

## Propuesta para el monitoreo del cultivo de maíz basado en sensores remotos

### Proposal for monitoring maize cultivation based on remote sensors

Jocelyn Cortez-Núñez<sup>1\*</sup>   
Alejandra Zepeda-Mondragón<sup>1</sup>   
Francisco Miguel Eduardo García-Reyna<sup>2</sup>   
Daniel Mendoza-González<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Geotecnologías, ambiente y sociedades resilientes, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec, CP. 50110, Ciudad Universitaria, Toluca, México.

<sup>2</sup>Laboratorio de Observación de la Tierra, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec, CP. 50110, Ciudad Universitaria, Toluca, México

<sup>3</sup>Tienda El Inge San José del Rincón y Agroquímicos Siya Ajumu, San Lorenzo Tlacotepec, CP. 50486, Atlacomulco, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia:  
jacn0421@gmail.com

#### Nota científica

Recibida: 1 de junio 2023

Aceptada: 15 de noviembre 2023

**Como citar:** Cortez-Núñez JA, Zepeda-Mondragón F, García-Reyna ME, Mendoza-González D (2023) Propuesta para el monitoreo del cultivo de maíz basado en sensores remotos. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 10(3): e3810. DOI: 10.19136/era.a10n3.3810

**RESUMEN.** El monitoreo de cultivos basado en sensores remotos, particularmente a través de vehículos aéreos no tripulados (VANTs), permite a los agricultores estar actualizados sobre la salud de su cultivo y localizar qué áreas de la parcela requieren atención para mejorar su rendimiento. Por tal motivo, la presente propuesta metodológica planteada a partir de los resultados del estudio piloto para identificar las zonas donde existe una deficiencia de nutrientes o agua a través de imágenes obtenidas de un VANT, integrando información de las prácticas agronómicas expresadas por los agricultores y los hallazgos observados en campo. Se emplearon índices de vegetación para determinar la salud del cultivo y la etapa fenológica en la que se encuentra. Asimismo, se incentiva la participación de los pequeños agricultores con la finalidad de sensibilizarlos de la información que se puede obtener a través de este tipo de metodologías de la agricultura de precisión. Finalmente, los estudios previos en la zona de estudio permitieron establecer una guía para el monitoreo de la salud del cultivo de maíz a través de sensores remotos, particularmente de un VANT.

**Palabras clave:** Agricultura de precisión, percepción remota, vehículo aéreo no tripulado, índices de vegetación, salud del cultivo.

**ABSTRACT.** Remote sensing-based crop monitoring, particularly through unmanned aerial vehicles (UAVs), allows farmers to stay up to date on the health of their crop and locate which areas of their plot require attention, thus implementing preventive and corrective measures to anticipate problems at an early stage and enhance crop yield. For this reason, the methodology proposes to identify areas where there is a nutrient or water deficiency through images obtained from an unmanned aerial vehicle, integrating information on the expressed agronomic practices by the farmers and the findings from the field. Vegetation indices were used to determine crop health. Participation of small farmers is encouraged to sensitize producers about the usefulness of the information that can be gathered through this type of precision agriculture methodologies. Finally, previous studies allowed establishing a guide for monitoring the maize health through remote sensors, particularly a UAV.

**Key words:** Precision agriculture, remote sensing, unmanned aerial vehicles, vegetation indices, healthy crop.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, en México viven 126 014 024 personas. México ocupa el lugar 11 dentro de las naciones más pobladas del mundo (INEGI 2021). Se prevé que en 2030 la población llegará a poco más de 138 millones de personas con una tasa de crecimiento de 0.62% anual (CONAPO 2019). Esta situación generará una demanda adicional de alimentos que solo se puede satisfacer mediante un mayor rendimiento de los cultivos. Sin embargo, esto conlleva a problemas ambientales como la degradación de los suelos, contaminación de aguas superficiales por el uso de fertilizantes, plaguicidas, entre otros (Niu *et al.* 2023). Por otro lado, el maíz es uno de los cultivos alimentarios más valiosos de México y es un componente fundamental de las economías locales, regionales y nacionales. Por lo tanto, la modernización del sector agrícola se convierte en una necesidad. Existen muchas limitaciones que son las responsables de la baja producción de los cultivos, aunque se pueden superar mediante el uso de herramientas de la agricultura de precisión como la percepción remota (Hafeez *et al.* 2022). La adopción de técnicas de agricultura de precisión mejora la salud del suelo, mantiene la calidad del agua y garantiza la seguridad ambiental, alimentaria y nutricional, así como el desarrollo económico local. De esta forma, la agricultura de precisión aborda varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Nhamo *et al.* 2020, Meivel y Maheswari 2021, Rakhymberdina *et al.* 2022, Singh 2022, Upadhyaya *et al.* 2022, Gokool *et al.* 2023, Niu *et al.* 2023).

El desarrollo tecnológico de los sensores remotos acoplados en vehículos aéreos no tripulados (VANTs), llamados también "drones", permiten realizar el monitoreo espaciotemporal de la deficiencia de nutrientes y de agua, detectar enfermedades y plagas, así como una tasa de crecimiento lenta (García-Pardo *et al.* 2022). Los VANTs brinda una mejor solución para los pequeños agricultores, ya que puede capturar imágenes desde una altura y resolución temporal deseadas, dependiendo del VANT pero se han trabajado en el caso del maíz con al-

