



MONITOREO DE LA FENOLOGÍA DEL MAÍZ CON IMÁGENES DE SATÉLITE PARA MEJORA DEL SERVICIO DE RIEGO EN ZONAS AGRÍCOLAS

**Ernesto Sifuentes-Ibarra^{1*}; Waldo Ojeda-Bustamante², Sergio Iván Jiménez-Jiménez³,
Jaime Macías-Cervantes¹ y Mariana de Jesús Marcial-Pablo³**

¹INIFAP-Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera Int. México-Nogales, km 1609, C.P. 81110, Juan José Ríos, Sinaloa, México.

eblnat68@gmail.com (*Autor de correspondencia)

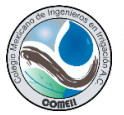
²Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMEII). Vicente Garrido 106, Col. Ampl. Maravillas, CP. 62230, Cuernavaca, Morelos, México.

³INIFAP-CENID RASPA Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Margen Derecha Canal Sacramento km 6.5, Zona Industrial, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

Resumen

Los grandes volúmenes de información de campo, la diversidad de manejo de cultivos, variabilidad espacial y variabilidad climática de las grandes zonas de riego, requieren de nuevas herramientas tecnológicas para el monitoreo de cultivos que coadyuven a la mejora del servicio de riego. Una metodología para el monitoreo de la fenología del cultivo de maíz a partir del Índice Normalizado de Desarrollo de Vegetación (NDVI) o del Índice Mejorado de Vegetación (EVI) calculados con imágenes de satélite LANDSAT de acceso libre para mejora del servicio de riego (programación-entrega-seguimiento) en escenarios de disponibilidad hídrica normal y restringida, se generó en 2020 para el distrito de riego (DR) 075, sin embargo, se requiere de una validación adecuada para iniciar el proceso de transferencia y adopción. En el presente trabajo se validó la metodología en nueve parcelas comerciales ubicadas en el módulo de riego (MR) Batequis II-3, DR075, utilizando como apoyo la plataforma Google Earth Engine (adaptado de VICAL) y el programa IRRIMODEL. La comparación entre el desarrollo fenológico observado (DF-observado) y el estimado (DF-estimado) generó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.83, lo cual es aceptable, considerando la variabilidad de fechas de siembra y manejo del cultivo. Para su implementación a gran escala se sugiere evitar errores en bases de datos como fechas de siembra, y descartar parcelas ubicadas en suelos con problemas físicos y de sales.

Palabras claves: Planeación, seguimiento, plataformas web, manejo de sequías



Introducción

Las grandes zonas de riego de México requieren acciones no estructurales para mejorar el servicio de riego, como el monitoreo de la fenología de cultivos asociado al servicio de riego. Sin embargo, su aplicación es limitada por los grandes volúmenes de información de campo requerida, diversidad de manejo de cultivos, variabilidad espacial y variabilidad climática, impactando en una eficiencia global de solo 33.9% (Olmedo-Vázquez et al., 2017). El uso de imágenes de satélite de acceso libre y modelos espectrales en función índice de vegetación (IVs) para el monitoreo de la fenología de cultivo, permite mejorar el servicio del riego al asociar el desarrollo fenológico de los cultivos con su demanda hídrica en tiempo y espacio.

Una metodología para el monitoreo de la fenología del cultivo de maíz en grandes zonas de riego (distritos y unidades de riego), a partir del Índice Normalizado de Desarrollo de Vegetación (NDVI) o del Índice Mejorado de Vegetación (EVI) calculados con imágenes de satélite LANDSAT, se generó en el año 2020 en el norte de Sinaloa, con el fin de mejorar el servicio de riego (programación-entrega-seguimiento) en escenarios de disponibilidad hídrica normal y restringida (Sifuentes-Ibarra et al., 2020).

Los aspectos identificados para mejora del servicio de riego fueron: 1) planeación semanal de volúmenes de agua demandados en función de etapas críticas, 2) manejo de volúmenes de agua en canales, 3) seguimiento del desarrollo del cultivo a gran escala y 4) decisión de aplicar riegos innecesarios.

