



ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT-8, LANDSAT-9 Y SENTINEL-2 EN PARCELAS BAJO RIEGO

Sebastián David Rodríguez Gaytán^{1*}; Ronald Ernesto Ontiveros Capurata²; José Antonio Quevedo Tiznado³; Víctor Manuel Gordillo Salinas³; Mario Alberto Montiel Gutiérrez³; Alberto González Sánchez³; José Agustín Breña Naranjo⁴

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Posgrado en Ciencia y Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Morelos, C. P. 62550, México.

rodriguez.12.29@hotmail.com 777 111 1173 (*Autor de correspondencia)

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Riego y Drenaje. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

³Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Riego y Drenaje. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

⁴Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidrología. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

Resumen

La humedad del suelo (HS) es una de las variables más importantes para la gestión del agua en las zonas agrícolas bajo riego. El método más frecuente para medir esta variable es mediante análisis de laboratorio o con sensores instalados en campo, lo que representa altos costos en tiempo y recursos. Ante esta situación el uso de información obtenida mediante sensores remotos satelitales e índices de vegetación (IV) representan una alternativa. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue comparar modelos de estimación de humedad del suelo basados en índices de vegetación (NDVI y NDMI) obtenidos a partir de imágenes satelitales Landsat-8, 9 y Sentinel-2, con registros medidos en campo con el sensor CropX en parcelas bajo riego del módulo IV-1 Culiacancito A.C., del distrito de riego (DR 010) Culiacán-Humaya, en el estado de Sinaloa, México, durante el ciclo agrícola otoño invierno (O-I) del año 2021. Para la estimación se utilizó un modelo empírico que estima el volumen de humedad del suelo (VHS) a partir de los IV. Los resultados indican que el modelo que usa datos de Sentinel 2 es mejor con un $R^2=0.661$, $ECM=1.691\%$ para NDVI y con un $R^2=0.601$, $ECM=1.836\%$ para NDMI. Sin embargo, al juntar las tres fuentes de imágenes en un solo modelo se obtuvo un $R^2=0.168$, $ECM=0.167\%$ para NDVI y un $R^2=0.076$, $ECM=4.312\%$ para NDMI. Por lo anterior, se puede concluir que la información proveniente del satélite Sentinel-2 representa una alternativa para la estimación de la humedad del suelo en zonas agrícolas.

Palabras claves: Índices de vegetación, sensor CropX, cultivo de maíz, Sinaloa.



Introducción

México anualmente recibe en forma de precipitación aproximadamente 1,449,471 m³ de agua. De la cual se estima que el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.2% es la que escurre en ríos o arroyos, y restante 6.4% se infiltra de forma natural al subsuelo y recarga los mantos acuíferos. Considerando las exportaciones y las importaciones de agua con los vecinos países, anualmente en el país se cuenta con 451,585 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (Conagua, 2018).

A pesar de esta disponibilidad de recurso hídrico, actualmente en México la problemática referente al agua se ha incrementado en las últimas décadas debido a frecuentes periodos de sequía principalmente en las zonas áridas y semiáridas, lo cual trae consigo un desequilibrio entre los recursos hidráulicos disponibles y las demandas de agua en los usos consuntivos (Ojeda et al., 2015).

Debido a las condiciones climáticas cambiantes que se han presentado en todo el mundo, el sector agrícola ha tenido que modificar las prácticas de riego, esto con el fin de poder mantener una buena productividad. Tales prácticas han creado impactos negativos en los recursos hídricos, por ejemplo, cada vez se extrae más agua subterránea, por lo que es necesario la implementación de metodologías que permitan el constante monitoreo en el uso de esta, ya que esto ha venido repercutiendo en la cantidad de agua destinada a los usos consuntivos (Chaves, M. M., & Oliveira, M. M., 2004; Baghdadi et al., 2015).

Una de las variables de gran importancia dentro del ciclo hidrológico es la humedad del suelo (HS), ya que es clave dentro del balance hídrico y numerosas aplicaciones donde interviene, por ello es necesario tener conocimiento de su dinámica espacial y temporal ya que ello la vuelve difícil de estimar (Babaeian et al., 2019a). A su vez también es de gran ayuda para hacer uso correcto de los recursos hídricos destinados a la producción agrícola (Vereecken et al., 2008).

La estimación de humedad en suelo puede obtenerse con ayuda de mediciones gravimétricas, que consisten en la toma de muestras del suelo y procesamiento de este con ayuda de equipos y personal de laboratorio (Babaeian et al., 2019b). Actualmente existen sensores de alta precisión basados en reflectometría como lo son los reflectómetros de dominio de tiempo (TDR por sus siglas en inglés) y los reflectómetros de dominio de la frecuencia (FDR por sus siglas en inglés). Sin embargo, dichas mediciones requieren personal técnico capacitado y pueden ser propensas a incertidumbres por diferentes factores, lo cual las vuelve costosas y demandan mucho tiempo. Ante esto surge la alternativa de los métodos basados en imágenes satelitales y aéreas para tratar de sobrellevar estas desventajas (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2013).