turas de 100 a 30 m obteniendo una resolución espacial de 0.05 a 0.03 m (Shu *et al.* 2023, Yu *et al.* 2023), de esta forma se puede monitorear el desarrollo del cultivo y actuar antes de que se propague el daño (Nhamo *et al.* 2020, Munghemezulu *et al.* 2023, Chin *et al.* 2023, Tahir *et al.* 2023). El monitoreo se realiza a través de índices de vegetación (IVs), los cuales son operaciones algebraicas de las bandas que tiene el sensor remoto y que captan las diferencias de la respuesta espectral del cultivo en las distintas longitudes de onda. Existen relaciones sólidas entre el rendimiento de la cosecha y los índices de vegetación (Hafeez *et al.* 2022). Particularmente en México, el uso de VANT se está empleando en los estados del norte de México (López-Calderón *et al.* 2020, Jiménez-Jiménez *et al.* 2022, López-Calderón *et al.* 2023). En este contexto, el objetivo del presente estudio fue establecer una metodología a partir de los resultados de un estudio piloto previamente realizado para llevar a cabo el monitoreo del desarrollo y la salud del cultivo de maíz a través de sensores remotos con la finalidad de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos agrícolas y el rendimiento de la parcela en condiciones reales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La propuesta metodológica toma como base un proyecto piloto de monitoreo del cultivo de maíz en 5.5 hectáreas del Ejido de San Francisco Chalchihuapan que pertenece al municipio de Atlacomulco, Estado de México (19° 45' 58 LN y 99° 52' 32 LO). El clima en Atlacomulco es subhúmedo con lluvias en verano (CW), precipitación media anual entre 800 y 1 000 mm, y rangos de temperatura de 6 a 20 °C de máxima y mínima, respectivamente. La temporada de lluvias comienza a mediados de mayo y finaliza en octubre, y la estación seca, es de noviembre a mediados de mayo. El área de estudio cubre 22 parcelas de riego rodado de ¼ de hectárea cada una. Sin embargo, solo 11 parcelas fueron sembradas en el ciclo agrícola 2022. La siembra se realizó con maíz criollo entre el 28 de marzo y el 1 de abril de 2022.

Se aplicó una dosis de 150 kg por hectárea de fertilizante inorgánico 18-46-00 y 100 kg por hectárea urea en mayo a las parcelas cultivadas antes de la etapa de panícula. Los productores del Ejido estiman una densidad de siembra de 75 000 plantas por hectárea y un rendimiento de 4.5 a 5 toneladas de maíz por hectárea. Finalmente, respecto a las prácticas agronómicas se emplea una labranza mecanizada usando maquinaria agrícola como tractor con rastra, sembradora y cosechadora.

### Preprocesamiento y procesamiento de imágenes de VANT

Con base en los resultados obtenidos del estudio piloto en el municipio de Atlacomulco donde se adquirieron imágenes obtenidas a través de un VANT Parrot Disco Pro-AG con cámara multiespectral Sequioa que cuenta con cuatro bandas verde (530-570 nm), rojo (640-680 nm), borde rojo (730-740 nm) e infrarrojo cercano (770-810 nm). Una vez obtenidas las imágenes del VANT, se procedió a realizar el preprocesamiento de las imágenes a través del programa Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia, el primer paso es la alineación de las imágenes, posteriormente, la corrección geométrica por medio de seis puntos control distribuidos en el área de estudio y obtenidos a partir de un sistema cinemático en tiempo real (RTK) de doble antena empleando antenas del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS). En seguida, se genera la nube de puntos y el ortomosaico. Por un lado, a partir de la nube de puntos se generan el modelo de elevación digital (MDE), que representa la topografía del suelo desnudo debajo de los cultivos en la parcela, por lo que tiene un nivel de referencia en la cota cero, y el modelo de superficie digital (DSM), el cual representa todos los elementos del terreno, en este caso el cultivo de maíz, con la finalidad de estimar la altura de la planta. Por otro lado, se generan los ortomosaicos a través de la nube de puntos (Figura 1). Posteriormente, se calculan los IVs a partir de la calculadora ráster del programa SNAP 9.0. Con la finalidad de extraer los valores de los IVs del cultivo se realiza una Clasificación Supervisada en Google Earth Engine (GEE) del ortomosaico del vuelo en la etapa lechosa, donde el maíz alcanza su

máximo crecimiento (Buthelezi *et al.* 2023), la capa clasificada se vectoriza y realiza el recorte de los IVs para extraer exclusivamente los valores de las plantas de maíz (Figura 2).

