

Discrepancia entre sensores remotos utilizados en la estimación de variables agronómicas

Discrepancy between remote sensors used in the estimation of agronomic variables

Ramón Trucíos-Caciano¹, Nuria Aide López-Hernández^{1*}, Cristo Omar Puente-Valenzuela¹, Iván Franco-Gaytán² y Marco Antonio Inzunza-Ibarra¹

¹ INIFAP CENID RASPA Km. 6.5 margen derecha. Canal de Sacramento, C.P. 35079, Gómez Palacio, Durango.

² INIFAP CIRNOC, Campo Experimental La Laguna, Blvd. José Santos Valdés 1200 Pte. C.P. 27440, Matamoros, Coahuila.

Autor para correspondencia: *lopez.nuria@inifap.gob.mx

RESUMEN

Las imágenes satelitales y las imágenes con drones o RPAS, usadas en la agricultura, han incrementado su uso por la variedad de aplicaciones en estimaciones de variables de importancia económica para esta actividad. Sin embargo, es importante establecer cuáles son las diferencias en los datos que registran, debido a que tienen diferentes escalas o tamaño de pixel, en donde un pixel de imagen satelital representa varios individuos, un pixel de imagen de RPAS representa una sección de un individuo. Por lo anterior, este estudio tuvo como objetivo describir la diferencia entre los datos que registran estas dos fuentes de información (Sentinel 2 y RPAS) que representan dos escalas de sensores remotos, para maíz forrajero verano 2023 y primavera 2024. Se encontró, con análisis de correlación y pruebas de T pareados, que las imágenes presentan una alta correlación cuando el muestreo se hace al interior de los pixeles de Sentinel 2, y que en el caso de los índices de vegetación NDRE y SAVI, no existe diferencia significativa entre los dos sensores.

Palabras clave: Maíz forrajero, teledetección, imágenes satelitales, SAVI.

ABSTRACT

Satellite images and images from drones or RPAS, used in agriculture, have increased their use due to the variety of applications in estimating variables of economic importance for this activity. However, it is important to establish what the differences are in the data they record, because they have different scales or pixel sizes, where a satellite image pixel represents several individuals, and a RPAS image pixel represents a section of an individual. Therefore, this study aimed to describe the difference between the data recorded by these two sources of information (Sentinel 2 and RPAS) that represent two remote sensing scales, for forage corn summer 2023 and spring 2024. It was found, with correlation analysis and paired T tests, that the images present a high correlation when sampling is done within the Sentinel 2 pixels, and that in the case of the NDRE and SAVI vegetation indices, there is no significant difference between the two sensors.

Keywords: Pixel Size, Vegetation Indices, Sentinel, RPAS.

INTRODUCCIÓN

La sensoria remota es una herramienta de uso extendido en las actividades agrícolas, y cada vez mayor, por las aplicaciones que se han desarrollado, además del incremento en precisión que han alcanzado. Lo anterior, ha sido impulsado por la facilidad de obtención de imágenes satelitales gratuitas como Landsat (USGS/NASA, -USGS, 2024-) y Sentinel (ESA/COPERNICUS, -ESA, 2024-), además de programas como QGIS (QGIS.org, 2024)

que también es gratuito y permite el análisis de las imágenes. Desde el lanzamiento de Landsat, en los años 70, hasta la actualidad, se han mejorado las técnicas de obtención de información con un mejor y rápido procesamiento de la información, incluso en procesadores personales. Aunado a la incorporación, en la última década, drones o RPAS (*Remotely Piloted Aircraft*) para el desarrollo de ortofotos con un incremento en precisión en las imágenes con pixeles menores a 20 cm, en comparación con las de satélite. En este estudio se resalta la necesidad de