Existen diferentes métodos para la estimación de HS, dentro de los que se incluyen el uso de sensores remotos satelitales, la monitorización de campo y de modelos hidrológicos (Wang et al., 2020a; Zhang, D., & Zhou, G., 2016; Baghdadi et al., 2017; Houser et al., 1998). La teledetección se ha convertido en un medio importante para obtener información de la humedad del suelo en grandes superficies a escala mundial,

debido a su amplia cobertura, larga duración, bajo costo y el constante seguimiento que se puede tener de los cambios de la superficie terrestre (El Hajj et al., 2016).

En este estudio, se realizó una comparación entre datos de humedad de suelo medidos con sensores inteligentes CropX y estimaciones realizadas mediante modelos basados en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI) obtenidos de imágenes satelitales Landsat-8, Landsat-9 y Sentinel-2. Esto con fin de contar con información de humedad del suelo más precisa y en grandes superficies que podrían ser utilizadas para mejorar la precisión de las estimaciones de volúmenes de agua distribuidos en las zonas de riego.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio se encuentra situada en el municipio de Culiacán, perteneciente al estado de Sinaloa, México, geográficamente se localiza entre las coordenadas $24^{\circ} 48' 32''$ latitud norte y $107^{\circ} 23' 38''$ longitud oeste. Esta investigación se realizó durante el ciclo agrícola otoño invierno (O-I) dentro del distrito de riego (DR 010) Culiacán-Humaya, módulo de riego IV-1 Culiacancito A.C., en las parcelas, Campo Berlín (uso de sensor CropX) y Fundación Produce Sinaloa (uso de pruebas de laboratorio y sensor CropX), cubriendo un área total de 5.96 ha. La temperatura promedio es aproximadamente 25.9°C . La temporada de lluvias tiende a ser en los meses de julio a septiembre, con una precipitación media anual promedio de 694.7 mm. Los suelos se caracterizan por tener un alto contenido arcilla, texturas finas y de color gris oscuro. (INEGI 2021).

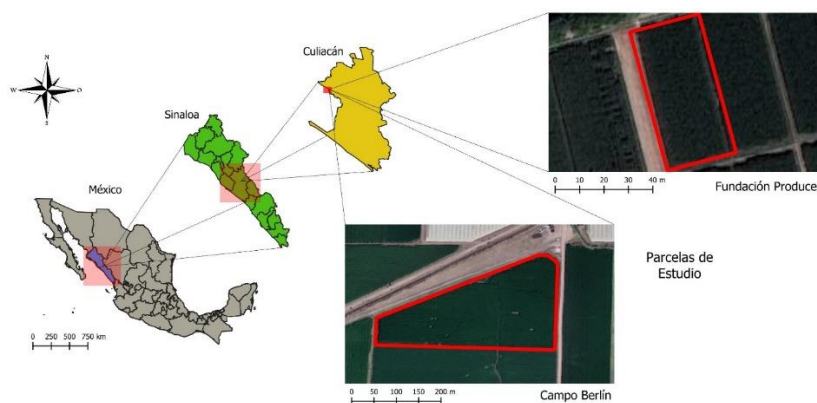


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Fuentes de información

El sensor inteligente CropX ofrece un sistema integrado de hardware y software que cuenta con un conjunto de herramientas, las cuales son de ayuda en toma de decisiones y planificaciones basadas en el monitoreo continuo de las condiciones del suelo y a su

vez del cultivo. Este sensor recolecta los datos de humedad, temperatura y conductividad eléctrica en diferentes profundidades. Los intervalos de tiempo de medición y transmisión de los datos a la nube pueden ser configurados y ajustados de forma remota a las necesidades de cada cultivo, los datos se encuentran georreferenciados con coordenadas del GPS que este mismo posee, lo cual crea series de tiempo geoespaciales para cada dato medido.

Los valores de humedad que obtiene tienen una precisión de $\pm 0.5\%$ en un rango de 0-60% de volumen de humedad del suelo (VHS). A su vez dentro de la plataforma de CropX se pueden obtener datos de clima preciso, imágenes aéreas, mapas topográficos, mapeo de suelos, modelos hidráulicos y modelos de cultivo (CropX, 2022). Para el estudio se obtuvieron datos a las profundidades de 20 y 40 cm, y la configuración de intervalos de medición fue a cada 30 minutos, este monitoreo se realizó durante el ciclo agrícola antes mencionado.



Figura 2. Sensor CropX (izquierda) e instalación de sensor en área de estudio (derecha)

Procesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat-9 fueron proporcionadas por el Servicio Geológico de Estados Unidos a través de su plataforma Earth Explorer (USGS, 2022) y las imágenes Sentinel-2 fueron proporcionadas por la plataforma Copernicus (ESA, 2022a), cuyas características se describen a continuación (cuadro 1).