### Diseño metodológico

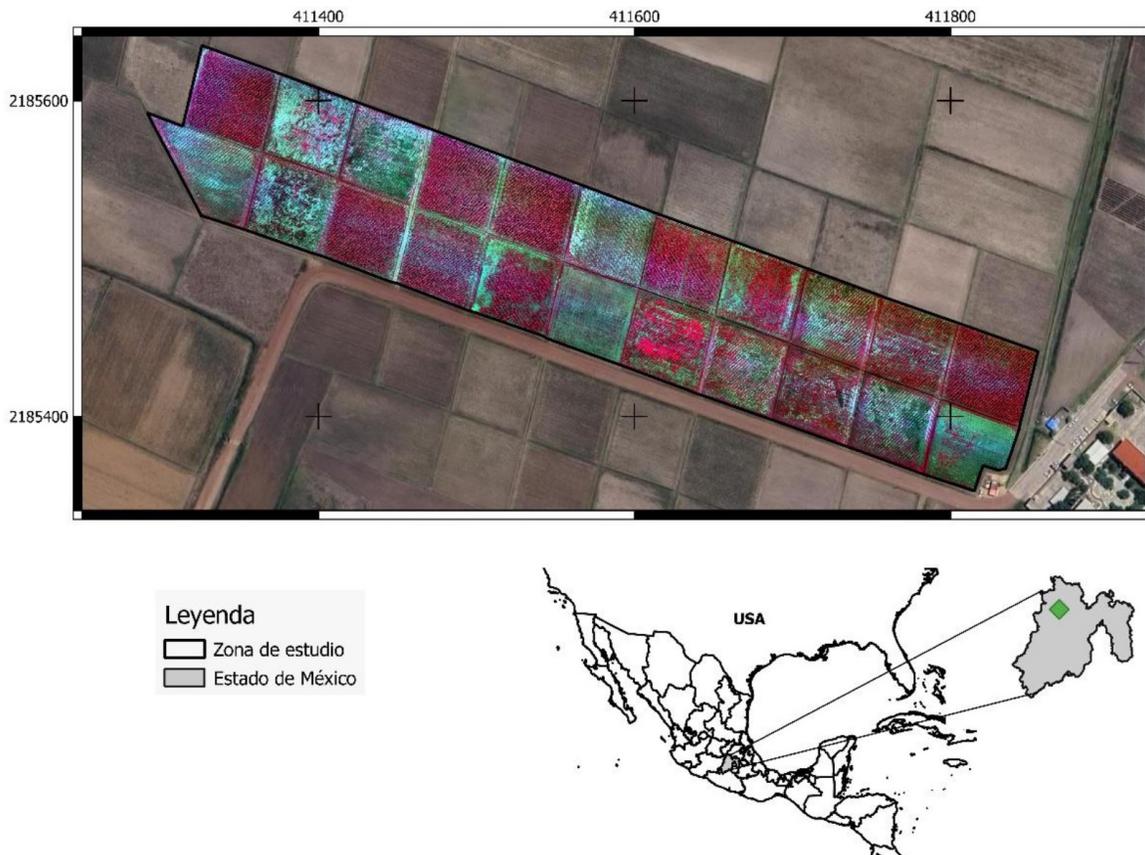
La metodología se diseñó tomando como base las etapas fenológicas claves en el crecimiento del maíz para obtener un óptimo rendimiento (Buthelezi *et al.*, 2023) (Tabla 1), es decir, las etapas donde es esencial realizar el monitoreo de la salud del cultivo para detectar una deficiencia de nutrientes o agua, enfermedad, plaga o afectaciones ocasionadas por fenómenos meteorológicos, dichas afectaciones se reflejan en bajos valores de los índices de vegetación analizados.

### Descripción de monitoreo de cultivos y variables evaluadas

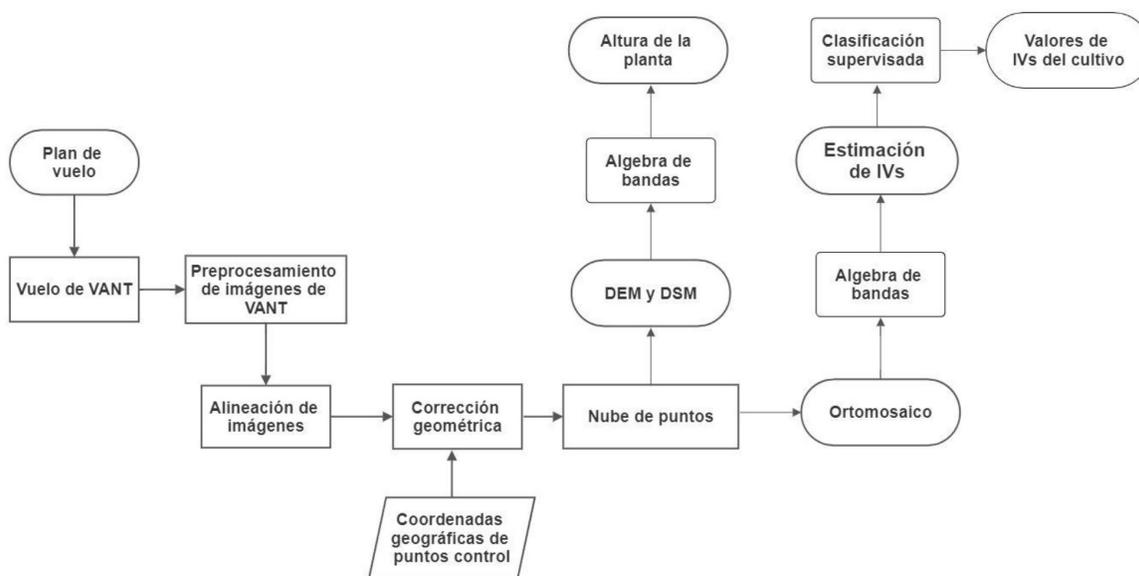
Como se mencionó anteriormente se focaliza el monitoreo de la salud del cultivo en las etapas cruciales para su óptimo desarrollo, con el objetivo de mejorar el rendimiento de éste, aplicando medidas correctivas inmediatas, especialmente en la etapa de crecimiento vegetativo antes de la panícula, así como en la floración y fecundación de la etapa reproductiva.

A continuación, se describen las variables evaluadas en cada una de las etapas en las que se centra el monitoreo partiendo de la etapa de la geminación y emergencia (VE) (Buthelezi *et al.* 2023). De igual forma, se tomaron como base los estudios de (Nonni *et al.* 2018, Jorge *et al.* 2019, Cucho-Padin *et al.* 2020, Lu *et al.* 2020, Monteleone *et al.* 2020, Tao *et al.* 2020, Lambertini *et al.* 2022, Zhang *et al.* 2022).

