Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Detección del tipo de fuente de agua para riego en el Distrito de Riego 017 La Laguna, México usando percepción remota

Detection of the type of irrigation water source in Irrigation District 017 La Laguna, Mexico using remote sensing

Flores-Velázquez, J., Gutiérrez-Morales, E., Ascencio-Hernández, R.*

Colegio de Postgraduados, Posgrado en Hidrociencias, Campus Montecillo. Carretera México Texcoco, Km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 56230.

jorgejv@colpos.mx; gutierez.eduardo@colpos.mx; ascenciohr@colpos.mx*

Innovación tecnológica: Uso de imágenes Sentinel-2 para monitoreo hídrico agrícola.

Área de aplicación industrial: Uso eficiente de agua en el sector agrícola.

Recibido: 28 septiembre 2022
Aceptado: 01 febrero 2024

Abstract

Irrigation Districts (ID) and Irrigation Units (IU) share borders that are not physically defined. Through remote sensing, it is feasible to know these limits and to estimate irrigated areas. The objective of this work was to discriminate, based on remote sensing techniques, the irrigated surface of both ID and IU in La Laguna region, Mexico, and to estimate irrigation volumes used by type of source (surface for ID and underground for IU). Sentinel-2 2018 satellite images were used to define the polygons of the plots, and together with the calculation of the Normalized Differential Vegetation Index, the irrigated areas were defined. In order to know the irrigation volume, the agricultural statistics of National Water Commission were used. Crop evapotranspiration was estimated using the Penman-Monteith model, with normal climatic databases from the Rapid Climatic Information Extractor. Estimated surface were 64,783.17 ha in the ID and 34,989.99 ha corresponds to the IU, a total of 99,773.16 ha. Consequently, the volume used by type of source was 680.41 Mm^3 yr^{-1} for IU and 345.62 Mm^3 yr^{-1} for ID. In spring-summer, 403.53 Mm^3 yr^{-1} was estimated and, in the fall-winter 78.14 Mm^3 yr^{-1}. With sentinel-2 satellite images were defined agriculture areas in order to estimate irrigation surface and water volume used by kind of source, surface and ground water.

Keywords: Concessioner water, NDVI, Evapotranspiration, Irrigation sheet.

Resumen

Distritos de Riego (DR) y Unidades de Riego (UR) comparten fronteras que no están físicamente delimitadas. Mediante percepción remota, es factible conocer dichos límites y estimar superficies regadas. El objetivo de este trabajo fue discriminar, con técnicas de percepción remota, la superficie regada tanto para el DR como para UR en La Región Lagunera, México, y estimar volúmenes de riego usados por tipo de fuente (Superficial para DR y subterránea para UR). Se utilizaron imágenes de satélite Sentinel-2, 2018 para definir los polígonos de las parcelas, aunado al cálculo del Índice de Vegetación Normalizada, se definieron las áreas regadas. Para conocer el volumen de riego se consultó las estadísticas agrícolas de la Comisión Nacional del Agua. Se estimó la evapotranspiración de cultivo con el modelo Penman-Monteith, con bases de datos climáticas normales del Extractor Rápido de información climática. Se estimaron superficies de 64 783.17 ha en el DR, 34 989.99 ha corresponden a UR para un total de 99 773.16 ha. Consecuentemente, el volumen usado por tipo de fuente fue 680.41 Mm^3 $año^{-1}$ para UR y 345.62 Mm^3 $año^{-1}$ para DR. En primavera-verano se estimaron 403.53 Mm^3 $año^{-1}$ y en otoño-invierno 78.14 Mm^3 $año^{-1}$. Con imágenes sentinel-2 se definieron áreas agrícolas con el fin de estimar el área regada y el volumen utilizado por tipo de fuente subterránea y superficial.

Palabras clave: Agua concesionada, NDVI; Evapotranspiración; Lamina de riego.

1. Introducción

Se estima que la eficiencia de riego en promedio oscila 69% [1], incrementar esta eficiencia gestionando el agua en el sector agrícola, significaría el ahorro de un volumen de agua similar al usado en el sector público o industrial [4]. En México, 102 de los 653 acuíferos manifiestan reducción gradual de sus niveles de agua [2], principalmente aquellos ubicados en zonas agrícolas, donde la recarga natural es rebasada por las extracciones de los pozos. En zonas agrícolas el agua esta diferenciada por tipo de fuente, entre presas que dominan principalmente Distritos de Riego (DR) y Pozos profundos, normalmente para abastecer las Unidades de Riego (UR), a esta zona se le llamará el complejo UR-DR.

Como se muestra en la Figura 1, entre los estados de Durango y Coahuila (México), se localiza el Distrito de Riego 017 (DR017), Región Lagunera cuya principal fuente de abastecimiento es la presa de almacenamiento Francisco Zarco [3], que en 2020 se regaban alrededor de 52,000 ha al año con aguas superficiales [4]. Durante el año, la zona está expuesta a condiciones climatológicas extremas, promedios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de 260 mm, 19.0 °C y 2,500 mm, respectivamente [5]. Dichas características propician que cultivos perennes como alfalfa y nogal, deban ser regados con una fuente de abastecimiento complementaria y en este caso se utilizan pozos profundos dispersos en UR situadas dentro de la poligonal que delimita al propio DR017.

Se han desarrollado técnicas para el seguimiento y gestión de recursos en zonas agrícolas, tal como, percepción remota o teledetección, aplicables al seguimiento de los censos agropecuarios [6], monitoreo sobre implementación de políticas agrícolas [7,8], estimar rendimientos [9] y contenido nutricional de los cultivos [10]. También se han usado para estimar el contenido hídrico

de los cultivos mediante índices de vegetación que de manera indirecta estima evapotranspiración hasta contenido de clorofila [11,12]. El uso de indicadores vegetales ha fincado una forma de análisis en el sector agrícola mediante percepción remota [12,13,14]. Uno de los indicadores más usados es el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI por sus siglas en ingles), el cual puede ser obtenido usando diferentes insumos; actualmente mediante imágenes de la constelación de satélites Sentinel-2, considerado útil en el monitoreo de cultivos [15,16,17].

Mediante percepción remota se han usado imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 para dar seguimiento a cultivos como maíz y soya al oeste de Brasil, concluyendo que los datos derivados de Sentinel-2 proporcionaron confiabilidad al modelar el NDVI de cultivos agrícolas [16]. En 2022, Quian et al., [18] utilizan Sentinel-2 para estimar contenido de clorofila e índice de área foliar con resultados que indican precisión del método en diferentes periodos estacionales. En otro estudio, Zenteno [19] estimaron rendimientos de caña de azúcar usando el NDVI calculado con imágenes Landsat 7 y el cálculo de evapotranspiración de cultivo usando un uso combinado de imágenes satelitales con información meteorológica y Sistemas de Información Geográfica, obtuvieron información que permitió a los usuarios de los sistemas de riego, estimar el consumo de agua de sus cultivos, dar seguimiento al desarrollo vegetativo y estimar en forma aproximada el rendimiento.

