



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

**ESTIMACIÓN DE SUPERFICIE SEMBRADA  
UTILIZANDO IMÁGENES DE SATÉLITE EN EL  
MODULO VI TLAHUALILO DEL DISTRITO DE RIEGO  
017 REGIÓN LAGUNERA**

**ADRIANA SILVA SAUCEDA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

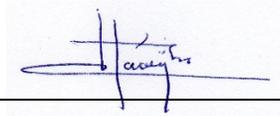
**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2021**

La presente tesis titulada: “**Estimación de superficie sembrada utilizando imágenes de satélite en el módulo VI Tlahualilo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera**”, realizada por la alumna: **Adriana Silva Saucedo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS  
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



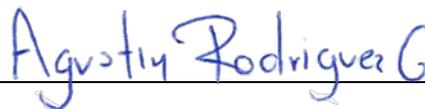
DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ASESOR:



DR. ROBERTO ASCENCIO HERNÁNDEZ

ASESOR:



DR. AGUSTÍN RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, marzo de 2021

# **ESTIMACIÓN DE SUPERFICIE SEMBRADA UTILIZANDO IMÁGENES DE SATÉLITE EN EL MODULO VI TLAHUALILO DEL DISTRITO DE RIEGO 017 REGIÓN LAGUNERA**

Silva Saucedo Adriana, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021.

## **RESUMEN**

La Región Lagunera, Coahuila y Durango, en las últimas tres décadas ha presentado períodos de sequía, provocando la disminución de los escurrimientos superficiales de los ríos Nazas y Aguanaval, y de la recarga de sus acuíferos. En el ciclo agrícola 2013-2014 hubo restricciones de agua en el Distrito de Riego 017 Región Lagunera, por lo que se programaron superficies de riego menores a las de años anteriores. Sin embargo, la demanda de superficies adicionales de riego, hicieron necesario mantener un estricto control para que solamente se establecieran las superficies programadas. El objetivo de este trabajo fue: elaborar una metodología para cuantificar el desarrollo del progreso del establecimiento de superficie sembrada a nivel parcela, en el módulo VI Tlahualilo del DR 017 Región Lagunera, Mexico, durante el ciclo agrícola 2013-2014 utilizando Sistemas de Información Geográfica, Percepción Remota y verificación en campo mediante muestreo y determinar en qué medida puede auxiliar para la toma de decisiones. Para su control, se utilizó como indicador de vegetación el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI por sus siglas en inglés, en imágenes satelitales RapidEye, captadas mensualmente, de febrero a junio de 2014. Se concluye que con la metodología se tiene una alta precisión para la cuantificación de superficie que se va estableciendo. Como verificación, con la certeza de los resultados obtenidos, la metodología se aplicó utilizando imágenes de satélite Sentinel-2, para estimar las superficies sembradas para cinco ciclos agrícolas posteriores, 2013-2014 al 2019-2020.

Los resultados mostraron que la combinación de Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica, produce información precisa y confiable para este control, en un mínimo de tiempo y con poco personal de campo.

**Palabras Clave:** Índice de vegetación, NDVI, SIG, Percepción Remota, Satélite.

**ESTIMATION OF PLANTED SURFACE USING SATELLITE IMAGES IN  
MODULE VI TLAHUALILO OF THE IRRIGATION DISTRICT**

**017 REGION LAGUNERA**

Silva Saucedo Adriana, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021.

**ABSTRACT**

The Lagunera Region, Coahuila and Durango, in the last three decades has presented periods of drought, causing the decrease of surface runoff from the Nazas and Aguanaval rivers, and the recharge of their aquifers. In the agricultural cycle 2013-2014 there were water restrictions in the Irrigation District 017 Lagunera Region, for which irrigation areas smaller than those of previous years were programmed. However, the demand for additional irrigated areas made it necessary to maintain strict control so that only programmed areas were established. The objective of this work was: to elaborate a methodology to quantify the development of the progress of the establishment of planted area at the plot level, in module VI Tlahualilo of DR 017 Lagunera Region, Mexico, during the 2013-2014 agricultural cycle using Geographic Information Systems, Remote Perception and verification in the field through sampling and determine to what extent it can assist in decision-making. For its control, the Normalized Difference Vegetation Index, NDVI for its acronym in English, was used as a vegetation indicator in RapidEye satellite images, captured monthly, from February to June 2014. It is concluded that with the methodology there is a high precision for the quantification of surface that are established. As a verification, with the certainty of the results obtained, it was applied using Sentinel-2 satellite images, to estimate the areas sown for the subsequent agricultural cycles from 2013-2014 to 2019-2020.

The results show that the combination of Remote Sensing and Geographic Information Systems produce accurate and reliable information for this control, in a minimum of time and with few field personnel.

**Keywords:** Vegetation Index, NDVI, GIS, Remote Perception, Satellite.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme las facilidades para realizar mis estudios de posgrado.

Al Colegio de Postgraduados, en particular al Posgrado en Hidrociencias por permitirme desarrollar mis estudios de maestría.

Al Dr. Jesús Chávez Morales por el apoyo y los atinados comentarios, de manera especial agradezco la confianza depositada.

Al Dr. Roberto Ascencio Hernández por el tiempo y el apoyo otorgado para concluir el presente trabajo.

Al Dr. Agustín Rodríguez González por su amistad y apoyo para la culminación de esta etapa profesional de mi vida.

Al Dr. Enrique Mejía Sáenz (†) por todo el apoyo y permitirme reconocer el ser y el quehacer de los especialistas en Hidrociencias.

Al personal técnico del Distrito de Riego 017 Región Lagunera, del Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte de la CONAGUA.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Antonio Silva Rivera e Hipolita Saucedo Castro (†), por su apoyo incondicional y por enseñarme el camino, los quiero mucho.

A mi hermana, Yesenia, porque sé que puedo contar con su apoyo, cariño y consejos incondicionalmente.

A José Luis Nevárez Domínguez, mi esposo, mi compañero de aventura al que amo, por su gran cariño y apoyo.

A mis niños adorados, Luisito, Angelito y Adriancito, porque cada día me inspiran, y sin saberlo me enseñan a apreciar cada momento, y me demuestran que cada día podemos ser mejores que el anterior.

A todos aquellos amigos y amigas, que por temor a omitir alguno, prefiero agradecerles su invaluable amistad y apoyo de manera general.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>vii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE CUADROS.....</b>	<b>xii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>6</b>
2.1 Hipótesis.....	6
2.2 Objetivos.....	6
2.2.1 <i>Generales</i> .....	6
2.2.2 <i>Específicos</i> .....	6
<b>III. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>8</b>
3.1 Percepción Remota.....	8
3.2 Imágenes de Satélite.....	10
3.2.1 <i>Historia</i> .....	10
3.2.2 <i>Aplicaciones en la Agricultura</i> .....	13
3.2.3 <i>Imágenes de satélite RapidEye</i> .....	14
3.2.4 <i>Imágenes de satélite Sentinel-2</i> .....	15
3.3 Índices de Vegetación.....	17
3.3.1 <i>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)</i> .....	18
3.3.2 <i>Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)</i> .....	19
3.3.3 <i>Índice de Agua por Diferencia Normalizada (NDWI)</i> .....	20
3.3.4 <i>Índice de Estrés Hídrico (MSI)</i> .....	21
<b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
4.1 Descripción del Área de Estudio.....	22
4.1.1 <i>Localización</i> .....	27
4.1.2 <i>Clima</i> .....	29
4.1.3 <i>Fisiografía</i> .....	29