Cuadro 1. Características de satélites (USGS y ESA 2022)

Satélites			
Características	Landsat-8	Landsat-9	Sentinel-2
Resolución espacial (m):	15,30,100	15,30,100	10,20,60
Resolución radiométrica (bits):	12	14	12
Resolución temporal (días):	16	16	5
Resolución espectral (μm):			
B1	0.43 - 0.45	0.43 - 0.45	0.43 - 0.45
B2	0.45 - 0.51	0.45 - 0.51	0.45 - 0.52



B3	0.53 - 0.59	0.53 - 0.59	0.54 - 0.57
B4	0.64 - 0.67	0.64 - 0.67	0.65 - 0.68
B5	0.85 - 0.88	0.85 - 0.88	0.69 - 0.71
B6	1.57 - 1.65	1.57 - 1.65	0.73 - 0.74
B7	2.11 - 2.29	2.11 - 2.29	0.77 - 0.79
B8	0.50 - 0.68	0.50 - 0.68	0.78 - 0.90
B8A	-----	-----	0.85 - 0.87
B9	1.36 - 1.38	1.36 - 1.38	0.93 - 0.95
B10	10.60 - 11.19	10.60 - 11.19	1.36 - 1.39
B11	11.50 - 12.51	11.50 - 12.51	1.56 - 1.65
B12	-----	-----	2.10 - 2.28

Selección y descarga de imágenes satelitales

La selección de las imágenes se realizó bajo el criterio de mínima cobertura de nubes (0 a 10%) y máxima calidad (menor cantidad de sombra). En el cuadro 2 se muestra la cantidad de las imágenes obtenidas por mes durante el ciclo agrícola, las cuales fueron seleccionadas y descargadas.

Cuadro 2. Cantidad de imágenes satelitales descargadas para el estudio

Mes	Imágenes Satelitales		
	Landsat-8	Landsat-9	Sentinel-2
Noviembre	1	1	5
Diciembre	----	1	2
Enero	1	1	3
Febrero	1	2	4
Marzo	1	1	4
Abril	1	2	5
Mayo	1	2	3

Las imágenes adquiridas fueron descargadas en formato GeoTIFF, las cuales presentan coordenadas geográficas con el Datum WGS-84 y coordenadas UTM 13N.

Metodología

La metodología propuesta en este trabajo se describe en la figura 3.

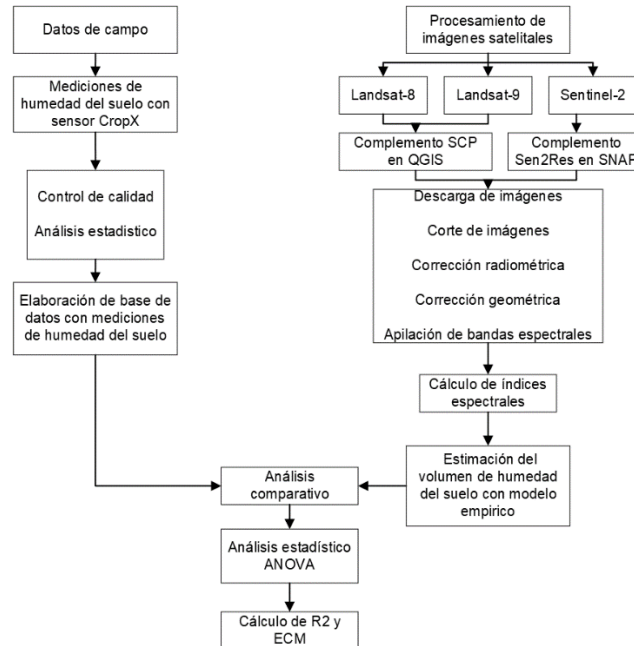


Figura 3. Metodología propuesta para el análisis comparativo

La metodología involucró la recopilación de datos en campo mediante datos provenientes del sensor CropX, con ello se elaboró una base de datos a la que se llamó “Base de datos con mediciones de humedad de suelo”. Así también, se realizó el procesamiento de las imágenes satelitales provenientes de Landsat-8, Landsat-9 y Sentinel-2 que consistieron en el corte de las imágenes para el área de estudio, corrección radiométrica y apilación de bandas, todos estos pasos fueron realizados en el software QGIS 3.24.2 (QGIS, 2021) y SNAP 9.0.0 (ESA, 2022b) mediante el módulo SCP y Sen2Res respectivamente.

Para el cálculo de los índices espectrales NDVI y NDMI se utilizó el software QGIS mediante la herramienta de calculadora raster que posteriormente, se utilizaron para calcular los contenidos de humedad del suelo (VHS) utilizando el modelo empírico propuesto por Gao et al. (2015), que se describe en el apartado siguiente. Con los datos obtenidos de las mediciones del sensor CropX y los resultados del modelo empírico aplicado, se realizó un análisis comparativo mediante regresión lineal con el cual se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (ECM) correspondientes de los modelos de regresión obtenidos.

Estimación del contenido de humedad del suelo mediante índices de vegetación

Debido a la relación que existe entre los índices de vegetación y VHS. En este estudio, se usaron datos mediante sensores remotos satelitales de Landsat-8, Landsat-9 y Sentinel-2, para el cálculo del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se usaron las bandas pertenecientes al infrarrojo cercano (NIR) y al rojo (R) (Rouse et al., 1973) y para índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI) se usaron las bandas pertenecientes al infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR) (Wang et

al., 2011), ya que en diferentes estudios han sido empleados para la estimación de la humedad del suelo y han establecido relaciones lineales (Wang et al., 2020b), las fórmulas correspondientes a cada satélite para el cálculo de estos se expresan en el cuadro 3:

Cuadro 3. Estimación de índices espectrales

Landsat-8 y 9	
$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$ (1)	$NDMI = \frac{B5 - B6}{B5 + B6}$ (2)
Sentinel-2	
$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$ (3)	$NDMI = \frac{B8 - B11}{B8 + B11}$ (4)

Donde NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada y NDMI es el índice de humedad de diferencia normalizada ambos adimensionales, B4 es la banda espectral roja, B5 y B8 es la banda espectral infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés) y B11 es la banda espectral infrarrojo de onda corta (SWIR1 por sus siglas en inglés).