Etapa de germinación y emergencia (VE): Es importante determinar en campo el día de germinación, con la finalidad de llevar a cabo el conteo de días para las siguientes etapas. Diez hojas (V10): En esta etapa la planta demanda de nutrientes tanto macroelementos como microelementos, por lo que se recomienda sembrar con fertilización. Por tal motivo, se plantea realizar el primer vuelo del VANT. Doce hojas (V12) a Emergencia de Barbas (R1): En estas etapas es importante determinar la deficiencia de nu-



**Figura 1.** Ortomosaico en falso color del 05 de julio de 2022 de la zona de estudio.



**Figura 2.** Metodología para obtención de ortomosaicos y nubes de puntos.

**Tabla 1.** Etapas fenológicas del maíz. Buthelezi *et al.* 2023.

	Etapa de crecimiento	Nombre	Días aproximados después de VE	Descripción
	VE	Emergencia	0	Germinación y emergencia
Vegetativa	V10	Diez hojas	35	Crecimiento activo: se define población de plantas;
	V12	Doce hojas	48	desarrollo de la mazorca;
	V18	Dieciocho hojas	56	polinización
	VT	Panícula	63	Desarrollo del núcleo: relleno
Reproductiva	R1	Barbas	66	de grano: nutrientes
	R3	Lechoso	88	transportados a la mazorca
	R5	Dentado	128	Listo para la cosecha
	R6	Madurez fisiológica	193	

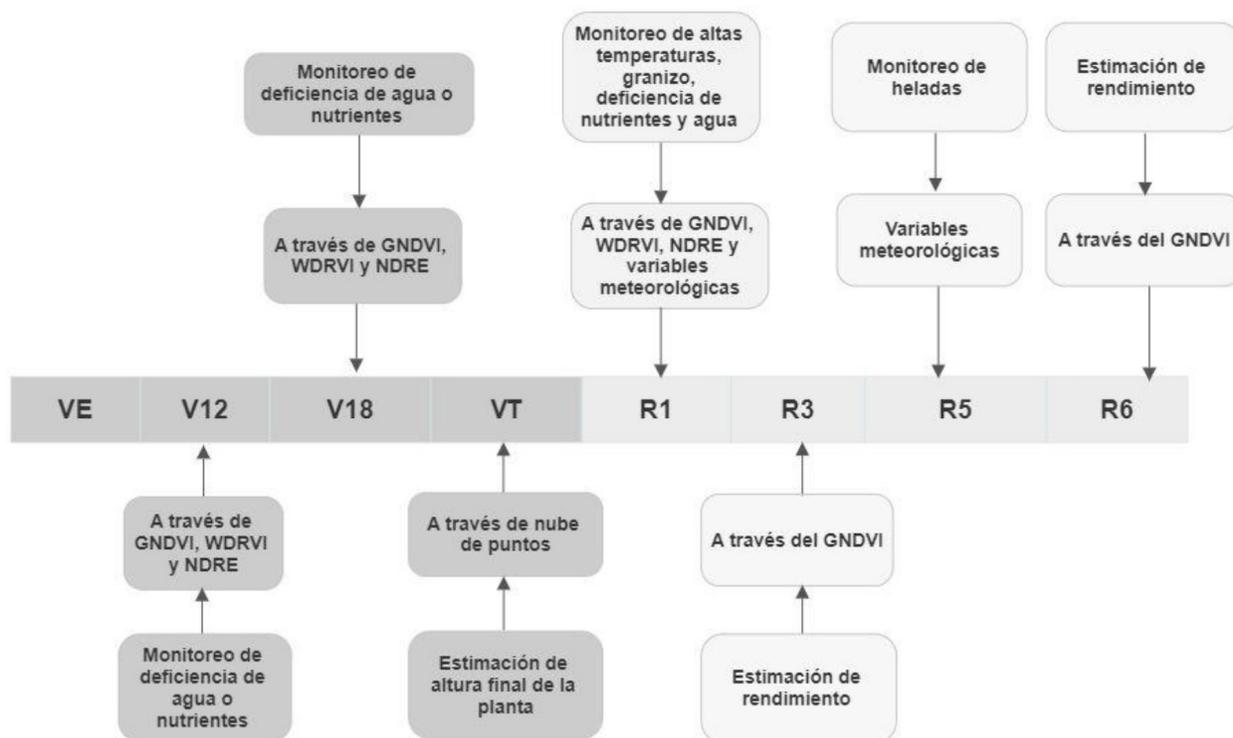
trientes o agua. Específicamente, en la etapa V12 puede reducir seriamente el número potencial de granos y el tamaño de la espiga; en la etapa de Dieciocho hojas (V18) el retraso de los órganos reproductivos provoca una desincronización entre el comienzo de la caída del polen y la emergencia de las barbas, por tanto problemas de rendimiento. Por otro lado, en la etapa de Panícula (VT), la planta alcanza su altura final y comienza la liberación del polen, es importante estimar la altura de la planta que está directamente relacionada con el rendimiento del cultivo. Finalmente, en la etapa R1 es esencial el monitoreo de estrés hídrico, deficiencia de nutrientes y eventos de granizo debido a que estos sucesos tienden a desecar las barbas y el polen, afectando el rendimiento. En este contexto, para realizar el monitoreo de la salud y desarrollo del cultivo en estas etapas cruciales (Figura 3), se estiman el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI, por sus siglas en inglés), Índice de Vegetación de Rango Dinámico Amplio (WDRVI, por sus siglas en inglés) y Índice Normalizado Diferencial de Borde Rojo (NDRE, por sus siglas en inglés) (Tabla 2) a partir de las imágenes obtenidas de 8 vuelos del VANT (Tabla 3). Los IVs se estiman a través de la calculadora ráster del programa QGIS. Mientras que la altura de la planta se estima a través de la diferencia de los valores del modelo de elevación digital (MDE), que representa la topografía del suelo desnudo debajo de los cultivos en la parcela, por lo que tiene un nivel de referencia en la cota cero, y el modelo de superficie digital (DSM) (Figura 2) (Furukawa *et al.* 2019, Tao *et al.* 2020), empleando el programa QGIS. Finalmente, para obtener un modelo predictivo de los IVs y la altura obtenida de la nube de puntos,

se mide con una cinta métrica la altura de 20 plantas georreferenciadas del centro de la parcela en un metro cuadrado, desde el suelo hasta la parte superior (Furukawa *et al.* 2019). Por otro lado, se realiza la estimación del rendimiento con base en el peso útil de grano (Aguilar-Ávila y Santoyo-Cortés 2013).