4.1.4	<i>Geología</i> .....	30
4.1.5	<i>Hidrología Superficial</i> .....	31
4.2	Herramientas y Software Utilizado.....	33
4.3	Metodología .....	34
4.3.1	<i>Recopilación de Información</i> .....	36
4.3.2	<i>Adquisición de Imágenes Satelitales</i> .....	36
4.3.3	<i>Procesamiento de Imágenes Satelitales</i> .....	39
4.3.4	<i>Estimación de NDVI</i> .....	41
4.3.5	<i>Medición de Parcelas en Campo</i> .....	43
4.3.6	<i>Análisis de información</i> .....	42
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>43</b>
5.1	Contraste de la información obtenida mediante imágenes satelitales y la obtenida en campo.....	43
5.2	Seguimiento histórico de la superficie sembrada al ciclo 2019-2020.....	50
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>54</b>
6.1	Conclusiones .....	54
6.2	Recomendaciones .....	56
<b>VII.</b>	<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>57</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Ubicación de la Comarca Lagunera. ....	1
<b>Figura 3.1.</b> Espectro electromagnético de la luz. ....	8
<b>Figura 3.2.</b> Ley de la Conservación de la Energía. ....	9
<b>Figura 3.3.</b> Elementos de la Percepción Remota. ....	9
<b>Figura 4.1</b> Localización del Distrito de Riego 017 Región Lagunera. ....	23
<b>Figura 4.2</b> Localización del Módulo VI Tlahualilo. ....	28
<b>Figura 4.3</b> Metodología utilizada para la estimación de superficie sembrada en el Módulo VI Tlahualilo. ....	34
<b>Figura 4.4</b> Esquema de la metodología aplicada. ....	35
<b>Figura 4.5</b> Ejemplo de imagen RapidEye para el Módulo VI Tlahualilo. ....	37
<b>Figura 4.6</b> Ejemplo de imagen Sentinel-2 para el Módulo VI Tlahualilo. ....	38
<b>Figura 4.7</b> Corrección atmosférica Modelo DOS con Semi-Automatic Classification Plugin. ..	40
<b>Figura 4.8</b> Visualización de archivo raster (imagen satelital) y archivo vector (shape) del Módulo VI Tlahualilo. ....	42
<b>Figura 4.9</b> Ubicación de las parcelas control en el Módulo VI Tlahualilo. ....	45
<b>Figura 5.1</b> Relación lineal de la superficie física vs la superficie obtenida mediante imagen satelital. ....	46
<b>Figura 5.2</b> Relación lineal de la superficie física vs la superficie medida mediante recorridos de campo. ....	47
<b>Figura 5.3</b> Relación lineal de la superficie medida vs la superficie obtenida mediante imagen satelital. ....	48
<b>Figura 5.4</b> Progreso de la cobertura vegetal en el Módulo de Riego VI Tlahualilo para el ciclo agrícola 2018-2019. ....	51
<b>Figura 5.5</b> Superficies programadas y estimadas para el Módulo de Riego VI Tlahualilo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera. ....	52
<b>Figura 5.6</b> Diferencia de superficies programadas y estimadas para el Módulo de Riego VI Tlahualilo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera, en los ciclos agrícolas 2013-2014 al 2019-2020. ....	53

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 3.1</b> Bandas espectrales de los satélites RapidEye. ....	14
<b>Cuadro 3.2</b> Bandas espectrales de los satélites Sentinel-2. ....	15
<b>Cuadro 4.1</b> Superficie por módulo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera. ....	24
<b>Cuadro 4.2</b> Superficie dotada por tipo de tenencia por modulo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera. ....	25
<b>Cuadro 4.3</b> Volumen concesionado por modulo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera. ..	26
<b>Cuadro 4.4</b> Descripción del equipo de campo utilizado. ....	33
<b>Cuadro 4.5</b> Parcelas control seleccionadas en el Módulo de Riego VI Tlahualilo. ....	44
<b>Cuadro 5.1</b> Superficie sembrada calculada a partir de NDVI en el mes de junio en las parcelas control. ....	43
<b>Cuadro 5.2</b> Superficie sembrada medida a partir de recorridos de campo en las parcelas control. ....	44
<b>Cuadro 5.3</b> Análisis de diferencias de superficies para las 15 parcelas control. ....	45
<b>Cuadro 5.4</b> Análisis de diferencias de superficies obtenidas por los dos métodos para las 15 parcelas control. ....	47
<b>Cuadro 5.5</b> Superficie estimada mediante imágenes satelitales para el módulo VI Tlahualilo... ..	49
<b>Cuadro 5.6</b> Comparación de superficies programadas y superficies estimadas con imágenes de satélite, Módulo VI Tlahualilo, en los ciclos agrícolas 2013-2014 a 2019-2020. ....	51

## I. INTRODUCCIÓN

El principal uso del agua en México es el agrícola, el cual se refiere principalmente al agua para el riego de cultivos. El área bajo riego es de aproximadamente 6.46 millones de hectáreas, de las cuales 3.50 corresponden a 85 distritos de riego y 2.96 a más de 39 mil unidades de riego, que fueron proyectados de acuerdo con la tecnología prevaleciente en esa época para la aplicación del agua por gravedad en las parcelas (CONAGUA, 2007).

La Comarca Lagunera, se ubica en el Centro Norte de México, incluye 15 municipios, 10 de ellos del estado de Durango y 5 del estado de Coahuila. Su nombre se debe a las 13 lagunas que existían en el área, entre las que estaban la Laguna de Mayrán que se abastecía por los ríos Nazas y Aguanaval. (López y Sánchez, 2010), Figura 1.1.



FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 1.1.** Ubicación de la Comarca Lagunera.

La Percepción Remota (PR) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se conciben como herramientas en continua evolución útil para la administración de los recursos, la planificación del desarrollo y toma de decisiones. En ellos se integra información geográfica y bases de datos, que una vez incorporados en un software SIG permiten su manipulación, análisis y presentación de resultados. Sin embargo, la investigación de campo y la validación de su información es primordial para la veracidad y sustento de los resultados.

Los sensores remotos, especialmente las imágenes satelitales, constituyen una importante fuente de información para mapear y caracterizar el uso del suelo y la estructura del paisaje a escala regional.

Los recientes avances en Agricultura de Precisión (AP) y en cartografía de la cubierta terrestre pueden hacer posible el monitoreo y la estimación del estado de cultivos en una región determinada a escala predio o unidad productiva, debido al bajo costo de adquisición de las imágenes, su cobertura espacial y la posibilidad de generar los índices de sus bandas espectrales (Zhang y Anderson, 2005).

El 23 de julio de 1972, Estados Unidos de América puso en órbita el satélite ERST (Earth Resources Technology Satelllte) posteriormente nombrado Landsat-1. Fue el primer satélite de una serie para evaluar los recursos naturales (Palacios, et. al., 2011); lo que dio inicio a la era de la observación de la Tierra.

Existen satélites de diferente resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica apropiados para aplicaciones agrícolas (Manjarraez et al., 2007) y uno de ellos es el satélite RapidEye conformado por una constelación de cinco satélites idénticos (George et al., 2005) con una capacidad de revisita diaria y una resolución espacial de 5 m, tras 11 años de operación, la constelación RapidEye tomó sus últimas imágenes durante el mes de marzo de 2020.

Las imágenes RapidEye tenían la capacidad de tomar imágenes en 5 bandas espectrales con 5 metros de resolución espacial y un ancho de barrido de 150 km. Los satélites operaban en una órbita SSO a 620 km de distancia de la Tierra con una separación de 19 minutos para asegurar

captaciones frecuentes sobre un mismo punto en la superficie. En marzo de 2020, la constelación RapidEye fue retirada de operación para cumplir con las mejores prácticas de la exploración espacial y las regulaciones vinculadas a la basura espacial.

Las imágenes Sentinel-2 son proporcionadas por los “gemelos” Sentinel-2A y Sentinel-2B, con una resolución espacial de 10 metros y disponibles para descarga de manera gratuita. La constelación de satélites Sentinel-2 cuenta con una innovadora cámara multispectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación.