El uso de Imágenes Sentinel-2, con una resolución espacial de 10 metros permite que los valores obtenidos de NDVI aumente el detalle y la precisión espacial del mismo. En ese sentido, Castañeda-Ibáñez et al. [20] realizaron el cálculo de la evapotranspiración en trigo (*Triticum aestivum; L.*) usando el módulo METRIC (Mapping ET at high Resolution with Internalized Calibration) y balance de energía logrando un coeficiente de correlación de 0.83 entre las imágenes y medidas en campo con eddy covariance. Las ventajas espaciales que representa el uso de imágenes de satélite han diversificado la posibilidad de análisis derivados del cálculo de índices de vegetación, específicamente NDVI [21] pero no limitativo, pues con una resolución espacial de 10 m mejora el seguimiento y monitoreo de variables de interés agrícola en general [22,23,24,25].

En 2020 mediante un balance de aguas subterráneas se estimó que el acuífero principal región lagunera presentó una extracción de 149.04 Mm^3 anuales, a partir de los volúmenes concesionados como variable que representa las extracciones [26], con eficiencias de aplicación promedio en un módulo del DR-017 de 59.4% [26]. La explotación del acuífero principal región lagunera ha propiciado problemas de salinidad y de presencia de metales pesados como Plomo, Cadmio y Arsénico, con valores por encima del límite máximo permisible por la NOM-127-SSA1-1994 (DOF: 31/12/1969). En donde destaca el Pb, con un valor de 1 208% superior al límite permitido, en tanto que el As y el Cd están en un 144 y 780 %, respectivamente por encima de la norma [27].

En la Región Lagunera, se riega a través de agua superficial provistas por el DR017 y por aguas subterráneas extraídas por medio de pozos agrícolas las cuales han sido concesionadas en su mayoría a usuarios hidroagrícolas de la región. Estas UR son usadas para el riego de cultivos no dominados por la red de distribución del DR y se usan como auxilio en el riego de cultivos perennes cuando las aguas superficiales dejan de ser conducidas por la red de canales a cargo del DR.

En este trabajo se expone una propuesta metodológica para estimar el volumen de agua utilizado por los cultivos, que aunado a fechas de siembra, índices de verdor y patrón de cultivos, permite inferir el origen de ese volumen por tipo ya sea superficial o subterráneas, El objetivo de este trabajo fue discriminar con base a técnicas de percepción remota la superficie regada en el complejo DR017 y UR en la Región Lagunera (Durango y Coahuila, México) y, previo cálculo de la evapotranspiración, inferir volúmenes de riego aplicado por tipo de fuente (Superficial para DR y subterránea para UR).

Descripción del sitio experimental

La Región Lagunera está comprendida entre los estados de Coahuila y Durango, México, sede del DR017 Región Lagunera y comparte fronteras con UR en lo que comprende el Acuífero Principal (Figura 1). Las parcelas coexisten sin una frontera delimitada formando sistemas mixtos de riego en distintas fechas del año. La metodología se aplica en parcelas regadas por cualquier tipo de fuente de abastecimiento dentro de la poligonal que delimita al acuífero principal Región Lagunera. Comprende las parcelas regadas por el DR017, Región Lagunera y UR regadas (1 494 Pozos agrícolas o mixtos). Esta zona de riego será el Complejo UR-DR 017 (Figura 1).

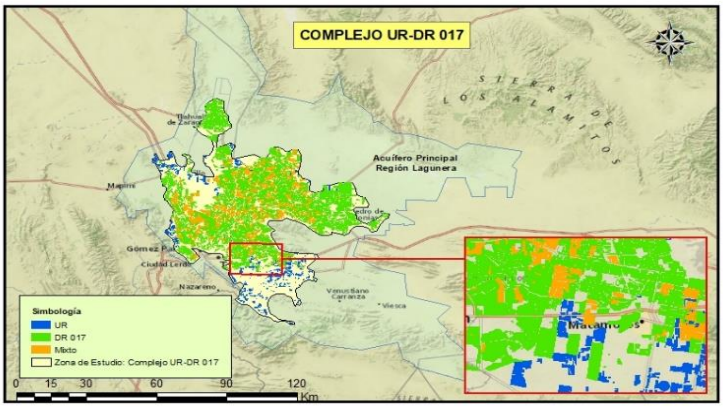


Figura 1. Delimitación del Complejo UR-DR 017 en la Región Lagunera, México.

El acuífero principal Región Lagunera, se localiza en el extremo suroccidental del estado de Coahuila, México, en el límite con el estado de Durango, entre los paralelos 25°00’ y 26°45’ de latitud norte y entre los meridianos 102°15’ y 103°50’ de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 12 617 km² [5]. De acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua de la Comisión Nacional del Agua, existen 2,350 aprovechamientos subterráneos con una concesión global de 683.14 Mm^3 anuales, de los cuales 1,494 son pozos agrícolas (Figura 2A, 2B), lo que representa una concesión de 614.00 Mm^3 anuales [5].

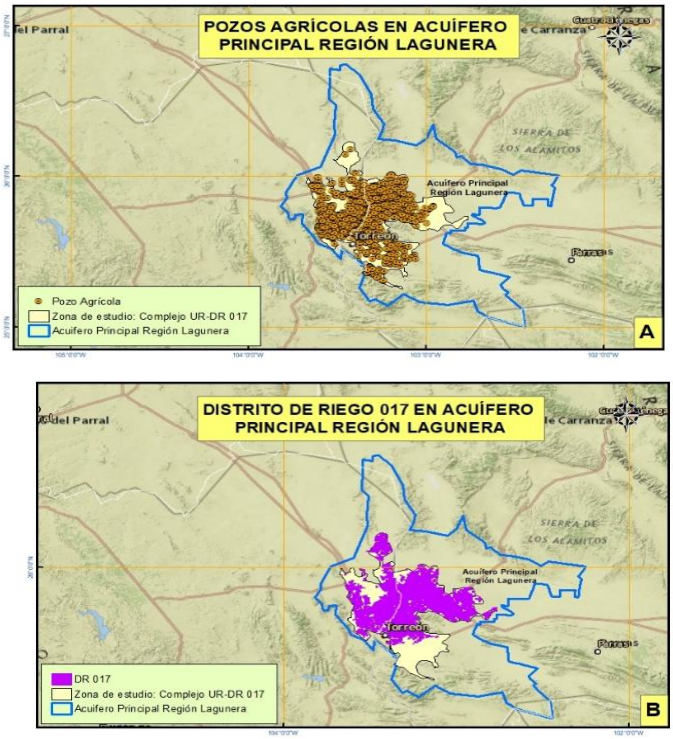


Figura 2. Diferenciación de las zonas agrícolas por tipo de fuente A) Pozos Agrícolas en Acuífero Principal Región Lagunera y B) Distrito de Riego 017 Región lagunera, México.

La superficie física del Distrito de Riego, de los Módulos I al XVII, es 193 749.51 ha, de las cuales 86 664.95 son superficie de riego, con 33 363 usuarios [3]. Las fuentes de agua para el Distrito de Riego 017 Región Lagunera se regulan con dos presas de almacenamiento: la Presa Lázaro Cárdenas (El Palmito) y la Presa Francisco Zarco, las cuales abastecen las Unidades I a la VI que incluyen los Módulos I al XVII.