Etapa lechosa (R3): En esta etapa se da la extensión celular y la acumulación de almidón en las células, por lo que la mazorca alcanza su tamaño máximo. Por esta razón se plantea generar un modelo matemático a través de la correlación del GNDVI con el promedio de la altura de una muestra de plantas de maíz de la parcela y el rendimiento de grano seco en ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (Furukawa *et al.* 2019, Buthelezi *et al.* 2023). Etapa dentada (R5): Es esencial considerar condiciones adversas (como granizo y heladas) en esta etapa debido a que reducen el rendimiento por la disminución del peso de los granos y el número de granos en la mazorca. Por otro lado, esto ocasiona un retraso en la cosecha debido a que el maíz dañado se seca lentamente. Por esta razón se plantea nuevamente realizar la correlación del GNDVI con el promedio de la altura de una muestra de plantas de maíz de la parcela y el rendimiento de grano seco en  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  (Furukawa *et al.* 2019, Buthelezi *et al.* 2023).

### Recomendaciones en la siembra y las etapas V12, V8 y R1

Deficiencia de agua: Se sugiere implementar lluvia sólida en la siembra, la cual representa una novedosa acción para mitigar el efecto de la sequía en el proceso de crecimiento del cultivo. La lluvia sólida es un polímero que es capaz de absorber agua hasta 200 veces de su volumen, cambiarla de estado



**Figura 3.** Diagrama de flujo de la metodología planteada.

líquido a sólido y liberarla lentamente durante 60 días. Es necesario aplicar una dosis de 8g por metro lineal (Cisneros-Zayas et al. 2018, Taco et al. 2022).

agua y jabón de lejía, la cual tiene una capacidad de eliminar enfermedades fúngicas como la cenicilla, mildiú y botritis (SADER-INIFAP 2022).

**Tabla 2.** Índices espectrales empleados para el monitoreo de la salud del maíz.

IVs	Fórmula	Referencia
GNDVI	$GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$	Jorge et al. 2019
NDRE	$NDRE = \frac{NIR - REG}{NIR + REG}$	Zhang et al. 2022
WDRVI	$WDRVI = \frac{(0.1 \times NIR) - RED}{(0.1 \times NIR) + RED}$	Maresma et al. 2016

NIR: banda del infrarrojo cercano; RED: banda roja del espectro visible; REG: banda del borde rojo; G: banda verde del espectro visible.

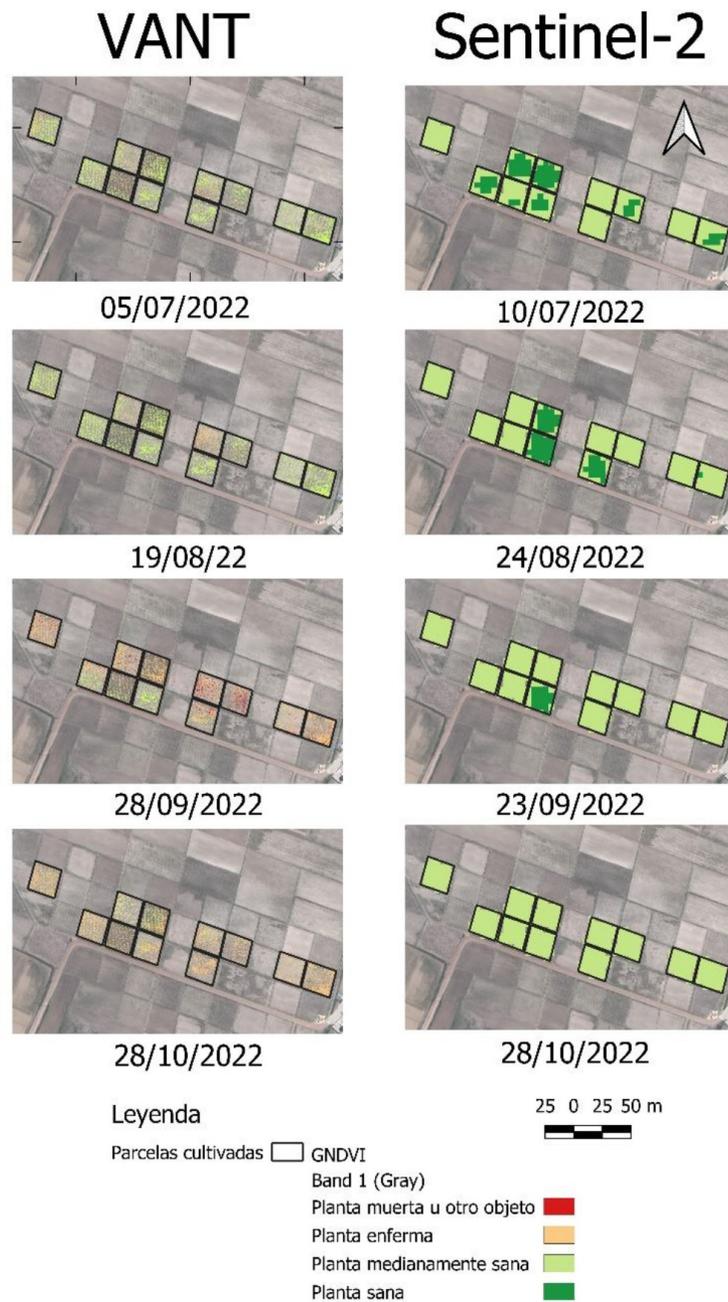
Deficiencia de nutrientes y control de enfermedades y plagas: Se sugiere la implementación de agua de vidrio, empleándose como fungicida, insecticida y nutriente orgánico. De igual forma, fortalece la respuesta inmunológica ante el ataque de plagas y/o enfermedades. También protege contra heladas y sequías. Además, se sugiere aplicar agua carbonatada, solución que se compone de bicarbonato de sodio,