Gao et al. (2015), integraron diferentes modelos para la estimación del volumen de humedad del suelo, y propusieron un modelo con la finalidad de describir cuantitativamente la diferencia entre diferentes fuentes de datos, en este estudio se utilizó la siguiente expresión de VHS basada en maíz:

$$VHS = 0.098 * 10^{4.225 * NDVI} \quad (5)$$

$$VHS = 7.84 * NDMI + 0.6 \quad (6)$$

Donde VHS es el volumen de humedad del suelo en porcentaje (%), NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada y NDMI es el índice de humedad de diferencia normalizada ambos adimensionales.

Resultados y Discusión

Mediciones de humedad del suelo con Sensor CropX

Los datos obtenidos del porcentaje de humedad del suelo durante monitoreo realizado en las dos parcelas bajo riego con el sensor CropX fueron proporcionados a las profundidades de 20 y 40 cm, de los cuales se usaron únicamente los primeros, el registro de datos obtenidos durante todo el ciclo agrícola se muestra en la figura 4. Para fines del estudio se usaron los datos correspondientes a las seis imágenes provenientes a cada uno de los satélites (cuadro 4).

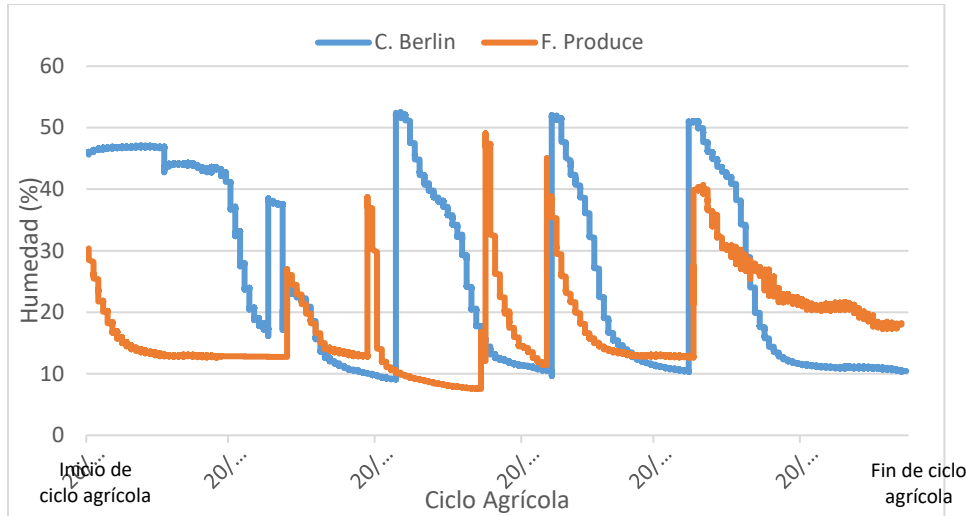


Figura 4. Registro de valores de humedad del suelo con sensor CropX a una profundidad de 20 cm en las parcelas de estudio

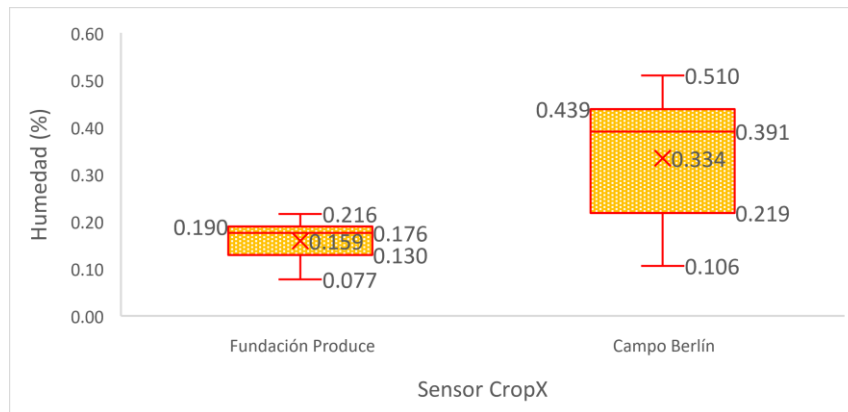


Figura 5. Diagrama de cajas para registro de humedad del suelo tomados por el sensor CropX a una profundidad de 20 cm en las parcelas de estudio

En la figura 5 se puede observar la variabilidad que existen en los registros de humedad del suelo los cuales fueron tomados con el sensor CropX, siendo los valores de porcentaje de humedad registrados, mínimos entre 0.077% y 0,106%; los valores máximos entre 0.216% y 0.510%; y los valores promedios entre 0.159% y 0.334%. De lo que podemos verificar que los registros en Campo Berlín tuvieron una mayor variabilidad de 0.404% en comparación a los registros de fundación Produce.

