



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

Instituto Tecnológico de Sonora

5 de Febrero No. 818 sur

T. (644) 410-09-00

C.P. 85000 Ciudad Obregón, Sonora, México.

www.itson.mx

Reporte de experimento

Nombre del proyecto

Uso de imágenes de alta resolución espacial para determinar las necesidades de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz en el Valle del Yaqui

Objetivo

Generar un modelo predictivo de la demanda de nitrógeno del cultivo de maíz en cuatro momentos del ciclo de desarrollo.

Colaboradores

Dr. Jaime Garatuza Payán

Dr. Enrico Yépez González

Dra. R. Suzuky Pinto

Dra. Masuly Vega Puga

Descripción del experimento

El proyecto consistió en el establecimiento de 15 parcelas experimentales con distintas dosis de nitrógeno aplicado en forma de urea, en el cultivo de maíz. Se estableció un área total de 3200 m² en el Centro Experimental y Transferencia de Tecnología (CETT) del ITSON durante el ciclo 2024-2025. La siembra se llevó a cabo el 16 de diciembre del 2024, utilizando un diseño en bloques con tres repeticiones. Se probaron cinco niveles de fertilización nitrogenada desde el 50 hasta el 100% de la dosis aplicada generalmente para maíz, por los agricultores del Valle del Yaqui. El listado de las dosis aplicadas se muestra en la Tabla 1. La fertilización nitrogenada se llevó a cabo al momento de la siembra (50%) y en el primer riego de auxilio (50%) de acuerdo con el análisis de suelo realizado antes de iniciar el experimento. Se aplicaron ocho riegos por gravedad durante el ciclo y se controlaron malezas y plagas mediante métodos mecánicos y químicos según se requirió. En el periodo de enero a mayo se colectaron muestras de planta para determinación de contenido de nitrógeno e imágenes satelitales y de dron en cuatro etapas fenológicas: V4, V9, R1 y R4. Al final del ciclo se obtuvo el rendimiento cosechando manualmente un área representativa de ~1m² por unidad experimental con tres réplicas.

Adicionalmente, se colectaron y analizaron 104 imágenes de satélite PlanetScope de la constelación Planet. Estos satélites registran datos en 8 longitudes de onda generando imágenes multiespectrales de 3 m de resolución espacial. La fechas de adquisición de las escenas se distribuyeron durante todo el ciclo de cultivo, desde la siembra hasta grano maduro. Se calcularon diversos índices de vegetación. Los resultados se incluyen en el **Anexo 1**.

Así mismo, se realizaron 8 vuelos con dron y una cámara multiespectral que registra datos en 4 regiones del espectro electromagnético: verde, rojo, infrarojo cercano y límite rojo (Red Edge), con una resolución espacial de 5 cm. Las fechas de los vuelos fueron 29 de enero, 14, 21 y 28 de febrero, 14, 15, 21 y 26 de marzo y 11 de abril, todos de 2025. Se determinaron diversos índices de vegetación y los resultados se incluyen en el **Anexo 2**.

Tabla 1. Dosis de fertilización nitrogenada correspondiente en cada uno de los 5 tratamientos sobre el cultivo de maíz.

| Tratamiento | % N | K de N/ha |
|-------------|------|-----------|
| T1 | 100 | 390 |
| T2 | 87.5 | 341 |
| T3 | 75 | 293 |
| T4 | 62.5 | 244 |
| T5 | 50 | 195 |

Los índices de vegetación utilizados para evaluar cambios en el vigor del cultivo de maíz sometido a diferentes dosis de fertilización nitrogenada fueron NDVI, NDRE, NGRDI, GNDVI y SAVI. Las fórmulas son:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}} \quad NDRE = \frac{R_{nir} - R_{rededge}}{R_{nir} + R_{rededge}} \quad NGRDI = \frac{R_{red} - R_{green}}{R_{red} + R_{green}}$$

$$GNDVI = \frac{R_{nir} - R_{green}}{R_{nir} + R_{green}} \quad SAVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + L)} * (1 + L)$$

Donde: R_{green} , R_{red} , R_{blue} , $R_{rededge}$ y $R_{nir=NIR}$ son las reflectancias absolutas observadas en las bandas verde, roja, azul, de borde roja y rojo cercano, y L es el factor de corrección, respectivamente.

Resultados

El tratamiento T1 (100%) se utilizó como referencia en el análisis estadístico realizado para índices vegetativos, contenido de nitrógeno en planta y rendimiento. El rendimiento promedio de los cinco tratamientos fue de 12 ± 2 t/ha. Se detectaron diferencias en el rendimiento, solamente entre el tratamiento 1 y el 5. La reducción de fertilización nitrogenada hasta un 62.5% no disminuyó, de manera significativa, el rendimiento, pero la reducción de la fertilización al 50% resultó en la pérdida de 5 t/ha con respecto al tratamiento 1. El tratamiento 1 registró el rendimiento más alto que fue de 13.8 t/ha, mientras el tratamiento 5 registró 8.8 t/ha (Figura 1).

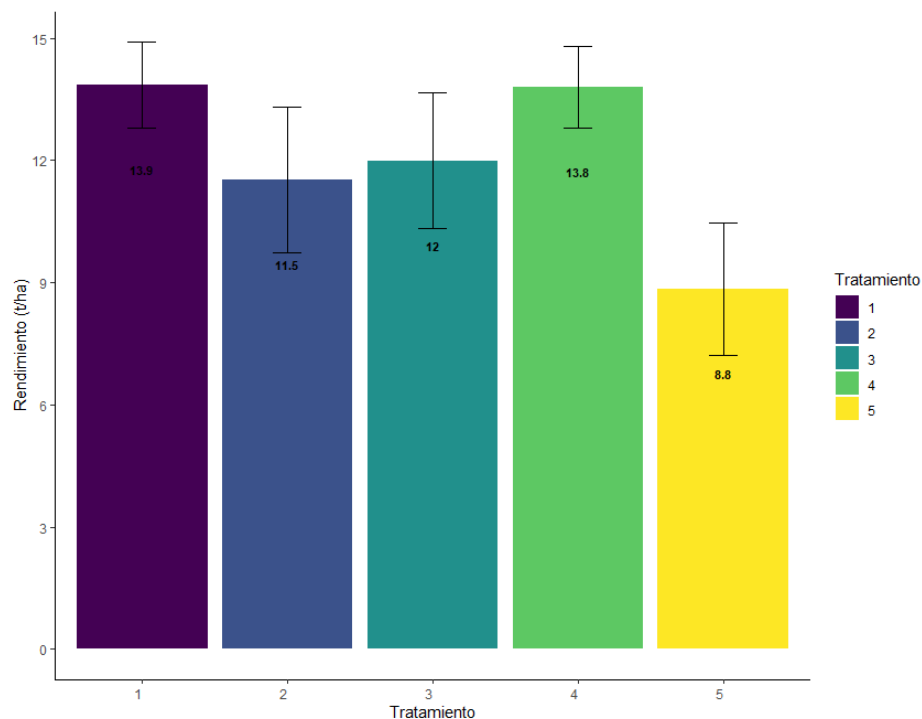


Figura 1. Rendimiento registrado en cinco tratamientos de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz durante el ciclo 2024-2025. Las barras indican la desviación estándar. Los distintos tratamientos de fertilización nitrogenada no tuvieron ningún efecto sobre los índices vegetativos derivados de imágenes satelitales ni sobre los índices obtenidos mediante el dron. Se calcularon nueve índices espectrales a partir de las imágenes digitales obtenidas mediante el dron (4) y satélite (5), los cuales se identifican con las terminaciones “.D” y “.P”, respectivamente. El comportamiento de los índices vegetativos durante las cuatro etapas fenológicas se muestra en las figuras siguientes.

Por otra parte, las muestras de biomasa colectada en cuatro etapas vegetativas (V4, V9, R1 y R4) se analizaron en laboratorio con el método de combustión. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Contenido de nitrógeno (%) en planta en 4 etapas vegetativas del cultivo de maíz en el Valle del Yaqui, ciclo 2024-2025.

| Contenido de nitrógeno (%) en planta de maíz en cuatro etapas fenológicas | | | | |
|---|------|------|------|------|
| Tratamiento | V4 | V9 | R1 | R4 |
| 1 | 3.71 | 3.07 | 1.95 | 1.73 |
| 2 | 3.84 | 2.64 | 1.83 | 1.98 |
| 3 | 3.21 | 2.62 | 1.78 | 1.98 |
| 4 | 3.62 | 2.54 | 2.02 | 1.76 |
| 5 | 3.64 | 2.61 | 1.92 | 1.76 |

* Datos determinados usando el método de combustión.

Índices vegetativos derivados de imágenes obtenidas mediante dron

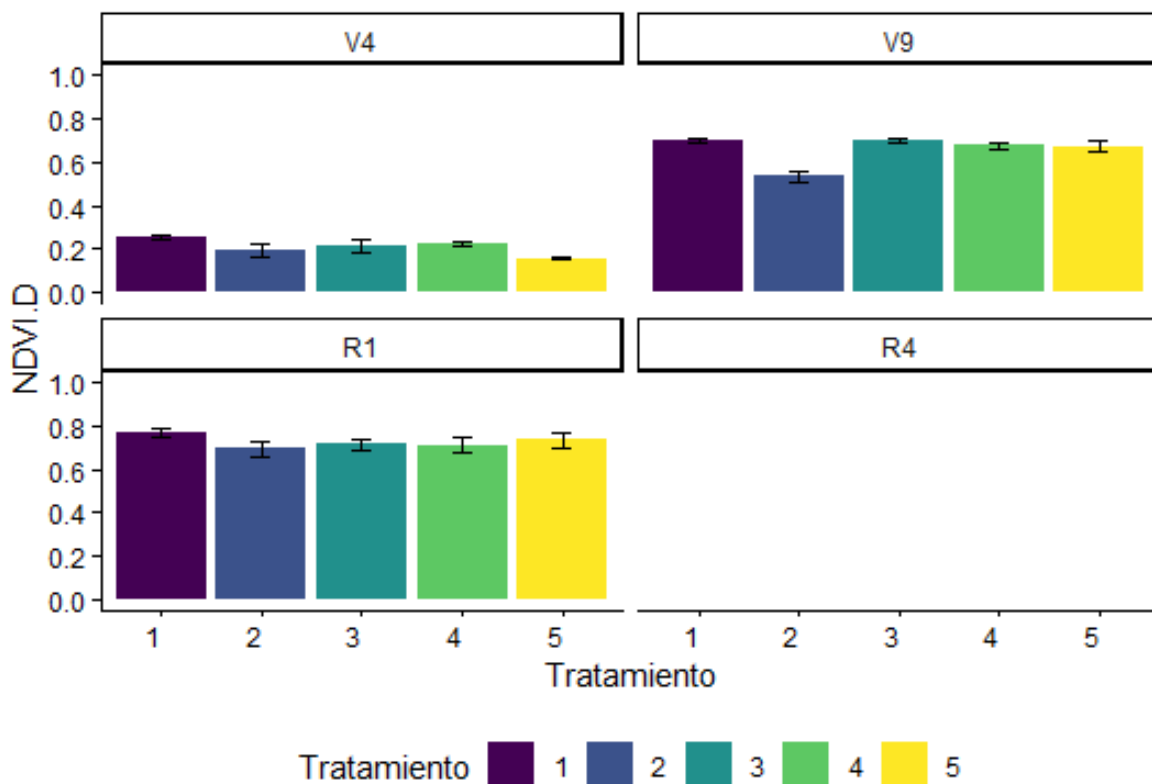


Figura 2. NDVI por etapa fenológica para cinco tratamientos de fertilización nitrogenada aplicada sobre el cultivo de maíz. El índice vegetativo deriva de imágenes obtenidas mediante dron. Las barras indican la desviación estándar. No se contó con registros del dron en la etapa R4.

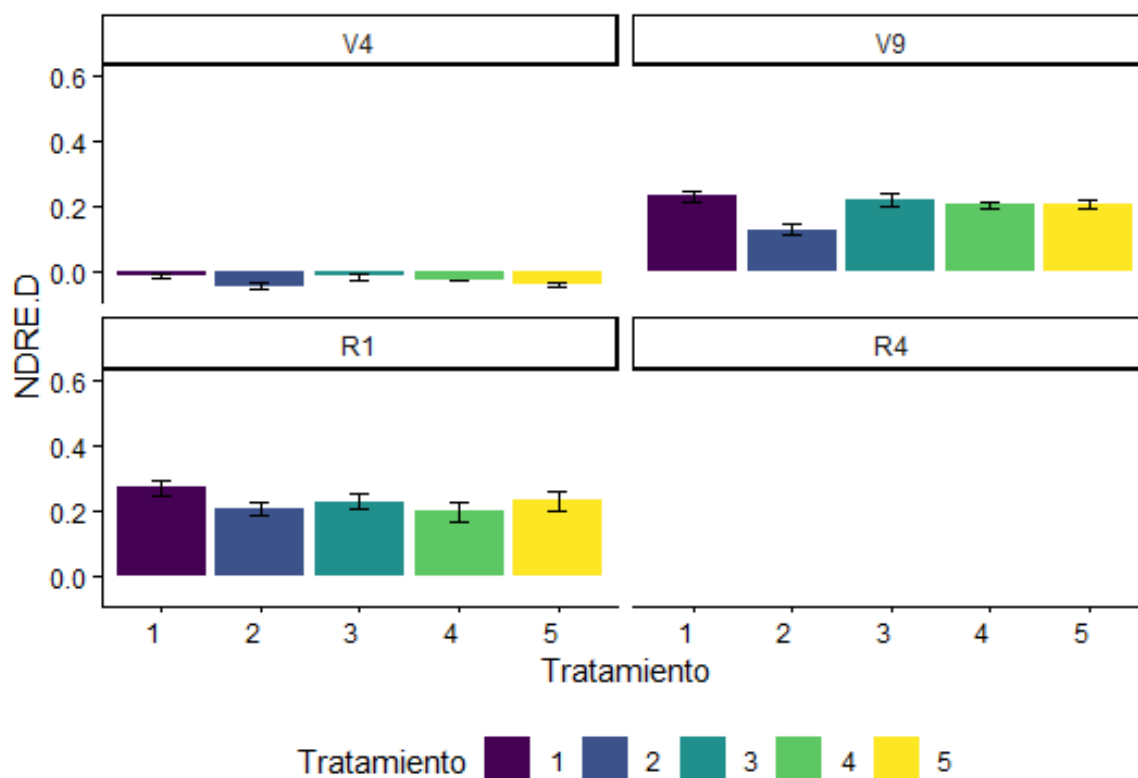


Figura 3. NDRE por etapa fenológica para cinco tratamientos de fertilización nitrogenada aplicada sobre el cultivo de maíz. El índice vegetativo deriva de imágenes obtenidas mediante dron. Las barras indican la desviación estándar. No se contó con registros del dron en la etapa R4.

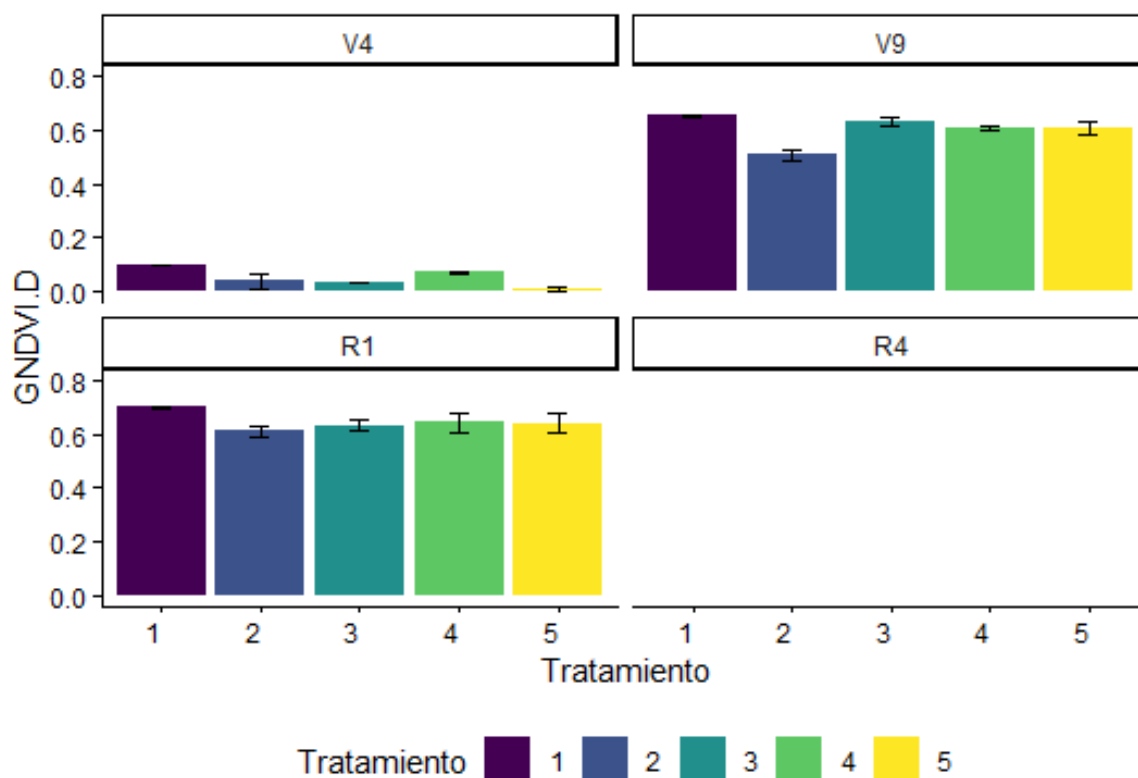


Figura 4. GNDVI por etapa fenológica para cinco tratamientos de fertilización nitrogenada aplicada sobre el cultivo de maíz. El índice vegetativo deriva de imágenes obtenidas mediante dron. Las barras indican la desviación estándar. No se contó con registros del dron en la etapa R4.

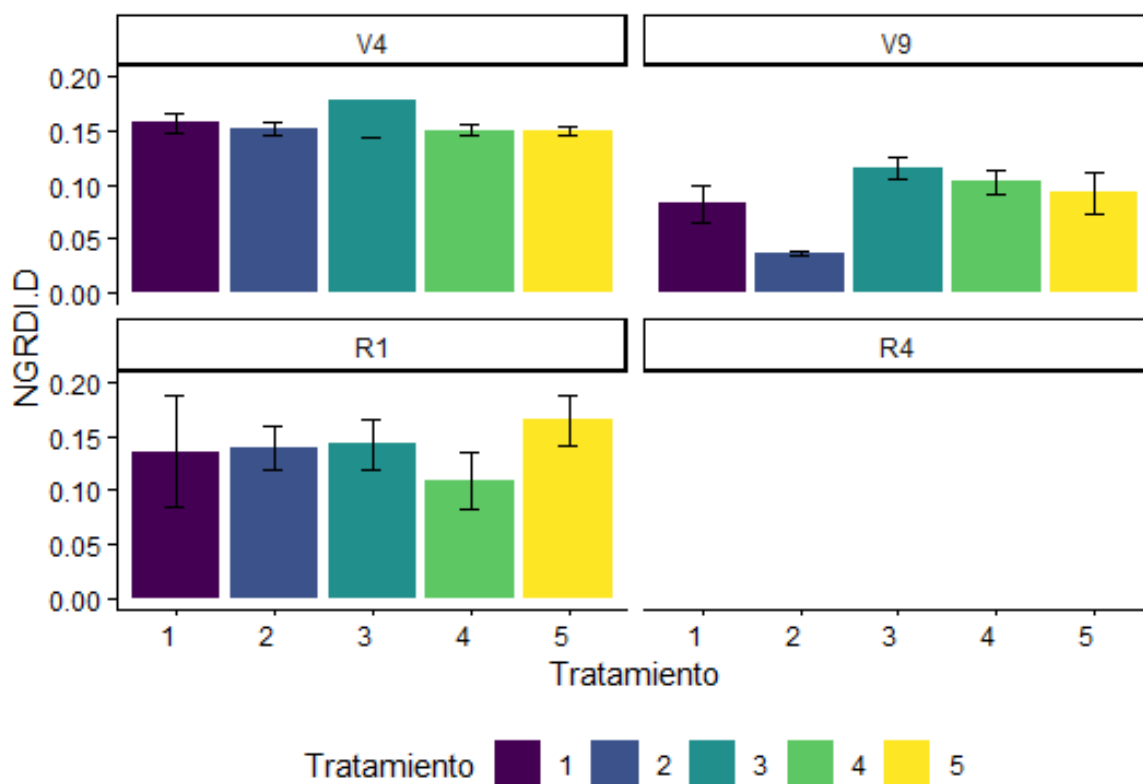


Figura 5. NGRDI por etapa fenológica para cinco tratamientos de fertilización nitrogenada aplicada sobre el cultivo de maíz. El índice vegetativo deriva de imágenes obtenidas mediante dron. Las barras indican la desviación estándar.

Índices vegetativos derivados de imágenes satelitales

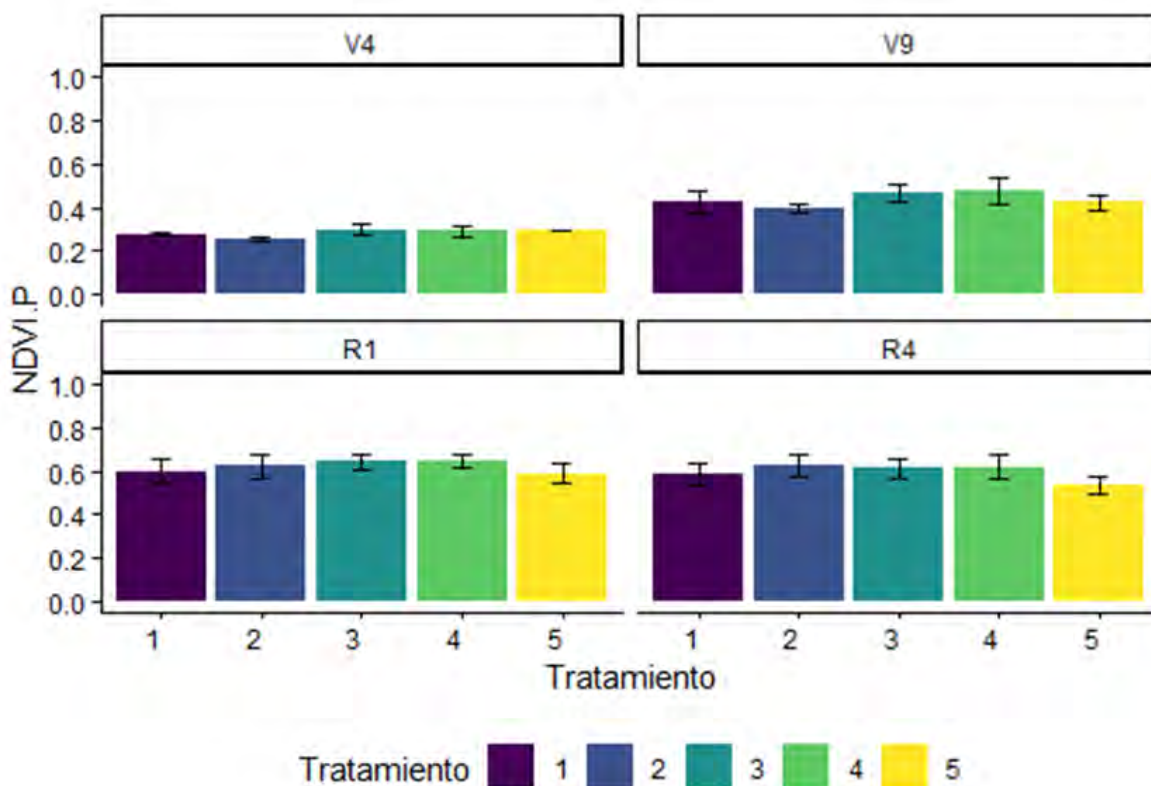


Figura 6. NDVI por etapa fenológica para cinco tratamientos de fertilización nitrogenada aplicada sobre el cultivo de maíz. El índice vegetativo deriva de imágenes obtenidas mediante el satélite PlanetScope. Las barras indican la desviación estándar.