2. Materiales y Métodos

Identificación de la superficie regada usando percepción remota. La secuencia metodológica puede ser resumida en la figura 3.

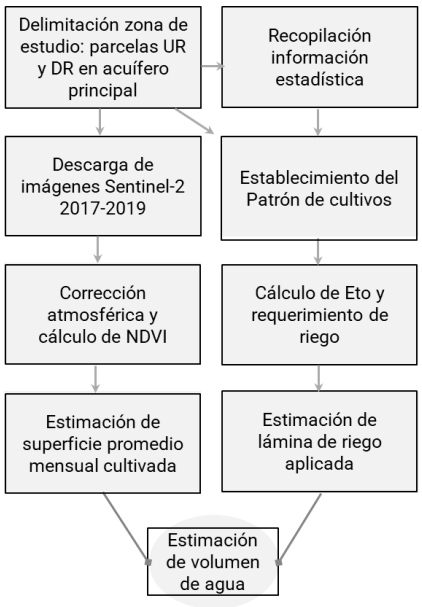


Figura 3. Secuencia metodológica para estimar volumen de agua de riego.

Se realizaron tres actividades básicas de manera remota para la discriminación de superficies: A) Identificar superficies sembradas (y por lo tanto regadas), B)

Establecer el patrón de cultivos y C) Estimar láminas de riego. El NDVI, se utilizó para calcular la superficie regada, mediante información de imágenes Satelitales Sentinel-2 de diversas fechas que comprenden los ciclos agrícolas 2017-2018 y 2018-2019 (Tabla 1).

Tabla 1. Superficies (ha) con cobertura vegetal estimada por parcela en periodo de estudio oct-nov 2017.

Parcela	Oct15	Oct20	Nov04	Nov09	Nov14	Nov24
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	36.33	35.62	44.52	36.74	51.34	58.26
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	20.55	14.74	14.34	0.00	0.00	10.29
16	1.00	1.03	1.10	0.86	1.05	1.15

Para estimar las láminas de riego utilizadas por cultivo, se utilizó el Modelo FAO Penman–Monteith, previa identificación del patrón de cultivos (Tabla 2 y Tabla 3) tanto en su distribución espacial como temporal.

Tabla 2. Patrón de Cultivos por ciclo agrícola en el Complejo UR-DR017.

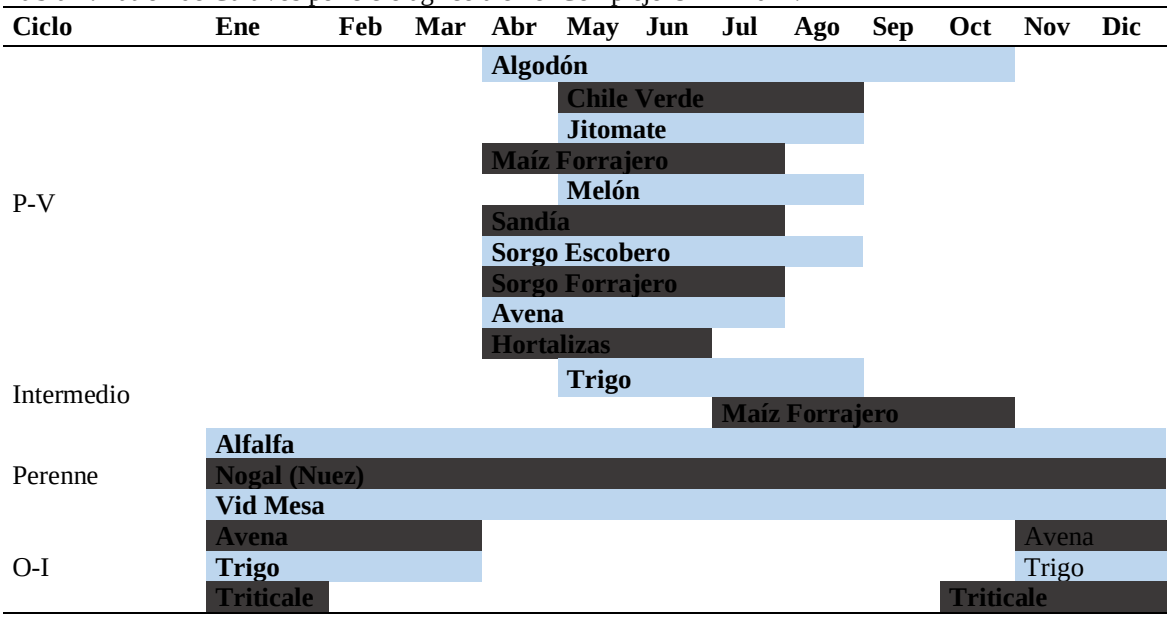


Tabla 3. Datos de cultivos Complejo UR-DR017.

Ciclo	Datos de cultivo		Fecha Siembra	
	Cultivo	**Periodo**	**Mes**	**Dia**
P-V	Algodón	Largo	Abril	15
	Chile Verde	Corto	Mayo	4
	Jitomate	Corto	Mayo	1
	Maíz Forrajero	Corto	Abril	3
	Melón	Medio	Mayo	9
	Sandía	Medio	Abril	8
	Sorgo Escobero	Medio	Abril	12
	Sorgo Forrajero	Corto	Abril	5
Intermedio	Avena	Corto	Abril	4
	Hortalizas	Medio	Mayo	1
	Trigo	Corto	Mayo	8
	Maíz Forrajero	Corto	Julio	3
Perenne	Alfalfa	Perenne	Noviembre	6
	Nogal (Nuez)	Perenne	Enero	15
	Vid Mesa	Perenne	Diciembre	17
O-I	Avena	Medio	Noviembre	10
	Trigo	Largo	Noviembre	15
	Triticale	Corto	Octubre	13

La combinación de fechas de siembra y tipo de cultivo son las variables que permiten inferir el tipo de fuente a partir de la cual se estima el requerimiento de riego. La fecha de siembra y la duración del cultivo, es específica para la temporalidad de cada fuente de agua, la presa tiene un periodo definido para uso agrícola.

Cálculo del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI). El índice de vegetación al ser un indicativo del verdor o grado de hidratación del cultivo permite inferir el vigor o etapa de desarrollo de la planta. Se utilizó el software QGIS 3.10 (2021) [28] para la determinación de este índice, para lo cual fue necesario discriminar las bandas 03, 04 y 08 de las imágenes corregidas atmosféricamente, las cuales se pueden apreciar en la Figura 4. El índice de vegetación diferencial normalizado NDVI se calcula mediante la ec. (1).

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad \textbf{(Ec. 1)}$$

En este caso, el NIR (Near Infra Red) será la Banda 08 y la capa R será la Banda 04. Al sustituir estos términos en el lenguaje de la "Calculadora Ráster" del programa QGIS 3.10 (2021) se realizó el cálculo. Al procesar estas bandas en el programa QGIS 3.10 se obtiene una imagen calculada del índice de vegetación NDVI; sin embargo, esta imagen solo puede visualizarse en escala de grises. Para poder apreciar gráficamente el índice de vegetación NDVI, se combina con la Banda 03 y se obtiene una imagen donde el índice de vegetación NDVI se diferencia en escala de rojos para coberturas terrestres con vegetación y en escala de grises para coberturas terrestres sin vegetación.