tomar en cuenta la mayor precisión con la que cuentan los RPAS y, que está relacionada con mayor captación de variabilidad. Lo anterior, se relaciona con la compatibilidad de la información que se registra con las imágenes satelitales, no solamente para el muestreo de datos en campo, sino la representatividad del mismo asociado con la escala del sensor que utilizemos para explicar variables como biomasa, fenología, rendimiento, entre otros. El objetivo de este estudio fue describir la diferencia entre la información que registraron dos escalas de sensores remotos, satélite comercial y RPAS, en cultivo de maíz forrajero. Para lo anterior, se compararon diferentes índices de vegetación, incluyendo el NDVI, para maíz forrajero en época de verano 2023 y primavera 2024, además de un análisis con respecto al tamaño del pixel de cada sensor remoto y la información que registran.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos analizados en este estudio, corresponden al registro de información de campo, y sensores remotos, en dos áreas de estudio. En 2023 los datos se registraron en el predio de un productor cooperante del ejido El Porvenir, Francisco I. Madero, Coah. (25°46'49.38" N, 103° 18' 44.54" W, 1110 m.s.n.m.). En 2024, se recolectó la información en el área experimental del CENID-RASPA, Gómez Palacio, Dgo (25°35'22.15" N, 103°27'9.40" W, 1150 msnm). La información de campo, corresponde al registro tanto de planta como de suelo en cultivo de maíz forrajero. Las fechas de registro de variables de campo, corresponden a las fechas en las cuales se realizó el registro de la imagen Sentinel (2a y 2b), considerando una periodicidad de 5 días y una resolución espacial de 10 m/pixel (ESA, 2024). Estos mismos días se realizaron los vuelos y registros de ortomosaicos con imágenes multispectrales utilizando el RPAS Ebee Classic con bandas: verde, borde rojo, infrarrojo cercano; con una resolución de 18 cm/pixel. Los muestreos de campo, suelo y planta, se realizaron en parcelas de 1 metro cuadrado. De la información registrada en campo se utilizó la información relacionada a las etapas fenológicas, registrando 18 que se mencionan a continuación: V1 (1), V2(2), V3(3), V4(4), V5(5), V6(6), V7(7), V8(8), V9(9), V10(10), V11(11), V12(12), VT(13), R1(14), R2(15), R3(16), R4(17) y R5(18).

Las fechas de imágenes satelitales y ortofotos obtenidas por RPAS, empleadas en este estudio, se enlistan a continuación en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Fechas de re-muestreo de las imágenes y ortofotos empleadas en este análisis.

DRON	SENTINEL 2	DRON	SENTINEL 2
25/08/2023	25/08/2023	02/05/2024	01/05/2024
04/09/2023	04/09/2023	06/05/2024	06/05/2024
14/09/2023	14/09/2023	10/05/2024	11/05/2024
25/09/2023	24/09/2023	21/05/2024	21/05/2024
03/10/2023	NUBOSIDAD	27/05/2024	26/05/2024
19/09/2023	19/10/2023	05/06/2024	05/06/2024
		25/06/2024	25/06/2024
		01/07/2024	30/06/2024
		05/07/2024	05/07/2024
		11/07/2024	10/07/2024

Las fechas de vuelo, de RPAS, en ocasiones tuvieron desfase con respecto a las fechas de Sentinel 2, debido a que las condiciones de clima (pronóstico de viento o lluvia, principalmente), no fueron las óptimas establecidas para el uso del RPAS. En esos casos, se registró la información en campo y el vuelo de RPAS un día antes o un día después del registro de la imagen Sentinel.

Cabe destacar, que los sitios de muestreo del año 2023 fueron aleatorios con respecto al área total de la parcela, mientras que en el año 2024 los sitios de muestreo se establecieron al interior del área de pixeles de Sentinel 2 preseleccionados. Esto último, obedece a que la selección aleatoria de sitios en 2023, en algunas fechas, ubicó los sitios de muestreo en sitios compartidos por dos o cuatro pixeles de Sentinel 2, lo cual se optimizó en 2024.

Se usaron dos programas para el cálculo de los índices de vegetación (IV). Emotion 3.5 ®, para las imágenes de RPAS, y QGIS 3.36 (QGIS.org, 2024), para las imágenes de Sentinel. La comparación de la información registrada con respecto a la escala de los sensores se analizó con los estadísticos calculados por los programas antes mencionados a través de información descriptiva de las imágenes.