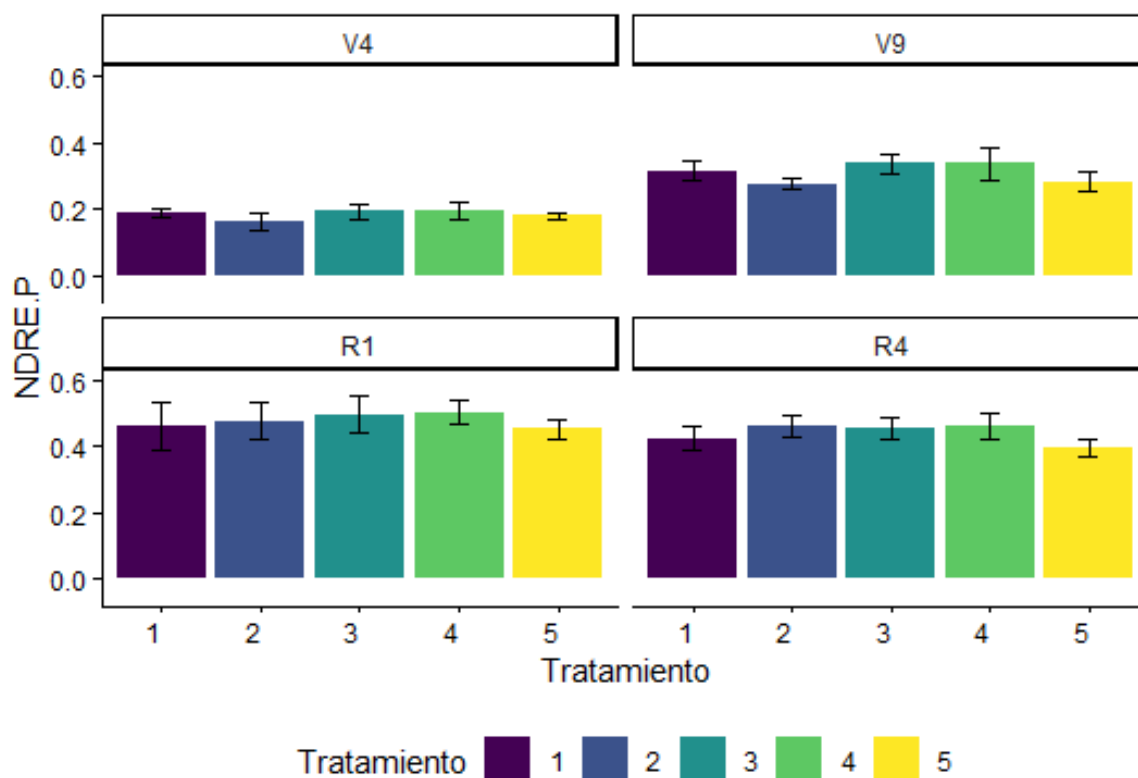


Figura 7. NDRE por etapa fenológica para cinco tratamientos de fertilización nitrogenada aplicada sobre el cultivo de maíz. El índice vegetativo deriva de imágenes obtenidas mediante el satélite PlanetScope. Las barras indican la desviación estándar.

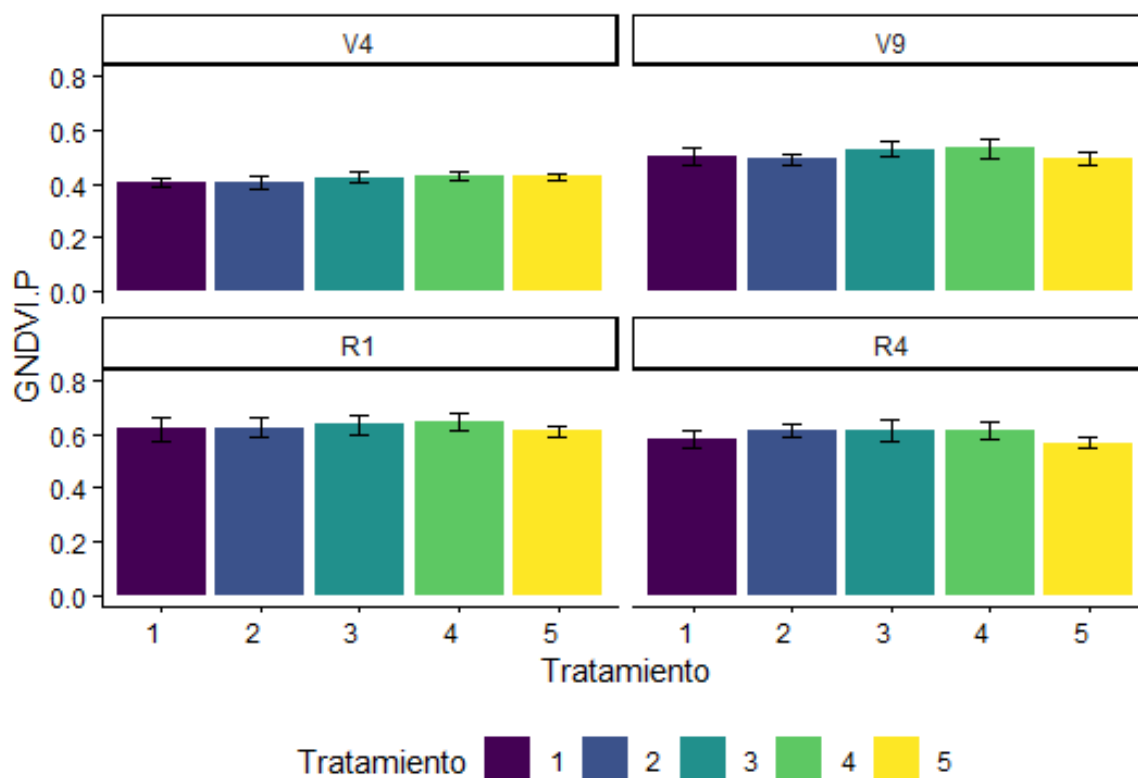


Figura 8. GNDVI por etapa fenológica para cinco tratamientos de fertilización nitrogenada aplicada sobre el cultivo de maíz. El índice vegetativo deriva de imágenes obtenidas mediante el satélite PlanetScope. Las barras indican la desviación estándar.

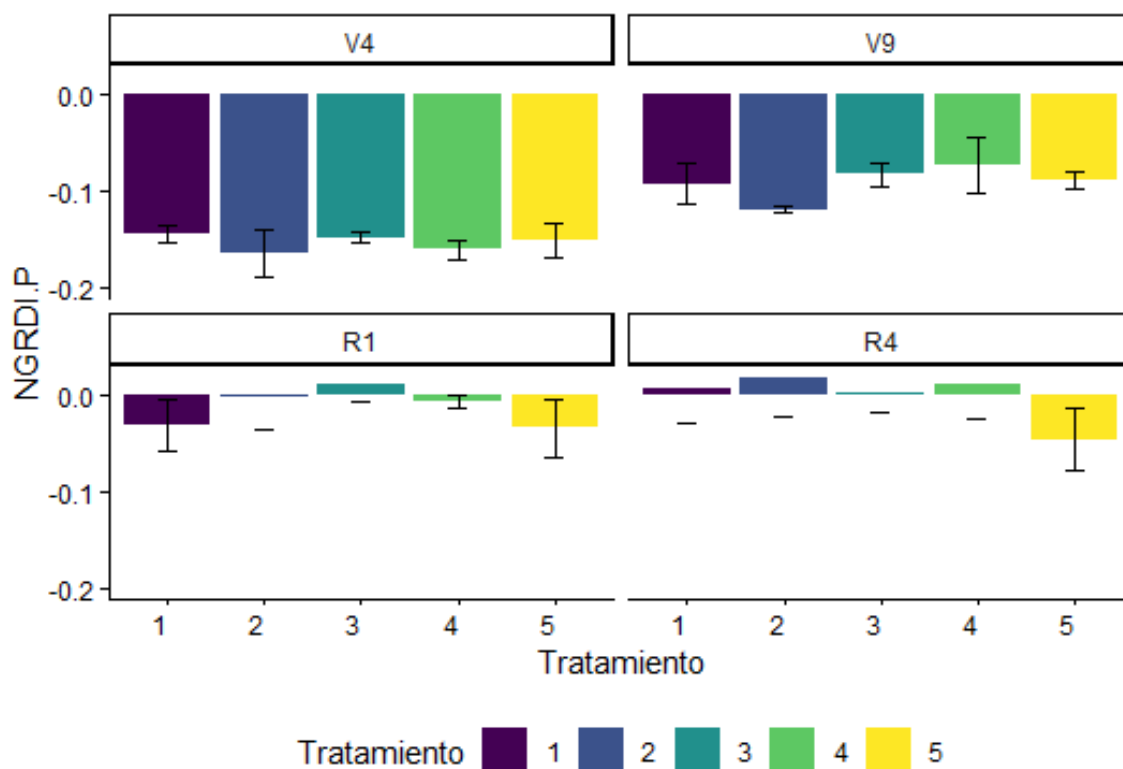


Figura 9. NGRVI por etapa fenológica para cinco tratamientos de fertilización nitrogenada aplicada sobre el cultivo de maíz. El índice vegetativo deriva de imágenes obtenidas mediante el satélite PlanetScope. Las barras indican la desviación estándar.

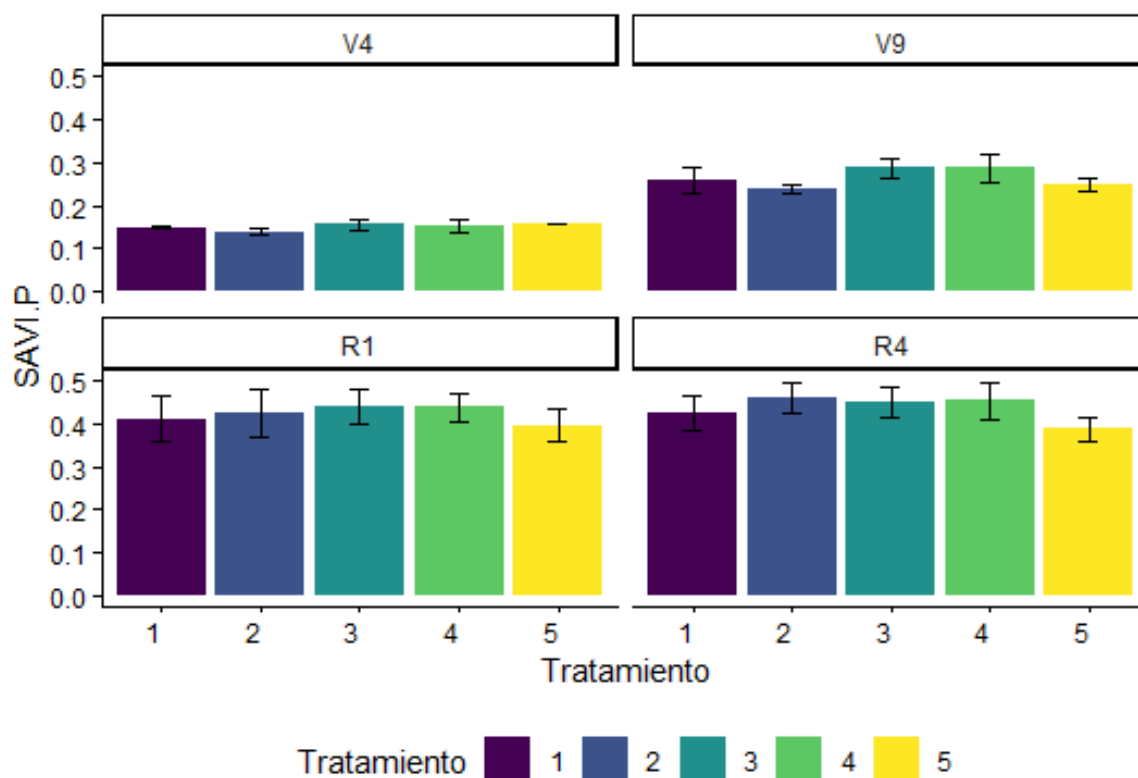


Figura 10. SAVI por etapa fenológica para cinco tratamientos de fertilización nitrogenada aplicada sobre el cultivo de maíz. El índice vegetativo deriva de imágenes obtenidas mediante el satélite PlanetScope. Las barras indican la desviación estándar.

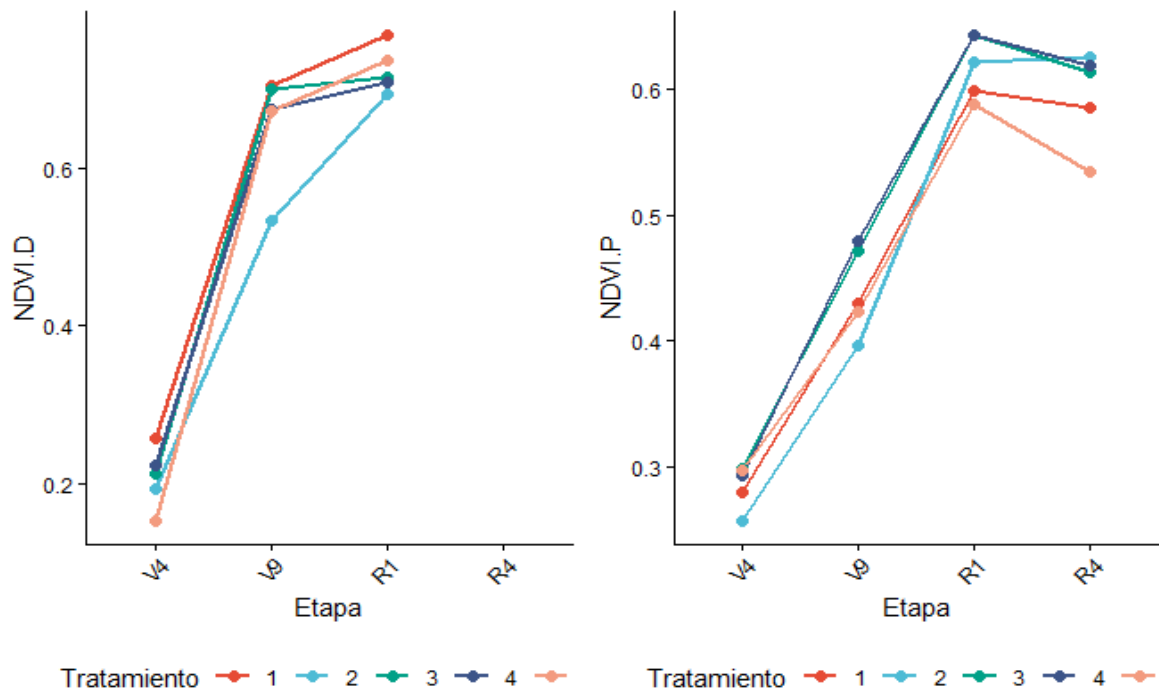


Figura 11. Curva de NDVI derivado de imágenes obtenidas mediante el dron (NDVI.D) y mediante imágenes satelitales de PlanetScope (NDVI.P) en el cultivo de maíz bajo cinco tratamientos de fertilización nitrogenada.

Los índices derivados de imágenes satelitales NDVI, GNDVI y NDRE mostraron asociaciones fuertes con sus equivalentes derivados de imágenes obtenidas mediante el dron ($r > 0.80$). El análisis de correlación entre índices vegetativos mostró asociaciones fuertes (negativas) con el contenido de nitrógeno en planta y moderados a fuerte (positivos) con la biomasa registrada en cada etapa de muestreo. Con base en lo anterior, se estandarizó el contenido de nitrógeno por la cantidad de biomasa generada en cada tratamiento obteniéndose así el contenido de nitrógeno por área.

Los índices vegetativos mejor correlacionados con el contenido de nitrógeno por unidad de área (gr N/m^2) mostraron correlaciones positivas de hasta 0.704, y estos fueron SAVI.P, NGRDI.P, NDVI.P y NDVI.D, en ese orden.



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

Instituto Tecnológico de Sonora

5 de Febrero No. 818 sur

T. (644) 410-09-00

C.P. 85000 Ciudad Obregón, Sonora, México.

www.itson.mx

Modelo predictivo

En función del análisis de correlación previo, se determinó que el índice SAVI.P explica mejor el contenido de nitrógeno en planta (gr N/m^2), es decir, hasta un 70% de la variación en el contenido de N se puede explicar mediante este índice vegetativo. La ecuación matemática obtenida para predicciones del contenido de N resultó de la siguiente forma:

$$y = 14284x - 2437.2$$

Donde:

y = gr de nitrógeno/ m^2

x = SAVI.P

ANEXO 1

Nombre del proyecto

Uso de imágenes de alta resolución espacial para determinar las necesidades de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz en el Valle del Yaqui

Diversos índices de vegetación estimados con sensoría remota satelital en cultivo experimental de maíz, en una zona agrícola del noroeste de México

Diversos índices de vegetación estimados con sensoría remota satelital en cultivo experimental de maíz, en una zona agrícola del noroeste de México

Octubre de 2025

PERCEPCIÓN REMOTA E ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Las imágenes de satélite son, hoy en día, una potente herramienta para identificar características terrestres en amplias coberturas geográficas y con distintos niveles de resolución espacial y temporal. Desde la detonación del monitoreo sistemático del globo terráqueo por medio de sensores montados en satélites allá en los albores de 1972, se han venido desarrollando diversas plataformas, muchas de ellas de acceso libre a la descarga de datos, con resoluciones espaciales moderadas (algunos hm^2), hasta contar con imágenes de 30, 20 e incluso 10 m^2 por pixel. Algunos ejemplos de estas tecnologías satelitales son las misiones: Landsat, Terra/Aqua, Sentinel, entre otras. También existen plataformas orbitales que sensan datos a muy alta resolución espacial: 5, 3, 1 m^2 y hasta submétricas por pixel; éstas por lo general son comerciales y las imágenes tienen un costo en función de su resolución espacial, cobertura y su nivel de procesamiento.

La disciplina que amalgama los distintos procesos de adquisición y procesamiento de imágenes satelitales se le conoce por el nombre de percepción remota o teledetección. Los sensores remotos más empleados son los llamados ópticos, que cuentan con instrumentos de sensoría pasiva que captan imágenes en distintos canales del espectro electromagnético: bandas del visible (VIS, acrónimo en inglés), infrarrojo cercano (NIR, siglas en inglés), infrarrojo medio (MIR, siglas en inglés) e infrarrojo térmico (TIR, siglas en inglés).

En las últimas tres o cuatro décadas han sido desarrollados numerosos índices de vegetación (VI, siglas en inglés), calculados a partir de datos espectrales proporcionados por los sensores remotos satelitales, con la finalidad de obtener información sobre el estado de la vegetación y sus características. Estos índices aprovechan el particular comportamiento radiométrico de la vegetación sana en las diferentes bandas espectrales, especialmente, entre el VIS y el NIR. Mientras en el VIS, en particular la banda roja, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al NIR (Chuvienco, 2002).

Estos contrastes son los que aprovechan los VI para establecer diferencias en la vegetación; sana y vigorosa cuando los contrastes son mayores y vegetación enferma o de baja densidad cuando éstos son reducidos (García, 2022).

Las bases de datos de los VI recopiladas a través del tiempo y en diversas regiones del planeta, se convierten en una robusta herramienta científica que ayuda en la preservación de la vegetación silvestre, llámense flora desértica, matorrales, sabanas, montes, bosques caducifolios o perennes, incluido el fitoplancton oceánico. Por otro lado, los VI favorecen la inspección de la actividad agrícola que provee granos, frutas y legumbres, base de la alimentación de la población mundial.

No menos importante es la contribución de la flora en la atenuación del cambio climático. La vegetación terrestre es responsable (vía fotosíntesis) del «secuestro» de aproximadamente 50,000 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono (CO₂), gas invernadero que los humanos han introducido en la atmósfera a una velocidad nunca vista y con pocas perspectivas de que se reduzca en forma sustancial. Sin embargo, cada año se extraen de la atmósfera cerca de 100,000 millones de toneladas métricas de este gas; si no fuera así, el clima terrestre ya habría cambiado hace muchos años. Si la vegetación terrestre extrae alrededor de la mitad de CO₂, ¿quién es responsable de extraer la otra mitad? Tal vez sorprenda saber que son los organismos microscópicos que deambulan por la superficie del océano, conocidos científicamente como fitoplancton. Por lo anterior, entender su variabilidad y su papel como reguladores del calentamiento terrestre es también de vital importancia (Pallàs-Sanz *et al.*, 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS (CASO DE ESTUDIO)

Planet Laboratories, Inc. es una compañía privada de satélites para la observación de la Tierra, establecida en San Francisco, California, EE. UU. Diseñan y fabrican satélites de miniatura tipo Triple-CubeSat (10x10x30 cm) llamados Doves, los cuales son puestos en órbita como carga útil secundaria de otras misiones de lanzamiento satelital. Cada Dove está equipado con un telescopio de alta potencia y una cámara, programados para capturar diferentes franjas del Planeta. La plataforma satelital PlanetScope, con resolución espacial de 3 m, está conformada por una flotilla de Doves, cuyo instrumento ampliado, SuperDove (PSB.SD, iniciales de identificación), fue construido con el telescopio PSB y la misma respuesta de filtro que el instrumento precedente PS2.SD (Dove-R). PlanetScope captura las bandas del rojo (Red), verde (Green II), azul (Blue), NIR, así como borde rojo (Red edge), verde adicional (Green I), azul costero (Costal blue) y canal amarillo (Yellow). El sistema satelital genera productos con escenas que cubren una superficie aproximada de 32.5x19.6 km². Las primeras imágenes disponibles de PlanetScope datan de mediados de marzo de 2020 y su sensor continúa monitoreando la Tierra hasta hoy en día.

En las Fig. 1, 2, 3, 4, 5 y 6 pueden observarse algunas subáreas del Valle del Yaqui, zona agrícola del noroeste de México. Las imágenes fueron capturadas por PlanetScope a finales del año 2024, en trayectoria cuasipolar de norte a sur, hora UTC (tiempo universal coordinado) con tiempo de sensado cada 2 s y franja con ancho de barrido ligeramente superior a 30 km. La etiqueta identificadora de cada escena se halla al pie de cada figura.



Fig. 1. Imagen de PlanetScope con paleta en color verdadero y valores de reflectancia de superficie, en una zona del Valle del Yaqui, en el noroeste de México.

Escena: 20240131_175643_31_247c_3B_AnalyticMS_SR_clip.

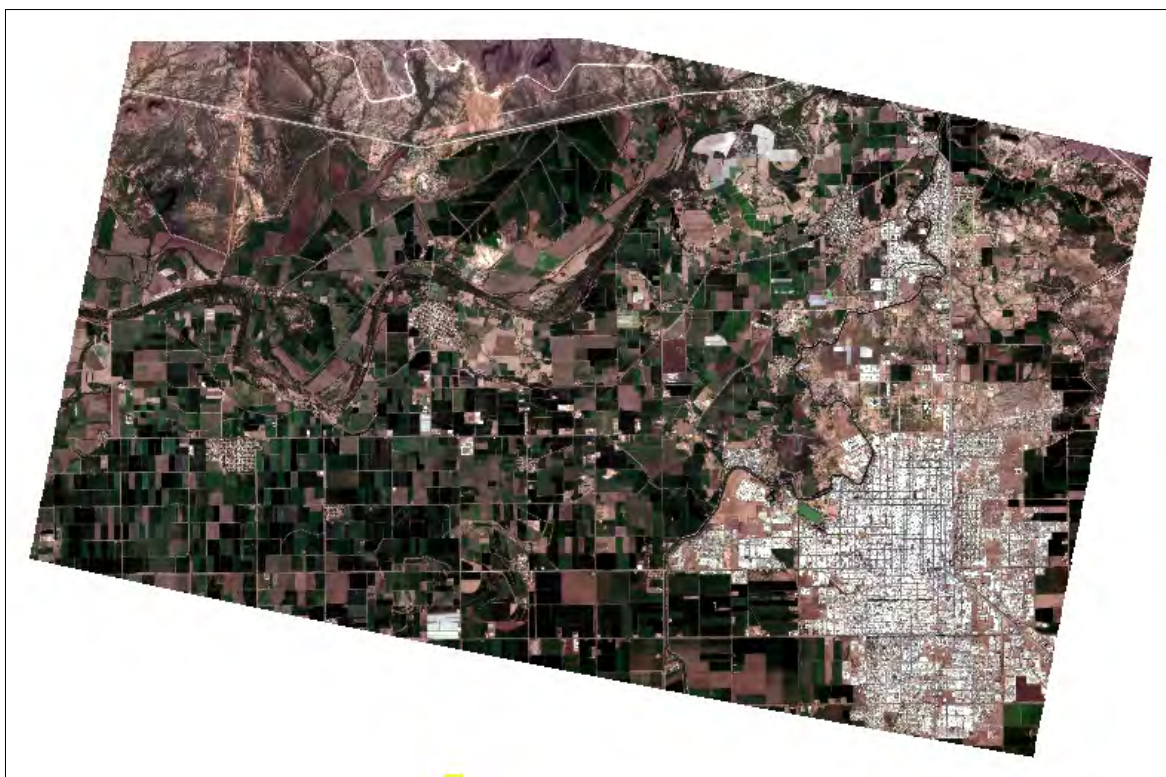


Fig. 2. Imagen de PlanetScope con paleta en color verdadero y valores de reflectancia de superficie, en una zona del Valle del Yaqui, en el noroeste de México.