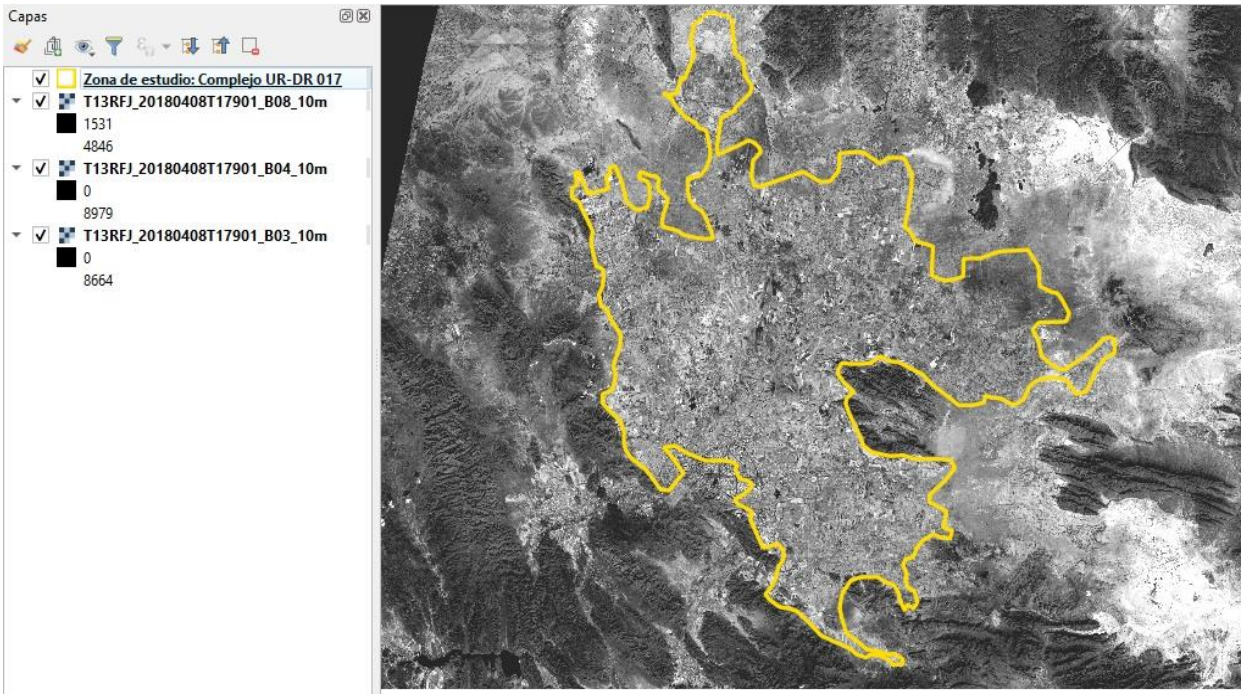


Figura 4. Mosaico de la zona de estudio con las Bandas 03, 04 y 08 en QGIS 3.10 (2021).

A partir de la imagen ráster con información del índice de vegetación diferencial normalizado NDVI, se procedió mediante la herramienta "Estadísticas de Zona" (Figura 5) a asignar los valores de los píxeles NDVI al archivo Shapefile que contiene la información vectorial de las parcelas del Complejo UR-DR 017.



Figura 5. Delimitación de parcelas por valores de NDVI para su proceso de cálculo (CONAGUA, 2020).

Estimación de la superficie regada a partir del NDVI. Para estimar la superficie sembrada, se calculó el NDVI a partir imágenes satelitales tipo Sentinel-2 de los ciclos agrícolas 2017-2018 y 2018-2019 en las parcelas que abarcan el Complejo UR-DR

017 (Figura 5). Un factor que interfiere en el uso de sensores orbitales en el monitoreo agrícola es la nubosidad [16]. El criterio de búsqueda fue el porcentaje de nubosidad fuera menor al 25% y que además de manera visual la nubosidad traslapara la menor cantidad de parcelas. Se descargaron 66 mosaicos de imágenes Sentinel-2, que corresponden a 66 fechas para ambos ciclos que van desde el 15 de octubre de 2017 al 21 de agosto de 2019.

Las imágenes Sentinel-2 hasta antes de 2019, no tenían corrección atmosférica, por lo que requieren de un procesamiento que permite corregir estas imágenes, a fin de descartar los errores en la reflectancia que las partículas en suspensión (polvo, humedad, hollín, humo, aerosoles, otros contaminantes atmosféricos) pueden arrojar al momento de hacer el cálculo de los índices de vegetación. Para llevar a cabo la corrección atmosférica se usó la aplicación SNAP para Windows. SNAP para Windows: Proviene del acrónimo Sentinel Application Platform. Es un software de uso gratuito desarrollado y distribuido por la Agencia Espacial Europea. Su función es para procesar y analizar imágenes satelitales de la flota de satélites Sentinel. Se utilizó para la corrección atmosférica de las imágenes satelitales descargadas de fechas anteriores al año 2019. La corrección atmosférica de imágenes satelitales sirve para corregir errores de reflectancia. Las imágenes satelitales Sentinel-2 de fechas 2019 y posteriores disponen de corrección atmosférica.

Cálculo de la superficie cubierta con vegetación. Se estimó la superficie con cubierta vegetal de acuerdo con la suma de pixeles que fueron asignados al archivo Shapefile de las parcelas y multiplicando por el área cubierta por cada píxel, mediante la ec. (2).

$$área = suma\ de\ pixeles * 0.01 \quad \textbf{(Ec. 2)}$$

Donde:
Suma de pixeles = número de pixeles encontrados en la parcela que presentan cubierta vegetal.
0.01= Es el área cubierta en hectáreas por cada píxel (ha).

El cálculo se realizó para las 66 imágenes Sentinel-2, obteniéndose una base de datos asociada al archivo Shapefile que después fue exportada a formato de Microsoft Excel que muestra la superficie estimada en hectáreas, para cada parcela del Complejo UR-DR 017 en las 66 fechas correspondientes (Tabla 1).

Con las superficies regadas por fecha y de acuerdo con los datos estadísticos recopilados, se estableció el patrón de cultivos (Tabla 2) y se calcularon los requerimientos de riego mediante la ecuación de la FAO Penman-Monteith. A partir de las superficies calculadas y del requerimiento de riego, se estimaron los volúmenes de riego utilizados en el Complejo UR-DR 017. Se estimaron los volúmenes de riego máximos utilizables en la zona de estudio de acuerdo con los volúmenes autorizados mediante los títulos de concesión otorgados por la CONAGUA.

3. Resultados

Volúmenes de riego mediante el cálculo de ET_0. En el Tabla 2 se muestra el patrón de cultivos que se estimó en base a las estadísticas agrícolas y del padrón de Usuarios del Distrito de Riego 017; al inventario de Unidades de Riego en la Región Lagunera, a la Agenda Técnica Agrícola de Durango y La Laguna elaboradas por el Instituto Nacional de Investigación Forestal, agrícola y Pecuaria (INIFAP) en 2017 [29], al análisis de la información vectorial que se recopiló de la zona de estudio y ajustado a las superficies promedio estimadas mediante el

análisis del índice de vegetación diferencial normalizado NDVI.