Por otro lado, la geoestadística constituye una herramienta adecuada para efectuar el análisis espacial de la información (Isaaks & Srivastava, 1989). El uso de los sensores remotos para monitorear cultivos ha aumentado (Paz et. al., 2005) y las imágenes de satélite son una alternativa para poder estimar las condiciones de los cultivos en grandes regiones (Palacios y Flores, 2013).

En este sentido, la PR y los SIG brindan la posibilidad de vincular espacialmente distintas fuentes de información, y a partir del análisis de las imágenes generadas por sensores remotos, es posible obtener información de las características de las coberturas vegetales utilizando diferentes técnicas de procesamiento de imágenes; entre ellas, el cálculo de índices de vegetación a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda, mismos que posibilitan la estimación el comportamiento de varios parámetros biofísicos de los cultivos (Hatfield et. al., 2008).

El uso combinado de imágenes satelitales con información meteorológica y SIG, permite 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 (Zenteno et. al., 2017).

El análisis espacial de la información ecológica contenida en las imágenes satelitales puede estar orientado hacia la clasificación de los tipos de cobertura (Alperin et. al., 2002). Tucker (1979) fue de los primeros autores en reportar el uso de índices de vegetación como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Fue desarrollado originalmente para pastos por Rouse et al. (1973, The Remote Sensing Center of Texas A&M University), para estimar

el contenido de humedad de las hojas y otras variables fisiológicas. El NDVI es el índice de vegetación más utilizado como indicador del estado de la vegetación, donde se aprovecha la máxima absorción producida en la banda roja debido a los pigmentos de la clorofila y la máxima reflectividad producida en el infrarrojo debido a la estructura celular de las hojas. La escala de medición tiene una propiedad deseada de rango que va de -1 a 1 (De Lira et. al., 2009), donde 0 representa la aproximación del valor sin vegetación y los valores negativos indican ausencia de vegetación (Silleos et al., 2006).

La principal motivación para la realización de este estudio radica en el hecho de que el Distrito de Riego (DR) 017 Región Lagunera presenta un grave problema de sobredimensionamiento de superficie de riego, por lo que año tras año se tiene una fuerte demanda por cantidades adicionales de agua para establecer una mayor superficie, lo que hace necesario mantener un estricto control, para que solamente se establezcan las superficies programadas de acuerdo a los volúmenes disponibles, y se entregue el agua para riego en cantidad y oportunidad requeridas. Sin embargo, la disposición de personal capacitado y equipo de medición es limitada, lo que hace difícil generar información precisa y oportuna para la toma de decisiones. Dado el acceso a herramientas, como PR y SIG, y sus características en cuanto a manejo, periodicidad y análisis, se espera cuantificar la superficie cultivada y su ubicación para el ciclo agrícola tomando como estudio de caso el módulo de riego VI Tlahualilo del DR 017 Región Lagunera.

Como consecuencia del sobredimensionamiento (mayor superficie de la que se puede regar) de la superficie susceptible de riego, del Distrito de Riego 017 Región Lagunera, en el módulo VI Tlahualilo año con año se presentan fuertes demandas por cantidades adicionales de agua proveniente del sistema de presas para establecer mayor superficie que la autorizada, por lo que se hace necesario mantener un estricto control para que solo se siembren las superficies programadas autorizadas y se entregue el agua en cantidad y oportunidad adecuados.

Sin embargo, la disposición de personal capacitado y equipo de medición en campo es limitada, lo que hace difícil obtener información precisa y oportuna, de las superficies de cultivos que se van estableciendo para su control y garantizar las cantidades de agua que requieran.

Por tal motivo, en este trabajo se desarrolla y propone una metodología que utiliza la aplicación de las técnicas modernas que proporcionan: la percepción remota como la fotografía satelital y su análisis, los modernos Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su verificación con muestreo de campo, que pueden auxiliar a solventar esta problemática.

## **II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

### **2.1 Hipótesis**

La Percepción Remota con imágenes de satélite e índices de análisis espectral, apoyadas con Sistemas de Información Geográfica y verificación de campo, pueden auxiliar a estimar y controlar el establecimiento de las superficies de cultivos, autorizadas en distritos de riego.

La estimación de superficie cultivada mediante herramientas de Percepción Remota es semejante a los datos obtenidos en la medición en campo.

La superficie cultivada en el módulo VI Tlahualilo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera aumentó del ciclo agrícola 2014-2015 al ciclo 2019-2020.

### **2.2 Objetivos**

#### **2.2.1 Generales**

- Desarrollar y proponer una metodología para estimar el avance espacial y temporal de superficies autorizadas sembradas, mediante: el uso de imágenes de satélite, el análisis de los índices de vegetación estimados a partir de sus bandas espectrales, apoyadas con sistemas de información geográfica y su verificación con mediciones de campo, y su aplicación a otros ciclos agrícolas, tomando como caso de estudio el módulo VI Tlahualilo, del Distrito de Riego 017 Región Lagunera.

#### **2.2.2 Específicos**

- Desarrollo de la metodología para el análisis, cuantificación temporal y espacial del NDVI y su interpretación como avance del establecimiento de las superficies sembradas a partir de la combinación de la información de fotografías satelitales RapidEye y SIG, en el módulo VI Tlahualilo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera.
- Verificar los resultados de la estimación del avance del establecimiento de las superficies sembradas, con la metodología descrita en el apartado anterior, con un muestreo y medición físicas, mediante recorridos de campo, de superficies de parcelas sembradas.

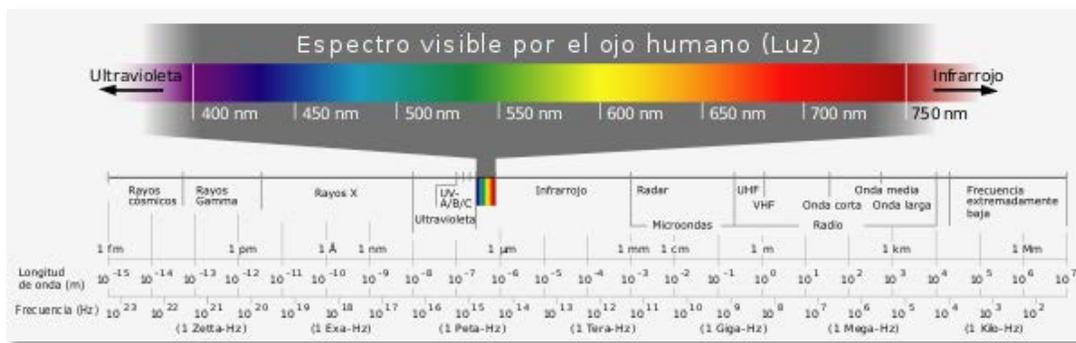
- Aplicar la metodología desarrollada, con imágenes satelitales Sentinel y su contraste con los resultados obtenidos de superficies sembradas, reportadas en los ciclos agrícolas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020 en el módulo de estudio.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Percepción Remota

De acuerdo a la ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), la percepción remota se define como la medición y adquisición de información de algunas propiedades de un objeto o fenómeno, a través de un dispositivo de grabación que no tiene contacto físico con el objeto o fenómeno en estudio.

La percepción remota de energía electromagnética es también llamada teledetección. La luz visible, la emisión infrarroja y las microondas son algunas expresiones que forman parte del espectro electromagnético y se propagan a la velocidad de 300,000 kilómetros por segundo.