Escena: 20240131_175645_28_247c_3B_AnalyticMS_SR_clip.

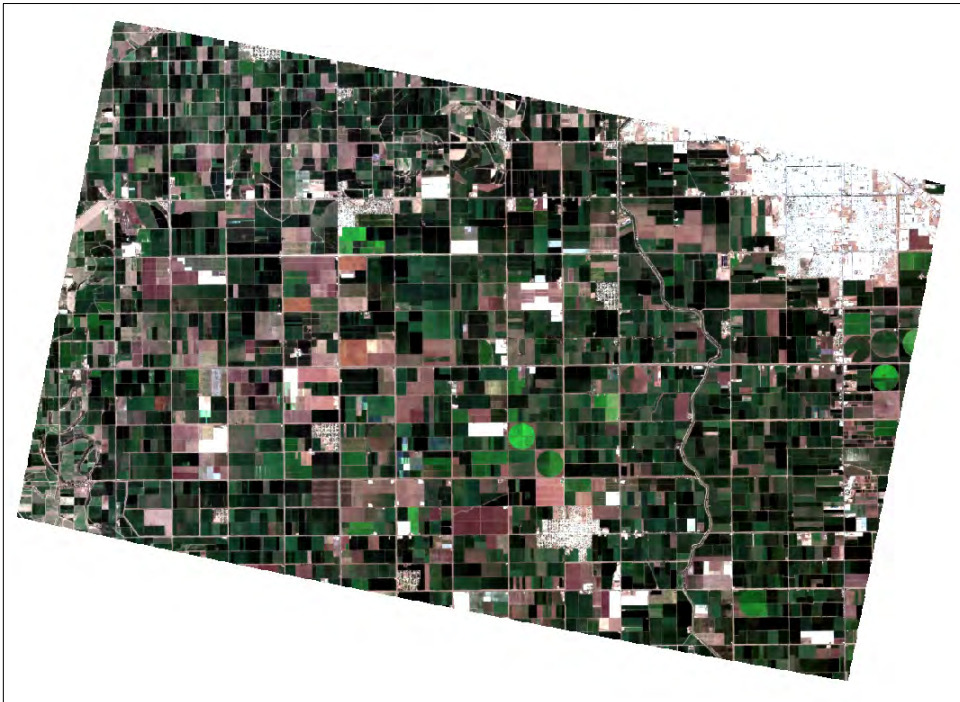


Fig. 3. Imagen de PlanetScope con paleta en color verdadero y valores de reflectancia de superficie, en una zona del Valle del Yaqui, en el noroeste de México.
Escena: 20240131_175647_25_247c_3B_AnalyticMS_SR_clip.

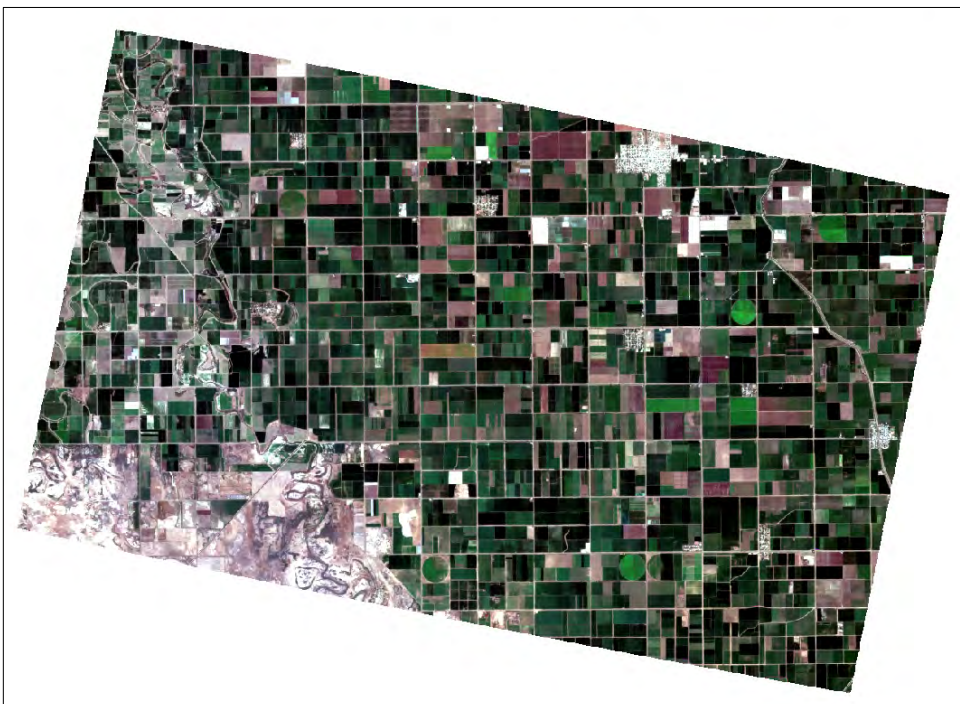


Fig. 4. Imagen de PlanetScope con paleta en color verdadero y valores de reflectancia de superficie, en una zona del Valle del Yaqui, en el noroeste de México.

Escena: 20240131_175649_21_247c_3B_AnalyticMS_SR_clip.

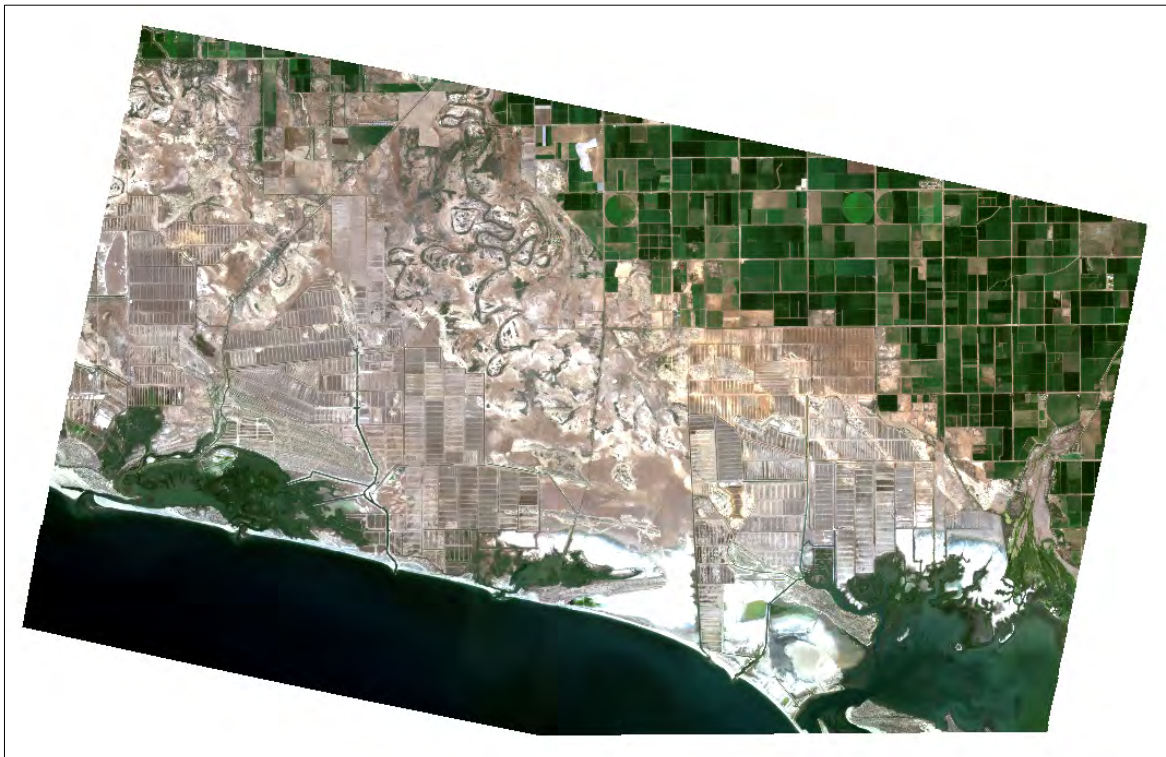


Fig. 5. Imagen de PlanetScope con paleta en color verdadero y valores de reflectancia de superficie, en una zona del Valle del Yaqui, en el noroeste de México.

Escena: 20240131_175651_18_247c_3B_AnalyticMS_SR_clip.

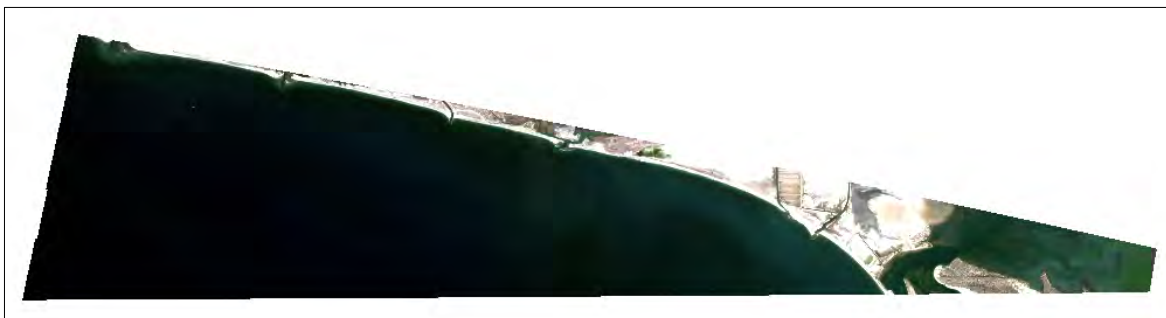


Fig. 6. Imagen de PlanetScope con paleta en color verdadero y valores de reflectancia de superficie, en una zona del Valle del Yaqui, en el noroeste de México.

Escena: 20240131_175653_15_247c_3B_AnalyticMS_SR_clip.

El compuesto de las seis imágenes anteriores muestra la franja de barrido en trayectoria cuasi polar (norte a sur) del sistema de satélites de PlanetScope (Fig. 7), donde el instrumento de sensado capturó una porción del Valle del Yaqui, parte de la costa del Golfo de California, la cuadrícula de sembradíos de la zona agrícola y la mancha urbana de Ciudad Obregón, cabecera del municipio de Cajeme, Sonora.

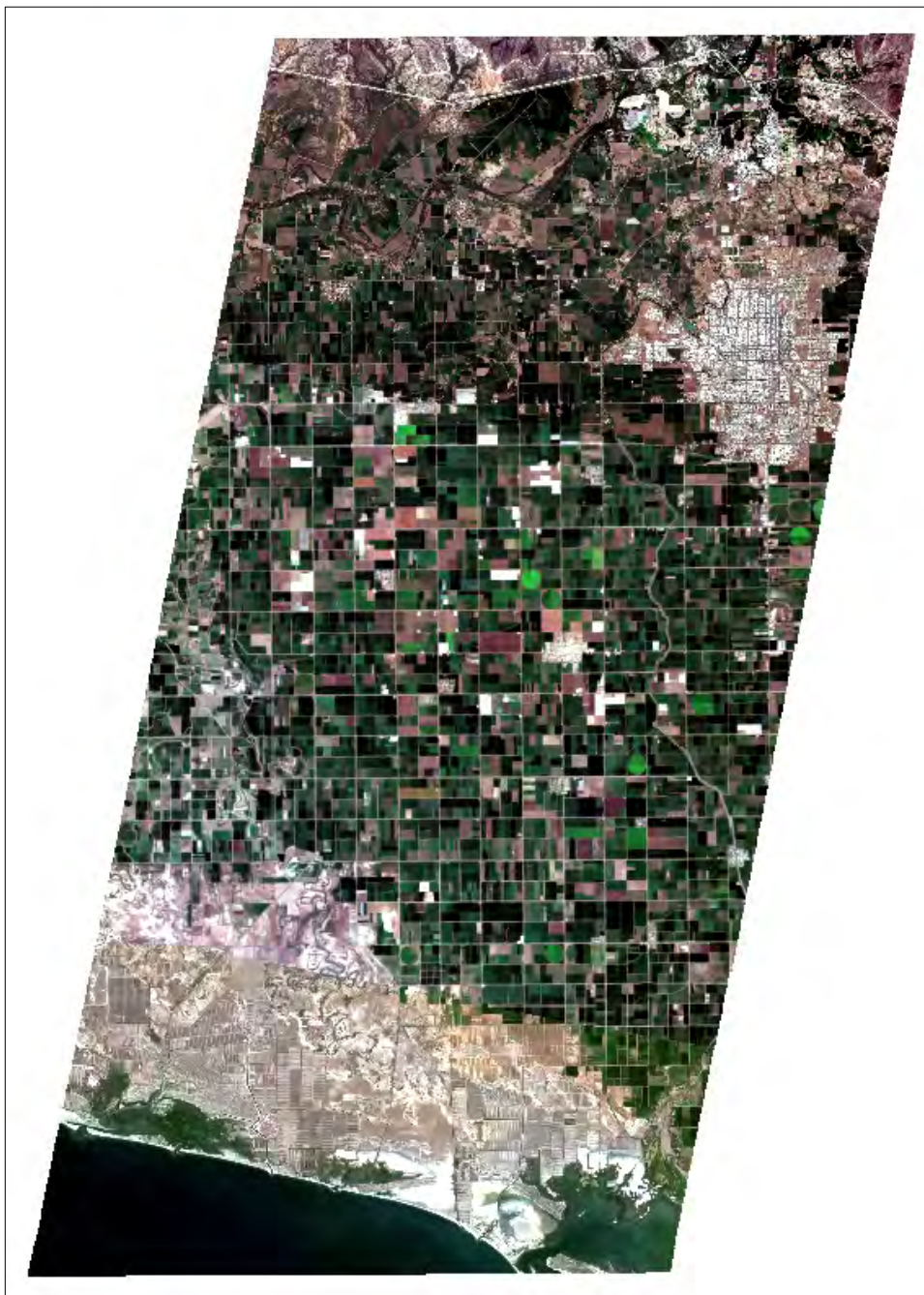


Fig. 7. Imagen de PlanetScope con paleta en color verdadero y valores de reflectancia de superficie, que muestra la franja de barrido del sensor satelital, en una zona del Valle del Yaqui, en el noroeste de México.

El sitio de estudio se localizó al sur de Ciudad Obregón, en el Centro Experimental y Transferencia de Tecnología (CETT-910) del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), ubicado en el *Block* 910 del Valle del Yaqui, Sonora, México (Fig. 8).

A finales del año 2024 se estableció en la zona de interés un cultivo experimental de maíz para el proyecto:

‘Uso de imágenes de alta resolución espacial para determinar las necesidades de fertilización nitrogenada en un cultivo de maíz, en la región agrícola del Valle del Yaqui, en el noroeste de México’, liderado por el Dr. Jaime Garatuza Payán (ITSON).

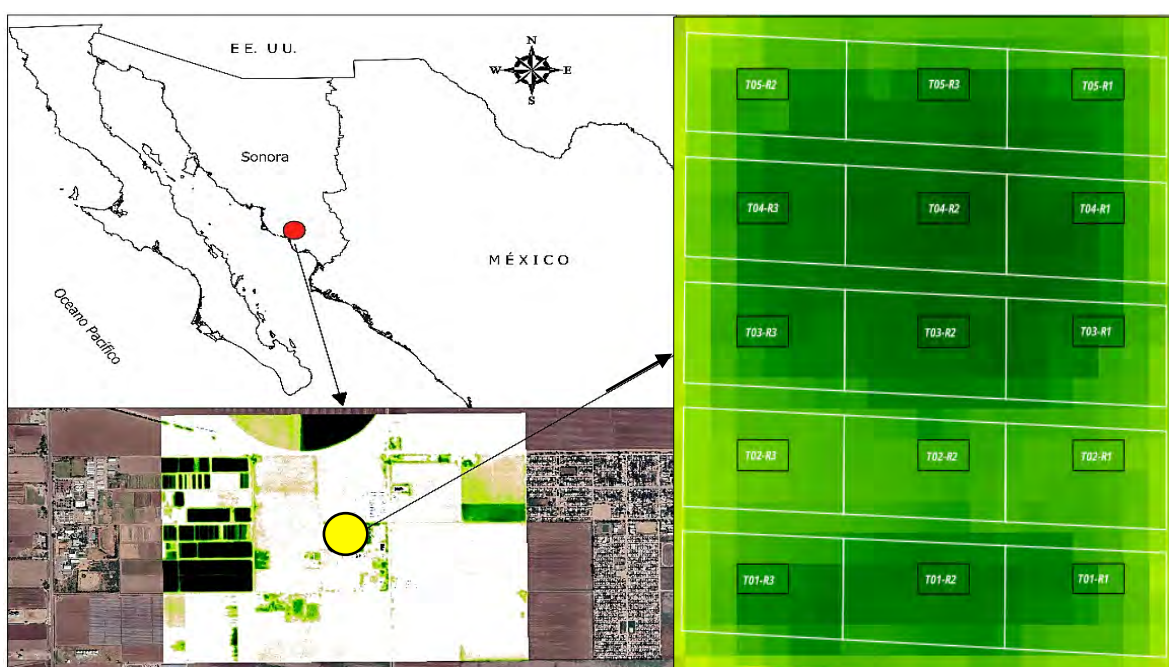


Fig. 8. Localización del sitio de estudio en el contexto nacional, mostrando imagen del índice de vegetación NDVI estimado con PlanetScope y el arreglo parcelario para el experimento en cultivo de maíz, Valle del Yaqui, Sonora, noroeste de México.

Se contó con un repositorio de 104 imágenes multiespectrales de PlanetScope (resolución espacial de 3 m). Las fechas de adquisición de las imágenes disponibles parten del 23 de diciembre de 2024 al 29 de junio de 2025. Los VI que se utilizaron para estudiar las distintas etapas fenológicas del cultivo fueron seis estandarizados, para valores que fluctúan entre - 1 y +1. El umbral de las áreas vegetadas se estableció entre 0 y 1; es decir, se aislaron los valores mayores que 0, los cuales sugieren distintas coberturas vegetales: cercanas a 0 muy ralas o enfermas y próximas a 1 muy espesas o vigorosas.

Las fórmulas de los VI de diferencia normalizada se presentan a continuación:

GNDVI (Green Normalized Vegetation Index): índice de vegetación de diferencia normalizada verde:

$$GNDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{GREEN})}{(R_{NIR} + R_{GREEN})}$$

NDRE (Normalized Difference Red Edge): índice de diferencia normalizada de borde rojo:

$$NDRE = \frac{(R_{NIR} - R_{RED\ EDGE})}{(R_{NIR} + R_{RED\ EDGE})}$$

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): índice de vegetación de diferencia normalizada:

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED})}$$

NGRDI (Normalized Green-Red Difference Index): índice de diferencia normalizada verde-rojo:

$$NGRDI = \frac{(R_{GREEN} - R_{RED})}{(R_{GREEN} + R_{RED})}$$

SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index): índice de vegetación ajustado al suelo:

$$SAVI = 1.5 \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED} + 0.5)}$$

LCI (Leaf Chlorophyll Index): índice de clorofila foliar:

$$LCI = \frac{(R_{NIR} - R_{RED\ EDGE})}{(R_{NIR} + R_{RED})}$$

Además, se contemplaron dos VI no estandarizados con valores mayores que 1:

GCI (Green Chlorophyll Index): índice de clorofila verde:

$$GCI = \frac{R_{NIR}}{R_{GREEN}} - 1$$

RCI (Red-Edge Chlorophyll Index): índice de clorofila de borde rojo:

$$RCI = \frac{R_{NIR}}{R_{RED\ EDGE}} - 1$$

En total fueron ocho los VI estimados mediante sensoría remota, donde R_{GREEN} es la reflectancia de la radiación en el rango del verde, R_{RED} en el rango del rojo, $R_{RED\ EDGE}$ en el rango del borde rojo y R_{NIR} en el rango del NIR.

Para el cálculo de los VI se emplearon las bandas B4 (Green), B6 (Red), B7 (Red edge) y B8 (NIR), que contienen valores enteros de reflectancia de superficie escalados por 10^4 . Los valores de reflectancia real se obtienen dividiendo los datos escalados entre 10^4 .

Las características espectrales de las imágenes de PlanetScope se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Bandas y longitudes de onda del sensor de PlanetScope.

| Bandas ordenadas | Longitud de onda en nm |
|--------------------------------|------------------------|
| B1: Costal blue (azul costero) | 431 – 452 |
| B2: Blue (azul) | 465 – 515 |
| B3: Green I (verde adicional) | 513 – 549 |
| B4: Green II (verde) | 547 – 583 |
| B5: Yellow (amarillo) | 600 – 620 |
| B6: Red (rojo) | 650 – 680 |
| B7: Red edge (borde rojo) | 697 – 713 |
| B8: NIR (infrarrojo cercano) | 845 – 885 |

© 2025 Planet Labs PBC.

Para el procesamiento de las imágenes de satélite y trabajos de digitalización se empleó el *software* QGIS, versión 3.44.1-Solothurn (2025). Se digitalizaron 15 polígonos en parcelas de maíz para cinco zonas de tratamiento (T) con distintas aplicaciones de nitrógeno, cada zona con tres repeticiones (R). Las 104 imágenes multiespectrales con datos de reflectancia en ocho bandas se procesaron en batería para el cálculo de los ocho índices en estudio, utilizando la calculadora ráster GDAL (biblioteca de código abierto para formatos de datos geoespaciales) y se extrajo también en batería la información particular de valores de reflectancia y de los VI, empleando una máscara de los píxeles de interés por parcela. El trabajo de procesamiento se llevó a cabo en el Laboratorio de Percepción Remota (LPR) del ITSON, a cargo del Dr. Jaime Garatuza Payán y colaboradores. La Fig. 9 muestra las parcelas experimentales en el cultivo de maíz, digitalizadas sobre una ortofoto georreferenciada con paleta de color verdadero, capturada por dron el 26 de marzo de 2025. Alrededor y entre parcelas pueden apreciarse zonas de aislamiento para evitar el efecto de borde. Además, para minimizar errores de geoposición en el cultivo de maíz, se decidió utilizar un arreglo de dos píxeles “centrales” como máscara para la extracción de los valores de los VI por parcela.



Fig. 9. Parcelas experimentales en cultivo de maíz en el CETT-910, etiquetadas por tratamientos (T) nitrogenados en tres repeticiones (R) cada uno; digitalización realizada sobre ortofoto capturada por dron el 26 de marzo de 2025 (cortesía: Dra. Masuly Vega, ITSON).

RESULTADOS

En un contexto agroecológico, el maíz puede clasificarse en dos tipos distintos dependiendo de la latitud y del ambiente en el que se cultiva. El maíz cultivado en los ambientes más cálidos, entre la línea ecuatorial y los 30° de latitud sur y los 30° de latitud norte es conocido como maíz tropical, mientras que aquel que se cultiva en climas más fríos, más allá de los 34° de latitud sur y norte es llamado maíz de zona templada; los maíces subtropicales crecen entre las latitudes de 30° y 34° de ambos hemisferios. Ésta es una descripción muy general ya que los maíces tropicales y templados no obedecen a límites regionales o latitudinales rígidos. La gran variabilidad genética en el cultivo del maíz le da la característica de poder ser sembrado en una gran diversidad de condiciones agroecológicas, desde las zonas templadas desérticas hasta las del trópico húmedo. Muchos autores coinciden en que el maíz se siembra desde los 60° latitud norte en Canadá hasta los 40° latitud sur en Argentina y en alturas que van desde el nivel del mar hasta los 3,200 m sobre el nivel medio del mar. Estas particularidades convierten al maíz en una de las especies de mayor adaptación y utilidad para el ser humano (Reyes, 1990).

La Fig. 10 muestra la fenología del cultivo de maíz como se presenta en el noroeste de México.