Las fechas de siembra y cosecha (Tabla 2 y 3), se obtuvieron de las Agenda Técnica Agrícola de Durango y La Laguna elaboradas por el INIFAP en 2017. Se muestra en la Figura 6, la superficie media estimada usando NDVI mensualmente para cada ciclo agrícola analizado y el promedio de ambos ciclos. El promedio de superficie de diciembre a marzo es de 34 989.99 ha, las cuales corresponden a superficie cultivada por Unidades de Riego. Junio es el mes de mayor superficie establecida con 99 773.16 ha.

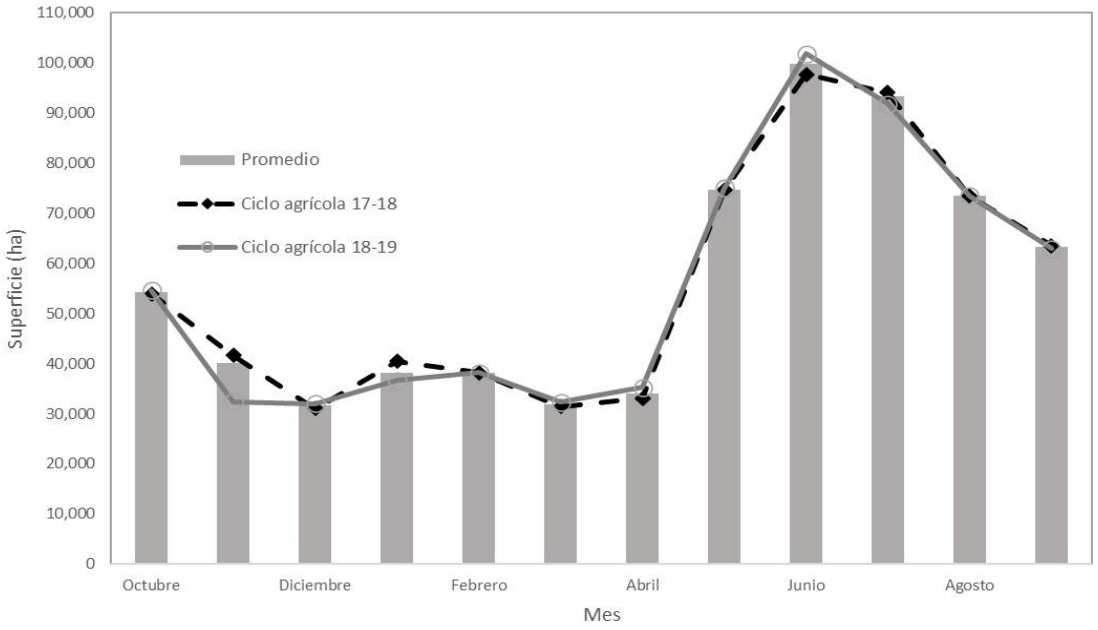


Figura 6. Variación temporal de las superficies medias (ha) estimadas durante los ciclos agrícolas 2017-2019.

En adición, la Tabla 4 muestra láminas aplicadas a nivel parcelario estimadas mediante FAO Penman-Monteith, así como los volúmenes estimados anuales por cultivo y por ciclo. Primavera-Verano (P-V), Intermedios, Perennes y Otoño-Invierno (O-I) (Tabla 4).

Tabla 4. Láminas y volúmenes de riego estimados mediante cálculo de ETo en diferentes cultivos.

Cultivo	**Lámina Neta Anual (mm)**	**Volumen estimado anual (Mm^3)**
Algodón	719.14	128.28
Chile Verde	576.24	2.54
Jitomate	538.59	1.03
Maíz Forrajero	633.13	74.15
Melón	416.35	2.33
Sandía	426.15	1.57
Sorgo Escobero	648.50	1.07
Sorgo Forrajero	528.33	80.04
Avena	705.25	86.09

Hortalizas	326.28	26.44
	Subtotal P-V	403.54
Trigo	686.11	6.52
Maíz Forrajero	522.03	61.14
	Subtotal Intermedios	67.66
Alfalfa	1 619.44	409.20
Nogal (Nuez)	989.97	67.35
Vid Mesa	926.22	0.13
	Subtotal Perennes	476.68
Avena	515.86	62.97
Trigo	513.31	4.88
Triticale	355.12	10.30
	Subtotal O-I	78.14
TOTAL	11 646.04	1 026.03
PROMEDIO AÑO	589.79	57.00

Volúmenes máximos utilizables a partir de concesiones otorgadas. En base a los datos de los volúmenes concesionados y en las eficiencias de conducción, distribución y aplicación (Tabla 5), se obtuvieron los volúmenes máximos que pueden ser realmente aplicados a nivel parcelario en el complejo UR-DR 017.

Tabla 5. Máximos volúmenes de riego que pueden ser utilizados a partir de las concesiones en UR y Módulos 4-17.

Sistema	**Volumen Concesionado (Mm^3 $año^{-1}$) (a)**	**Pérdidas por Conducción y Distribución (Mm^3 $año^{-1}$) (b)**	**Pérdidas por Método de Riego (Mm^3 $año^{-1}$) (c)**	**Vol. Estimado a nivel parcelario VE_{ef} (Mm^3 $año^{-1}$) (a-b-c)**
Unidades de Riego	614.00	0.00	153.50	460.50
Módulos 4-17	837.86	368.66	92.17	345.62
Suma	1 451.87	368.66	245.67	806.12

4. Resultados y Discusión

Como se observa en la Figura 6 donde se muestra el total de las superficies con valores máximos de cobertura vegetal en el mes de junio (105,105.84 ha) y mínimas en los meses de diciembre a marzo (mínima de 28,049.86 ha). Así como también en la Figura 7 se describe el comportamiento de las superficies de ambos ciclos agrícolas, mostrando comportamientos similares en cuanto a la temporalidad del establecimiento de superficies con cobertura vegetal. Resultados que atienden la complejidad de la multitemporalidad en la estimación del NDVI analizada por Lopez-Adreu et al. [7].