**Tabla 3.** Programación de vuelos para monitoreo de las etapas V12, V18, VT y R1.

	Etapas de crecimiento	Días después de VE	Número de vuelo de VANT
Vegetativa	V10	35	1
	V12	48	2
	V18	52	3
	VT	56	4
	VT	63	5
Reproductiva	R1	66	6
	R3	88	7
	R5	128	8
	R6		

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se pueden observar valores altos de GNDVI en las imágenes del VANT y Sentinel-2 el 05 y 10 de julio de 2022, considerando que el maíz se encontraba en la etapa R3, posteriormente



**Figura 4.** Comportamiento del GNDVI en la zona de estudio para ambos sensores remotos.

reduce el valor del GNDVI debido a que el cultivo se encuentra en la etapa de madurez fisiológica. Se nota claramente como el GNDVI calculado a partir de las imágenes del VANT puede captar los cambios en el verdor del cultivo, mientras que el GNDVI estimado a

través de las imágenes del satélite Sentinel-2 no detecta la reducción del contenido de agua del dosel del maíz. Por otro lado, los valores de VIs para cada parcela presentaron diferencias en todas ellas. Estas diferencias se deben principalmente a las distin-

tas prácticas agronómicas (como presencia o ausencia de vegetación herbácea en los surcos, riego y fertilización). Diversos estudios han determinado que el GNDVI es un buen predictor del rendimiento al principio de las etapas V12 a VT cuando la aplicación de nitrógeno adicional aún es agronómicamente factible (Maresma *et al.* 2016, Peter *et al.* 2020, Burns *et al.* 2022, Gokool *et al.* 2023). De acuerdo con otros estudios, los índices basados en la banda verde se correlacionan con el contenido de clorofila y el rendimiento que los índices convencionales de banda roja (Maresma *et al.* 2016, Peter *et al.* 2020). Por tanto, la combinación de diferentes índices de vegetación para identificar la deficiencia de nutrientes o agua en el cultivo puede proporcionar una visión completa del estado de salud de la vegetación debido a que algunos muestran mayor sensibilidad que otros dependiendo la etapa fenológica del cultivo (Raptis *et al.* 2023). Es así como el GNDVI, se puede complementar con el NDRE ha mostrado ser muy sensible a los cambios en las propiedades de la vegetación y particularmente útil para identificar el crecimiento. Asimismo, se ha utilizado para observar irregularidades en el riego (Jorge *et al.* 2019). Esto es posible debido a la mayor dispersión de los valores de reflectancia en la banda del borde rojo que en la banda roja cuando cambia el contenido de agua y nitrógeno (Jorge *et al.* 2019, Raeva *et al.* 2019, Burns *et al.* 2022). Por último, WDRVI ha mostrado sensibilidad a los cambios en los valores del índice de área foliar en las etapas vegetativas del crecimiento del cultivo, por ejemplo, etapas V12 y VT (Pazhanivelan *et al.* 2023, Akbarian *et al.* 2023, Marino y Alvino 2019, Maresma *et al.* 2016). Se considera que hay una falta de métodos empíricos, cualitativos y basados en estudios de caso en investigación de imágenes provenientes de VANT (Rejeb *et al.* 2022). Por tal motivo, esta propuesta metodológica pretende aplicar las técnicas y métodos de la agricultura de precisión con el objetivo de mapear la variabilidad espaciotemporal de la salud del cultivo de maíz y contribuir a implementar una agricultura sostenible (Lambertini *et al.* 2022). Finalmente, los estudios futuros es necesario examinar

la viabilidad técnica, económica y operativa.

El uso de sensores remotos para monitorear cultivos y apoyar su manejo está atrayendo cada vez más atención en México. Este enfoque de uso de sensores puede emplearse para mejorar las decisiones de manejo en el campo e implementar prácticas de la agricultura de precisión. Por tanto, la presente propuesta de monitoreo del cultivo de maíz permite identificar posibles heterogeneidades espaciales y temporales en las parcelas e identificar las zonas donde el cultivo requiere de aplicar agua o fertilizante con el objetivo de mejorar el rendimiento de la parcela. La metodología planteada se basa en un estudio previo en el Ejido de San Francisco Chalchihuapan del municipio de Atlacomulco, Estado de México, el cual permitió identificar la necesidad del monitoreo del cultivo en las etapas cruciales en su desarrollo para aplicar medidas correctivas que mejoren su rendimiento a través de un vehículo aéreo no tripulado, el cual demostró tener una mayor sensibilidad a los cambios en el verdor de la planta. De igual forma, se estableció en calendario de vuelos a fin de dar seguimiento a las etapas V12, V18, VT y R1.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades brindadas por los agricultores del Ejido San Francisco Chalchihuapan del municipio de Atlacomulco, Estado de México. Especialmente, al Sr. Miguel Ángel Martínez y al Sr. Bernabé Martínez por compartir sus experiencias. Su agradecimiento también a los estudiantes vinculados al proyecto y al Dr. Rodrigo Huitrón por su apoyo. Además, los autores desean dar un importante agradecimiento al Centro Regional de Desarrollo Espacial Estado de México de la Agencia Espacial Mexicana por el acceso al equipo de cómputo del Laboratorio de Análisis y Procesamiento de Imágenes. Finalmente, un agradecimiento especial al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por financiar este estudio.