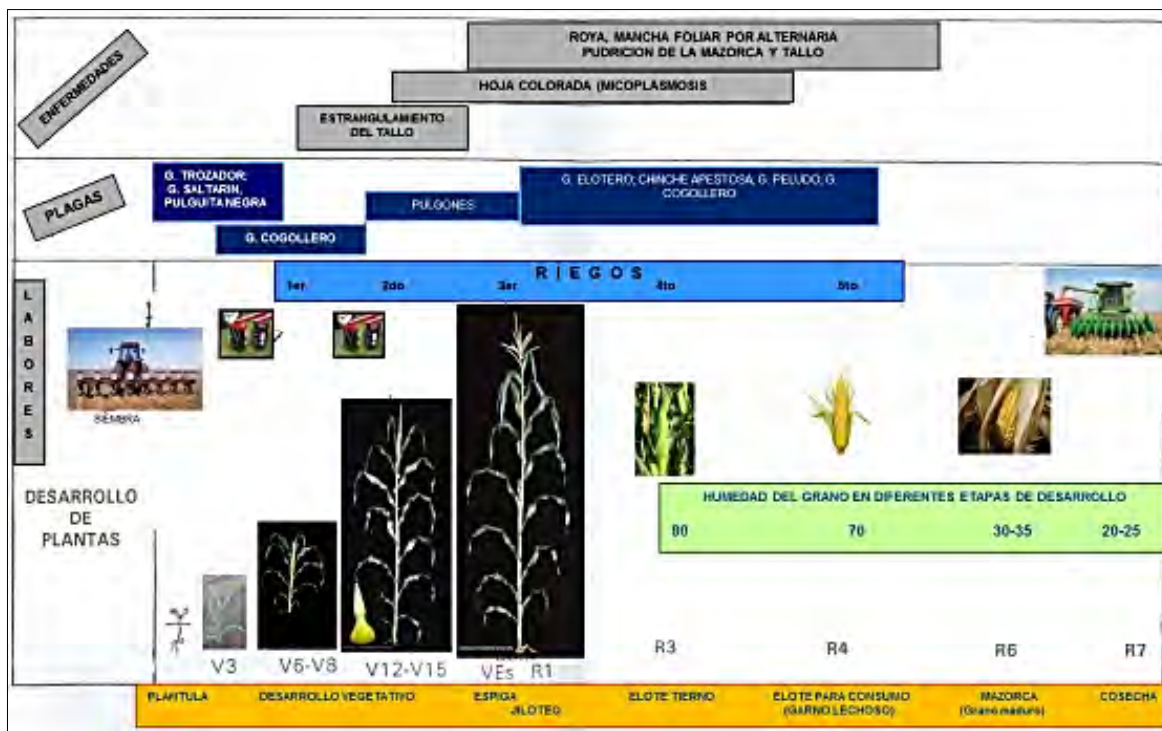


Fig. 10. Etapas fenológicas del cultivo de maíz en el noroeste de México.

Adaptación de INIFAP – CIFAPSON, 2002.

Las fechas de los muestreos realizados por el equipo de fisiología del ITSON, encabezado por la Dra. Reyna Suzuki Pinto y colaboradores, sugiere cuatro momentos relevantes que relacionan aspectos fenológicos con la adquisición o captura de las imágenes multibanda del satélite PlanetScope, además de una fecha adicional donde se manifiesta la madurez fisiológica del cultivo y su franco estado de senescencia (Tabla 2). La Tabla 3 presenta las aplicaciones de nitrógeno, realizadas a partir de la dosis recomendada (100%) en las parcelas de maíz (etiquetas y distribución espacial de tratamientos en Fig. 9).

Tabla 2. Etapas fenológicas del maíz, coincidentes con las fechas de adquisición de las imágenes de satélite.

| Etapa fenológica del cultivo | Fecha |
|--|-----------------------|
| E1: Vegetativa, cuatro hojas (V4) | 29 de enero de 2025 |
| E2: Vegetativa, nueve hojas (V9) | 24 de febrero de 2025 |
| E3: Reproductiva, visibilidad de estigmas (R1) | 10 de abril de 2025 |
| E4: Reproductiva, grano masoso (R4) | 10 de mayo de 2025 |
| E5: Madurez fisiológica (R6) | 18 de junio de 2025 |

Pinto *et al.*, 2025.

Tabla 3. Dosis de nitrógeno, como porcentaje de la dosis recomendada, en los diferentes tratamientos aplicados al cultivo de maíz.

| Tratamiento (T##) | Dosis (%) |
|-------------------|-----------|
| T01 | 100 |
| T02 | 87.5 |
| T03 | 75 |
| T04 | 62.5 |
| T05 | 50 |

Pinto *et al.*, 2025.

Las imágenes multiespectrales de PlanetScope y los resultados gráficos del proceso para la obtención de los valores de los VI, en las fechas de las etapas fenológicas consignadas en la Tabla 2, se muestran a continuación. Se hallan acotadas a la zona de interés en el CETT-910 del ITSON y manteniendo el orden siguiente:

1. Imágenes satelitales procesadas para la estimación de los VI de proyecto. Son escenas adquiridas con nivel de procesamiento 'Level-2', es decir, georreferenciadas y corregidas atmosférica y radiométricamente, con datos finales de reflectancias de superficie (Fig. 11 – 15).

2. Imágenes con valores estimados de ocho VI: GNDVI, NDRE, NDVI, NGRDI, SAVI, LCI, GCI y RCI. Las bandas empleadas para el cálculo de los VI son: B4-Green, B6-Red, B7-Red edge y B8-NIR (Fig. 16 – 23).
3. Gráficas de barras con los valores estimados promedio en cada etapa fenológica: 1-Vegetativa, cuatro hojas (V4), 2-Vegetativa, nueve hojas (V9), 3-Reproductiva, visibilidad de estigmas (R1) y 4-Reproductiva, grano masoso (R4); incluye diagramas de caja y bigote que muestran la variabilidad de los datos por etapa (Fig. 24 – 31).



Fig. 11. Imagen satelital de PlanetScope en color verdadero, con valores de reflectancia de superficie acotados al CETT-90 del ITSON. La cuadrícula en color amarillo ubica las parcelas de tratamiento en maíz. Fecha de adquisición: 29 de enero de 2025.



Fig. 12. Imagen satelital de PlanetScope en color verdadero, con valores de reflectancia de superficie acotados al CETT-90 del ITSON. La cuadrícula en color amarillo ubica las parcelas de tratamiento en maíz. Fecha de adquisición: 24 de febrero de 2025.



Fig. 13. Imagen satelital de PlanetScope en color verdadero, con valores de reflectancia de superficie acotados al CETT-90 del ITSON. La cuadrícula en color amarillo ubica las parcelas de tratamiento en maíz. Fecha de adquisición: 10 de abril de 2025.



Fig. 14. Imagen satelital de PlanetScope en color verdadero, con valores de reflectancia de superficie acotados al CETT-90 del ITSON. La cuadrícula en color amarillo ubica las parcelas de tratamiento en maíz. Fecha de adquisición: 10 de mayo de 2025.

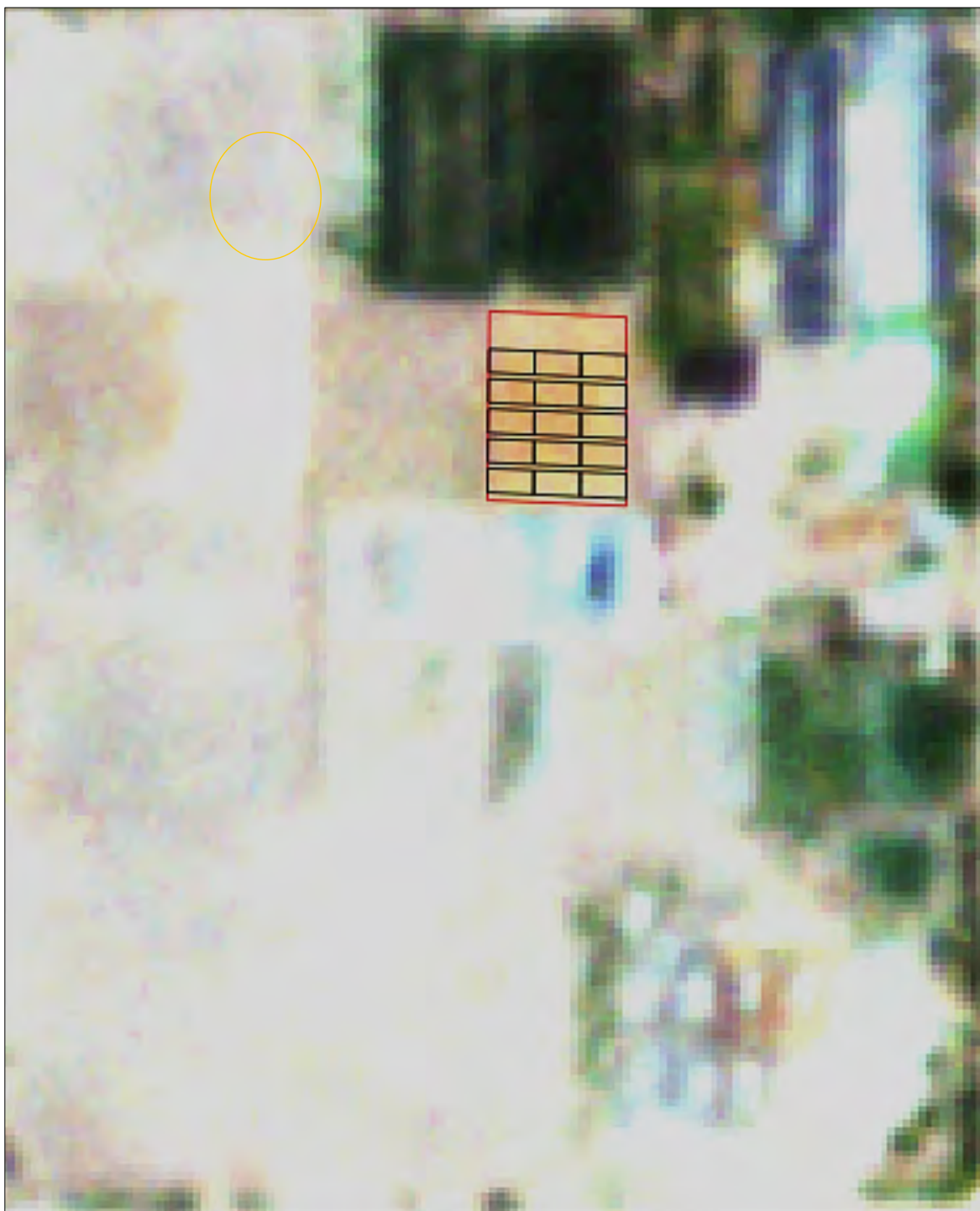
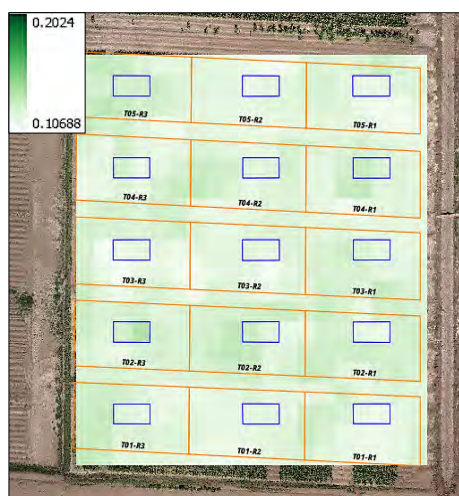
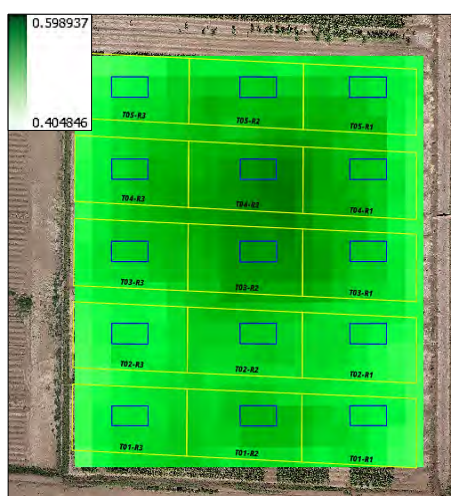


Fig. 15. Imagen satelital de PlanetScope en color verdadero, con valores de reflectancia de superficie acotados al CETT-90 del ITSON. La cuadrícula en color negro ubica las parcelas de tratamiento en maíz. Fecha de adquisición: 18 de junio de 2025.



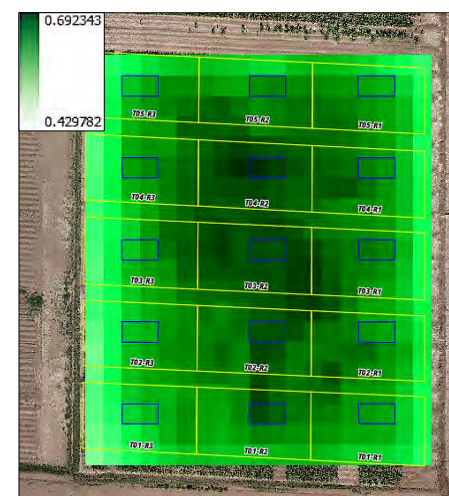
(1) Vegetativa, cuatro hojas [V4]

29 de enero de 2025



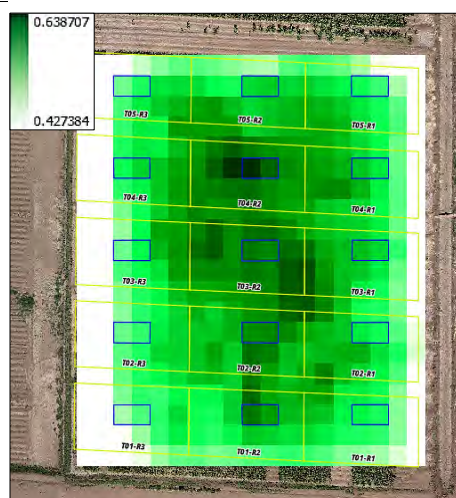
(2) Vegetativa, nueve hojas [V9]

24 de febrero de 2025



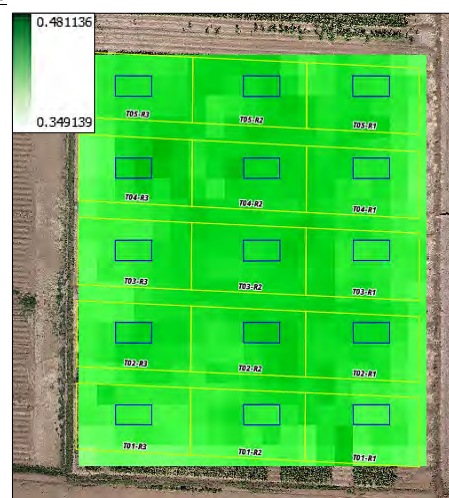
(3) Reproductiva, visibilidad de estigmas [R1]

10 de abril de 2025



(4) Reproductiva, grano masoso [R4]

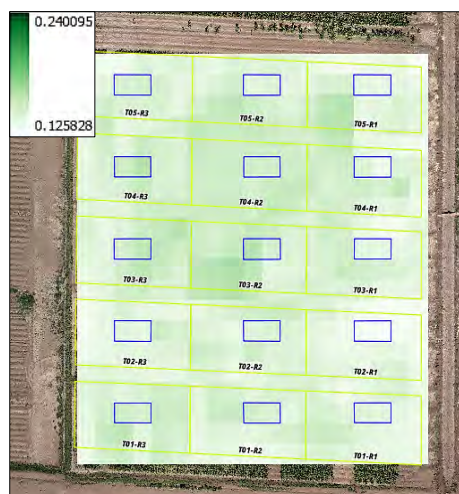
10 de mayo de 2025



(5) Madurez fisiológica [R6]

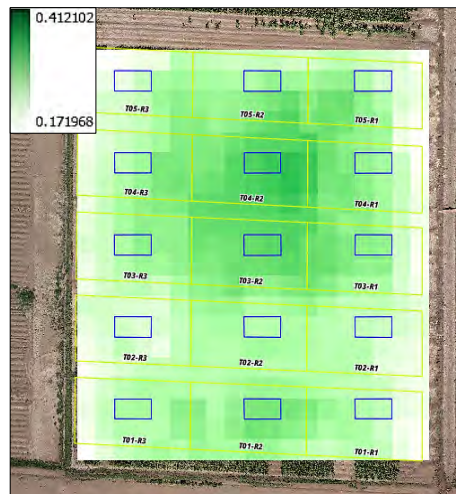
18 de junio de 2025

Fig. 16. GNDVI estimado con PlanetScope en parcelas de maíz (líneas amarillas) en las distintas etapas fenológicas del cultivo, ubicado éste en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. Los cuadros en azul (6x3 m) son dos pixeles de extracción de los VI con etiquetas de Tratamiento/Repeticición (Trat: de abajo hacia arriba [1-5] y Rep: de derecha a izquierda [1-3]). Ciclo mostrado: de enero a junio de 2025. La imagen base fue capturada por dron (cortesía: Dra. Masuly Vega, ITSON).



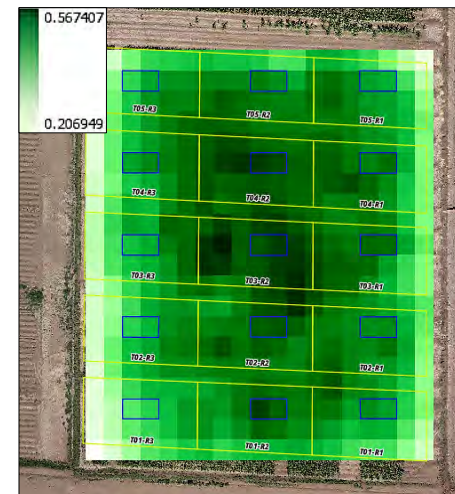
(1) Vegetativa, cuatro hojas [V4]

29 de enero de 2025



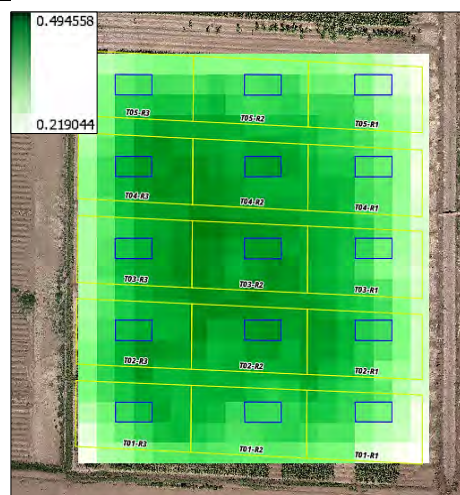
(2) Vegetativa, nueve hojas [V9]

24 de febrero de 2025



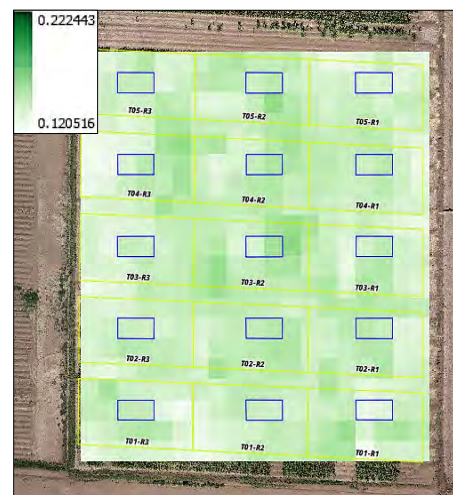
(3) Reproductiva, visibilidad de estigmas [R1]

10 de abril de 2025



(4) Reproductiva, grano masoso [R4]

10 de mayo de 2025



(5) Madurez fisiológica [R6]

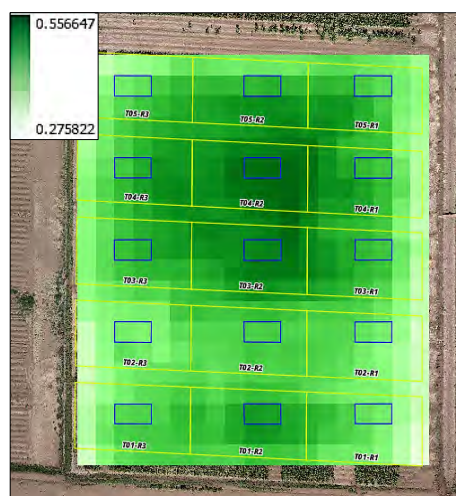
18 de junio de 2025

Fig. 17. NDRE estimado con PlanetScope en parcelas de maíz (líneas amarillas) en las distintas etapas fenológicas del cultivo, ubicado éste en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. Los cuadros en azul (6x3 m) son dos pixeles de extracción de los VI con etiquetas de Tratamiento/Repetición (Trat: de abajo hacia arriba [1-5] y Rep: de derecha a izquierda [1-3]). Ciclo mostrado: de enero a junio de 2025. La imagen base fue capturada por dron (cortesía: Dra. Masuly Vega, ITSON).



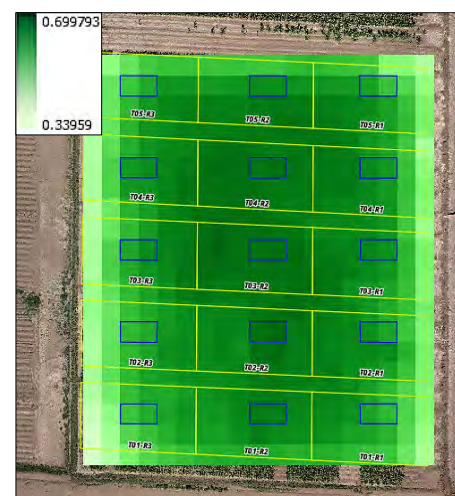
(1) Vegetativa, cuatro hojas [V4]

29 de enero de 2025



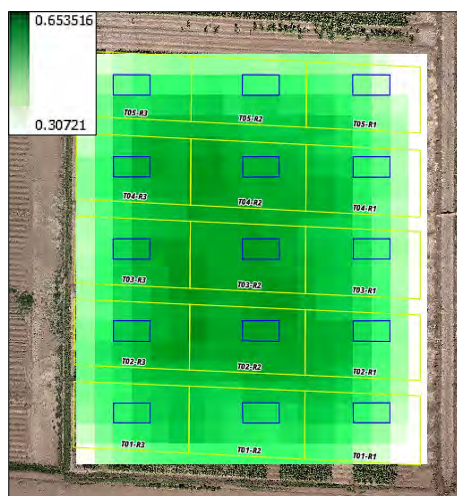
(2) Vegetativa, nueve hojas [V9]

24 de febrero de 2025



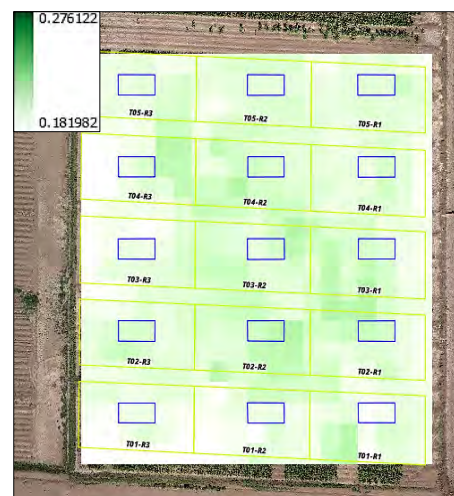
(3) Reproductiva, visibilidad de estigmas [R1]

10 de abril de 2025



(4) Reproductiva, grano masoso [R4]

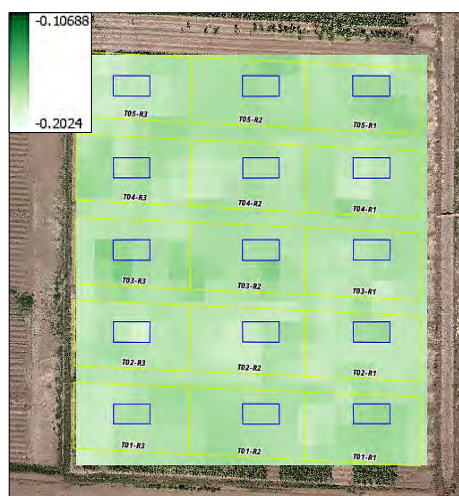
10 de mayo de 2025



(5) Madurez fisiológica [R6]

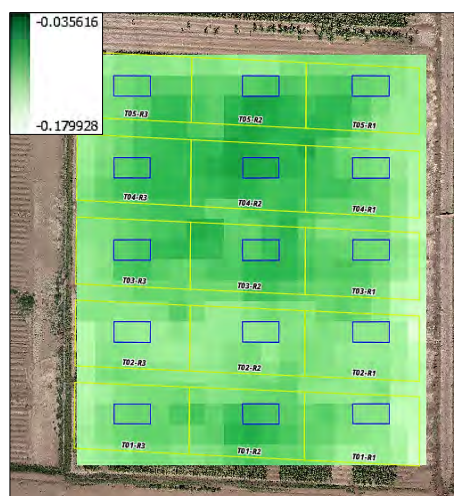
18 de junio de 2025

Fig. 18. NDVI estimado con PlanetScope en parcelas de maíz (líneas amarillas) en las distintas etapas fenológicas del cultivo, ubicado éste en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. Los cuadros en azul (6x3 m) son dos pixeles de extracción de los VI con etiquetas de Tratamiento/Repetición (Trat: de abajo hacia arriba [1-5] y Rep: de derecha a izquierda [1-3]). Ciclo mostrado: de enero a junio de 2025. La imagen base fue capturada por dron (cortesía: Dra. Masuly Vega, ITSON).