FUENTE: [www.almazcara.forestry.es](http://www.almazcara.forestry.es)

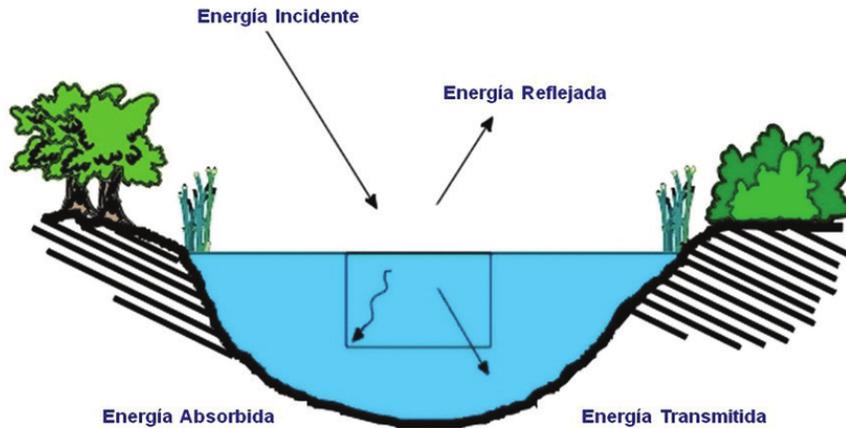
Figura 3.2. Espectro electromagnético de la luz.

Las ondas emitidas por una fuente de energía al pasar a través de cualquier medio, especialmente de la atmósfera, no se transmiten completamente y sufren perturbaciones. En este proceso se manifiesta la Ley de la Conservación de Energía, esto es:

$$E_I = E_R + E_A + E_T \quad (3.1)$$

Donde:

- $E_I$  = Energía Incidente
- $E_R$  = Energía Reflejada
- $E_A$  = Energía Absorbida
- $E_T$  = Energía Transmitida



FUENTE: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

**Figura 3.3.** Ley de la Conservación de la Energía.

Existen rangos del espectro electromagnético en que la atmósfera produce mínimas perturbaciones. Estos rangos se denominan ventanas atmosféricas. Los elementos involucrados en la obtención de datos, además del medio de transmisión, son: fuente de energía, objeto y sensor. De acuerdo a estos elementos, la percepción remota puede dividirse en: pasiva de energía reflejada, pasiva de energía emitida y activa de energía reflejada.

Los sistemas de Percepción Remota constan de tres elementos, una fuente de iluminación, un sensor y el objeto observado. Pongamos de ejemplo a nuestro sistema visual: nosotros podemos ver los objetos que hay a nuestro alrededor debido a la luz que reflejan; nuestros ojos funcionan como sensores y la luz del sol es la fuente de iluminación. Sólo podemos ver a los objetos porque reflejan una determinada energía que nuestros ojos y cerebro procesan.



FUENTE: [www.teledet.com.uy/](http://www.teledet.com.uy/)

**Figura 3.4.** Elementos de la Percepción Remota.

Las fotografías aéreas fueron durante muchos años uno de los productos de la percepción remota más utilizados; funcionaron como insumo principal para la elaboración de toda la cartografía base de nuestro país. Sin embargo, con el advenimiento de la tecnología satelital en la exploración de los recursos naturales y el desarrollo de equipos de cómputo de alta capacidad y velocidades de procesamiento, las imágenes digitales de satélite se convirtieron en una de las opciones más adecuadas para trabajar grandes áreas de manera rápida y a bajo costo. Los satélites también son diversos en función de factores como su resolución espacial, el número de regiones espectrales o bandas que registran, periodicidad con la que se obtienen las escenas, entre otros.

Algunos de los más conocidos son los sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) con imágenes que pueden abarcar un país diariamente y el MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer), ideales para el monitoreo en gran escala de la biosfera; la serie Landsat y SPOT, adecuados para trabajos a nivel de mayor detalle, su área de cobertura es de aproximadamente 170x170 km y 60x60 km respectivamente.

## **3.2 Imágenes de Satélite**

Una imagen satelital o imagen de satélite se puede definir como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la Tierra que luego es enviada de regreso a ésta y es procesada convenientemente.

### **3.2.1 Historia**

La primera imagen satelital de la Tierra fue tomada el 14 de agosto de 1959 por el satélite estadounidense *Explorer 6.1*. La primera fotografía satelital de la luna fue tomada por el satélite soviético *Luna 3* el 6 de octubre de 1959, en una misión para fotografiar el lado oculto de la luna. También en 1972 los Estados Unidos comenzaron con el programa Landsat, el mayor programa para la captura de imágenes de la tierra desde el espacio.

En la segunda mitad del siglo XX la teledetección espacial surge y se desarrolla, con el apoyo económico de gobiernos, como una técnica encaminada a proporcionar datos para el conocimiento

de la atmosfera y de la superficie terrestre y marina. Muy pronto se convirtieron en operativos dos tipos de satélites: los meteorológicos para la observación de la atmósfera y los satélites denominados de recursos naturales con una alta resolución espacial, diseñados para cartografía y la explotación de los recursos terrestres. Junto a estos programas, se fueron desarrollando, especialmente en la década de los 90, otros destinados al estudio global de la atmósfera, los océanos y la criosfera desde una perspectiva más científica que aplicada. (López, 1999).

El acceso a una plataforma satelital permite obtener imágenes que facilitan el estudio de los patrones de comportamiento del suelo, brindando facilidad al momento de obtener datos. (Vite et. al., 2018).

La información adquirida con detectores a bordo de satélites o aviones ha resultado de gran utilidad para muchas y diferentes aplicaciones: agricultura, minería, fenómenos naturales, detección de aguas contaminadas; asimismo para el monitoreo de bosques y de glaciares, entre otras. (González, 2017).

Las imágenes satelitales tienen diferentes características. Estas dependen de los sensores o detectores con las que son obtenidas, en todos estos sensores se pueden incorporar filtros para seleccionar rangos espectrales de la energía que se desea registrar (bandas o canales espectrales). De acuerdo a la plataforma y al sensor que se utilicen, los sistemas de sensores remotos se diferencian entre ellos por las siguientes características:

- **Resolución espacial.** Es el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen. Define el tamaño del píxel, que es la distancia correspondiente al tamaño de la mínima unidad de información en la imagen. La resolución espacial está relacionada con la escala de trabajo y la fiabilidad de la información.
- **Resolución espectral.** Es el número y el ancho de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Los satélites pueden clasificarse como monoespectrales para caso de los radares que presenta solo una banda, multispectrales de 2 a varias bandas y hiperespectrales capaces obtener información simultánea de cientos de bandas.

- **Resolución radiométrica.** Es la sensibilidad del sensor, es decir, la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Determina el número de niveles de gris recogidos en el film, se expresa en niveles por píxel. A mayor resolución radiométrica, mejor interpretación de la imagen. El píxel mixto es definido por una señal intermedia a las cubiertas que lo componen.
- **Resolución temporal.** Es la periodicidad con que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. Esta en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación) y del diseño del sensor (ángulo de observación y ángulo de cobertura). El ciclo de recubrimiento es el tiempo que tarda el sensor en pasar sobre la misma porción de la Tierra, el periodo orbital es el tiempo que él tarda en circundar la tierra.

### 3.2.2 Aplicaciones en la Agricultura

Actualmente, el campo de aplicaciones o usos en el seguimiento de recursos naturales, comprende un vasto abanico de posibilidades, entre las cuales destacan:

- Estimación de parámetros: biomasa, altura, LAI, WC, entre otros
- Clasificación de cultivos.
- Inventario, predicción y rendimiento de la producción.
- Evaluación de salud y daños de los cultivos.
- Mapa de rastrojos.
- Mapeo y predicción de inundaciones.
- Humedad del suelo y monitoreo de sequías.
- Patrones de irrigación.
- Intensidad de labranza.
- Mapeo de daños por incendios.

Si bien se ha publicado una gran cantidad de trabajos sobre estos temas utilizando sensores ópticos, varias de estas aplicaciones siguen siendo complejas, las mediciones están sujetas a error y en muchos casos es complicado llegar a un método que pueda ser utilizado de manera global. (Cappuccio, et. al., 2017).