Los IV calculados fueron: NDVI (Diferencia Normalizada), SR (Radio Simple), NDRE (Diferencia Normalizada de Borde Rojo) y SAVI (Ajustado a Suelo) (IDB, 2024). Estos IV se analizaron de forma gráfica y estadística empleando correlación de Person (r) y Prueba de T para análisis de muestras pareadas (Bollas et al., 2021), empleando el programa R versión 4.4.1 (R Core Team, 2024).



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Escala del sensor remoto

La comparación del tamaño de celda o resolución espacial, es la comparación de la información que puede captar cada sensor en relación al cultivo del maíz forrajero. Para ejemplificar la comparación realizada en este estudio, se muestra en la figura 1 el sitio del experimento de maíz forrajero primavera 2024, desarrollado en el INIFAP CENID-RASPA, en donde se registró la información en color verdadero por parte de un RPAS, y en NDVI por parte de Sentinel 2 y RPAS. El cuadro 2 muestra la información estadística de la superficie de 4 pixeles de Sentinel 2, en el área de estudio, y la información que registra el RPAS en la misma superficie.

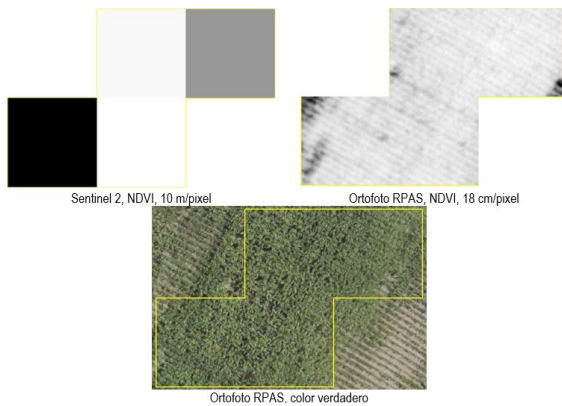


Figura 1. Recorte de ortofotos e imágenes satelitales del sitio de estudio para las fechas 3 y 5/jun/2024 para una superficie de cuatro pixeles de Sentinel 2.

Cuadro 2. Estadísticas básicas, de valores de NDVI, por sensor para tres fechas del ciclo de cultivo de maíz forrajero en primavera 2024.

	# Pixel es	Med ia	Max	Min	Fecha	Etap a fenológ ica
Senti nel	4	0.09	0.10	0.09	11.04.	
RPAS	2379	0.08	0.19	0.10	11.04.	V1, V2
	3	41	34	92	24	
Senti nel	4	0.29	0.31	0.27	11.05.	
RPAS	2227	0.44	0.71	0.19	10.05.	V6, V7
	5	98	74	13	24	
Senti nel	4	0.50	0.54	0.46	05.06.	
RPAS	3115	0.80	0.86	0.37	03.06.	V8, V9
	2	33	35	41	24	

La relación directa entre el tamaño y el número de pixeles, es una de las principales diferencias entre

los sensores utilizados en este estudio. Mientras que Sentinel 2, para el área establecida, registra la información en cuatro pixeles, para el caso del RPAS se tiene un rango de 22275 a 31152 pixeles para la misma superficie. Se observa un incremento gradual en los valores promedio (Media), que representan un incremento gradual también en el crecimiento del cultivo.

Registro de índices de vegetación

Se realizaron dos análisis comparativos para verificar la relación entre los datos registrados por los dos tipos de sensores remotos.

Coefficiente de correlación

El primero de ellos fue el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson (r). Este coeficiente se calculó entre los datos registrados por el Satélite y por el RPAS. Los valores de este coeficiente se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Coeficiente de correlación para los datos de Sentinel 2 y RPAS, en maíz forrajero verano 2023 y primavera 2024.