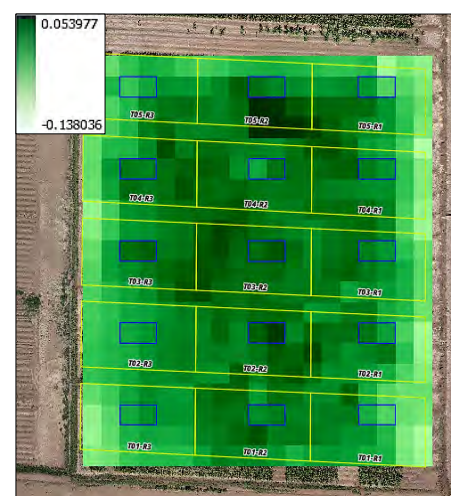
(1) Vegetativa, cuatro hojas [V4]

29 de enero de 2025



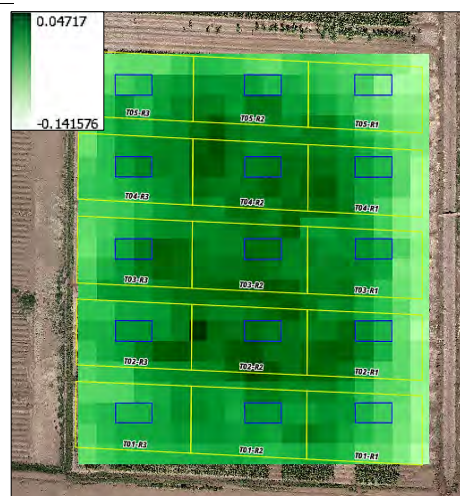
(2) Vegetativa, nueve hojas [V9]

24 de febrero de 2025



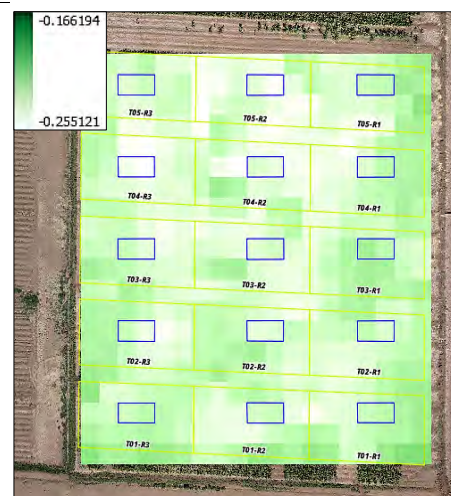
(3) Reproductiva, visibilidad de estigmas [R1]

10 de abril de 2025



(4) Reproductiva, grano masoso [R4]

10 de mayo de 2025



(5) Madurez fisiológica [R6]

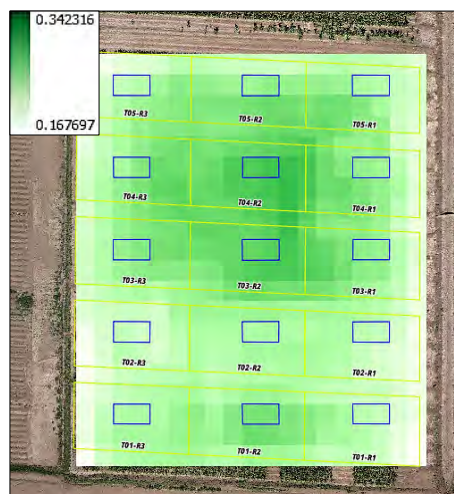
18 de junio de 2025

Fig. 19. NGRDI estimado con PlanetScope en parcelas de maíz (líneas amarillas) en las distintas etapas fenológicas del cultivo, ubicado éste en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. Los cuadros en azul (6x3 m) son dos pixeles de extracción de los VI con etiquetas de Tratamiento/Repetición (Trat: de abajo hacia arriba [1-5] y Rep: de derecha a izquierda [1-3]). Ciclo mostrado: de enero a junio de 2025. La imagen base fue capturada por dron (cortesía: Dra. Masuly Vega, ITSON).



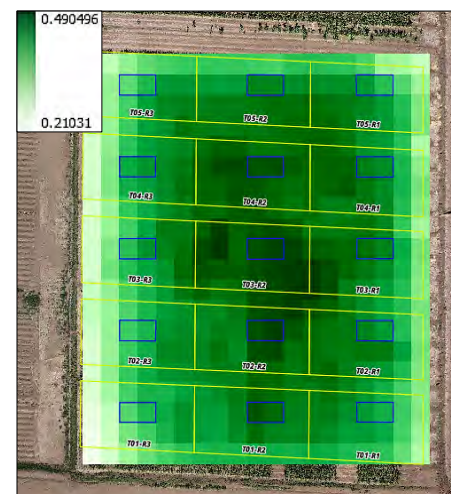
(1) Vegetativa, cuatro hojas [V4]

29 de enero de 2025



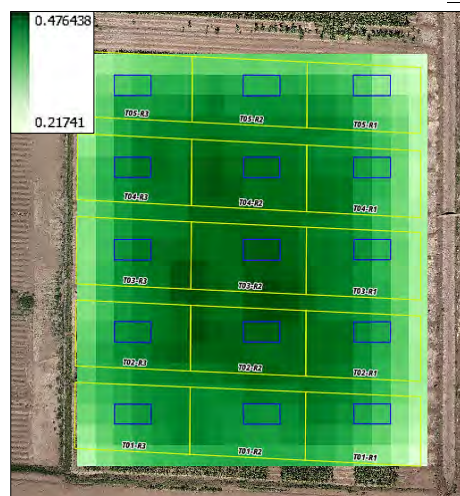
(2) Vegetativa, nueve hojas [V9]

24 de febrero de 2025



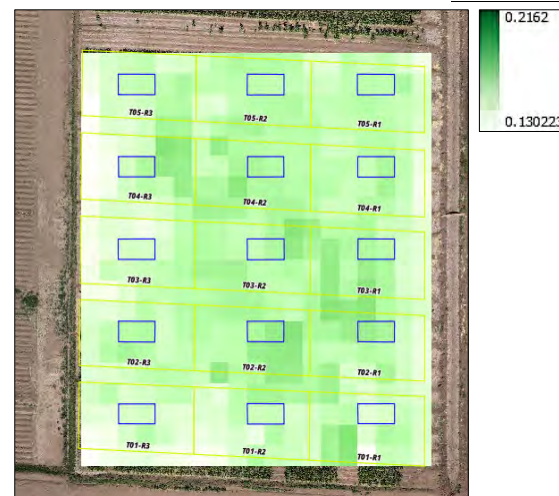
(3) Reproductiva, visibilidad de estigmas [R1]

10 de abril de 2025



(4) Reproductiva, grano masoso [R4]

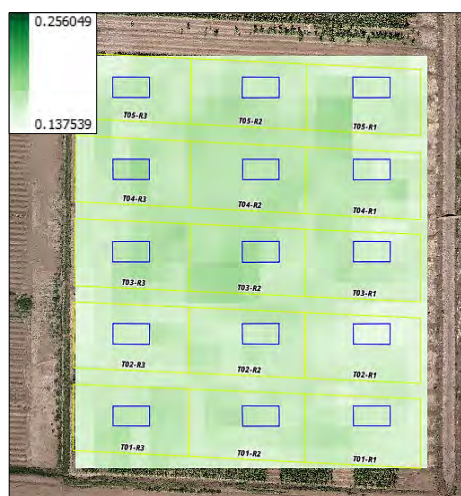
10 de mayo de 2025



(5) Madurez fisiológica [R6]

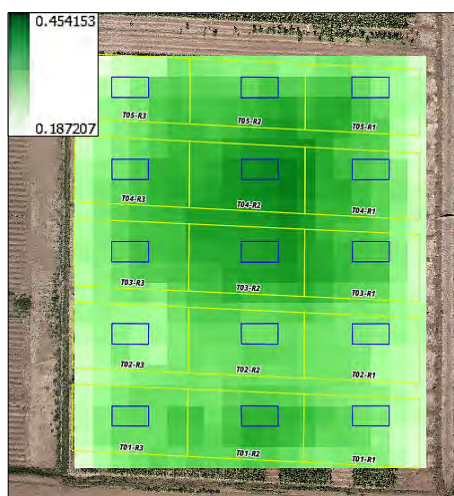
18 de junio de 2025

Fig. 20. SAVI estimado con PlanetScope en parcelas de maíz (líneas amarillas) en las distintas etapas fenológicas del cultivo, ubicado éste en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. Los cuadros en azul (6x3 m) son dos pixeles de extracción de los VI con etiquetas de Tratamiento/Repetición (Trat: de abajo hacia arriba [1-5] y Rep: de derecha a izquierda [1-3]). Ciclo mostrado: de enero a junio de 2025. La imagen base fue capturada por dron (cortesía: Dra. Masuly Vega, ITSON).



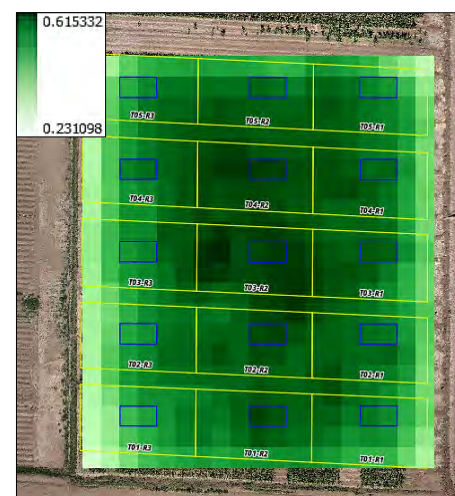
(1) Vegetativa, cuatro hojas [V4]

29 de enero de 2025



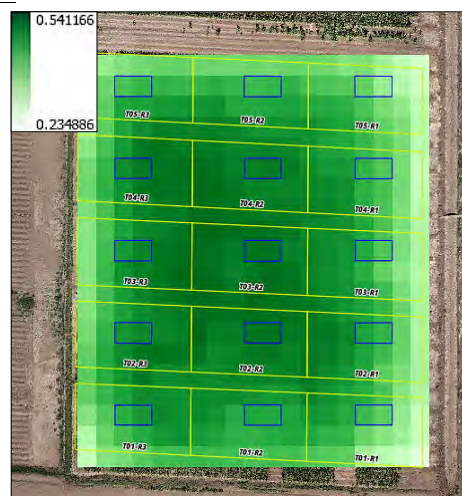
(2) Vegetativa, nueve hojas [V9]

24 de febrero de 2025



(3) Reproductiva, visibilidad de estigmas [R1]

10 de abril de 2025



(4) Reproductiva, grano masoso [R4]

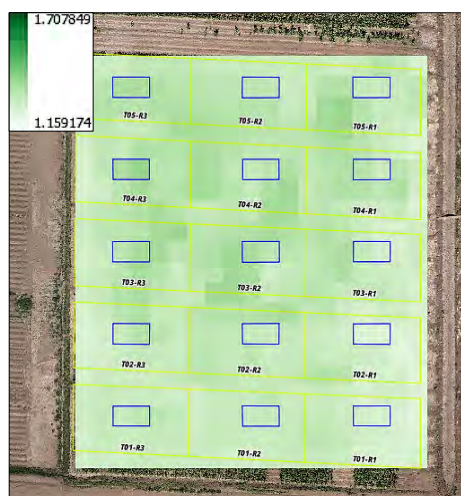
10 de mayo de 2025



(5) Madurez fisiológica [R6]

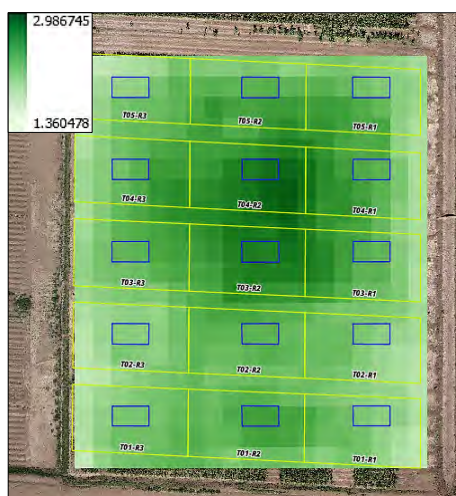
18 de junio de 2025

Fig. 21. LCI estimado con PlanetScope en parcelas de maíz (líneas amarillas) en las distintas etapas fenológicas del cultivo, ubicado éste en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. Los cuadros en azul (6x3 m) son dos pixeles de extracción de los VI con etiquetas de Tratamiento/Repetición (Trat: de abajo hacia arriba [1-5] y Rep: de derecha a izquierda [1-3]). Ciclo mostrado: de enero a junio de 2025. La imagen base fue capturada por dron (cortesía: Dra. Masuly Vega, ITSON).



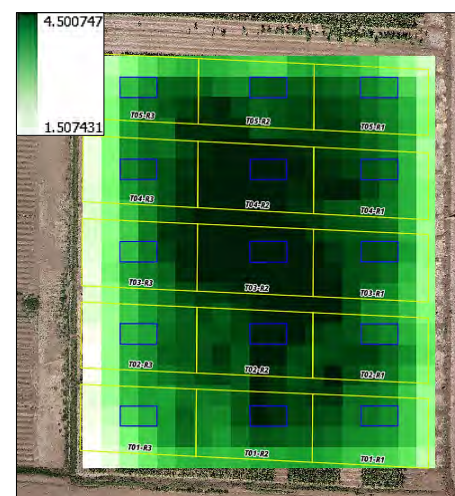
(1) Vegetativa, cuatro hojas [V4]

29 de enero de 2025



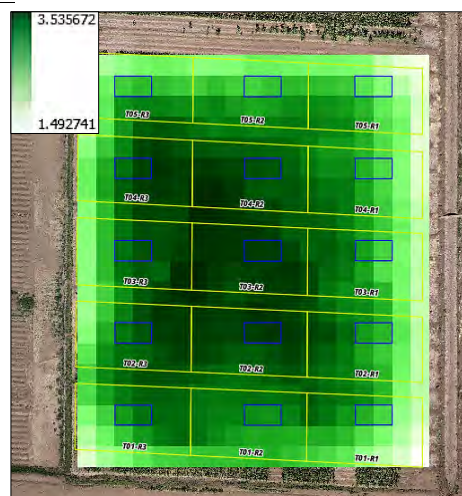
(2) Vegetativa, nueve hojas [V9]

24 de febrero de 2025



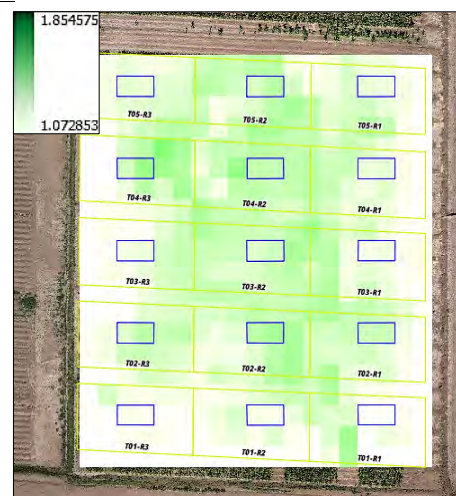
(3) Reproductiva, visibilidad de estigmas [R1]

10 de abril de 2025



(4) Reproductiva, grano masoso [R4]

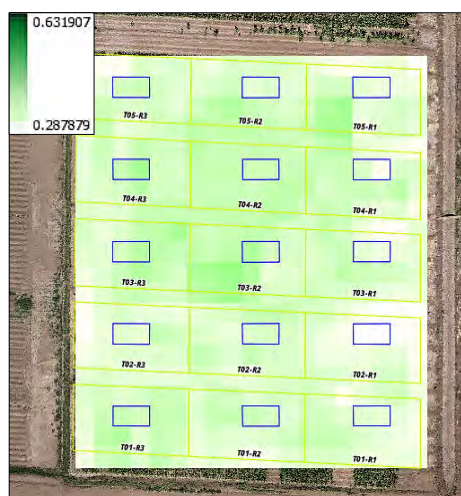
10 de mayo de 2025



(5) Madurez fisiológica [R6]

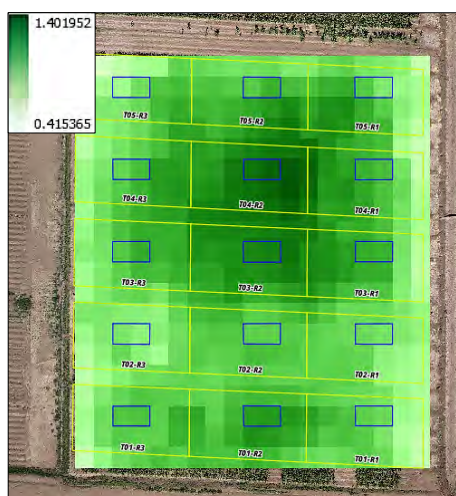
18 de junio de 2025

Fig. 22. GCI estimado con PlanetScope en parcelas de maíz (líneas amarillas) en las distintas etapas fenológicas del cultivo, ubicado éste en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. Los cuadros en azul (6x3 m) son dos pixeles de extracción de los VI con etiquetas de Tratamiento/Repetición (Trat: de abajo hacia arriba [1-5] y Rep: de derecha a izquierda [1-3]). Ciclo mostrado: de enero a junio de 2025. La imagen base fue capturada por dron (cortesía: Dra. Masuly Vega, ITSON).



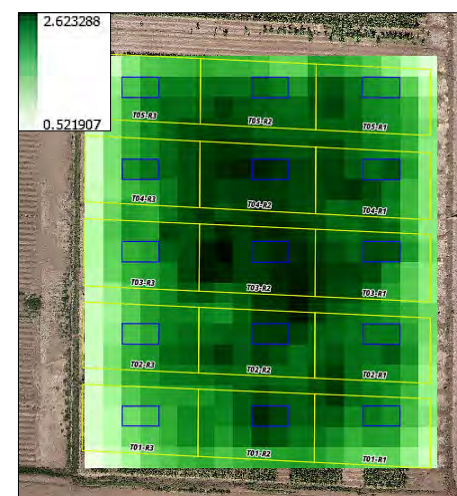
(1) Vegetativa, cuatro hojas [V4]

29 de enero de 2025



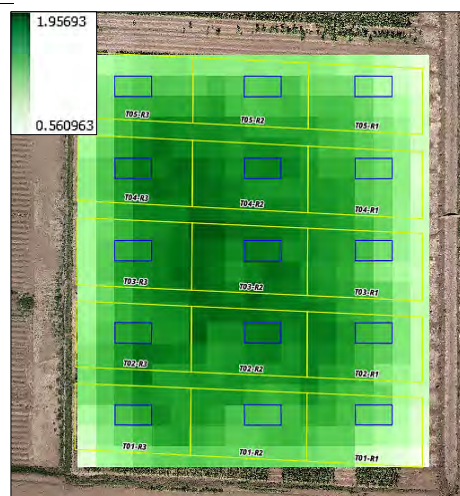
(2) Vegetativa, nueve hojas [V9]

24 de febrero de 2025



(3) Reproductiva, visibilidad de estigmas [R1]

10 de abril de 2025



(4) Reproductiva, grano masoso [R4]

10 de mayo de 2025



(5) Madurez fisiológica [R6]

18 de junio de 2025

Fig. 23. RCI estimado con PlanetScope en parcelas de maíz (líneas amarillas) en las distintas etapas fenológicas del cultivo, ubicado éste en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. Los cuadros en azul (6x3 m) son dos pixeles de extracción de los VI con etiquetas de Tratamiento/Repetición (Trat: de abajo hacia arriba [1-5] y Rep: de derecha a izquierda [1-3]). Ciclo mostrado: de enero a junio de 2025. La imagen base fue capturada por dron (cortesía: Dra. Masuly Vega, ITSON).

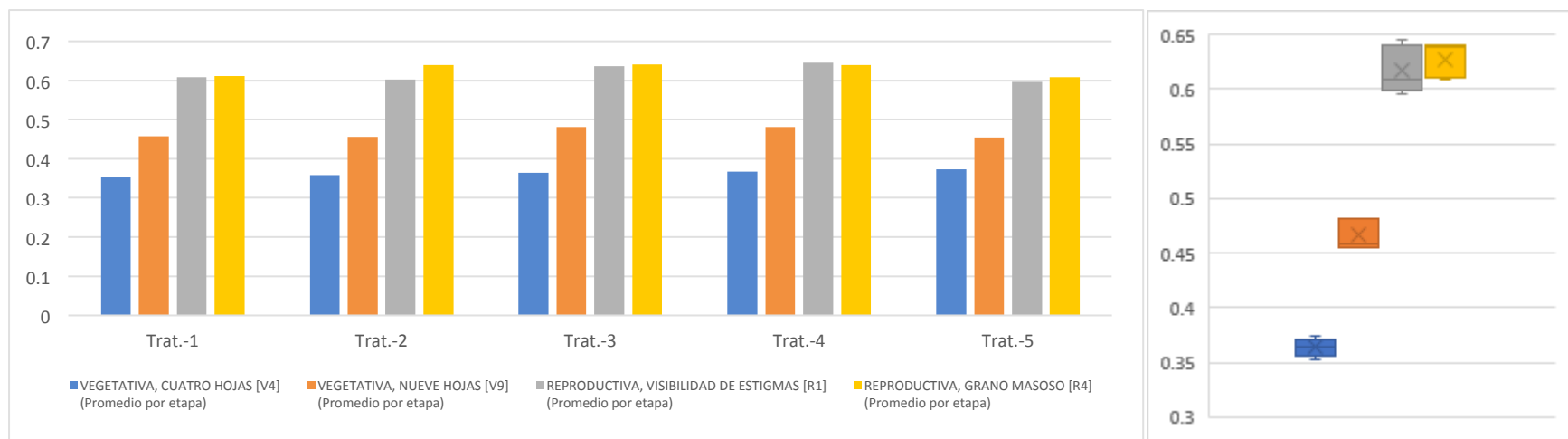


Fig. 24. Valores promedio por tratamiento del GNDVI, estimado con PlanetScope en parcelas de maíz en cuatro etapas fenológicas del cultivo, CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. El diagrama de caja y bigote a la derecha, muestra la variabilidad de los datos por etapa.

Fig. 25. Valores promedio por tratamiento del NDRE, estimado con PlanetScope en parcelas de maíz en cuatro etapas fenológicas del cultivo, CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. El diagrama de caja y bigote a la derecha, muestra la variabilidad de los datos por etapa.

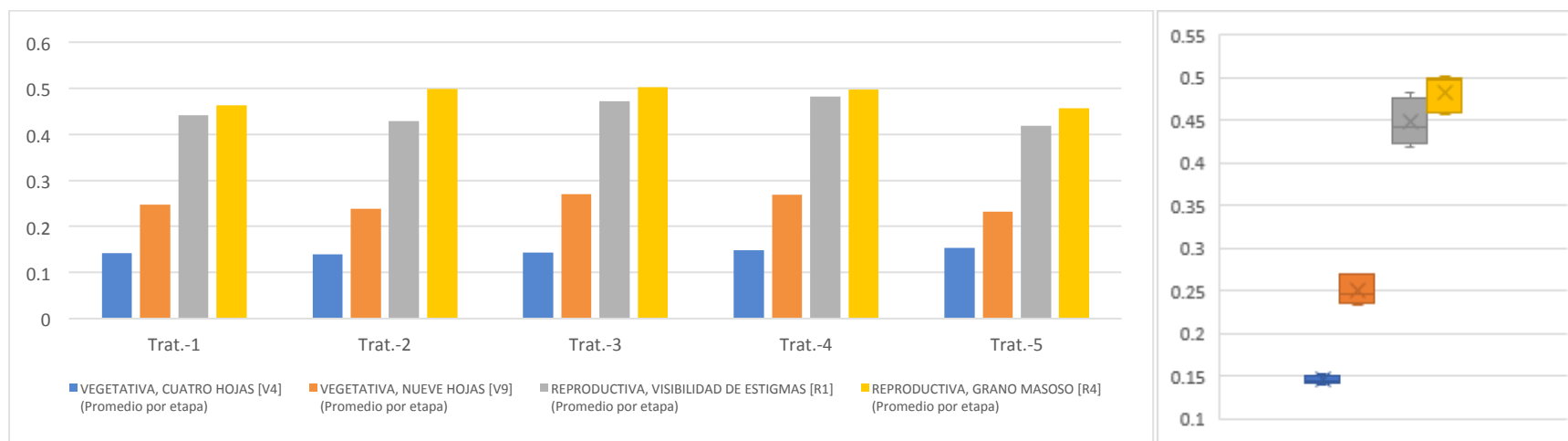


Fig. 26. Valores promedio por tratamiento del NDVI, estimado con PlanetScope en parcelas de maíz en cuatro etapas fenológicas del cultivo, CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. El diagrama de caja y bigote a la derecha, muestra la variabilidad de los datos por etapa.