Aunque ya se cuenta con la metodología, se requiere una validación adecuada en parcelas comerciales, que permita diseñar e implementar un esquema de transferencia y adopción de corto plazo. El objetivo del presente trabajo fue validar la metodología en parcelas comerciales de un módulo de riego, representativo del DR075 y generar las bases para su adopción rápida con el apoyo de softwares y plataformas web de acceso libre como IRRIMODEL (Sifuentes y Macías, 2015), QGIS y Google Earth Engine. Con lo anterior se estima un ahorro de agua de $870 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y un aumento en el rendimiento del 8% ($1,120 \text{ kg ha}^{-1}$) en la zona de estudio, además, de ahorros en costos de personal de campo y operativos, estimados en 20%.

Materiales y Métodos

Generación de la metodología (2020)

La metodología se generó en el DR075, Río Fuerte en la región norte del estado de Sinaloa México, ubicada en las coordenadas $25^\circ 45'N$ y $-108^\circ 51'W$, en un área aproximada de 20000 ha ubicada en la unión de los MR Santa Rosa y Batequis (figura1).



Figura 1. Ubicación del área de estudio

Esta región presenta una precipitación media anual de 352 mm, una temperatura media anual de 25 °C y una altitud de 15 msnm. Los suelos son planos, profundos, sin problemas de sales y principalmente con texturas arcillosa y franco-arcillosa con humedad disponible en el rango de 0.143 a 0.155 cm³ cm⁻³. El DR075 es el más grande del país, con más de 260000 ha cosechadas anualmente y un valor de la producción de alrededor de 850 millones de dólares, con más de 170000 ha de maíz con rendimiento promedio de 12.7 t ha⁻¹ y un valor de producción de 400 millones de dólares estadounidenses (SIAP, 2019).

Se seleccionaron 30 parcelas al azar de referencia de maíz con superficie promedio de 10 ha, a las cuales se les estimaron los grados-día desarrollo (GDD) ($T_{min} = 10^{\circ}C, T_{max} = 30^{\circ}C$) e índice de desarrollo fenológico (DF) históricos para los ciclos agrícolas otoño-invierno (OI) del periodo 1998 a 2018, con la metodología reportada por Ojeda-Bustamente et al. (2006). Para el mismo periodo se descargaron y calibraron imágenes de satélite LANDSAT (<https://glovis.usgs.gov/>), para posteriormente calcular los índices de vegetación (IV) NDVI y EVI con el software QGIS.

Con los datos históricos de estas dos variables se generaron dos modelos espectrales de forma cuadrática, para la estimación de DF en función de cada IV para la mejora del servicio de riego de módulos de riego, especialmente los que utilizan el software IRRIMODEL de INIFAP (Sifuentes y Macías, 2015).

Validación de la tecnología OI 2021-2022

La validación de la metodología se realizó durante el ciclo OI 2021-2022 en nueve parcelas representativas del DR075 ubicadas en el MR Batequis, II-3 (cuadro1). La

fenología de estas parcelas se monitoreó semanalmente comparando el DF-observado con el DF-estimado con los modelos espectrales.

Cuadro 1. Relación de parcelas para la validación de la tecnología, ubicadas en el módulo Batequis II-3, DR075. Ciclo OI 2021-2022.

No.	Cuenta	Superficie (ha)	Fecha de siembra	Híbrido
1	6817-2	2.44	30/11/21	DK-4050
2	9131-0	8.84	03/12/21	DK-2038
3	9137-0	10.23	09/12/21	DK-2038
4	9139-0	10.08	16/12/21	DK-2038
5	9242-2	8.50	12/11/21	DK-2038
6	9265-0	10.00	23/11/21	DK-2038
7	9279-0	9.90	18/11/21	Garañón
8	9304-0	10.00	08/12/21	DK-4050
9	9344-0	10.44	26/11/21	DK-2038

Para automatizar el proceso se utilizó la plataforma Google Earth Engine, que es una adaptación de la plataforma VICAL (Jiménez-Jiménez et al., 2022) con el mapa catastral del MR en archivo vectorial, bases de datos históricas de parcelas y siembras y los modelos espectrales para la estimación del DF. Esta plataforma descarga las imágenes en forma automática y genera consultas de los resultados en forma de mapas y gráficas.