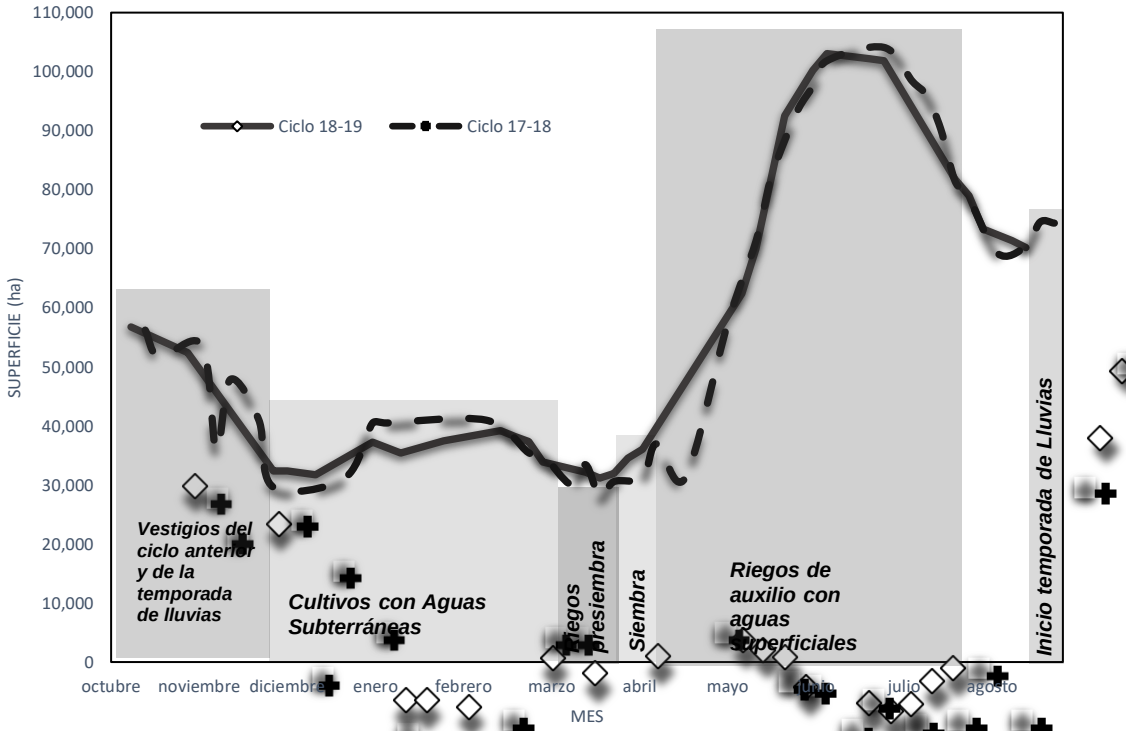


Figura 7. Análisis de superficies cultivadas por Ciclos Agrícolas 2017-2018 y 2018-2019.

Gráficamente se aprecia que, al finalizar el ciclo agrícola inmediato anterior, la superficie cultivada decrece hasta mantenerse en un promedio de 34,989.99 ha de los meses de diciembre a marzo (Figura 7), lo cual de acuerdo con el índice radiométrico indica que es la superficie que se riega con aguas subterráneas [30]. El índice radiométrico se refiere a la transformación de imágenes satelitales mediante la combinación de dos o más bandas con el objeto de resaltar e identificar coberturas terrestres. Los índices radiométricos más utilizados en la investigación agronómica son los índices de vegetación tal como el NDVI.

De acuerdo con la clasificación de López et al. [31] los valores NDVI obtenidos en ese periodo, identifican vegetación mediana-alta, la cual no es posible que subsista en la región de estudio si no se le administra riego suplementario, ya que en esta época del año, la suma de las precipitaciones promedio mensuales ascienden a 77.15 mm. Esos resultados concuerda con los realizado por Pech et al., López et al., y Bomasea et al. [30-32] al usar el método en la zonificación de zonas de cultivo durante los años 2018-2020, y su clasificación por rangos de NDVI.

De acuerdo con los datos oficiales del plan de riegos del Distrito de Riego 017, el sistema de la presa comienza operaciones en la primera decena de marzo y concluye en la última decena de julio [3]; asimismo, acorde a las Agendas Técnicas Agrícolas, los cultivos en el ciclo primavera-verano, tiene riegos de pre-siembra durante el mes de marzo y sembrados durante la primera quincena de abril; posteriormente, se les aplican riegos de auxilio [29] con aguas superficiales hasta alcanzar un máximo promedio en el mes de Junio de 99,773.16 ha, este valor de superficie corresponde a los cultivos que son regados de manera simultánea por el DR y UR. Si las 34,989.99 ha que se infiere son Unidades de Riego se mantuviesen constantes en junio e independientes de la superficie regada con aguas superficiales, se tendría un total promedio de 64,783.17 ha regadas con aguas

superficiales en junio en el mes de mayor superficie establecida, lo cual es mayor al valor promedio (48.859.13 ha) de la superficie regada reportada para los módulos del DR 017 que se ubican en la zona de estudio [4].

La precipitación efectiva (Pe) calculada es menor que la evapotranspiración de cultivo, por ello el requerimiento de riego de todos los cultivos en el Complejo UR-DR 017 (Tabla 4). La Pe es estimada como un porcentaje de la precipitación total, de acuerdo a las consideraciones de FAO (2006), que indica:

$Pe = 0.8\ PP - 25$ cuando la PP > 75 mm por mes
$Pe = 0.6\ PP - 10$ cuando la PP < 75 mm por mes

En los periodos que se analizan (2017-2019) la Pe mensual se indica en la Tabla 6; la evapotranspiración se estima para cada cultivo.

Tabla 6. Precipitación efectiva (Pe) promedio durante el período 2017-19 (FAO, 2006).

Mes/2017-19	Pe (mm)
Enero	0.10
Febrero	0.04
Marzo	0.03
Abril	0.06
Mayo	0.09
Junio	0.44
Julio	0.45
Agosto	0.21
Septiembre	0.66
Octubre	0.19
Noviembre	0.03
Diciembre	0.05

La Figura 8 muestra la distribución de cobertura vegetal (color rojo) derivada del análisis de NDVI con imágenes Sentinel-2, se manifiesta únicamente en aquellas parcelas que se ubican más cerca o que contienen pozos agrícolas. La misma zona en julio (Figura 9) representa mayor presencia de cobertura vegetal, esto debido a que, en el mes de julio, se encuentran operando los canales de riego del DR 017 y la cobertura vegetal se encuentra distribuida en superficies dominadas por infraestructura hidroagrícola independientemente si se trata de aguas superficiales (canales) o aguas subterráneas (pozos), con similares patrones a los estimados por Bonansea et al. [32] y Pech et al. [30].