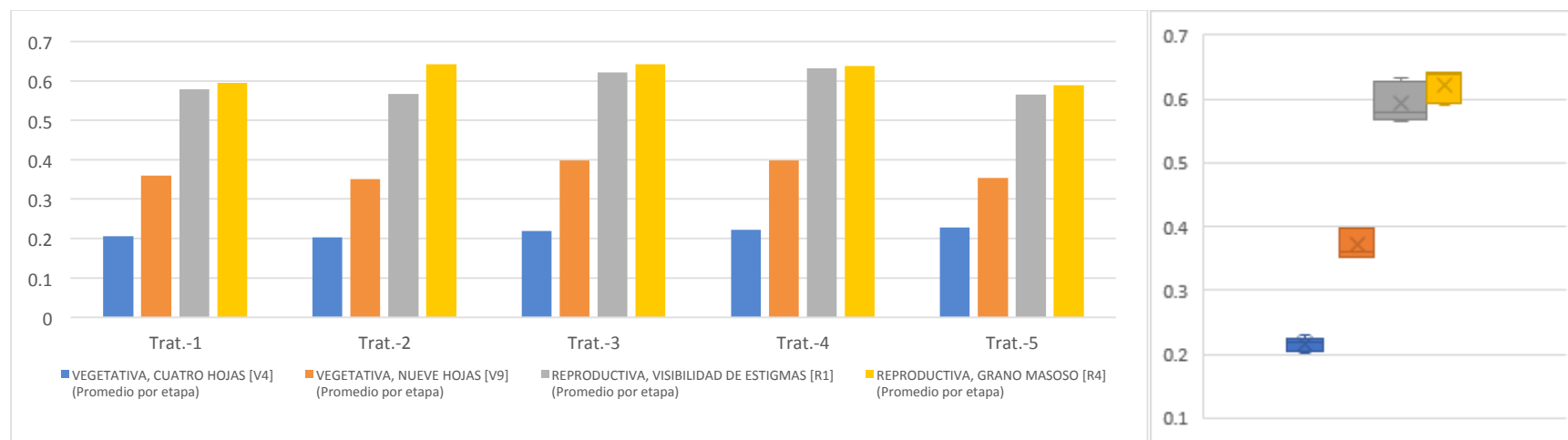


Fig. 27. Valores promedio por tratamiento del NGRDI, estimado con PlanetScope en parcelas de maíz en cuatro etapas fenológicas del cultivo, CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. El diagrama de caja y bigote a la derecha, muestra la variabilidad de los datos por etapa.

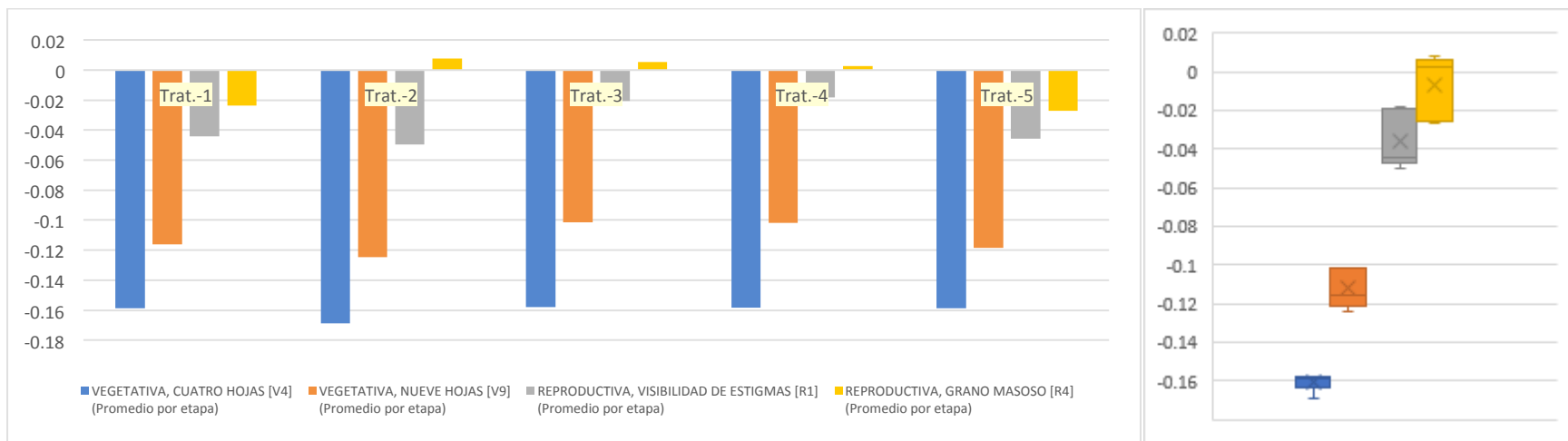


Fig. 28. Valores promedio por tratamiento del SAVI, estimado con PlanetScope en parcelas de maíz en cuatro etapas fenológicas del cultivo, CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. El diagrama de caja y bigote a la derecha, muestra la variabilidad de los datos por etapa.

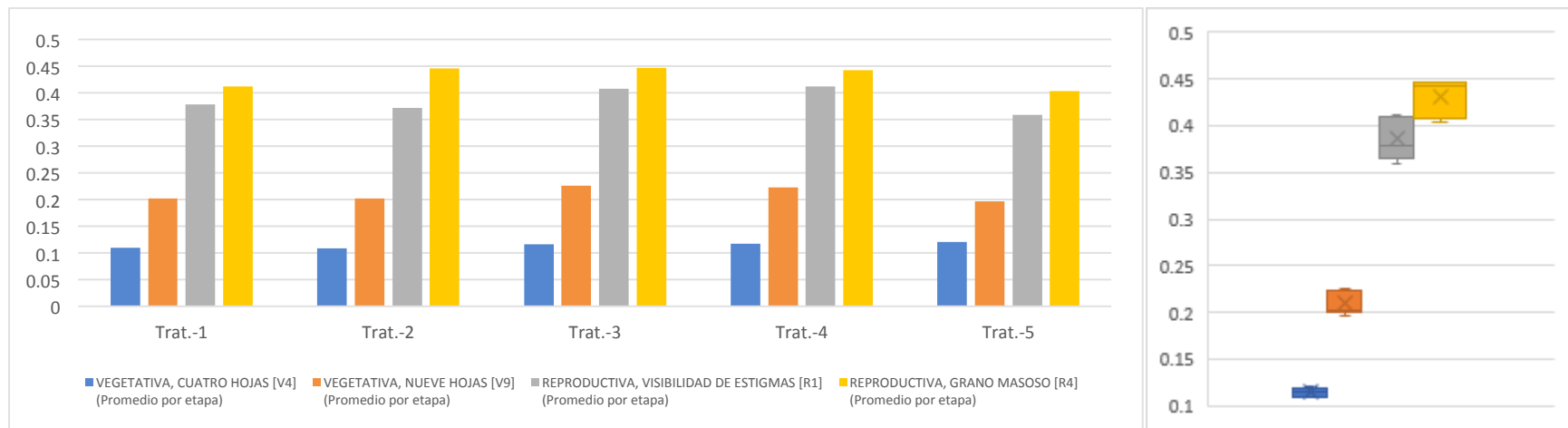


Fig. 29. Valores promedio por tratamiento del LCI, estimado con PlanetScope en parcelas de maíz en cuatro etapas fenológicas del cultivo, CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. El diagrama de caja y bigote a la derecha, muestra la variabilidad de los datos por etapa.

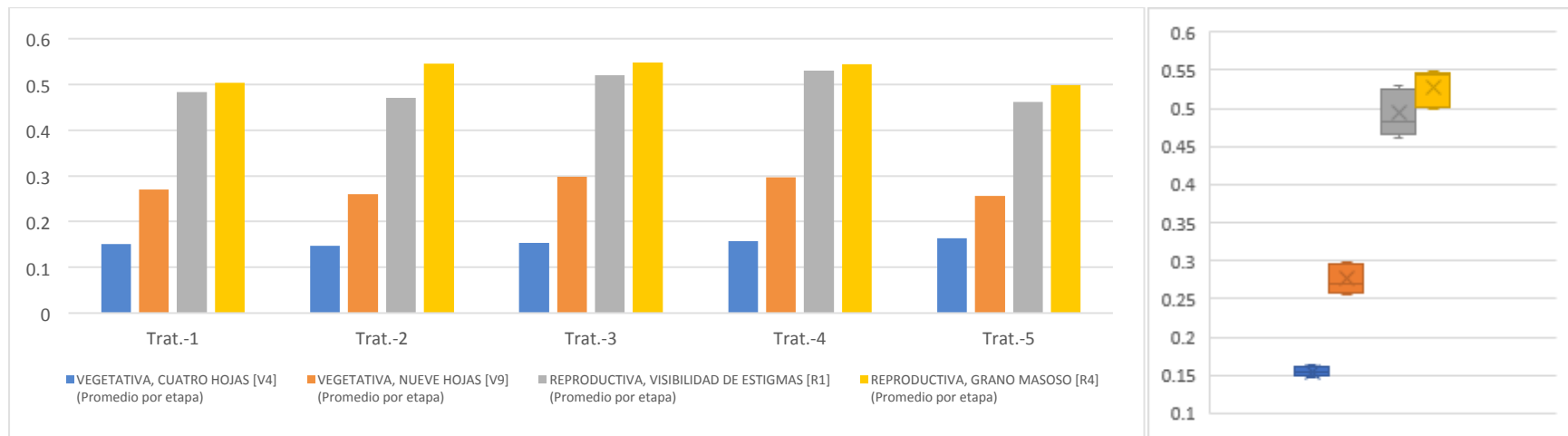


Fig. 30. Valores promedio por tratamiento del GCI, estimado con PlanetScope en parcelas de maíz en cuatro etapas fenológicas del cultivo, CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. El diagrama de caja y bigote a la derecha, muestra la variabilidad de los datos por etapa.

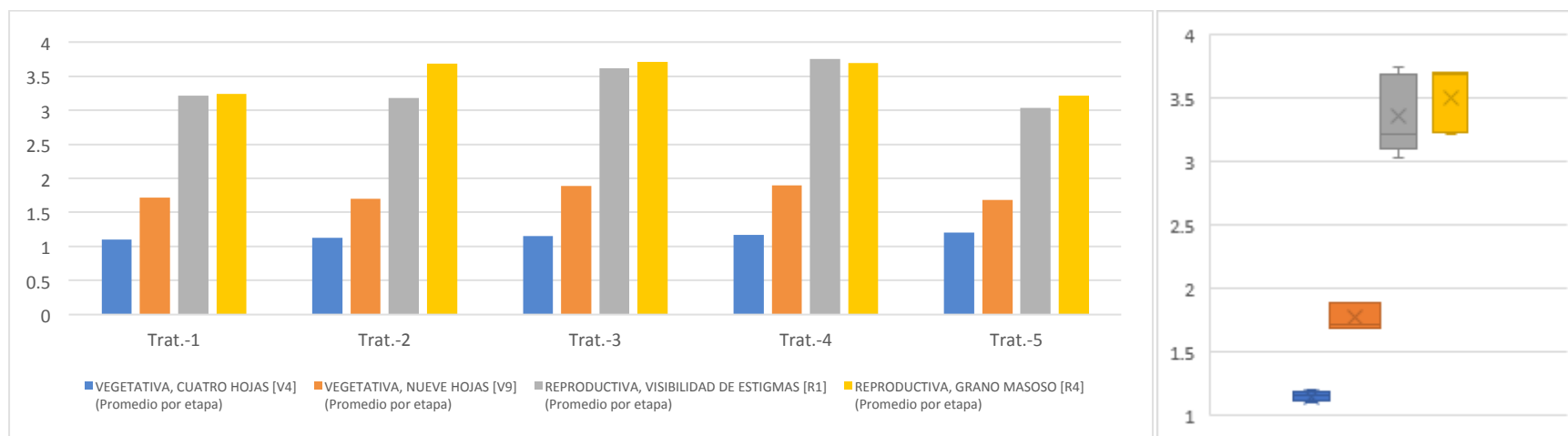
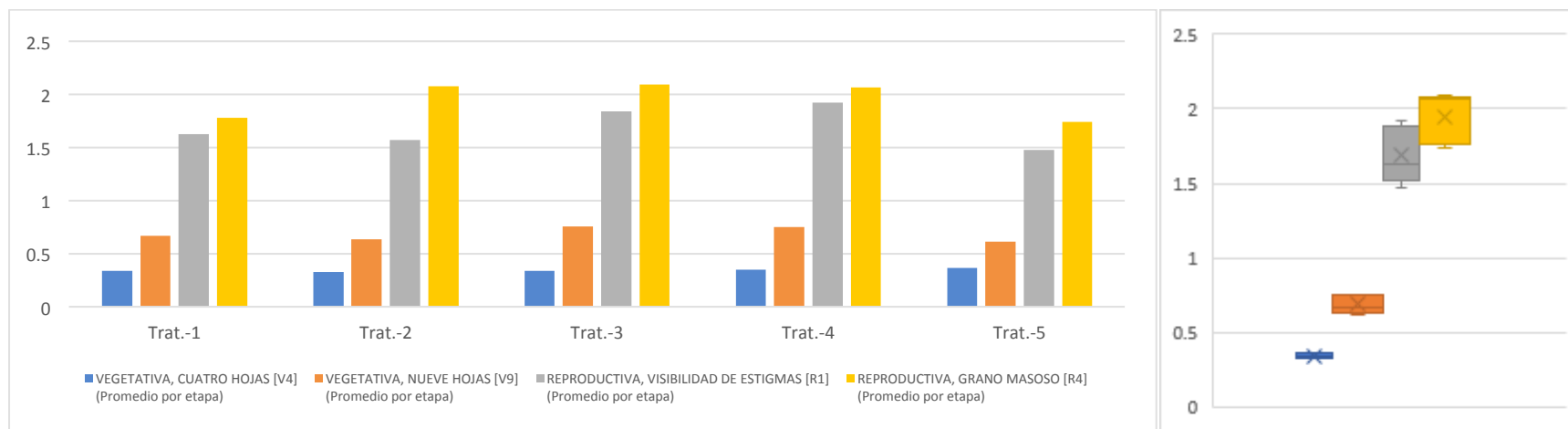


Fig. 31. Valores promedio por tratamiento del RCI, estimado con PlanetScope en parcelas de maíz en cuatro etapas fenológicas del cultivo, CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, México. El diagrama de caja y bigote a la derecha, muestra la variabilidad de los datos por etapa.



Las Fig. 32 – 39 son las series de tiempo de los ocho VI, graficadas en los meses de finales de diciembre de 2024 a junio de 2025. Los valores son los promedios de cada uno de los 10 tratamientos nitrogenados en sus tres repeticiones, aplicados al cultivo de maíz.

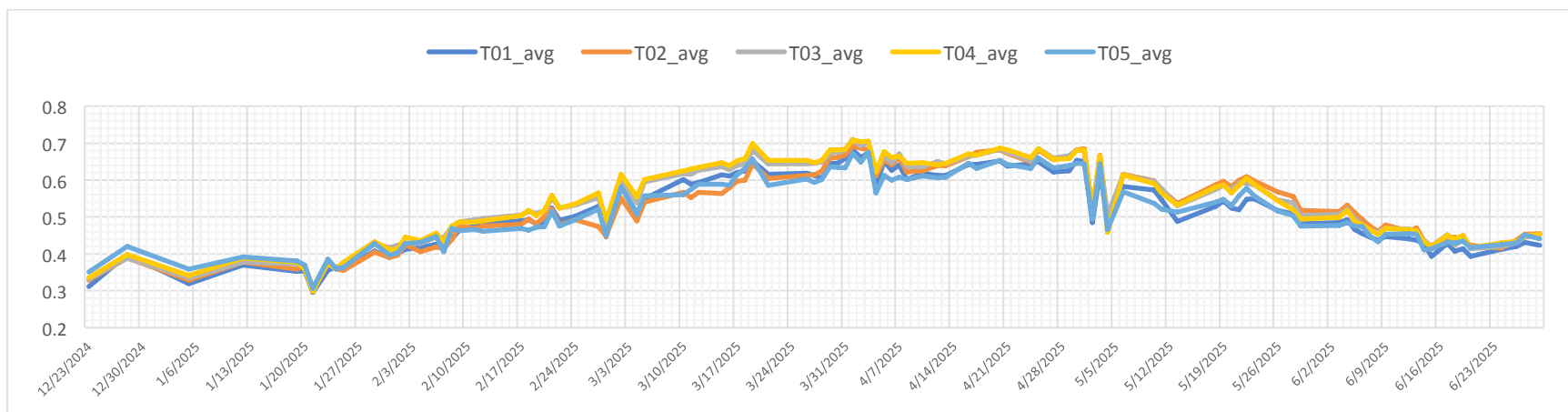


Fig. 32. Serie de tiempo del GNDVI estimado con PlanetScope en cultivo de maíz, ubicado en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, Sonora, México. El periodo del cultivo se observa de finales de diciembre de 2024 a junio de 2025, con tratamientos nitrogenados promedios (1 – 5) en tres repeticiones.

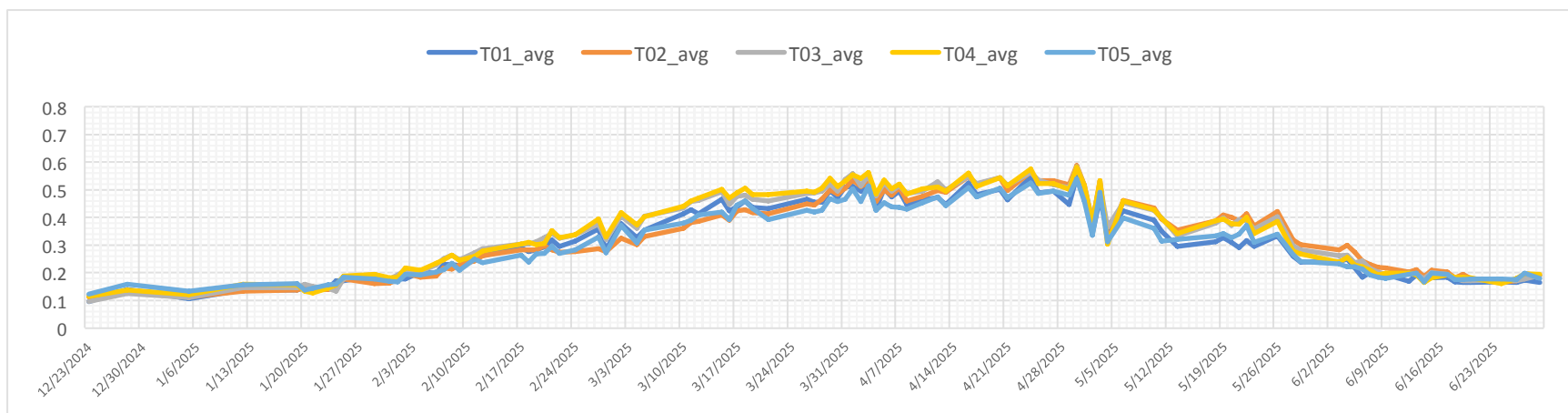


Fig. 33. Serie de tiempo del NDRE estimado con PlanetScope en cultivo de maíz, ubicado en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, Sonora, México. El periodo del cultivo se observa de finales de diciembre de 2024 a junio de 2025, con tratamientos nitrogenados promedios (1 – 5) en tres repeticiones.

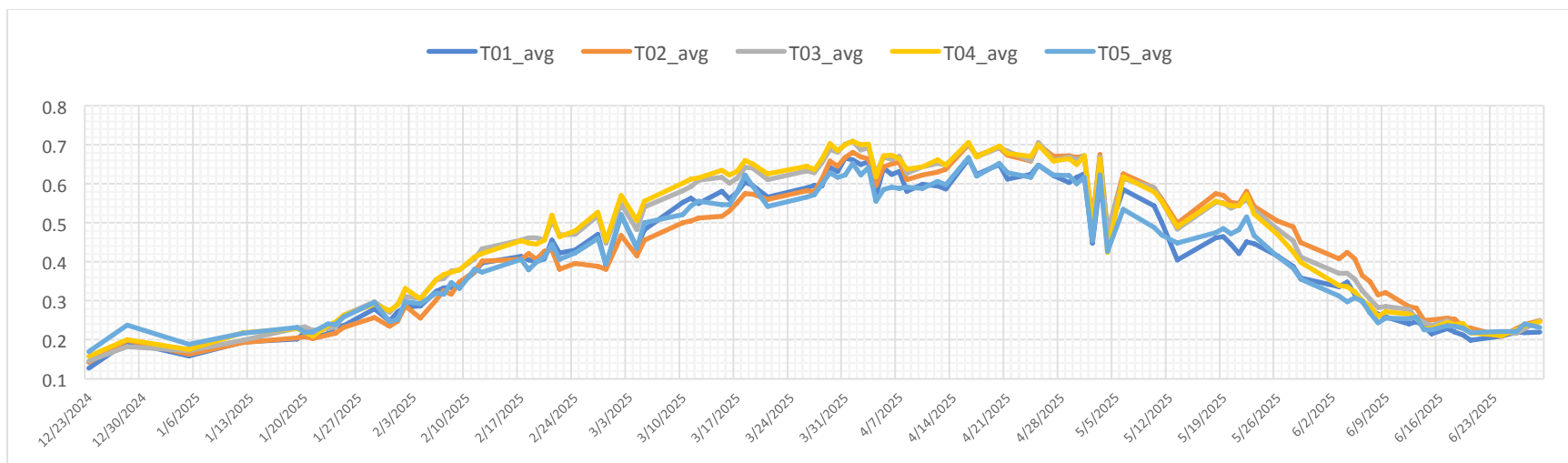


Fig. 34. Serie de tiempo del NDVI estimado con PlanetScope en cultivo de maíz, ubicado en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, Sonora, México. El periodo del cultivo se observa de finales de diciembre de 2024 a junio de 2025, con tratamientos nitrogenados promedios (1 – 5) en tres repeticiones.

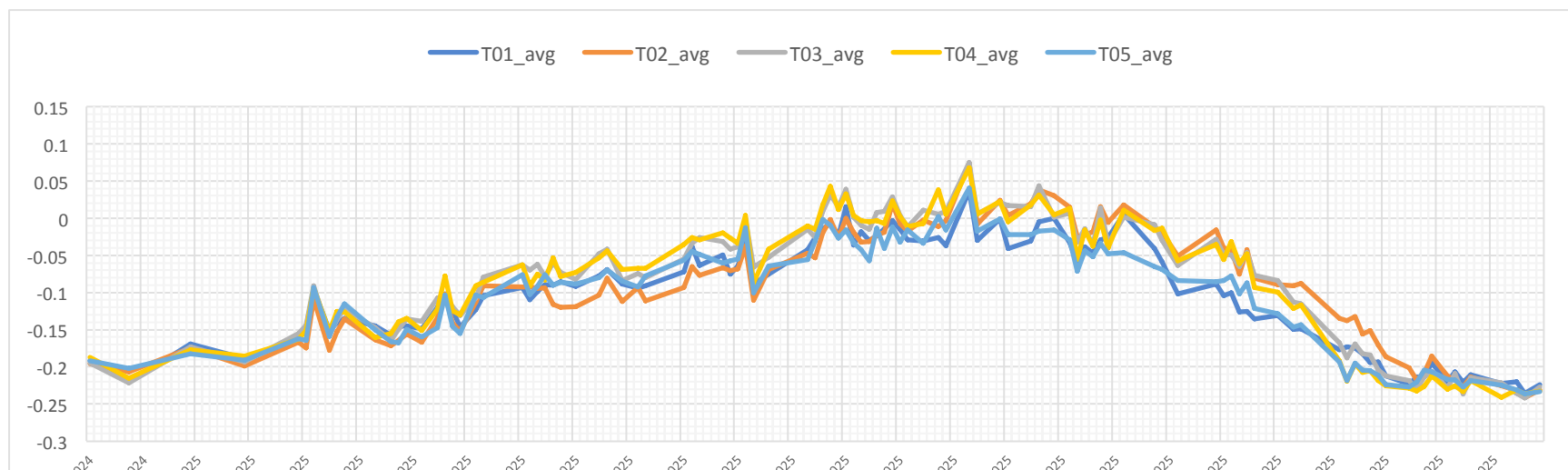


Fig. 35. Serie de tiempo del NGRDI estimado con PlanetScope en cultivo de maíz, ubicado en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, Sonora, México. El periodo del cultivo se observa de finales de diciembre de 2024 a junio de 2025, con tratamientos nitrogenados promedios (1 – 5) en tres repeticiones.