Resultados y Discusión

Modelos espectrales generados

En el cuadro 2 se muestran los parámetros de los dos modelos espectrales generados durante el ciclo OI 2018-2019, para la estimación del desarrollo fenológico del cultivo de maíz en el DR-075 usando imágenes LANDSAT (Sifuentes-Ibarra, et al., 2020).

Cuadro 2. Parámetros para la forma de la ecuación $DF = f(IV) = \alpha_1 \pm [\alpha_2 + (\alpha_3 * IV)]^{0.5}$, para $IV \leq IV_{m\acute{a}x}$, de lo contrario $DF = DF_{VT}$, para estimar desarrollo fenológico (DF) como función de índices de vegetación (IVs), considerando dos zonas de desarrollo del maíz. Zona I: ecuación con signo negativo (-) para la raíz cuadrada. Zona II: ecuación con signo positivo (+) para la raíz cuadrada.

DF = f (IV)	Parámetro			IV _{máx}	DF _{VT}	R ²
	α_1	α_2	α_3			
DF _{NDVI}	0.6130	0.3740	-0.5150	0.726	0.607	0.7059
DF _{EVI}	0.6191	0.3106	-0.4052	0.767	0.616	0.6975

La secuencia de pasos para la aplicación de la metodología generada se muestra en el diagrama de la figura 2.

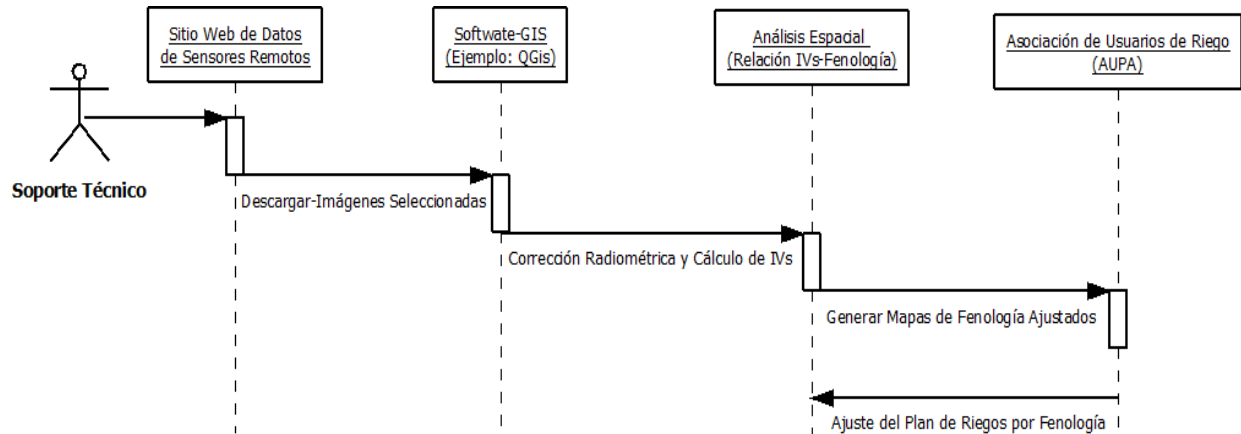


Figura 2. Esquema secuencial de la metodología generada

Validación

La figura 3 muestra la relación entre el DF-observado y el DF-estimado con la metodología, en parcelas de validación de maíz en el ciclo agrícola OI 2021-2022, donde se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.83, lo cual es aceptable, considerando la variabilidad de fechas de siembra y manejo del cultivo. Para su implementación a gran escala se sugiere evitar errores en bases de datos como fechas de siembra, y como descartar parcelas ubicadas en suelos con problemas físicos y de sales.