### 3.2.3 Imágenes de satélite RapidEye

La constelación de satélites RapidEye fue la primera constelación de satélites de observación de la Tierra, contando con 5 satélites lanzados simultáneamente, con 5 bandas y 5 m de resolución.

Los 5 satélites de la constelación fueron lanzados el 29 de agosto de 2008 mediante un cohete ruso Dnpr desde el cosmódromo de Baikonur, Rusia.

La constelación RapidEye tomó sus últimas imágenes durante el mes de marzo de 2020. Tras 11 años de operación, la constelación integrada por 5 satélites fue retirada por Planet de forma proactiva para cumplir con las mejores prácticas de la exploración espacial y las regulaciones vinculadas a la basura espacial.

Lo constelación RapidEye, integrada por 5 satélites de 150 kg de peso y 7 años de vida útil de diseño, fue fabricada por MDA como contratista principal sobre plataformas satelitales provistas por la británica SSTL. La carga útil de observación óptica fue provista por la empresa alemana Jena Optronik.

Los satélites RapidEye tenían la capacidad de tomar imágenes en 5 bandas espectrales (Cuadro 3.1) con 5 metros de resolución espacial y un ancho de barrido de 150 km. Los satélites operaban en una órbita SSO a 620 km de distancia de la Tierra con una separación de 19 minutos para asegurar captaciones frecuentes sobre un mismo punto en la superficie.

**Cuadro 3.1** Bandas espectrales de los satélites RapidEye.

	<b>Banda</b>	<b>Longitud de onda (µm)</b>	<b>Resolución espacial (m)</b>
Banda 1	Azul	0.440 - 0.510	5
Banda 2	Verde	0.520 - 0.590	5
Banda 3	Rojo	0.630 - 0.685	5
Banda 4	Borde del rojo	0.690 - 0.730	5
Banda 5	Infrarrojo cercano	0.760 - 0.850	5

FUENTE: [www.planet.com/pulse/blackbridge](http://www.planet.com/pulse/blackbridge)

En 2011 RapidEye fue adquirida por la corporación canadiense BlackBridge con presencia comercial en más de 70 países para a través de una red de socios vinculados a las tecnologías geoespaciales. Posteriormente, en el año 2015, la empresa norteamericana liderada por Will Marshal adquiere la constelación RapidEye.

### 3.2.4 Imágenes de satélite Sentinel-2

La Agencia Espacial Europea (ESA), a través del programa Copernicus tiene la constelación de satélites de observación de la Tierra más ambiciosa de la historia, diseñado para proporcionar información precisa y actualizada, para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana.

Las imágenes Sentinel-2 son proporcionadas por los “gemelos” Sentinel-2A y Sentinel-2B, con una resolución de 10 metros en el espectro visible y disponibles para descarga de manera gratuita.

La constelación de satélites Sentinel-2 cuenta con una innovadora cámara multiespectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales (Cuadro 3.2) que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación.

**Cuadro 3.2** Bandas espectrales de los satélites Sentinel-2.

	<b>Banda</b>	<b>Longitud de onda (µm)</b>	<b>Resolución espacial (m)</b>
Banda 1	Coastal aerosol	0.443	60
Banda 2	Blue	0.490	10
Banda 3	Green	0.560	10
Banda 4	Red	0.665	10
Banda 5	Vegetation red edge	0.705	20
Banda 6	Vegetation red edge	0.740	20
Banda 7	Vegetation red edge	0.783	20
Banda 8	Near Infrared (NIR) 1	0.842	10
Banda 8A	Vegetation red edge	0.865	20
Banda 9	Water vapour	0.945	10
Banda 10	SWIR – Cirrus	1.375	60
Banda 11	SWIR 1	1.610	20
Banda 12	SWIR 2	2.190	20

FUENTE: [www.esa.int](http://www.esa.int).

La misión se basa en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, separados por 180 grados, para lograr una cobertura y una descarga de datos óptimos. Cada cinco días los satélites cubren todas las superficies terrestres, grandes islas y aguas costeras.

La misión proporciona sobre todo información útil para las prácticas agrícolas y forestales, y para gestionar la seguridad alimentaria. Las imágenes de los satélites son empleadas para determinar varios índices vegetales, como el área con clorofila en la hoja y el contenido en agua.

Además de vigilar el crecimiento de las plantas, Sentinel-2 puede mapear el estado y los cambios de la superficie terrestre, y observar las selvas. También alertará de la contaminación en lagos y aguas costeras. Las imágenes de inundaciones, erupciones volcánicas y deslizamientos contribuirán a gestionar las consecuencias de estos desastres, y ayudarán en las tareas de ayuda humanitaria.

Sentinel-2A es el resultado de una colaboración estrecha entre la ESA, la Comisión Europea, la industria, los proveedores de servicios y los usuarios de datos. Ha sido diseñado y construido por un consorcio de 60 compañías liderado por Airbus Defense and Space, con el apoyo de la agencia espacial francesa CNES para optimizar la calidad de las imágenes, y del Centro Aeroespacial Alemán DLR para mejorar la recuperación de datos mediante comunicaciones ópticas.

Con su cámara multiespectral y su amplia cobertura, la misión Sentinel-2 ofrece no solo continuidad, sino que amplía la capacidad de las misiones Spot, francesa, y Landsat, estadounidense.

### 3.3 Índices de Vegetación

Como se mencionó anteriormente, la Percepción Remota o Teledetección tiene por finalidad identificar y caracterizar los materiales de la superficie terrestre y los procesos que en ella ocurren a partir de la radiación electromagnética procedente de la misma, entendiendo por tal tanto la emitida por la propia superficie terrestre como la reflejada de la que le llega del sol, prevaleciendo una sobre otra en función del intervalo espectral considerado. En la región óptica del espectro, o espectro solar (0.4 - 3.0  $\mu\text{m}$ ), la radiación procedente de las superficies es la radiación solar reflejada. En general, cuando la radiación solar incide sobre un material, una parte de la misma se refleja en la parte más superficial del mismo y el resto se propaga por su interior. Allí, parte es absorbida y el resto sufre un proceso de dispersión (en todas direcciones) de tal modo que parte de la energía dispersada emerge del material por la misma superficie por la que penetró, sumándose así a la radiación reflejada en la capa superficial. (Gilabert, et. al., 1997).

Por otro lado, los Índices de Vegetación (IV) constituyen un resumen de la información satelital correspondiente a la vegetación, reduciendo la contribución de otros factores (suelo, condición de iluminación, vegetación seca y atmósfera), que permiten una evaluación sistemática de la cantidad, la calidad y el desarrollo de la vegetación de un cultivo. (Balbontin, et. al., 2016).

Por medio de sensores (cámaras) instalados en los satelitales, se registra la intensidad con que las plantas emiten o reflejan radiación en ciertas bandas del espectro electromagnético.

Así pues, al hablar de Índices de Vegetación se refiere específicamente a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena.

Para el análisis de vegetación existen cientos de índices con los cuales se puede saber el estado de alguna área de explotación. Si bien el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es el índice más utilizado en el análisis de la vegetación. Existen otros índices espectrales de gran importancia, los cuales en combinación con este ayudan en una mejor interpretación del estado del cultivo. En los siguientes párrafos, se enlistan solo algunos de esos índices de mayor importancia.