Índice de Vegetación	Año	NDVI	SR	NDRE	SAVI
Coeficiente de correlación (r)	2023	0.76	0.53	0.47	0.56
	2024	0.89	0.92	0.92	0.88

En el año 2023, el NDVI fue el IV que presentó la correlación positiva más alta, de los cinco índices estudiados, mientras que el NDRE tuvo correlación media. Para el año 2024, todos los IV presentaron correlaciones positivas muy altas, destacando entre ellas la del NDRE. Lo anterior, establece que en 2024 los registros de Sentinel 2 y del RPAS, para todos los índices, muestran una relación positiva en la cual los valores de Sentinel se incrementan a medida que se incrementan los valores registrados por el RPAS. En la figura 2, se observan los datos de NDRE, como ejemplo de la información empleada en el cálculo de la correlación. En esta figura se observa una mayor dispersión de los datos de 2023, en comparación de los que tuvieron lugar en 2024.

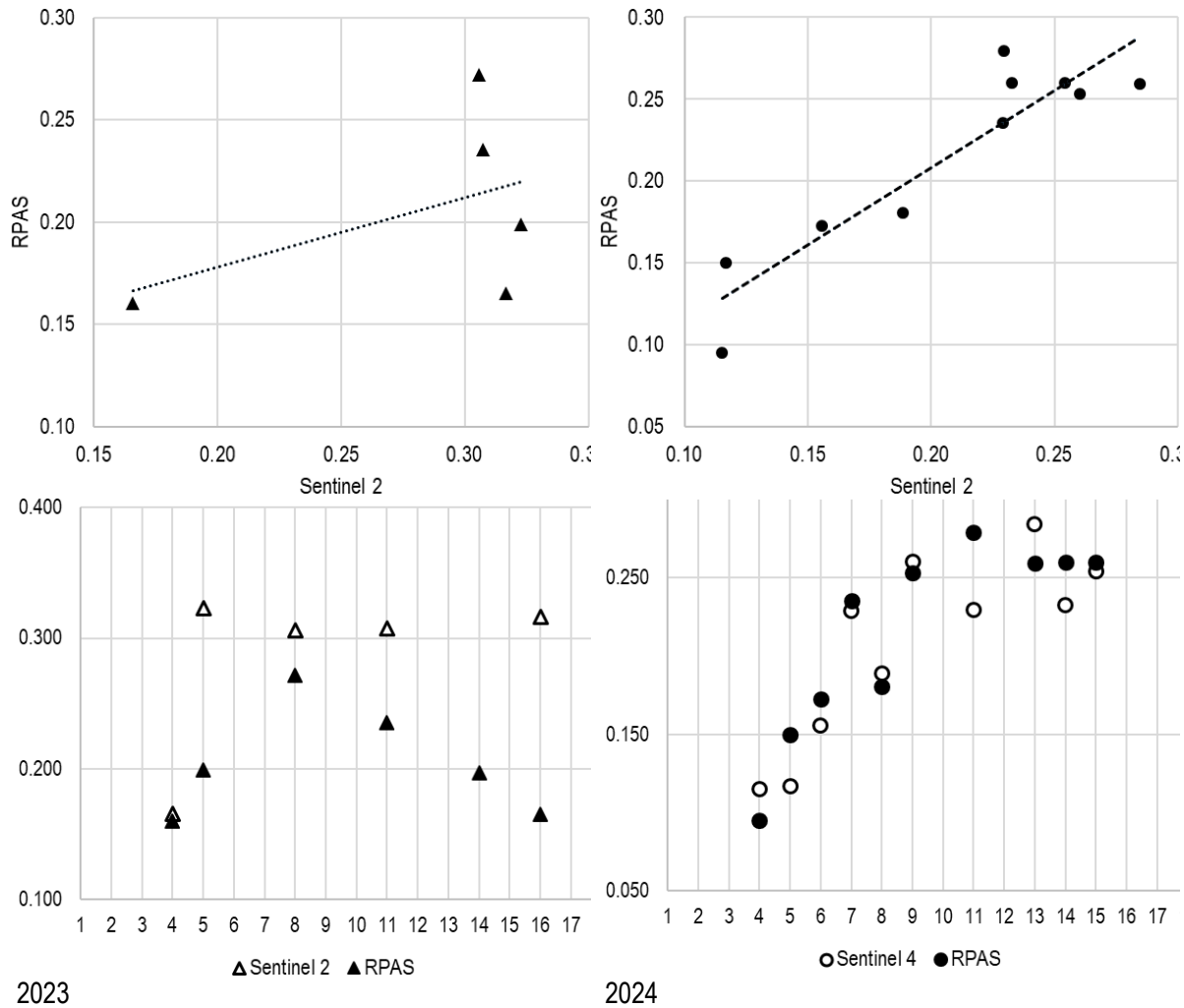


Figura 2. Relación entre los datos registrados por los dos sensores remotos analizados para NDRE en los años 2023 y 2024, en cultivo de maíz forrajero.