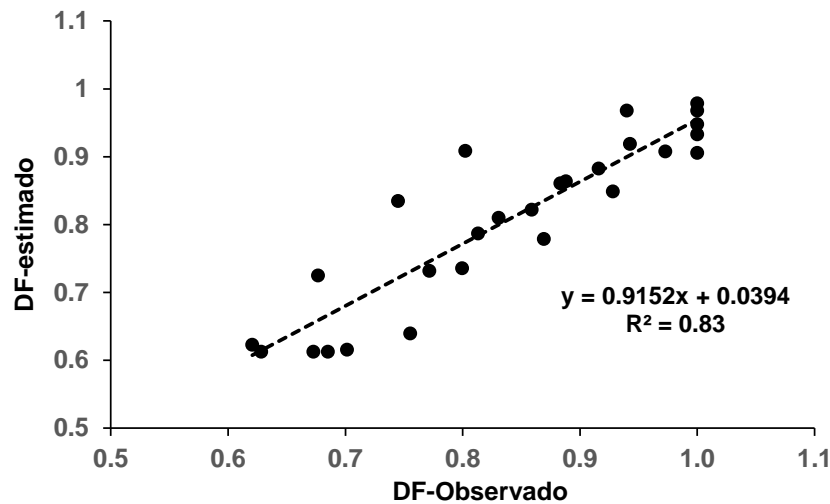


Figura 3. Esquema secuencial de la metodología generada.

En la figura 4 se puede apreciar una consulta de fenología generada con la plataforma Google Earth Engine y la evolución de NDVI y DF en una de las parcelas de validación, los cuales se utilizaron durante el proceso de validación.

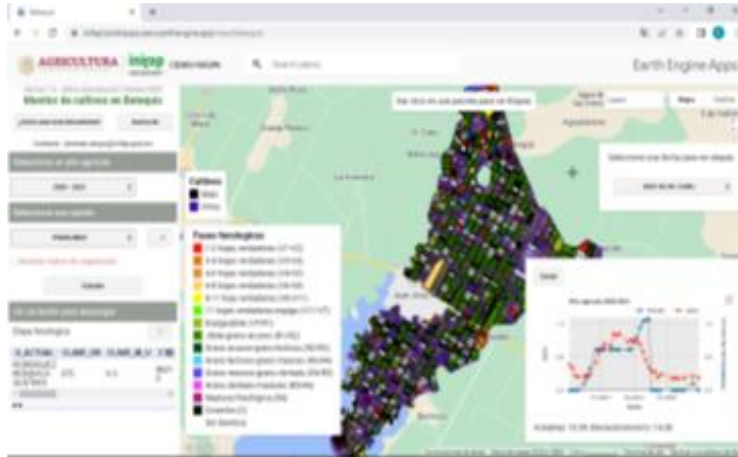


Figura 4. Consulta automática de la fenología de maíz para el módulo de riego Batequis II-3, DR075, realizada con la Plataforma Google Earth Engine (Adaptada de VICAL).

Conclusiones

La validación de la metodología para la estimación de la fenología con imágenes LANDSAT desarrollo fenológico de maíz con datos de campo de calidad mostró un nivel aceptable. Para su implementación a gran escala es fundamental utilizar bases de datos de calidad sin discrepancias de datos de parcelas y siembras para evitar errores en los resultados. La herramienta Google Earth Engine es una excelente opción para la automatización de la metodología en zonas agrícolas y con ello contribuir a la mejora del servicio de riego.

Referencias Bibliográficas

- Jiménez-Jiménez, S.I, Marcial-Pablo, M.J., Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Inzunza-Ibarra, M.A. y Sánchez-Cohen, I. (2022). VICAL: Global Calculator to Estimate Vegetation Indices for Agricultural Areas with Landsat and Sentinel-2 Data. *Agronomy* 2022, 12, 1518.
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E. y Unland, W. H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencia* 40: 13-25. Montecillos, Edo. México.
- Olmedo-Vázquez, V.M. (2017). Determinación de indicadores de gestión en los módulos del distrito de riego No.41, Río Yaqui (Sonora, México). Universidad de Córdoba. Tesis Doctoral. Córdoba, España. 222pp.
- SIAP (2019). Estadística. [En línea] Fecha de ingreso: 01 de octubre de 2019
- Sifuentes-Ibarra, E; Ojeda-Bustamante, W; Ontiveros-Capurata, RE; Sánchez-Cohen, I (2020). Improving the monitoring of corn phenology in large agricultural areas using



remote sensing data series. Spanish Journal of Agricultural Research, Volume 18, Issue 3, e1204. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020183-16269>.