### 3.3.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI corresponde a una medida relativa, acerca del verdor o vigor de la vegetación contenida en los píxeles de una imagen.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada fue introducido por Rouse et. al. (1974) con el fin de producir un índice espectral que separe la vegetación verde de la reflectancia del suelo, usando imágenes de satélite. Se expresa como la diferencia entre las bandas del infrarrojo y rojo cercano, normalizado por la suma de esas bandas. Es el índice más comúnmente utilizado ya que conserva la capacidad de minimizar el efecto topográfico mientras se produce una escala de medición lineal. Además, los errores de división por cero se reducen significativamente. Por otra parte, la escala de medición tiene una propiedad deseada de rango que va de -1 a 1, donde 0 representa la aproximación del valor sin vegetación y los valores negativos indican ausencia de vegetación (Silleos, et. al., 2006).

La obtención del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada se calcula mediante el siguiente cociente:

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{ROJA}) / (R_{NIR} + R_{ROJA}) \quad (3.2)$$

Donde:

*R<sub>NIR</sub>* = Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano.

*R<sub>ROJA</sub>* = Reflectancia de la banda del rojo visible.

El NDVI ha sido uno de los índices de vegetación más empleados como indicador del estado de la vegetación, donde se está aprovechando la máxima absorción producida en el canal rojo debido a los pigmentos de la clorofila y a la máxima reflectividad producida en el infrarrojo debido a la estructura celular de las hojas. El principal inconveniente de este índice de vegetación radica en su tendencia a saturarse en cubiertas vegetales moderadas o densas (Martín, et. al., 2011).

Zenteno G. (2011) realizó un estudio con el propósito de calibrar una metodología que relacione variables biofísicas del cultivo de caña de azúcar con otras variables, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Estrés de Humedad (MSI); todo con el uso de imágenes de satélite Landsat 7 ETM+, en la zona de abastecimiento del Ingenio “Emiliano Zapata”, en el estado de Morelos.

### 3.3.2 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

El Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) combina las reflectividades captadas en el infrarrojo cercano y en el rojo, los mismos del NDVI. Es propio para zonas áridas y se utiliza como factor de corrección de suelo (llamado factor L). Es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación y que está relacionado con la reflectividad del suelo. Para densidades intermedias, como en el caso de las imágenes de satélite, se toma  $L = 0.5$ . Este índice se utiliza con el fin de conseguir corregir algunos efectos externos al valor del NDVI en lugares donde el aporte de la reflectividad del suelo es elevado (Huete, 1988).

El índice SAVI es calculado mediante la siguiente expresión:

$$SAVI = [(R_{NIR} - R_{ROJA}) / (R_{NIR} + R_{ROJA} + L)] * (1+L) \quad (3.3)$$

Donde:

$R_{NIR}$  = Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano.

$R_{ROJA}$  = Reflectancia de la banda del rojo visible.

$L$  = es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación, para densidades intermedias, como en el caso de las imágenes de satélite se toma un valor de 0.5 (Cosero et al.1998).

### 3.3.3 Índice de Agua por Diferencia Normalizada (NDWI)

El Normalized Difference Water Index (NDWI) ha sido usado en varios estudios forestales (Stimson et al.2005, Ito et al.2007), frecuentemente relacionados con el contenido de humedad de la vegetación. Su importancia radica en que la información sobre el contenido de humedad interno de la vegetación es de gran utilidad en la agricultura, en la hidrología y en estudios forestales (Galvão et al.2005). Es calculado a partir de las bandas del infrarrojo cercano (760-900 nm) e infrarrojo medio (1550-1750 nm). Obteniéndose valores que oscilan entre -1 y 1.

El proceso es determinado por medio de la siguiente expresión:

$$NDWI = [(R_{NIR} - R_{SWIR}) / (R_{NIR} + R_{SWIR})] \quad (3.4)$$

Donde:

*R<sub>NIR</sub>* = Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano.

*R<sub>SWIR</sub>* = Reflectancia de la banda del infrarrojo medio.

El NDWI puede calcularse con las bandas 5 o 7 del Landsat en el SWIR, designándose como NDWI (5) y NDWI (7), según corresponda. Algunos autores, como Townsend et al. (2012) lo llaman NDII (Normalized Difference Infrared Index) siguiendo la fórmula propuesta por Hardisky et al. (1983).

### 3.3.4 Índice de Estrés Hídrico (MSI)

De todos los índices de uso común que no miden verdor, el más conocido es el denominado MSI Moisture Stress Index o Índice de Estrés Hídrico (Rocket, 1985), que combina las reflectividades captadas en el infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (SWIR). En las imágenes del Landsat 5 TM, los valores corresponden a la banda 4 y 5 respectivamente. La banda 4 (NIR) responde a la biomasa presente; y la banda 5 es fuertemente afectada por el contenido de agua en la planta.

El resultado es que a medida que la vegetación se seca, produce aumentos en la zona del rojo (0.6 –0.7  $\mu\text{m}$ ), y en el infrarrojo medio en la zona de las bandas de absorción de agua (1.4  $\mu\text{m}$ , 1.9  $\mu\text{m}$ , y 2.6  $\mu\text{m}$ ).

El índice MSI es calculado mediante la siguiente expresión:

$$MSI = R_{NIR} / R_{SWIR} \quad (3.5)$$

Donde:

*R<sub>NIR</sub>* = Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano.

*R<sub>SWIR</sub>* = Reflectancia de la banda del infrarrojo medio.

El MSI puede ser una alternativa para conocer el estado de estrés hídrico de un cultivo o una cobertura vegetal, y está relacionado con la temperatura de la planta y la humedad aprovechable del suelo (Palacios et al., 2012).

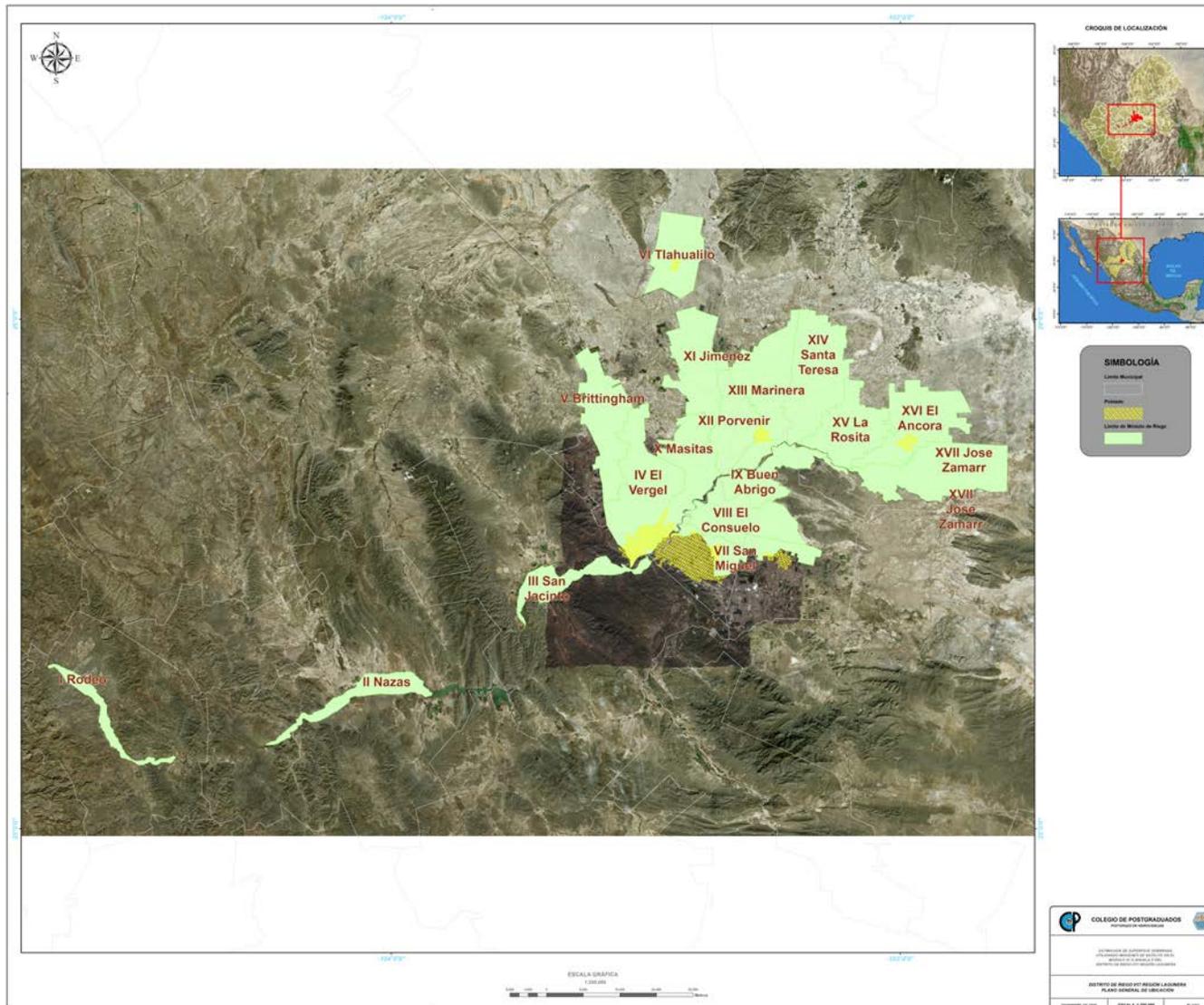
## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Descripción del Área de Estudio