Prueba de T para análisis de muestras pareadas
El segundo análisis consistió en aplicar una prueba de T para datos pareados, como los registrados por el sensor del Sentinel y el sensor del RPAS. En el

Cuadro 4 se muestran los estadísticos obtenidos en este análisis para los IV registrados en 2023.

Cuadro 3. Estadísticos de Prueba de T para muestras pareadas aplicado a los datos de Sentinel 2 y RPAS, en maíz forrajero primavera 2023 y 2024.

IV	2023				2024			
	NDVI	SR	NDRE	SAVI	NDVI	SR	NDRE	SAVI
Media	-0.25	2.01	0.08	0.07	-0.28	1.71	-0.01	-0.02
Desviación Estándar.	0.09	0.37	0.06	0.12	0.10	0.42	0.02	0.07
Error Estadístico	0.04	0.17	0.03	0.05	0.03	0.13	0.01	0.02
Normalidad _{sw}	0.28	0.93	0.94	0.89	0.08	0.12	0.10	0.06
t calc	-6.24	12.06	2.85	1.33	-9.11	13.03	-1.04	-0.78
t (α , G.L.)	2.78	2.78	2.78	2.78	2.31	2.31	2.31	2.31

Para los datos de 2023, esta prueba indicó que las medias de los datos pareados de los IV analizados



son diferentes estadísticamente, con excepción del índice SAVI. En 2024, además de SAVI, los registros de NDRE mostraron ser no diferente estadísticamente diferentes en la media para RPAS y Sentinel 2.

Escala del sensor remoto

La densidad de siembra, de 90,000 plantas por hectárea, significa que una superficie de 10 X 10 m, o 100 metros cuadrados contiene en promedio 900 plantas de maíz para forraje; esta superficie es el tamaño del pixel de Sentinel 2, y la información de las 900 plantas está contenida en un pixel que promedia la información contenida, ya que almacena un solo valor (ESA, 2024). En el caso de las imágenes de RPAS, cada planta (si consideramos una etapa de cultivo con cobertura total del suelo) es registrada en promedio con 25 a 35 píxeles. Esto implica que las imágenes de Sentinel 2 registran por pixel un dato promedio de un grupo de plantas, mientras que los datos registrados por los píxeles del RPAS representan secciones de la planta. Esto es necesario considerarlo al momento de muestrear datos de campo en el tamaño de la muestra e incluso la superficie que re-muestrea el satélite, la cual es constante para todas las escenas.

El incremento gradual de NDVI en relación a la fenología del cultivo, ha sido reportado por otros autores (Pastonchi et al., 2020). Esta tendencia se observó también en los valores máximos y mínimos. Sin embargo, para información de la misma fecha, el rango entre estos dos valores, es mayor en las imágenes del RPAS en comparación con Sentinel. Esta relación se considera que obedece no solo a la diferencia en resolución espacial (tamaño de pixel), sino también con la diferencia en la resolución radiométrica (rango de bandas espectrales), con las cuales fueron diseñados los sensores, en las misiones a las que pertenecen (Bollas et al., 2021).

Coefficiente de correlación y Prueba de T para análisis de muestras pareadas

El análisis de correlación, muestra para el año 2023 una tendencia similar (incremento de registros de RPAS vs registros de Sentinel 2) en el incremento de valores, solamente para NDVI ($r=0.76$). Pero en el caso de los datos de 2024, la tendencia similar existe para todos los índices existe también un desfase de la información de valores de NDVI registrados por parte del RPAS en comparación con los registrados por el Sentinel 2. Esta misma tendencia se ha evidenciado en maíz, algodón, girasol (Bollas et al., 2021).