Para las fechas de imágenes descargadas que fueron utilizadas en el estudio se elaboró una base de datos de humedad de suelo medidas con el sensor CropX, la cual se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 4. Base de datos de humedad de suelo registrados por el sensor CropX para las fechas que se tiene imágenes satelitales

Fecha	Humedad del Suelo (%)		Satélite
	Fundación Produce	Campo Berlín	
07-nov-21	0.140	0.306	Landsat-9
12-nov-22	0.131	0.403	Landsat-8
14-nov-22	0.187	0.387	Sentinel-2
22-dic-22	0.128	0.306	Landsat-9
07-ene-22	0.176	0.169	Landsat-9
13-ene-22	0.187	0.391	Sentinel-2
31-ene-22	0.088	0.403	Landsat-8
08-feb-22	0.077	0.268	Landsat-9
16-feb-22	0.216	0.122	Landsat-8
17-feb-22	0.187	0.429	Sentinel-2
24-feb-22	0.117	0.106	Landsat-9
04-mar-22	0.192	0.396	Landsat-8
09-mar-22	0.187	0.457	Sentinel-2
28-mar-22	0.197	0.510	Landsat-9
21-abr-22	0.216	0.114	Landsat-8
23-abr-22	0.142	0.449	Sentinel-2
23-may-22	0.132	0.469	Landsat-8/Sentinel-2

En el cuadro 4 se puede observar los registros de humedad del suelo los cuales fueron tomados con el sensor CropX y que explican la variabilidad existente mostrada en la figura 5.

Procesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales utilizadas fueron recortadas para fines del estudio como se muestra en la figura 6.

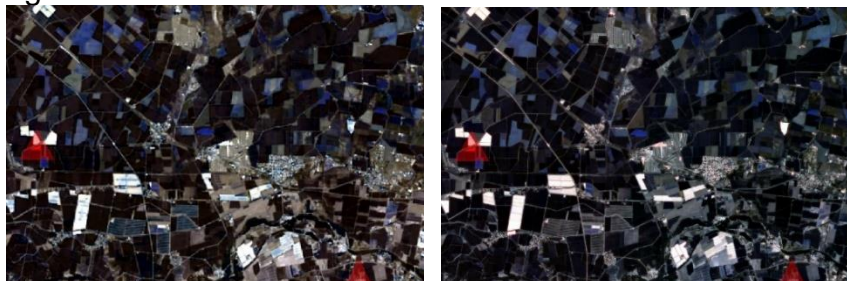


Figura 6. Imágenes satelitales del área de estudio, Landsat-9 (izquierda) y Sentinel-2 (derecha)

En la figura 6 se puede observar la diferencia de resoluciones de cada imagen, así como la ubicación de las parcelas de estudio, ya que en las imágenes utilizadas del satélite



Landsat 8 y Landsat-9 el tamaño del píxel es de 30 x 30 m y en el satélite Sentinel-2 es de 10 x 10 m.

Cálculo de índices espectrales

A continuación, se presenta las estadísticas descriptivas de los valores obtenidos de los índices espectrales NDVI y NDMI para las fechas seleccionadas (cuadro 5).

Cuadro 5. Valores de índices de vegetación NDVI y NDMI para las parcelas de estudio en las fechas seleccionadas

Fecha	NDVI				NDMI				Satélite
	Fundación Produce		Campo Berlín		Fundación Produce		Campo Berlín		
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
07-nov-21	0.265	0.025	0.175	0.019	-0.058	0.037	0.000	0.021	Landsat-9
12-nov-22	0.215	0.062	0.108	0.011	-0.024	0.044	-0.013	0.011	Landsat-8
14-nov-22	0.210	0.058	0.084	0.017	-0.127	0.043	-0.030	0.042	Sentinel-2
22-dic-22	0.578	0.031	0.633	0.083	0.205	0.005	0.230	0.053	Landsat-9
07-ene-22	0.708	0.074	0.832	0.081	0.330	0.066	0.426	0.077	Landsat-9
13-ene-22	0.161	0.027	0.068	0.015	-0.166	0.033	-0.078	0.025	Sentinel-2
31-ene-22	0.609	0.058	0.693	0.067	0.337	0.060	0.444	0.061	Landsat-8
08-feb-22	0.766	0.061	0.880	0.080	0.400	0.068	0.547	0.090	Landsat-9
16-feb-22	0.582	0.066	0.676	0.062	0.330	0.055	0.438	0.067	Landsat-8
17-feb-22	0.170	0.055	0.092	0.022	-0.131	0.048	-0.138	0.026	Sentinel-2
24-feb-22	0.780	0.029	0.857	0.074	0.383	0.036	0.501	0.076	Landsat-9
04-mar-22	0.575	0.044	0.607	0.065	0.310	0.027	0.352	0.051	Landsat-8
09-mar-22	0.183	0.064	0.099	0.026	-0.128	0.058	-0.126	0.020	Sentinel-2
28-mar-22	0.653	0.025	0.791	0.067	0.297	0.031	0.419	0.065	Landsat-9
21-abr-22	0.431	0.003	0.498	0.043	0.118	0.005	0.220	0.039	Landsat-8
23-abr-22	0.208	0.056	0.107	0.022	-0.121	0.053	-0.068	0.018	Sentinel-2
23-may-22	0.227	0.013	0.229	0.006	-0.02	0.035	-0.017	0.007	Landsat-8
23-may-22	0.279	0.054	0.171	0.018	-0.056	0.036	-0.067	0.017	Sentinel-2

El cuadro 5 muestra los valores correspondientes a las estadísticas del NDVI y NDMI, donde se puede observar que de los valores medios y la desviación estándar mostraron ser más altos para el satélite Landsat-9 con valores máximos de 0.780; 0.880 en NDVI, para NDMI se obtuvo 0.400; 0.547, referidos a los satélites Landsat-8 y Sentinel-2 que mostraron tener valores menores. En cuanto a los valores obtenidos de la desviación estándar, se observa que Sentinel-2 tuvo una varianza mínima en los resultados con valores de 0.001 en ambos índices con respecto a Landsat-8 y Landsat-9.