El área de la Comarca Lagunera se localiza en la parte baja de dos cuencas hidrológicas endorreicas donde desembocan los ríos Nazas y Aguanaval. Estos ríos son considerados como de desierto y poseen un régimen de escurrimiento intermitente limitado a los periodos de lluvia anuales (de junio a septiembre) que a lo largo de los últimos siglos y milenios transportaron y depositaron los materiales hidrogeológicos que caracterizan las aguas y los suelos de la Comarca Lagunera. Actualmente este transporte de agua de escurrimiento y depósito de materiales edafológicos son impedidos por las presas regionales que desde los años 1940 interrumpieron el flujo de agua hasta las zonas más bajas, impidiendo también la recarga de numerosos acuíferos pequeños o mantos freáticos colgados localizados en la gran planicie aluvial por donde transitaban los ríos (González, 2012).

El Distrito de Riego 017 Región Lagunera está integrado por 20 Módulos de riego, de los cuales 17 reciben agua del Río Nazas y tres del Río Aguanaval, Figura 4.1. Cuenta con una superficie física total de 286,386 ha, de los cuales 223,822 ha tienen derechos de riego, 193,937 ha en la zona del Río Nazas. Sin embargo, de acuerdo con el volumen de agua disponible que es de 976.65 Mm<sup>3</sup>, la superficie susceptible de riego es de 87,408.88 ha, considerando una lámina de riego promedio de 1.12 m.

En el Distrito de Riego 017 Región Lagunera se identifican tres zonas agrícolas, la primera, localizada aguas abajo de la presa Lázaro Cárdenas que integra a los Módulos I y II. La segunda ubicada aguas abajo de la presa Francisco Zarco, que incluye los Módulos III al XVII. La tercera zona comprende los Módulos XVIII, XIX, y XX, prácticamente en las vegas del Río Aguanaval, desde el municipio San Juan de Guadalupe hasta el de Matamoros. En el Cuadro 4.1, se presenta la superficie dominada, la superficie dotada y la superficie susceptible de riego en el Distrito de Riego 017.



**FUENTE:**  
Elaboración propia.

**Figura 4.1** Localización del Distrito de Riego 017 Región Lagunera.

**Cuadro 4.1** Superficie por módulo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera.

No. de Módulo	Nombre de Módulo	Superficie Física (ha)	Superficie Dominada (ha)	Superficie Susceptible de Riego (ha)	Total de usuarios	Superficie Susceptible de Riego/Usuario (ha)
I	Rodeo	5,006	2,247	2,247	628	3.58
II	Nazas	3,696	3,797	3,797	1,014	3.74
III	San Jacinto	6,372	6,372	6,372	1,544	4.13
IV	El Vergel	21,279	13,437	4,702	1,851	2.54
V	Brittingham	18,293	11,084	4,421	1,843	2.40
<b>VI</b>	<b>Tlahualilo</b>	<b>11,789</b>	<b>7,634</b>	<b>3,895</b>	<b>1,619</b>	<b>2.41</b>
VII	San Miguel	12,686	7,910	3,554	1,536	2.31
VIII	El Consuelo	19,550	15,069	6,731	2,709	2.48
IX	Buen Abrigo	13,665	10,809	4,978	2,129	2.34
X	Masitas	21,588	11,803	5,105	2,177	2.34
XI	Jiménez	19,489	11,606	4,879	1,996	2.44
XII	El Porvenir	14,275	11,639	4,969	2,072	2.40
XIII	La Marinera	21,052	18,485	7,715	3,166	2.44
XIV	Santa Teresa	20,137	18,227	6,986	2,762	2.53
XV	La Rosita	16,975	11,955	5,455	2,123	2.57
XVI	El Ancora	15,726	15,813	5,403	1,643	3.29
XVII	Zamarripa Cobos	29,998	16,046	6,196	2,513	2.47
<b>TOTAL</b>		<b>256,502</b>	<b>193,937</b>	<b>87,408</b>	<b>33,325</b>	<b>2.62</b>

FUENTE: Reglamento del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera", Coahuila-Durango. CONAGUA, 2010.

De la información que se muestra en el cuadro anterior, es evidente que la superficie dominada con la infraestructura de riego del Distrito, es muy superior a la superficie susceptible de riego (87,408 ha) con el volumen concesionado de 976.657 Millones de m<sup>3</sup>. Esto pone de manifiesto que uno de los problemas principales del Distrito de Riego 017 es su sobredimensionamiento, por lo que se vuelve imperante un uso más eficiente del agua, a fin de obtener los máximos beneficios posibles por unidad empleada de este recurso. Aunado a la información mostrada en el Cuadro 4.1, se desprende que las láminas de riego utilizadas superan la lámina promedio de 1.12 m originalmente concesionada.

En el Distrito de Riego 017 se tienen empadronados 33,325 usuarios, la tenencia de la tierra es principalmente ejidal con el 92.92% equivalente a 30,964 usuarios y el 7.08% corresponde a usuarios con pequeña propiedad. En relación a la superficie dotada, 76,961 ha son de tipo ejidal y 10,448 ha pequeña propiedad.

En el Cuadro 4.2 se indica la distribución del tipo de tenencia de la tierra por módulo de riego.

**Cuadro 4.2** Superficie dotada por tipo de tenencia por modulo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera.