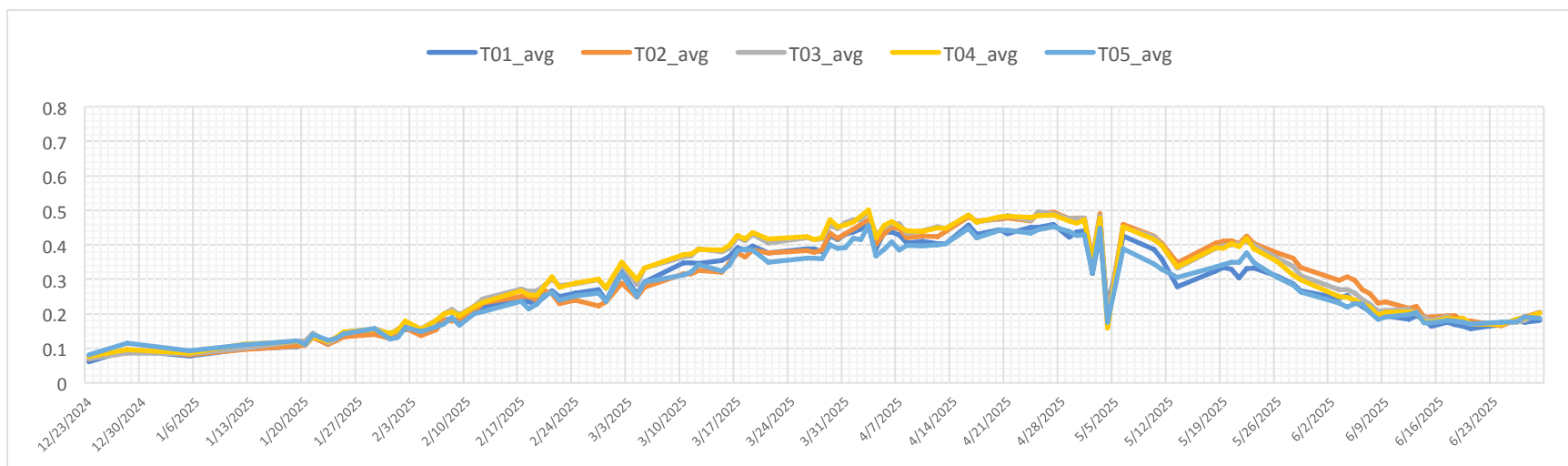


Fig. 36. Serie de tiempo del SAVI estimado con PlanetScope en cultivo de maíz, ubicado en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, Sonora, México. El periodo del cultivo se observa de finales de diciembre de 2024 a junio de 2025, con tratamientos nitrogenados promedios (1 – 5) en tres repeticiones.

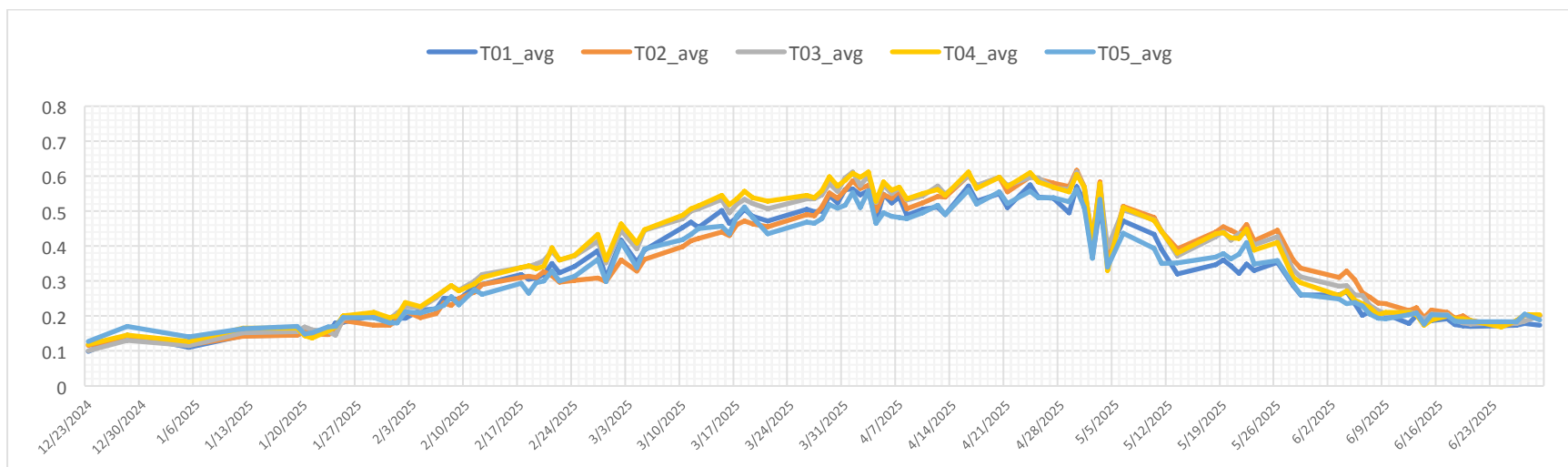


Fig. 37. Serie de tiempo del LCI estimado con PlanetScope en cultivo de maíz, ubicado en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, Sonora, México. El periodo del cultivo se observa de finales de diciembre de 2024 a junio de 2025, con tratamientos nitrogenados promedios (1 – 5) en tres repeticiones.

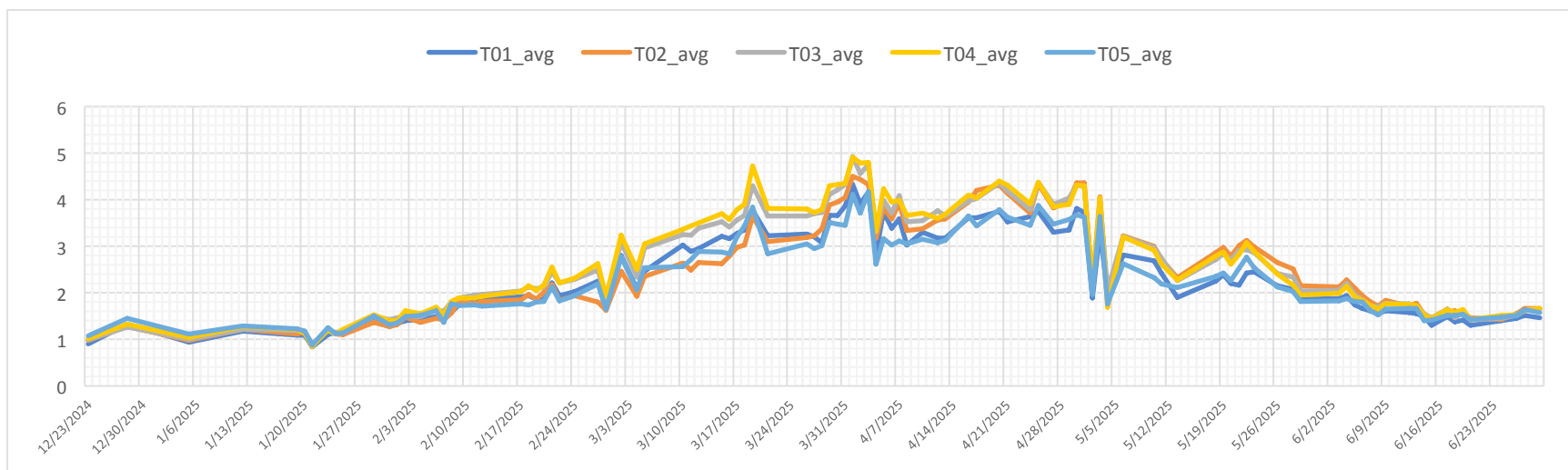


Fig. 38. Serie de tiempo del GCI estimado con PlanetScope en cultivo de maíz, ubicado en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, Sonora, México. El periodo del cultivo se observa de finales de diciembre de 2024 a junio de 2025, con tratamientos nitrogenados promedios (1 – 5) en tres repeticiones.

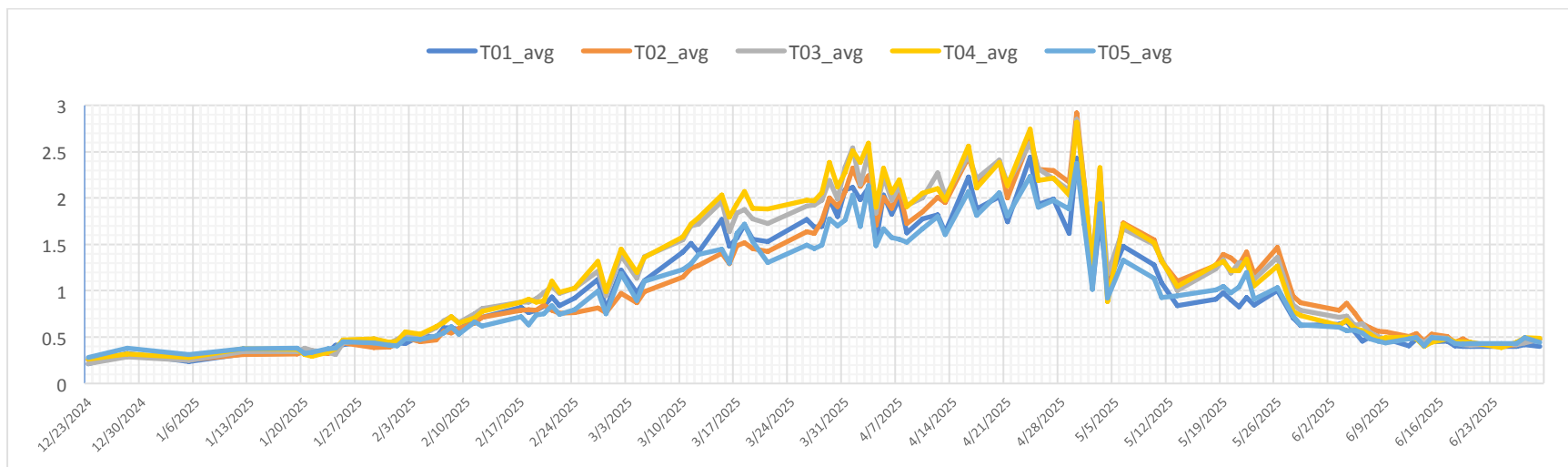


Fig. 39. Serie de tiempo del RCI estimado con PlanetScope en cultivo de maíz, ubicado en el CETT-910 del ITSON, Valle del Yaqui, Sonora, México. El periodo del cultivo se observa de finales de diciembre de 2024 a junio de 2025, con tratamientos nitrogenados promedios (1 – 5) en tres repeticiones.

CONCLUSIONES

El uso de imágenes de satélite de alta resolución como los productos de PlanetScope (pixel de 3x3 m), permite monitorear con gran precisión las condiciones de la vegetación mediante el empleo de índices de vegetación (VI). El cálculo de los VI y el empleo de técnicas estadísticas geoespaciales, brindan productos mapeados de alta calidad para la toma de decisiones y la gestión final en ecosistemas inducidos y silvestres.

BIBLIOGRAFÍA

- Ávila Miramontes J., Ávila Salazar J., Martínez Heredia D., Rivas Santoyo F. (2014). Generalidades y sistemas de producción en el noroeste. Dirección de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad de Sonora.
- Chuvieco, E., Martín, M. P., & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103–5110. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- García Aranda, Mario Alberto, *et al.* "Conservación de la cobertura vegetal en Maderas del Carmen Coahuila, análisis multitemporal con índice SAVI." *Revista mexicana de ciencias forestales* 13.71 (2022): 53-75.
- <https://aqua.nasa.gov/>
- <https://conahcyt.mx/fitoplancton-y-cambio-climatico/>
- <https://developers.planet.com/docs/apis/data/sensors/>
- <https://docs.planet.com/data/imagery/planetscope/>
- <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Planet_Lab
- <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- https://oa.upm.es/72070/1/TFM_SARA_GARCIA_CASAMAYOR.pdf
- <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>

- <https://www.indexdatabase.de/db/i.php>
- <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/AlphabeticalListSpectralIndices.html>
- <https://www.qgis.org/>
- Pallàs-Sanz, E., Tenreiro, M. C., Ruiz-Angulo, A., Linacre, L., Sampeiro-Ramos, G. A., Herzka, S. Z., ... & Camacho Ibar, V. F. (2024, February). Observations of the fine-scale themohaline and bio-optical vertical structure in a wind-forced warm core ring. In American Geophysical Union, Ocean Sciences Meeting (No. 4, pp. PL53A-04).
- Reyes Castañeda P. (1990). El maíz y su cultivo. AGT editor. México, D.F., *Pp.* 460.

A N E X O 2

Uso de imágenes de alta resolución espacial para determinar las necesidades de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz en el Valle del Yaqui

Análisis de imágenes con vehículos aéreos no tripulados y sus índices de vegetación.

Uso de imágenes de alta resolución espacial para determinar las necesidades de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz en el Valle del Yaqui

Para la obtención de imágenes de alta resolución se utilizó el dron DJI Mavic 3 Multiespectral (Mavic 3M), el cual, cuenta con un sistema de cámara dos en uno para la observación y recopilación de una amplia gama de información:

- Una cámara RGB equipada con un sensor de imagen CMOS de 4/3 pulgadas y 20 MP y un obturador mecánico con una velocidad máxima de 1/2000.
- Una cámara multiespectral de cuatro lentes que proporciona información direccional más precisa. Las cuatro cámaras multiespectrales abarcan las siguientes longitudes de onda: verde (G) de $560 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$, rojo (R) de $650 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$, el borde rojo (RE) de $730 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ e infrarrojo cercano (NIR) de $860 \text{ nm} \pm 26 \text{ nm}$.

Particularmente, la captura de las imágenes de alta resolución se tomó en la parcela experimental, con diferentes tratamientos de aplicación de nitrógeno, localizada en el Centro de Experimental de Transferencia de Tecnología (CETT 910) del Instituto Tecnológico de Sonora (Figura 1). Esto, a través de misiones automatizadas programadas en programa nativo del dron, DJI Pilot 2 (Figura 2). Las características del vuelo fueron: 56 metros de altura, superposición lateral de 70 %, superposición frontal de 80% y velocidad de 4.8 m/s.

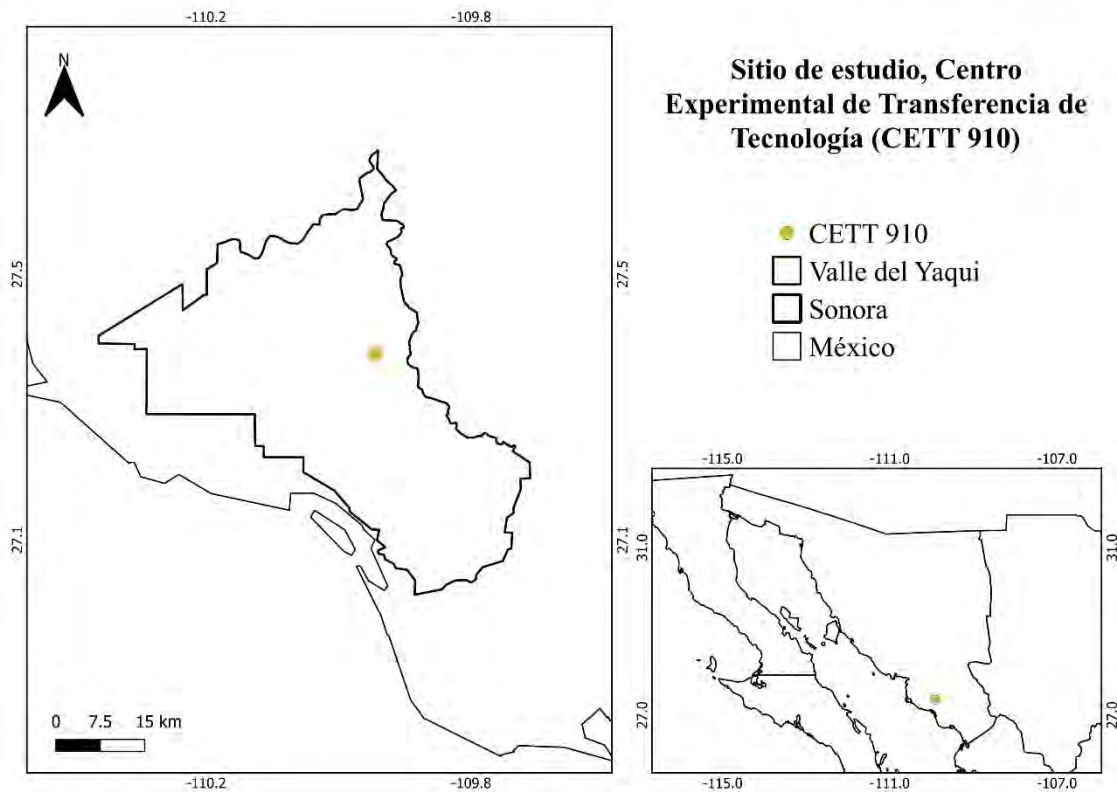


Figura 1. Localización de parcela experimental de maíz



Figura 2. Misión automatizada para captura de imágenes de alta resolución.

Como resultado del seguimiento RGB y multi-espectral del cultivo en sus etapas fenológicas críticas, fueron generadas 835 imágenes en ocho fechas diferentes que abarcan desde finales de enero hasta principios de abril del 2025, donde se observa desde el cubrimiento por el cultivo de la parcela hasta el inicio de su senescencia (Figura 3). Cabe destacar que, en la Figura 4, se muestra el porcentaje de aplicación de nitrógeno para cada uno de los tratamientos, donde el tratamiento 1 (aplicación convencional; 100%) es la parcela al extremo sur y el tratamiento 5 (reducción de aplicación convencional en 50%) es la parcela al extremo norte.

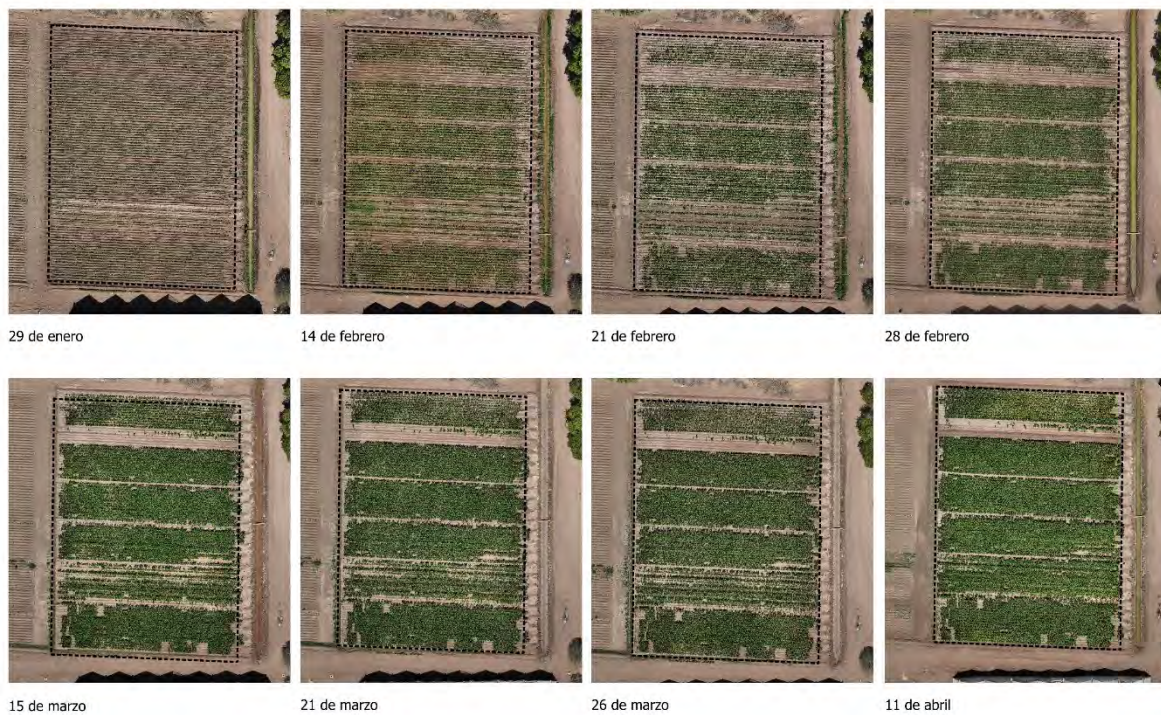


Figura 3. Fenología del cultivo de maíz seguida con ortofotos RGB.



Figura 4. Esquema de la fertilización nitrogenada para cada uno de los cinco tratamientos.

Posterior a la obtención de las imágenes, se procedió a su procesamiento en el programa de código abierto, Open Dron Map y, con ello, la obtención de ocho orto mosaicos RGB y ocho Orto mosaicos multiespectrales con las bandas necesarias para el cálculo de los índices de vegetación normalizados: NDVI, NDRE, GNDVI y NGRDI, los cuales se pueden observar de la Figura 5 a la Figura 11. Específicamente, en estas Figuras se encontrará el comportamiento de los cuatro índices de vegetación para los 5 diferente tratamiento de aplicación de nitrógeno en cada una de las fechas que se capturaron en las imágenes.

En la Figura 5 se puede observar el comportamiento a lo largo del experimento del cultivo a través del índice NDVI (mínimo: 0.15 y máximo: 0.78), donde el tratamiento 1 es el que presenta los valores más altos, llegando a su valor máximo el 15 de marzo (0.78), así mismo, es importante destacar que tres de los tratamientos (3, 4 y 5) presentan un rango similar al tratamiento 1, el cual, recibió la aplicación más alta de nitrógeno. Por otra parte, es importante precisar que por cuestiones técnicas se presenta un bajo rendimiento en el tratamiento 2 (reducción de aplicación convencional del 17.5 %), aun así, para la última fecha se observa que el cultivo del tratamiento 2 logra cerrar dosel y tener un verdor (0.69) en el mismo rango que los otros (t1: 0.76, t3: 0.71, t4: 0.70 y t5: 0.73; Figura 3 y Figura 5).

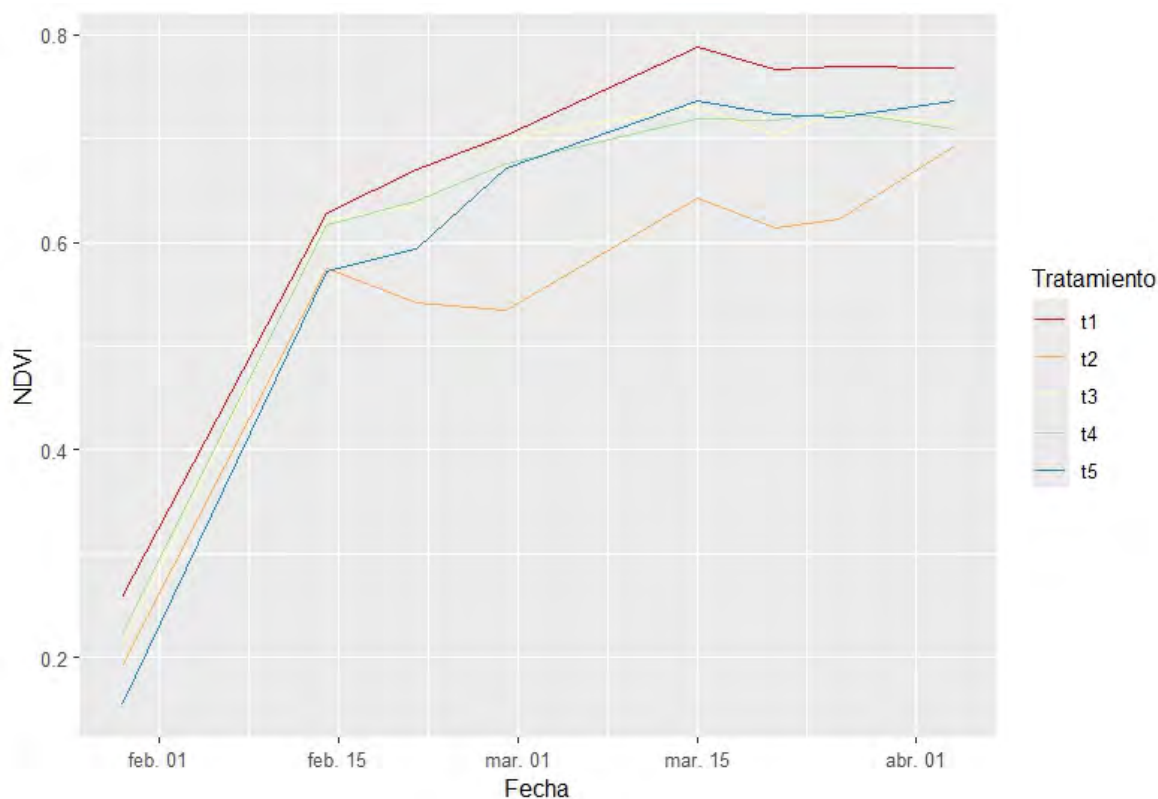


Figura 5. Comportamiento NDVI para los cinco tratamientos de fertilización nitrogenada.