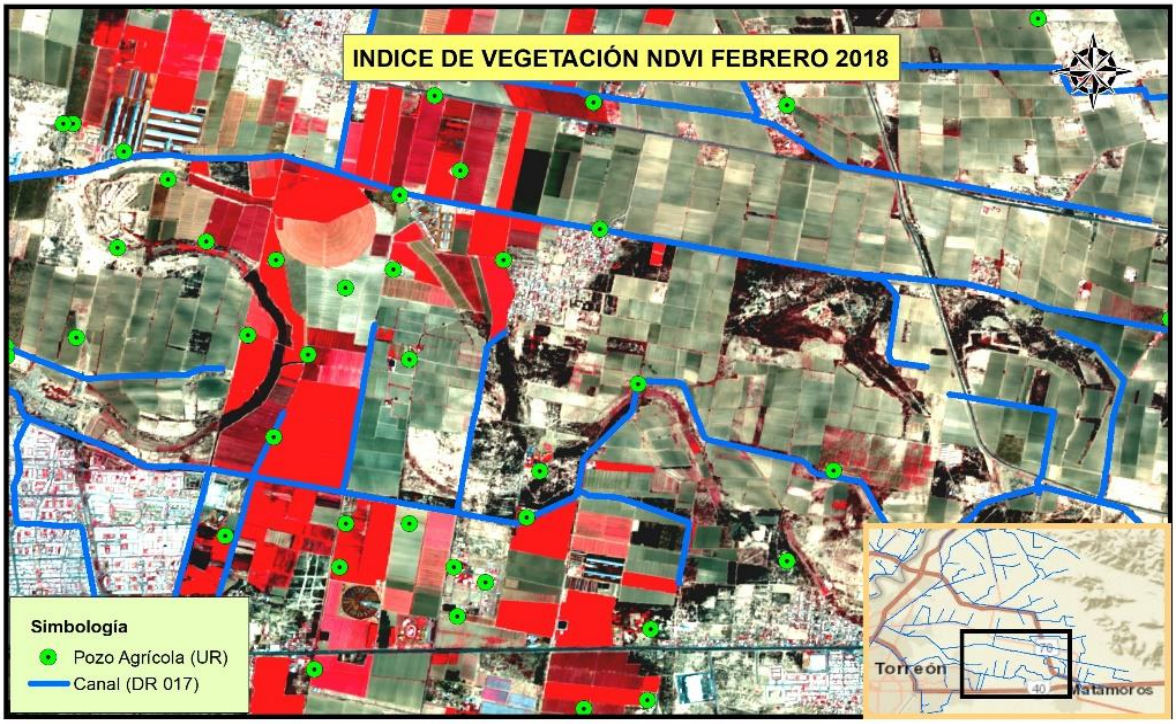


Figura 8. Distribución de superficie sembrada diferenciado por NDVI en febrero de 2018.

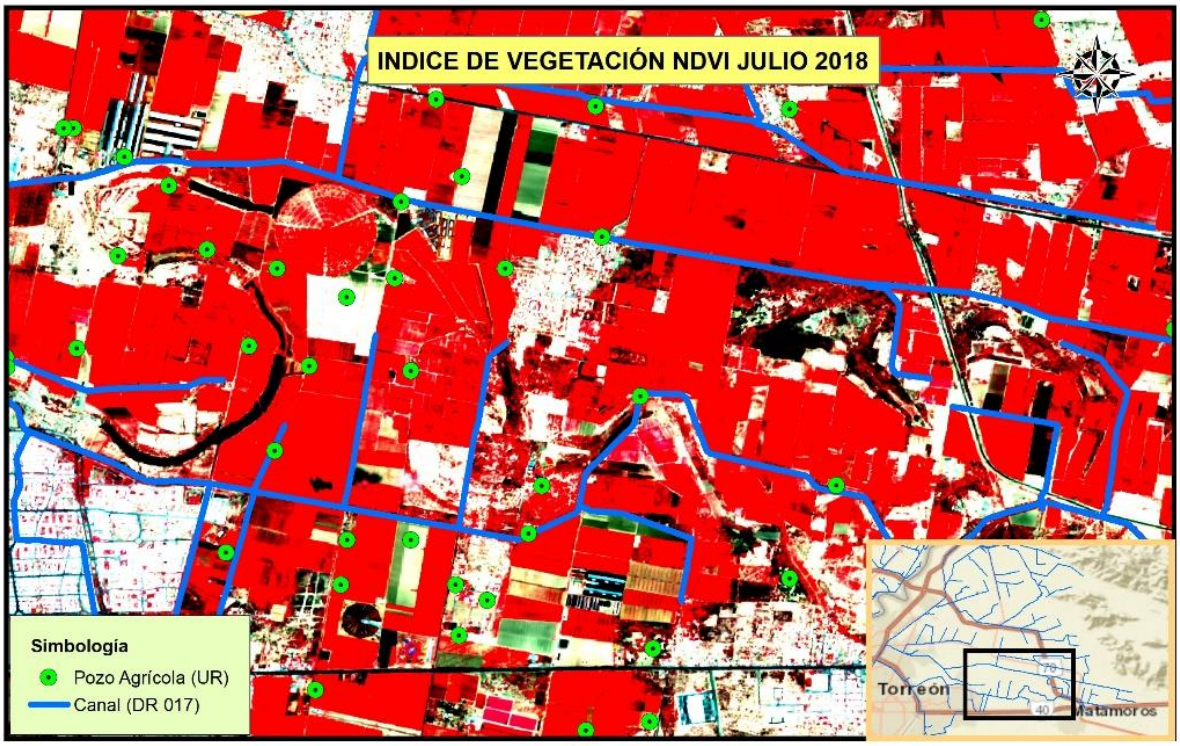


Figura 9. Distribución de parcelas regadas de acuerdo al NDVI en julio de 2018.

5. Conclusiones

Se estima que en el complejo UR-DR 017, los volúmenes aplicados a nivel parcelario suman 1, 026.03 Mm^3 al año, considerando el uso de agua que demandan los cultivos de acuerdo con sus requerimientos de riego. Con los resultados de este trabajo, se estimó un volumen que podría ser utilizado a nivel parcelario luego de las pérdidas por conducción, distribución y método de riego en el complejo UR-DR 017 de 806.12 Mm^3 al año, por lo que existe una diferencia de aproximadamente 219.91 Mm^3 anuales, que pueden ser de origen subterráneo.

Derivado de los resultados de este trabajo se concluye que el seguimiento de superficies de riego a nivel DR o UR usando percepción remota es una alternativa confiable para el seguimiento del uso de agua de riego en el sector agrícola. La estimación de índices de vegetación, como indicador del estado hídrico de las plantas, permite la delimitación de superficies por tipo de fuente de manera remota a partir del estado de verdor de la planta. La herramienta es útil para estimación de láminas de riego a partir de índices de vegetación y en consecuencia el seguimiento de los volúmenes de riego actual. A partir de esos datos puede hacerse una comparación respecto del agua otorgada según concesión en función del tipo de fuente y la usada en espacio y tiempo de acuerdo a las imágenes de satélite.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT-México) los apoyos para la culminación de la tesis de maestría del C. Eduardo Gutiérrez Morales.

6. Literatura citada

[1] Martínez, D.; Mora, J.; Exebio, A.; Arana, O.; Arjona, E. (2021). "Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo". Terra Latinoamerica, 39:1-12. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.544

[2] Andrés, C.; Zambrano, L.; Ruiz, R.; Alicia, G.M.; Pérez, R.; Sandoval, R.; Caldera, A. (2017). "El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica." *Primera ed. Fundación Friedrich Ebert.* Ciudad de México: 256 p.

[3] CONAGUA. (2011). "Desarrollo de un modelo de Sistema de Información Geográfica y revisar e identificar las parcelas que requieren actualización en el Padrón de Usuarios del Distrito de Riego 017 Región Lagunera, en los Módulos de Riego del I al XVII". *Ciudad de México: CONAGUA.*

[4] CONAGUA (2018). "Estadísticas agrícolas de los distritos de riego", *Ciudad de México: CONAGUA*.