Los datos corresponden a la estadística de las dos parcelas de estudio, que siguieron el siguiente orden Sentinel-2 < Landsat-8 < Landsat-9. De los valores obtenidos de cada

índice de vegetación se realizó la estimación del volumen de humedad del suelo con modelo empírico el cual se describe en la sección siguiente.

Estimación del volumen de humedad del suelo con modelo empírico

Después de aplicar el modelo de Gao et al. (2015), que relaciona los índices de vegetación con valores de humedad de suelo medidos en campo, se presentan los resultados obtenidos en el cuadro 6.

Cuadro 6. Valores de volumen de humedad del suelo estimadas mediante el modelo de Gao et al. (2015) basado en índices espectrales para las parcelas de estudio en las fechas seleccionadas

Fecha	VHS-NDVI (%)		VHS-NDMI (%)		Satélite
	Fundación Produce	Campo Berlín	Fundación Produce	Campo Berlín	
07-nov-21	0.300	0.205	0.143	0.599	Landsat-9
12-nov-22	0.243	0.155	0.415	0.495	Landsat-8
14-nov-22	0.238	0.140	-0.393	0.362	Sentinel-2
22-dic-22	1.129	1.419	2.210	2.402	Landsat-9
07-ene-22	1.951	3.293	3.185	3.937	Landsat-9
13-ene-22	0.193	0.131	-0.704	-0.013	Sentinel-2
31-ene-22	1.284	1.832	3.240	4.081	Landsat-8
08-feb-22	2.490	4.039	3.736	4.888	Landsat-9
16-feb-22	1.146	1.706	3.187	4.034	Landsat-8
17-feb-22	0.201	0.145	-0.423	-0.481	Sentinel-2
24-feb-22	2.646	3.659	3.600	4.526	Landsat-9
04-mar-22	1.113	1.276	3.027	3.364	Landsat-8
09-mar-22	0.213	0.149	-0.400	-0.386	Sentinel-2
28-mar-22	1.547	2.773	2.932	2.773	Landsat-9
21-abr-22	0.605	0.803	1.526	2.326	Landsat-8
23-abr-22	0.236	0.154	-0.345	-0.522	Sentinel-2
23-may-22	0.256	0.259	0.436	0.461	Landsat-8
23-may-22	0.319	0.203	0.182	0.068	Sentinel-2

El cuadro 6 muestra los valores correspondientes a las estadísticas del VHS-NDVI y VHS-NDMI, donde se puede observar que de los valores medios y la desviación estándar mostraron ser más altos para el satélite Landsat-9 con valores máximos entre 2.646% y 4.039% en VHS-NDVI, para VHS-NDMI se obtuvo entre 3.736% y 4.888%, referidos a los satélites Landsat-8 y Sentinel-2 que mostraron tener porcentajes menores.

Análisis comparativo de valores de humedad de suelo estimados a partir de imágenes satelitales

Se realizó la comparativa de los datos obtenidos del sensor CropX, junto con los resultados calculados del modelo de volumen de humedad de suelo, dicha comparativa se realizó para las dos parcelas de estudio mediante regresiones lineales las cuales mostraron las correlaciones que se presentan en la figura 7.