## LITERATURA CITADA

- Akbarian S, Jamnani MR, Xu C, Wang W, Lim S (2023) Plot level sugarcane yield estimation by machine learning on multispectral images: A case study of Bundaberg, Australia. *Information Processing in Agriculture*. DOI: 10.1016/j.inpa.2023.06.004.
- Aguilar-Ávila J, Santoyo-Cortés VH (2013) Estimación de rendimientos en el sector agropecuario. Miguel Ángel Porrúa. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial, Universidad Autónoma Chapingo, México. 11p. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/89f4258a-fef6-45a4-aa68-20ff4093fcd0>. Fecha de consulta: 04 de noviembre de 2023
- Burns B, Green V, Hashem A, Massey JH, Shew A, Adviento-Borbe M, Milad M (2022) Determining nitrogen deficiencies for maize using various remote sensing indices. *Precision Agriculture* 23(3): 791-811.
- Buthelezi S, Mutanga O, Sibanda M, Odindi J, Clulow A D, Chimonyo VG, Mabhaudhi T (2023) Assessing the prospects of remote sensing maize leaf area index using UAV-derived multi-spectral data in smallholder farms across the growing season. *Remote Sensing* 15(6): 1597. DOI: 10.3390/rs15061597.
- Cisneros-Zayas E, Cun-González R, Rosales-Naranjo L, González-Morales D (2018) Lluvia sólida, para un uso eficiente del agua. Resultados preliminares. *Revista Ingeniería Agrícola* 8: 13-20.
- CONAPO (2019) Proyecciones de la población de México y las entidades federativas 2016-2050. Ciudad de México, México. 36p. <https://www.gob.mx/conapo/acciones-y-programas/conciliacion-demografica-de-mexico-1950-2015-y-proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050>. Fecha de consulta: 15 de abril de 2023
- Cucho-Padín G, Loayza H, Palacios S, Balcazar M, Carbajal M, Quiroz R (2020) Development of low-cost remote sensing tools and methods for supporting smallholder agriculture. *Applied Geomatics* 12: 247-263.
- Chin R, Catal C, Kassahun A (2023) Plant disease detection using drones in precision agriculture. *Precision Agriculture* 24: 1663-1682. DOI: 10.1007/s11119-023-10014-y
- Furukawa F, Maruyama K, Saito Y, Kaneko M (2019) Corn height estimation using UAV for yield prediction and crop monitoring. In: Ram A, Teiji W (ed) *Unmanned aerial vehicle: Applications in agriculture and environment*. Springer Cham. Switzerland. pp: 51-69. DOI: 10.1007/978-3-030-27157-2.
- García-Pardo K, Moreno-Rangel D, Domínguez-Amarillo S, García-Chávez J (2022) Remote sensing for the assessment of ecosystem services provided by urban vegetation: A review of the methods applied. *Urban Forestry & Urban Greening* 74: 127636. DOI: 10.1016/j.ufug.2022.127636
- Gokool S, Mahomed M, Kunz R, Clulow A, Sibanda M, Naiken V, Chetty K, Mabhaudhi T (2023) Crop monitoring in smallholder farms using unmanned aerial vehicles to facilitate precision agriculture practices: A scoping review and bibliometric analysis. *Sustainability* 15: 3557. DOI: 10.3390/su15043557.
- Hafeez A, Husain MA, Singh SP, Chauhan A, Khan MT, Kumar N (2022) Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review. *Information Processing in Agriculture* 10: 192-203.
- INEGI (2021) Cuéntame de México. Ciudad de México, México. <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>. Fecha de consulta: 05 de abril de 2023
- Jiménez-Jiménez S, Marcial-Pablo M, Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Inzunza-Ibarra M, Sánchez-Cohen I (2022) VICAL: Global calculator to estimate vegetation indices for agricultural areas with Landsat and Sentinel-2 Data. *Agronomy* 12: 1518. DOI: 10.3390/agronomy12071518.