[5] CONAGUA (2020). "Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Principal-Región Lagunera (0523), Estado de Coahuila". *Ciudad de México: CONAGUA.*

[6] Serrano, J.; Fábrega, J.; Quirós, E.; Sánchez-Galán, J.; Jiménez, J.U. (2018) "Análisis prospectivo de la detección hiperespectral de cultivos de arroz (Oryza sativa L.)". *KnE Engineering 3*: 69-79. DOI: 10.18502/keg.v3i1.1414

[7] Lopez-Andreu, F.J.; Erena, M.; Dominguez-Gómez, J.A.; López-Morales, J.A. (2021). "Sentinel-2 Images and machine learning as tool for monitoring of the common agricultural policy: Calasparra Rice as a Case Study". *Agronomy* 2021, *11*, 621. https://doi.org/10.3390/agronomy11040621

[8] Sarvia, F.; De Petris, S.; Ghilardi, F.; Xausa, E.; Cantamessa, G.; Borgogno-Mondino, E. (2022). "The importance of agronomic knowledge for crop detection by sentinel-2 in the CAP controls framework: A

possible rule-based classification approach". *Agronomy* 2022, *12*, 1228. https://doi.org/10.3390/agronomy12051228

[9] Ovando, G.; De la Casa, A.; Díaz, G.; Díaz, P.; Bressanini, L.; Miranda, C. (2021). **"**Desempeño de diferentes índices de vegetación de sentinel-2 para estimar el rendimiento de soja en agricultura de precisión". Agriscientia. 2021, 38(2),1-12. DOI: https://doi.org/10.31047/1668.298x.v38.n2.25148

[10] Clevers, J.G.P.W.; Kooistra, L.; Van den Brande, M.M.M. (2017). "Using Sentinel-2 Data for Retrieving LAI and Leaf and Canopy Chlorophyll Content of a Potato Crop". *Remote Sens.* 2017, *9*, 405. https://doi.org/10.3390/rs9050405

[11] Allam, M.; Mhawej, M.; Meng, Q.; Faour, G.; Abunnasr, Y.; Fadel, A.; Xinli, H. (2021). "Monthly 10-m evapotranspiration rates retrieved by SEBALI with Sentinel-2 and MODIS LST data". *Agricultural Water Management,* 243, 2021, 1064 https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106432.

[12] Zhang, H.; Li, J.; Liu, Q.; Zhao, J.; Dong, [Y. (2020). "A highly Chlorophyl-Sensitive and LAI-Insensitive index based on the red edge band". *CSI, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 5014-5017. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324179

[13] Croft, H.; Chen, J.M.; Zhang, Y. (2014) "The applicability of empirical vegetation indices for determining leaf chlorophyll content over different leaf and canopy structures". *Ecological Complexity* 17, 2014, 119-130. https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2013.11.005.

[14] Xing, N.; Huang, W.; Xie, Q.; Shi, Y.; Ye, H.; Dong, Y.; Jiao, Q. (2019). "A transformed triangular vegetation index for estimating winter wheat leaf area index". *Remote Sensing*, *12*(1), 16. https://doi.org/10.3390/rs12010016

[15] Martinez M., L.J. (2017). "Relationship between crop nutrimental status, spectral measurement and sentinel-2 images". *Agronomía Colombiana*. 35(2): 205-215

[16] Filgueiras, R.; Chartuni, E.; Althoff, D.; Fernandes, E.; França, F. (2019). "Crop NDVI Monitoring Based on Sentinel 1". *Remote Sensing 11:* 1-21. https://doi.org/10.3390/rs11121441

[17] Pech, M. F.; Julio Victor Sánchez H. J.V.; Sánchez, J. H. (2020). "Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2". *Lámpsakos* 24;48-59. ISSN (En línea): 2145-4086

[18] Qian, B.; Ye, H.; Huang, W.; Xie, Q.; Pan, Y.; Xing, N.; Ren, Y.; Guo, A.; Jiao, Q.; Lan, Y. (2022). "A sentinel-2-based triangular vegetation index for chlorophyll content estimation". *Agricultural and Forest Meteorology*, 322, 109000. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109000

[19] Zenteno C.G. A.; Palacios, V. E.; Tijerina, Ch. L.; Flores, M. H. (2017). "Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar". *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 8 (7), 1575-86. https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.513

[20] Castañeda-Ibáñez, C. R.; Flores-Magdaleno, H.; Martínez-Menes, M.; Esparza-Govea, S.; Fernández-Reynoso, D.; Prado-Hernández, V.; Pascual-Ramírez, F. (2018). "Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos". *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 5:* 537-545. https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1647

[21] Johnson, L.F. and Trout, T.J. (2012). "Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley". *Remote Sensing, 4,*439-455. https://doi.org/10.3390/rs4020439

[22] Calera, A.; Campos, I.; Osann, A.; D'Urso, G.; Menenti, M. (2017). "Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users". *Sensors, 17,*1-25. https://doi.org/10.3390/s17051104

[23] Singh, R.K.; Khand, K.; Kagone, S.; Schauer, M.; Senay, G.B.; Wu, Z. (2020). "A novel approach for next generation water-use mapping using Landsat and Sentinel-2 satellite data". *Hydrological Sciences Journal, 65:* 2508-2519. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1817461

[24] Salvador-Castillo, J.M.; Bolaños-González, M.A.; Palacios-Vélez, E.; Palacios-Sánchez, L.A.; López-Pérez, A; Muñoz-Pérez, J.M. (2021). "Estimación de la fracción de cobertura vegetal y contenido de nitrógeno del dosel en maíz mediante sensores remotos". *Terra Latinoamericana 39:*1-11. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.899.

[25] Harmse, C.J.; Gerber, H.; van Niekerk, A. (2022). "Evaluating several vegetation iIndices derived from sSentinel-2 imagery for quantifying localized overgrazing in a semi-arid region of south africa". *Remote Sens.*, *14*, 1720. https://doi.org/10.3390/rs14071720

[26] Ramos, C.; Estrada, J.; Delgado, G.; Pérez, E.; Diego, D. (2021). "Evaluación de variables involucradas en riego superficial para incrementar la eficiencia del uso del agua en la Región Lagunera, Coahuila de Zaragoza, México". *Acta Agrícola y Pecuaria, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 7:* 24-31. Doi: https://doi.org/10.30973/aap/2019.5.0051004

[27] Azpilculeta, M.E.; Pedroza, A.; Sánchez, I.; Salcedo, M.; Trejo, R. (2017). "Calidad química del agua en un área agrícola de maíz forrajero (Zea Mays L.) en la Comarca Lagunera, México". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental 33:* 75-83. https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.07

[28] QGIS Development Team (2021). *"*QGIS Geographic Information System". *Open Source Geospatial Foundation Project. https://qgis.org.*

[29] INIFAP (2017). "Agenda Técnica Agrícola de Durango y la Laguna". *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. Segunda edición. SAGARPA. Ciudad de México.

[30] Pech, M. F.; Sánchez-Hernández, J.; Sánchez-Jacinto, H. (2021). "Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2". *Lámpsakos, 0:* 48-59. DOI: https://doi.org/10.21501/issn.2145-4086

[31] López, A.; Martínez, M.; Fernández, D. (2015). "Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación". *Tecnología y ciencias del agua, 6:*121-137. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100007&lng=es&tlng=es.

[32] Bonansea, M.; Ledesma, M.; Bazán, R.; Ferral, A.; German, A.; O'Mill, P.; Rodriguez, C.; Pinotti, L. (2019). "Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 imagery for water clarity assessment in a reservoir". *Journal of South American Earth Sciences* 95: 102265. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102265