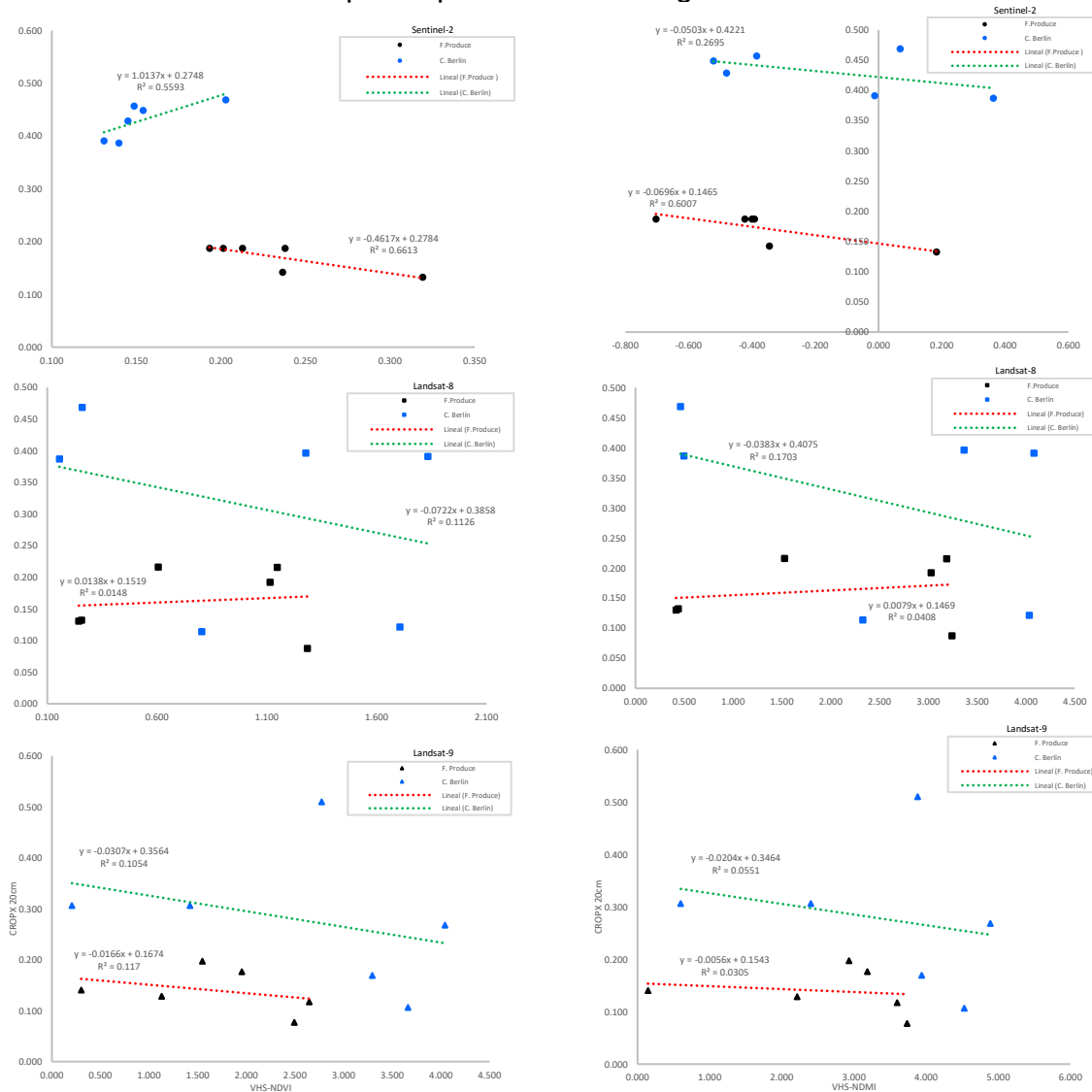


Figura 7. Modelos de regresión lineal entre los valores obtenidos de índices de vegetación y registros de humedad del suelo tomados con el sensor CropX en las parcelas de estudio

Wang et al., (2020), sugieren que el área foliar afecta las estimaciones de humedad de suelo a partir de imágenes satelitales, esto debido a que esta variable va cambiando a medida que se desarrolla el cultivo. Los datos obtenidos del análisis comparativo muestran que el modelo que usa datos de Sentinel 2 con NDVI en las dos parcelas de estudio es mejor para poder estimar la humedad del suelo ya que tienen una mejor precisión con un $R^2=0.661$, $ECM=1.691\%$; $R^2=0.559$, $ECM=2.554\%$ y con un $R^2=0.601$,



ECM=1.836%; $R^2=0.269$, ECM=3.288% para NDMI respectivamente en cada parcela. Sin embargo, al juntar las tres fuentes de imágenes en un solo modelo se obtuvo un $R^2=0.168$, ECM=0.167%; $R^2=0.145$, ECM=13.283% para NDVI y un $R^2=0.076$, ECM=4.312%; $R^2=0.192$, ECM=12.912% para NDMI respectivamente.

El NDVI es uno de los índices más importantes utilizado para mostrar el estado de la vegetación, es por ello que es ampliamente utilizado en el estudio de los cambios espacio-temporales de la vegetación (Felegari et al.,2022). El valor de este índice varía entre -1 y 1, los valores negativos significan la ausencia de vegetación en el suelo. Al ser uno de los índices con más correlación con la vegetación, conocer el verdor del cultivo en cada etapa fenológica tiene resultados importantes dentro de las parcelas de estudio.

En los resultados obtenidos del cálculo del NDVI dentro del ciclo agrícola se puede observar que los valores tendieron a incrementar en el mes de enero en ambas parcelas, y los registros máximos se presentaron en el mes febrero con valores promedio de 0.780 y 0.880, manteniendo la tendencia hasta finales de marzo, dichos registros fueron obtenidos del satélite Landsat-9, los registros mínimos se presentaron en los meses de noviembre y mayo que corresponden al inicio y fin del ciclo agrícola respectivamente, por lo que los valores de NDVI tendieron a disminuir.

Khazaei et al. (2017), estimaron la humedad del suelo a partir de índices de vegetación con ayuda de imágenes satelitales, de lo que afirmaron que la tendencia de los cambios que se presentan en el NDVI, correspondía al comienzo del periodo de muestreo, cuando la vegetación era escasa y la cobertura foliar muy pequeña, por lo que la humedad del suelo se almacenaba y el NDVI con un periodo de retraso relativo a la humedad máxima había alcanzado su valor máximo. En el periodo final, debido a la cosecha y la disminución de la vegetación, así como la presencia de agua, el NDVI disminuyó.