- Jorge J, Vallbéa M, Solerb J A (2019) Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote Sensing* 52: 169-177.
- Lambertini A, Mandanici E, Tini M, Vittuari L (2022) Technical challenges for multi-temporal and multi-sensor image processing surveyed by UAV for mapping and monitoring in precision agriculture. *Remote Sensing* 14: 4954. DOI: 10.3390/rs14194954.
- López-Calderón M, Estrada-Ávalos J, Martínez-Sifuentes A, Trucíos-Caciano R, Miguel-Valle E (2023) Nitrógeno total en maíz forrajero (*Zea mays* L.) estimado mediante índices espectrales con el satélite Sentinel-2. *Revista Terra Latinoamericana* 41: 1-14. DOI: 10.28940/terra.v41i0.1628.
- López-Calderón M, Estrada-Ávalos J, Rodríguez-Moreno V, Mauricio-Ruvalcaba J, Martínez-Sifuentes A, Delgado-Ramírez G, Miguel-Valle E (2020) Estimation of total nitrogen content in forage maize (*Zea mays* L.) using spectral indices: Analysis by random forest. *Agriculture* 10: 451. DOI: 10.3390/agriculture10100451.
- Lu H, Fan T, Ghimire P, Deng L (2020) Experimental evaluation and consistency comparison of UAV multispectral minisensors. *Remote Sensing* 12(16): 2542. DOI: 10.3390/rs12162542.
- Maresma Á, Ariza M, Martínez E, Lloveras J, Martínez-Casasnovas JA (2016) Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays* L.) from a standard UAV service. *Remote Sensing* 8(12): 973. DOI: 10.3390/rs8120973.
- Marino S, Alvino A (2019) Detection of spatial and temporal variability of wheat cultivars by high-resolution vegetation indices. *Agronomy* 9(5): 226. DOI: 10.3390/agronomy9050226.
- Meivel S, Maheswari S (2021) Remote sensing analysis of agricultural drone. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 49: 689-701.
- Monteleone S, de Moraes E, de Faria B, Maia R, Torre A, Toscano A (2020) Exploring the adoption of precision agriculture for irrigation in the context of agriculture 4.0: The key role of internet of things. *Sensors* 20: 7091. DOI: 10.3390/s20247091.
- Munghemezulu C, Mashaba-Munghemezulu Z, Ratshiedana PE, Economon E, Chirima G, Sibanda S (2023) Unmanned aerial vehicle (UAV) and spectral datasets in South Africa for precision agriculture. *Data* 8(6): 98. DOI: 10.3390/data8060098.
- Nhamo L, Magidi J, Nyamugama A, Clulow A, Sibanda M, Chimonyo V, Mabhaudhi T (2020) Prospects of improving agricultural and water productivity through unmanned aerial vehicles. *Agriculture* 10: 256. DOI: 10.3390/agriculture10070256.
- Niu X, Ni H, Ma Q, Wang S, Zong L (2023) Identifying ecological security patterns based on ecosystem service supply and demand using remote sensing products. *Sustainability* 15: 578. DOI: 10.3390/su15010578.
- Nonni F, Malacarne D, Pappalardo S, Codato D, Meggio F, De Marchi M (2018) Sentinel-2 data analysis and comparison with UAV multispectral images for precision viticulture. *GI Forum* 1: 105-116.
- Pazhanivelan S, Kumaraperumal R, Shanmugapriya P, Sudarmanian NS, Sivamurugan AP, Satheesh S (2023) Quantification of biophysical parameters and economic yield in cotton and rice using drone technology. *Agriculture* 13(9): 1668. DOI: 10.3390/agriculture13091668.
- Peter B, Messina J, Carroll J, Zhi J, Chimonyo V, Lin S, Snapp S (2020) Multi-spatial resolution satellite and sUAS imagery for precision agriculture on smallholder farms in Malawi. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 86: 107-119.
- Raeva P, Šedina J, Dlesk A (2019) Monitoring of crop fields using multispectral and thermal imagery from UAV. *European Journal of Remote Sensing* 52: 192-201.

- Rakhymberdina M, Kulenova N, Shaimardanov Z, Assylkhanova Z, Toguzova M, Kassymov D (2022) Using remote sensing data to support intelligent agricultural GIS to monitor the condition of arable land and crops 94: 883-888.
- Raptis EK, Englezos K, Kypris O, Krestenitis M, Kapoutsis AC, Ioannidis K, Vrochidis S, Kosmatopoulos EB (2023) CoFly: An automated, AI-based open-source platform for UAV precision agriculture applications. *SoftwareX* 23: 101414. DOI: 10.1016/j.softx.2023.101414.
- Rejeb A, Abdollahi A, Rejeb K, Treiblmaier H (2022) Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture* 198: 107017. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107017.
- Rosales-Soto A, Arechavala-Vargas R (2020) Agricultura inteligente en México: Analítica de datos como herramienta de competitividad. *VinculaTégica EFAN* 2: 1415-1427.
- SADER-INIFAP (2022) Manuales prácticos para la elaboración de Bioinsumos. Ciudad de México, México. <https://www.gob.mx/agricultura/documentos/bioinsumos-transicion-agroecologica>. Fecha de consulta: 05 de abril de 2023
- Singh A (2022) Precision agriculture in India - Opportunities and challenges. *Indian Journal of Fertilisers* 18: 308-331.
- Shu M, Li Q, Ghafoor A, Zhu J, Li B, Ma Y (2023) Using the plant height and canopy coverage to estimation maize aboveground biomass with UAV digital images. *European Journal of Agronomy* 151: 126957. DOI: 10.1016/j.eja.2023.126957.
- Taco C, López O, Vistín M, López J (2022) Lluvia sólida como estrategia de desarrollo sostenible en el cantón Guaranda en Ecuador. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay* 27: 31-48.
- Tao H, Feng H, Xu L, Miao M, Yang G, Yang X, Fan L (2020) Estimation of the yield and plant height of winter wheat using UAV-Based hyperspectral images. *Sensors* 20: 1231. DOI: 10.3390/s20041231.
- Tahir MN, Lan Y, Zhang Y, Wenjiang H, Wang Y, Naqvi SMZA (2023) Application of unmanned aerial vehicles in precision agriculture. In: Zaman Q (ed) *Precision Agriculture*. Academic Press. Massachusetts, USA. pp: 55-70.
- Upadhyaya A, Jeet P, Sundaram P (2022) Efficacy of drone technology in agriculture: A review. *Journal of AgriSearch* 9: 189-195.
- Yu J, Zhang S, Zhang Y, Hu R, Lawi AS (2023) Construction of a winter wheat comprehensive growth monitoring index based on a fuzzy degree comprehensive evaluation model of multispectral UAV data. *Sensors* 23(19): 8089. DOI: 10.3390/s23198089
- Zhang X, Zhang K, Sun Y, Zhao Y, Zhuang H, Ban W, Chen Y, Fu E, Chen S, Liu J, Hao Y (2022). Combining spectral and texture features of UAS-based multispectral images for maize leaf area index estimation. *Remote Sensing* 14(2): 331. DOI: 10.3390/rs14020331.