yamaguchi, T., Tanaka, Y., Imachi, Y., Yamashita, M., & Katsura, K. (2020). Feasibility of combining deep learning and RGB images obtained by unmanned aerial vehicle for leaf area index estimation in rice. Remote Sensing, 13(1), 84.