Por otro lado, el análisis con la Prueba de T para datos pareados, nos indica que al analizar las medias en 2023 el IV SAVI no presenta diferencia significativa y en 2024, además de SAVI, NDRE no presenta diferencia significativa. Lo anterior, a diferencia de la correlación, establece que, si bien en 2024 todos los IV muestran la misma tendencia de incremento de los IV en relación a la etapa fenológica, solo SAVI y NDRE muestran también que nos son diferentes sus medias. Lo anterior, ha sido verificado de forma similar para cultivos de cebolla y ajo (Ryu et al., 2020), además de trigo y cebada (Li et al., 2022).

Es importante determinar estas diferencias al momento de generar modelos descriptivos o predictivos que consideren el uso de registros de sensores remotos, es decir, no es recomendable emplear modelos desarrollados para datos de RPAS con datos de Sentinel (y viceversa), sin realizar un ajuste de variables. Este ajuste, permitiría evitar el sesgo que sub o sobreestime la variable en estudio (biomasa, rendimiento, evapotranspiración, fenología, etc.).

CONCLUSIONES

La diferencia de la información que registran la imagen de Sentinel 2 y de los RPAS, con respecto al pixel, requiere de tamaño de muestras compatibles, y debido a que Sentinel 2 es la imagen de menor resolución, los muestreos deben considerar el tamaño del pixel de Sentinel 2 (10 X 10 m) en las variables que se muestreen, para ser representativo. Los datos registrados por Sentinel y RPAS mejoran su correlación al seleccionar sitios de muestreo al interior de los píxeles de Sentinel.

Es necesario tomar en cuenta el sensor remoto utilizado en el desarrollo de modelos para estimación de variables agronómicas, ya que en este estudio se verificó que en el caso de Sentinel 2 y un RPAS los datos registrados de los IV difieren y requieren de ajustes al momento de emplearlos como modelos predictivos o explicativos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de la investigación desarrollada para el proyecto 12494136181 "Determinación de la lámina de riego óptima en tiempo casi real como estrategia de adaptación/mitigación del cambio



climático”. Fuente financiera: Proyectos Fiscales INIFAP 2022.

LITERATURA CITADA

- Bollas, N.; Kokinou, E.; Polychronos, V. (2021). Comparison of Sentinel-2 and UAV Multispectral Data for Use in Precision Agriculture: An Application from Northern Greece. *RPAS*. 5(2), 35; <https://doi.org/10.3390/RPASes5020035>
- European Spatial Agency (ESA). (2024). Sentinel-2 MSI User Guide. European Union. (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>) Sitio visitado el 19 de septiembre del 2024).
- United States Geological Survey (USGS). (2024). Science for a changing world. Landsat Missions (<https://www.usgs.gov/landsat-missions>) Sitio visitado el 2 de octubre del 2024).
- Index DataBase (IDB). 2024. A database for remote sensing indices. The IDB Project. (<https://www.indexdatabase.de/>) Sitio visitado el 14 de agosto del 2024)
- Li, M.; Shamshiri, R.R.; Weltzien, C.; Schirrmann, M. Crop Monitoring Using Sentinel-2 and UAV Multispectral Imagery: A Comparison Case Study in Northeastern Germany. *Remote Sens.* 2022, 14, 4426.
- Pastonchi, L., Filippo Di G., S., Piero T. & A. Matese. (2020). Comparison between satellite and ground data with UAV-based information to analyse vineyard spatio-temporal variability in International Viticulture and Enology Society. *OENO One* 2020, 54, 4, 919-934.
- QGIS.org (2024). Sistema de información geográfica QGIS. Proyecto de la Fundación Geoespacial de código abierto. <http://qgis.org>
- R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Ryu, J.-H.; Na, S.-I.; Cho, J. 2020. Inter-Comparison of Normalized Difference Vegetation Index Measured from Different Footprint Sizes in Cropland. *Remote Sensing*.