Conclusiones

Podemos concluir que el modelo que más se aproximó a los registros de humedad del suelo tomados con el sensor CropX fue el obtenido con Sentinel-2 con el NDVI, dando un error cuadrático medio de 1.691% mientras que el modelo con NDMI tuvo un error cuadrático medio de 1.836%.

La humedad del suelo es una variable que cambia independientemente del desarrollo del cultivo, por lo que se sugiere hacer más estudios que analicen la relación de los cambios en el área foliar a medida que se desarrolla el cultivo y los cambios de humedad del suelo.

La resolución temporal del satélite Sentinel-2 en comparativa con Landsat-8 y Landsat-9 permite tener más repeticiones en un periodo de tiempo, lo que puede derivar en una estimación más precisa de humedad del suelo.

Financiamiento: Este estudio fue realizado con datos provenientes del proyecto interno con No. de contrato: RT-O-SIN-010-(SRLHYA)-14-015-21 “capacitación con la asistencia



técnica en el manejo de sistema de riego en 15,000 hectáreas, con la finalidad de lograr el uso eficiente del agua de riego, aplicado a las asociaciones civiles de usuarios que integran el sistema Humaya distritos 010 y 074 MOCORITO, S.R.L. de I.P de C.V. del distrito de riego 010 Culiacán-Humaya, municipio de Culiacán, estado de Sinaloa”. IMTA

Referencias Bibliográficas

Conagua (2018). Estadísticas del Agua en México. Edición 2018. Comisión Nacional del Agua, Coyoacán, México, Ciudad de México.

CropX (2022). CropX Technologies.
<https://cropx.com/>

Babaeian et al., 2019. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 57(2), 530-616.

Baghdadi, N. N., El Hajj, M., Zribi, M., & Fayad, I. (2015). Coupling SAR C-band and optical data for soil moisture and leaf area index retrieval over irrigated grasslands. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(3), 1229-1243.

Baghdadi, N., El Hajj, M., Zribi, M., & Bousbih, S. (2017). Calibration of the water cloud model at C-band for winter crop fields and grasslands. *Remote Sensing*, 9(9), 969.

Chaves, M. M., & Oliveira, M. M. (2004). Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of experimental botany*, 55(407), 2365-2384.

El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Belaud, G., Cheviron, B., Courault, D., & Charron, F. (2016). Soil moisture retrieval over irrigated grassland using X-band SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 176, 202-218.

ESA (2022a). The European Space Agency.
<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

ESA (2022b). The European Space Agency.
<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>

Felegari, S., Sharifi, A., Moravej, K., Golchin, A., & Tariq, A. (2022). Investigation of the Relationship Between NDVI Index, Soil Moisture, and Precipitation Data Using Satellite Images. *Sustainable Agriculture Systems and Technologies*, 314-325.

Gao, Y., Walker, J. P., Allahmoradi, M., Monerris, A., Ryu, D., & Jackson, T. J. (2015). Optical sensing of vegetation water content: A synthesis study. *IEEE Journal of*



Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(4), 1456-1464.

Houser, P. R., Shuttleworth, W. J., Famiglietti, J. S., Gupta, H. V., Syed, K. H., & Goodrich, D. C. (1998). Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation. *Water resources research*, 34(12), 3405-3420.

INEGI (2021). Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas Estatales, Municipales y Localidades. <https://www.inegi.org.mx>

Khazaei, S., Raeini Sarjaz, M., Valizadeh, E., & Ghorbani, K. (2017). Estimation of Surface Soil Moisture from Satellite Images Using Vegetation and Thermal Indices. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 11(2), 151-162.

Ojeda Bustamante, W., Flores Velázquez, J., Íñiguez Covarrubias, M., Unland Weiss, H., Carrillo García, M., Rojano Aguilar, A., Flores Gallardo, H., Macías Cervantes, J., Flores Magdaleno, H., López López, R., Sifuentes Ibarra, E. y Ruiz García, A. (2015). La importancia de la calendarización del riego. En W. Ojeda Bustamante (ed.), *Calendarización del riego: teoría y práctica* (pp. 3-9). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

QGIS, (2021). Free and Open Source Geographic Information System. QGIS. <https://www.qgis.org/es/site/>.

Rahimzadeh-Bajgiran, P., Berg, A. A., Champagne, C., & Omasa, K. (2013). Estimation of soil moisture using optical/thermal infrared remote sensing in the Canadian Prairies. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 83, 94-103.

Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation (No. NASA-CR-132982).

USGS (2022). United States Geological Survey. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Vereecken, H., Huisman, J. A., Bogaen, H., Vanderborght, J., Vrugt, J. A., & Hopmans, J. W. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water resources research*, 44(4).

Wang, L., Qu, J. J., Hao, X., & Hunt Jr, E. R. (2011). Estimating dry matter content from spectral reflectance for green leaves of different species. *International Journal of Remote Sensing*, 32(22), 7097-7109.

Wang, Q., Li, J., Jin, T., Chang, X., Zhu, Y., Li, Y., & Li, D. (2020). Comparative analysis of Landsat-8, Sentinel-2, and GF-1 data for retrieving soil moisture over wheat farmlands. *Remote Sensing*, 12(17), 2708.



Zhang, D., & Zhou, G. (2016). Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: A review. *Sensors*, 16(8), 1308.