Por su parte, en la Figura 6 se presenta el comportamiento del NDRE (mínimo: -0.04 y máximo: 0.30), con un rango menor al que presentó el NDVI, pero un comportamiento similar, sin embargo, en este índice es más marcada la diferencia entre los tratamientos a partir de mediados de febrero. Siendo consistente con NDVI, NDRE muestra que el tratamiento 1 es el que se desarrolla con los valores más altos durante todo el experimento, dando como resultado el valor más alto para el 15 de marzo (0.30), seguido por los tratamientos 5, 3, 4 y 2 (0.24, 0.23, 0.22 y 0.16, respectivamente).

En el caso de NDRE, es importante destacar que el comportamiento de los tratamientos 1 y 3 son similares del 29 de enero al 28 de febrero, posterior a esta fecha, el tratamiento 1 se encuentra por encima de los demás tratamientos y por su parte, el tratamiento 3 se encuentra en el rango de los tratamientos 4 y 5. Además, a través de NDRE se aprecia al igual que en el NDVI, que el tratamiento 2 logra incrementar su verdor en un rango similar a los tratamientos 3, 4 y 5.

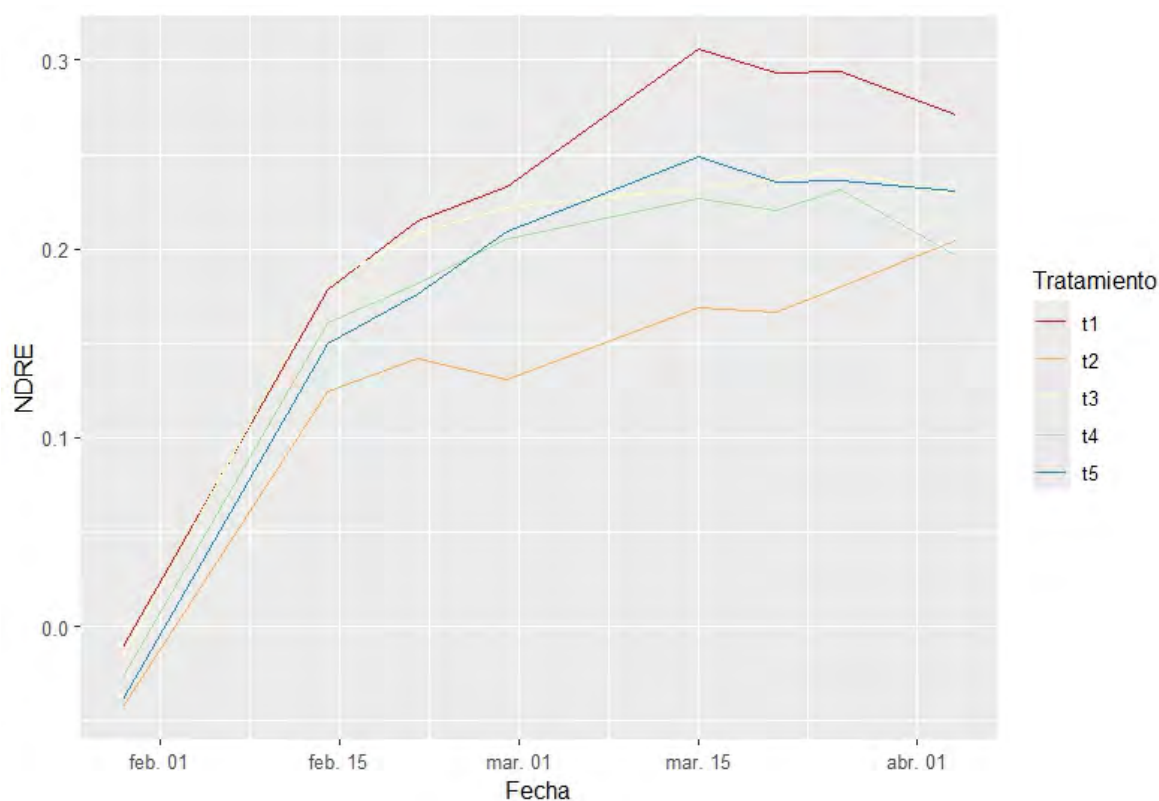


Figura 6. Comportamiento NDRE para los cinco tratamientos de fertilización nitrogenada.

En la Figura 7 se tiene el comportamiento del GNDVI, con valores que van desde 0.007 a 0.71, encontrando de manera consistente con los dos índices anteriores que el valor máximo se presenta durante 15 de marzo por parte del tratamiento 1, seguido por los tratamientos 3, 4, 5 y 3 (0.65, 0.65, 0.64 y 0.57, respectivamente). Sin embargo, se enfatiza que a diferencia del NDRE que presenta un decremento posterior a esta fecha, el GNDVI y el NDVI presentan valores sostenidos hasta el 4 de abril para los 5 tratamientos en sus diferentes rangos. Así mismo, se observa un comportamiento con menor variabilidad y una tendencia al incremento en el tratamiento 2 a través del GNDVI en contraste con el NDVI que presenta fechas de decremento y posterior incremento.

En términos de rangos se tiene que el GNDVI (mínimo: 0.007 y máximo: 0.71) tienen valores entre los mostrado para NDVI (mínimo: 0.15 y máximo: 0.78) y NDRE (mínimo: -0.04 y máximo: 0.30), siendo más cercano al NDVI. A pesar de las diferencias que se muestran en cada uno de estos índices, en términos generales el patrón que se dibuja con las ocho fechas es similar, es decir, al avanzar la fenología del cultivo se va incrementando el valor del índice y particularmente, en el caso del GNDVI, los cambios son más suavizados.

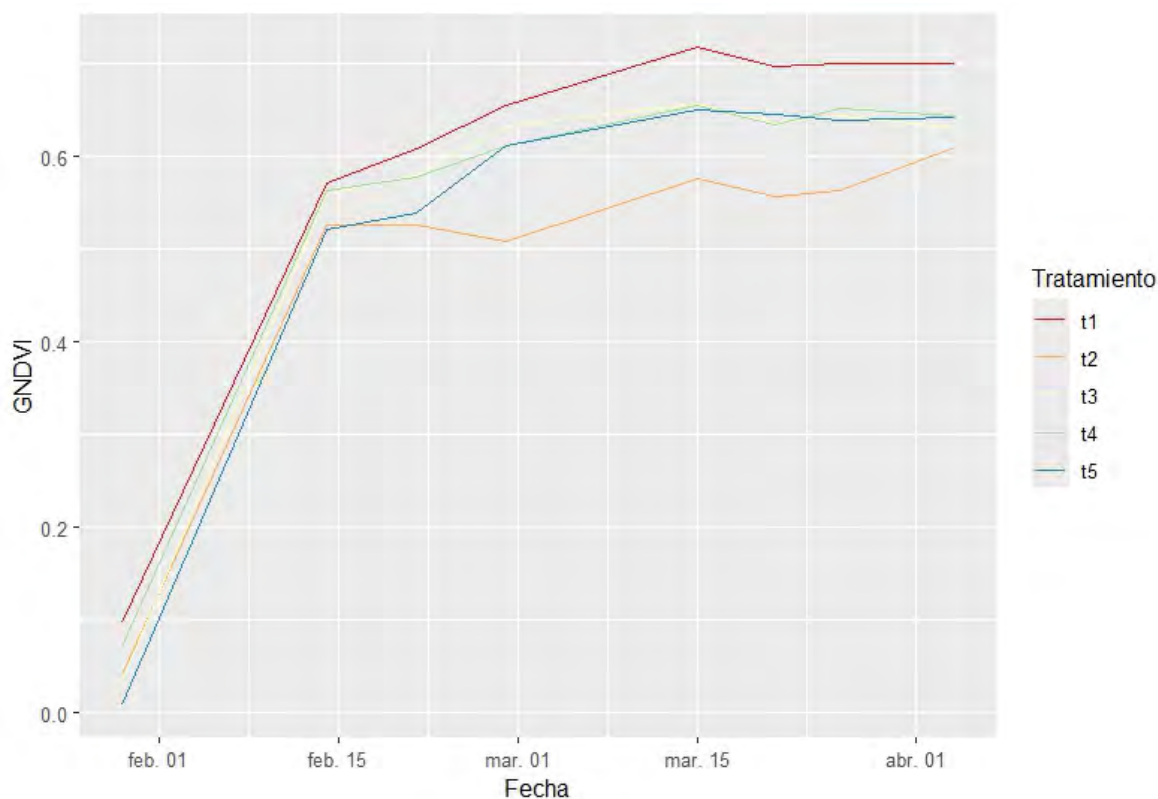


Figura 7. Comportamiento GNDVI para los cinco tratamientos de fertilización nitrogenada.

Finalmente, en la Figura 8 se presenta el comportamiento de los 5 tratamientos durante las 8 fechas en función del valor obtenido a través del NGRDI, el cual, presentó un valor mínimo de 0.07 y máximo de 0.53, sin embargo, en contraste a los índices anteriores, el valor máximo lo presenta el tratamiento 5 durante el 4 de abril y el valor mínimo se presenta el día 21 de febrero para el tratamiento 2, situación que es inconsistente de igual manera con los otros 3 índices, dado que para esto el día con el valor mínimo es el 28 de enero (la fecha con plántulas de maíz; Figura 3). Además de estos contrastes, también se puede observar que el tratamiento 1 y 5 presentan un comportamiento muy similar, incluso en rangos, tratamiento que posterior al 15 de marzo presentan los valores más altos de verdor y previo al 15 de marzo, el tratamiento 3 es el que presenta valores más altos de verdor.

En general, el NGRDI no es comparable en términos de patrón con los otros índices, dado que presenta datos máximos y mínimos en fechas y tratamientos distintos, así como mayor variabilidad en los 5 tratamientos, sin embargo, es cercano en términos de rango al NDVI y al GNDVI.

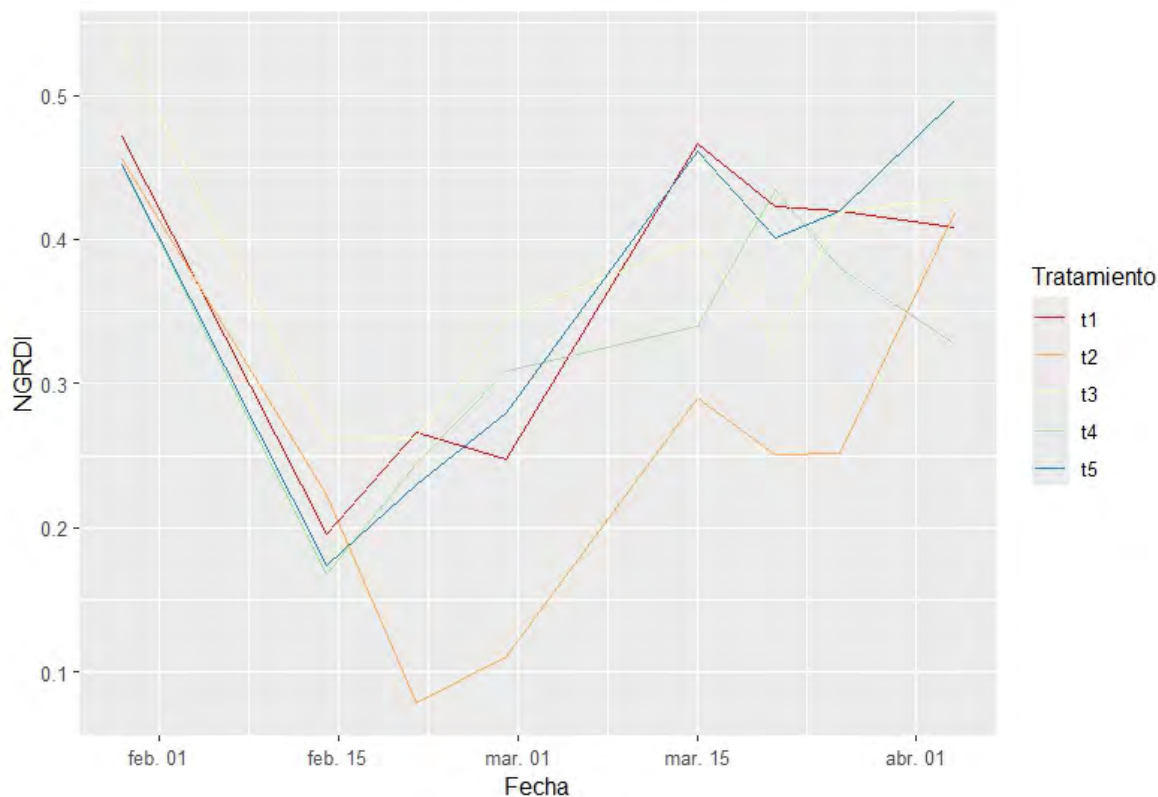


Figura 8. Comportamiento NGRDI para los cinco tratamientos de fertilización nitrogenada.

Con el fin de contrastar los índices de vegetación, en la Figura 9 se encuentra una gráfica multi panel con el comportamiento de cada uno de ellos. En resumen, podemos observar que el NDVI presenta los valores más altos, cercanos a 0.8 y NDRE el valor más bajo, incluso negativo. Así mismo, en la Figura 9 es más fácil apreciar las similitudes que presentan NDVI, NDRE y GNDVI, en contraste, el comportamiento del NGRDI.

A pesar de estas diferencias, los 4 índices son consistentes en los valores bajo del tratamiento 2, el cual, presenta la cobertura menos densa hasta antes del 4 de abril, así mismo, que el tratamiento 1 presenta la cobertura más verde.

El complementar diversos índices de vegetación obtenidos por medio de imágenes de alta resolución espacial, da la oportunidad de corroborar patrones que presentan las parcelas, tanto por cuestiones técnicas de fondo como el desarrollo del cultivo a lo largo de las etapas fenológicas, siendo fundamental para evaluar de manera integral el experimento.

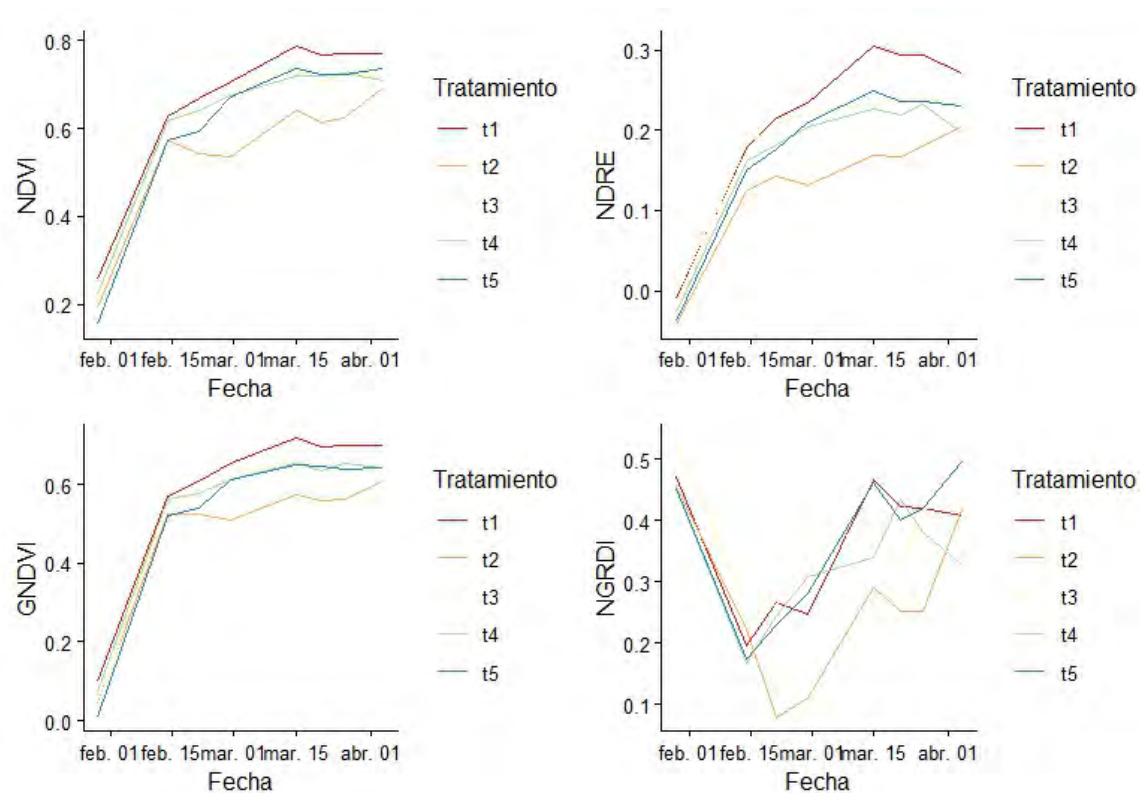


Figura 9. Comportamiento de índices de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI y NGRDI) para los cinco tratamientos de fertilización nitrogenada.

Finalmente, en la Tabla 1 se presentan los valores obtenidos posterior al procesamiento de las imágenes de alta resolución para la obtención de los valores digitales de cada uno de los tratamientos en el cultivo de maíz, cabe destacar que, las estimaciones se llevaron a cabo en el programa de Sistema de Información Geográfica, de código abierto, QGIS.

Tabla 1. Valores de índices de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI y NGRDI) calculados con números digitales de imágenes de alta resolución provenientes de cámaras montadas en un vehículo aéreo no tripulado, ocho repeticiones para cada uno de los 5 tratamientos de nitrógeno aplicados en cultivo de maíz.

| Tratamiento | Fecha | NDVI | NDRE | GNDVI | NGRDI |
|-------------|---------------|--------|---------|--------|--------|
| t1 | 29-ene | 0.2575 | -0.0109 | 0.0976 | 0.4720 |
| t1 | 14-feb | 0.6277 | 0.1781 | 0.5723 | 0.1956 |
| t1 | 21-feb | 0.6694 | 0.2152 | 0.6093 | 0.2668 |
| t1 | 28-feb | 0.7037 | 0.2334 | 0.6550 | 0.2475 |
| t1 | 15-mar | 0.7874 | 0.3055 | 0.7176 | 0.4664 |

| | | | | | |
|----|---------------|--------|---------|--------|--------|
| t1 | 21-mar | 0.7665 | 0.2931 | 0.6971 | 0.4230 |
| t1 | 26-mar | 0.7698 | 0.2937 | 0.7001 | 0.4200 |
| t1 | 04-abr | 0.7686 | 0.2708 | 0.7009 | 0.4087 |
| t2 | 29-ene | 0.1925 | -0.0429 | 0.0412 | 0.4565 |
| t2 | 14-feb | 0.5746 | 0.1244 | 0.5265 | 0.2232 |
| t2 | 21-feb | 0.5421 | 0.1421 | 0.5260 | 0.0783 |
| t2 | 28-feb | 0.5346 | 0.1312 | 0.5093 | 0.1104 |
| t2 | 15-mar | 0.6425 | 0.1687 | 0.5757 | 0.2905 |
| t2 | 21-mar | 0.6136 | 0.1669 | 0.5576 | 0.2508 |
| t2 | 26-mar | 0.6222 | 0.1799 | 0.5638 | 0.2517 |
| t2 | 04-abr | 0.6932 | 0.2042 | 0.6103 | 0.4190 |
| t3 | 29-ene | 0.2119 | -0.0148 | 0.0346 | 0.5342 |
| t3 | 14-feb | 0.6209 | 0.1823 | 0.5602 | 0.2627 |
| t3 | 21-feb | 0.6351 | 0.2087 | 0.5794 | 0.2625 |
| t3 | 28-feb | 0.7006 | 0.2216 | 0.6337 | 0.3458 |
| t3 | 15-mar | 0.7312 | 0.2323 | 0.6573 | 0.3995 |
| t3 | 21-mar | 0.7028 | 0.2366 | 0.6368 | 0.3243 |
| t3 | 26-mar | 0.7252 | 0.2416 | 0.6434 | 0.4192 |
| t3 | 04-abr | 0.7146 | 0.2279 | 0.6310 | 0.4279 |
| t4 | 29-ene | 0.2232 | -0.0264 | 0.0719 | 0.4509 |
| t4 | 14-feb | 0.6161 | 0.1609 | 0.5638 | 0.1675 |
| t4 | 21-feb | 0.6395 | 0.1812 | 0.5773 | 0.2449 |
| t4 | 28-feb | 0.6758 | 0.2052 | 0.6119 | 0.3085 |
| t4 | 15-mar | 0.7193 | 0.2263 | 0.6547 | 0.3400 |
| t4 | 21-mar | 0.7175 | 0.2202 | 0.6353 | 0.4343 |
| t4 | 26-mar | 0.7258 | 0.2318 | 0.6523 | 0.3806 |
| t4 | 04-abr | 0.7090 | 0.1964 | 0.6445 | 0.3278 |
| t5 | 29-ene | 0.1539 | -0.0387 | 0.0078 | 0.4514 |
| t5 | 14-feb | 0.5714 | 0.1502 | 0.5213 | 0.1740 |
| t5 | 21-feb | 0.5936 | 0.1763 | 0.5385 | 0.2301 |
| t5 | 28-feb | 0.6720 | 0.2095 | 0.6111 | 0.2800 |
| t5 | 15-mar | 0.7357 | 0.2492 | 0.6498 | 0.4609 |
| t5 | 21-mar | 0.7236 | 0.2356 | 0.6456 | 0.4006 |
| t5 | 26-mar | 0.7211 | 0.2361 | 0.6398 | 0.4194 |
| t5 | 04-abr | 0.7362 | 0.2304 | 0.6420 | 0.4964 |

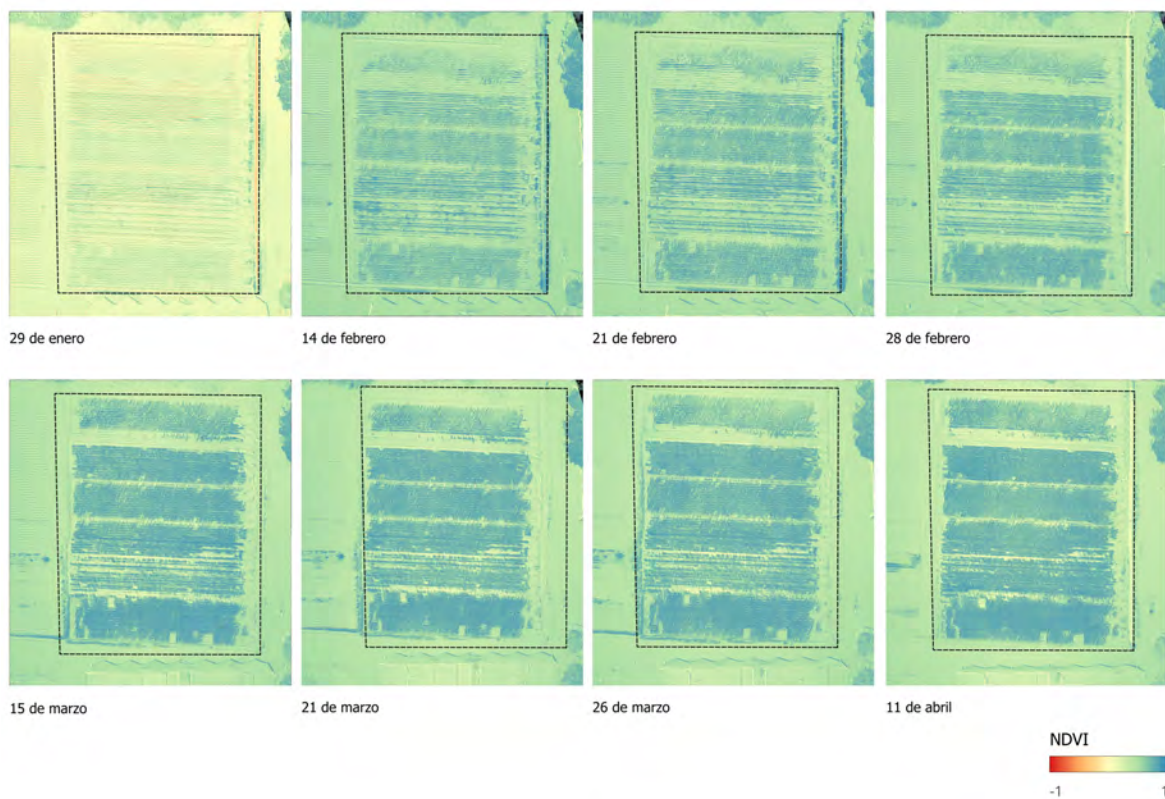


Figura 10. Imágenes del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizada (NDVI) en 8 fechas durante todo el ciclo de cultivo de maíz en el Valle del Yaqui, ciclo 2024-2025, en un experimento con cinco tratamientos de fertilización nitrogenada. Se determinaron otros índices de vegetación (NDRE, GNDVI y NGRDI) para las mismas fechas.