Módulo	Núm. de Usuarios	Sector Ejidal		Sector Pequeña Propiedad			Núm. de Usuarios	Total	
		Dominada	De Riego	Núm. de Usuarios	Dominada	De Riego		Dominada	De Riego
I	604	2,001.57	2,001.57	24	245.62	245.62	628	2,247.19	2,247.19
II	924	2,860.67	2,860.67	90	936.35	936.35	1,014	3,797.02	3,797.02
III	1,475	5,502.02	5,502.02	69	869.53	869.53	1,544	6,371.55	6,371.55
IV	1,409	7,079.60	3,560.51	442	6,357.89	1,141.77	1,851	13,437.49	4,702.28
V	1,703	7,546.91	3,848.56	140	3,537.38	572.85	1,843	11,084.29	4,421.41
<b>VI</b>	<b>1,546</b>	<b>6,348.30</b>	<b>3,484.71</b>	<b>73</b>	<b>1,286.07</b>	<b>410.76</b>	<b>1,619</b>	<b>7,634.37</b>	<b>3,895.47</b>
VII	1,510	6,697.42	3,372.21	26	1,213.44	182.06	1,536	7,910.86	3,554.27
VIII	2,623	12,463.32	6,331.42	86	2,605.57	399.71	2,709	15,068.89	6,731.13
IX	2,107	9,477.88	4,778.94	22	1,330.89	199.64	2,129	10,808.77	4,978.58
X	2,082	9,293.01	4,686.31	95	2,510.00	419.08	2,177	11,803.01	5,105.39
XI	1,879	8,511.57	4,295.72	117	3,095.00	583.77	1,996	11,606.57	4,879.49
XII	2,013	9,129.61	4,592.25	59	2,509.77	376.47	2,072	11,639.38	4,968.72
XIII	2,987	13,998.48	6,999.91	179	4,486.95	715.61	3,166	18,485.43	7,715.52
XIV	2,440	12,002.59	5,986.98	322	6,224.69	999.38	2,762	18,227.28	6,986.36
XVI	1,292	7,926.99	4,169.19	351	7,886.87	1,233.95	1,643	15,813.86	5,403.14
XVII	2,287	10,677.99	5,360.33	226	5,368.24	835.73	2,513	16,046.23	6,196.06
<b>TOTAL</b>	<b>30,964</b>	<b>141,398.41</b>	<b>76,961.34</b>	<b>2,361</b>	<b>52,539.30</b>	<b>10,447.54</b>	<b>33,325</b>	<b>193,937.71</b>	<b>87,408.88</b>

FUENTE: Reglamento del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera", Coahuila-Durango. CONAGUA, 2010.

El volumen concesionado a los módulos I al XVII ubicados en el sistema Río Nazas, es de 976.66 Millones de m<sup>3</sup> anuales. Sin embargo, cada año se fija la dotación en función del volumen total almacenado en las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco. En los últimos ciclos la dotación corresponde a medio riego, lo que genera el mercadeo del agua, ya que, al no contar con la dotación de riego suficiente, los usuarios adquieren derechos de riego para producir generalmente forrajes para poder atender la demanda de los productores de leche.

En el Cuadro 4.3 se indican los datos por módulo de riego de lo que se mencionó anteriormente:

**Cuadro 4.3** Volumen concesionado por modulo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera.

Módulo	Nombre de Módulo	Volumen Concesionado (Mm <sup>3</sup> )	Superficie Susceptible a Riego (ha)	Total Usuarios
I	Rodeo	25.12	2,247.19	628
II	Nazas	42.44	3,797.02	1,014
III	San Jacinto	71.22	6,371.55	1,544
IV	El Vergel	52.56	4,702.28	1,851
V	Brittingham	49.24	4,421.41	1,843
<b>VI</b>	<b>Tlahualilo</b>	<b>43.54</b>	<b>3,895.47</b>	<b>1,619</b>
VII	San Miguel	39.73	3,554.27	1,536
VIII	El Consuelo	75.24	6,731.13	2,709
IX	Buen Abrigo	55.65	4,978.58	2,129
X	Masitas	57.07	5,105.39	2,177
XI	Jiménez	54.26	4,879.49	1,996
XII	El Porvenir	55.54	4,968.72	2,072
XIII	La Marinera	86.25	7,715.52	3,166
XIV	Santa Teresa	78.09	6,986.36	2,762
XV	La Rosita	60.98	5,455.30	2,123
XVI	El Ancora	60.40	5,403.14	1,643
XVII	Zamarripa Cobos	69.26	6,196.06	2,513
<b>TOTAL</b>		<b>976.66</b>	<b>87,408.88</b>	<b>33,325</b>

FUENTE: Reglamento del Distrito de Riego 017 “Región Lagunera”, Coahuila-Durango. CONAGUA, 2010.

Ahora bien, la presente investigación se llevó a cabo específicamente en el Módulo VI Tlahualilo, denominado “Asociación de Usuarios de la Tercera Unidad de Riego Tlahualilo A.C.”

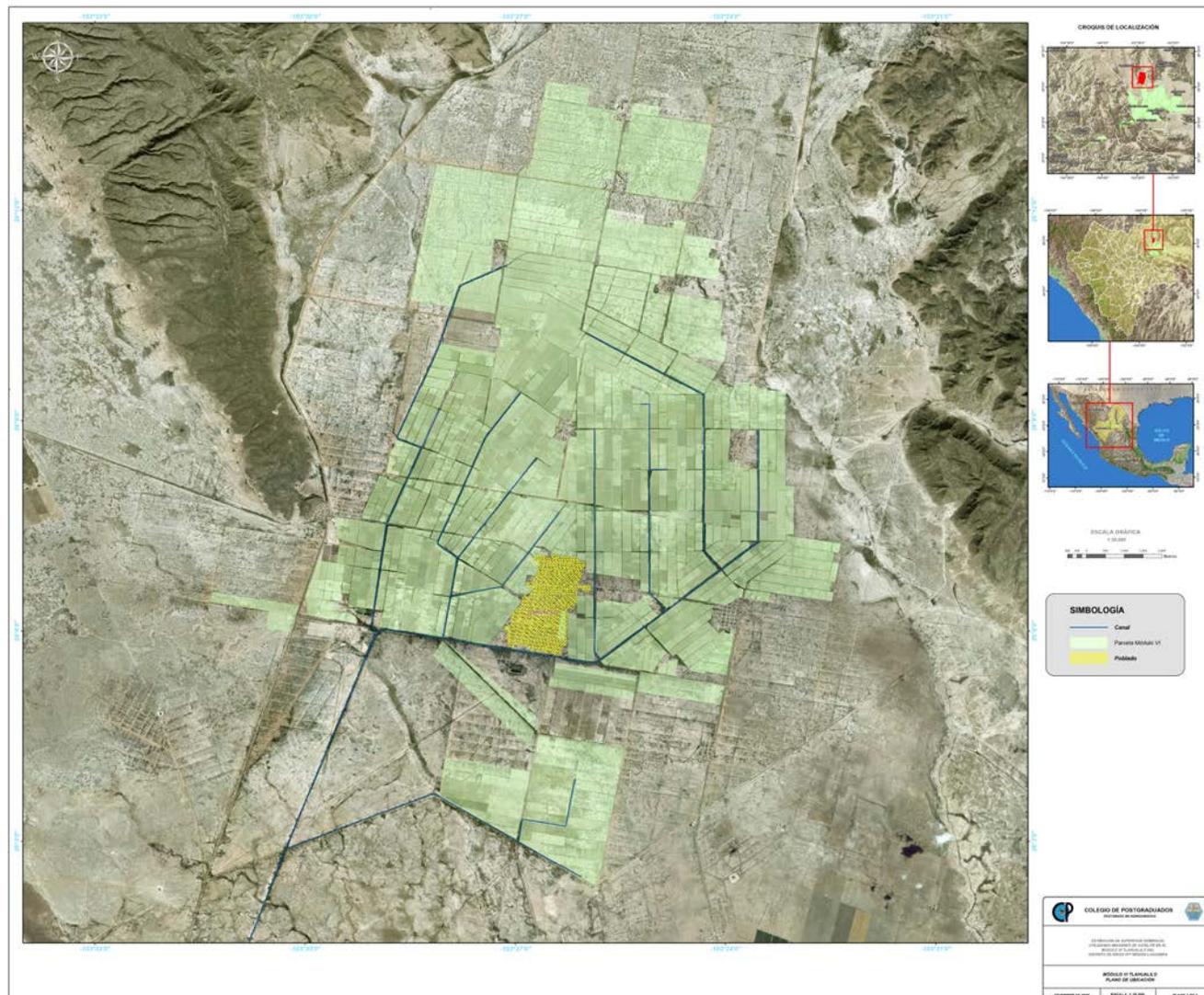
#### **4.1.1 Localización**

El Módulo VI Tlahualilo pertenece al Distrito de Riego 017 Región Lagunera, se encuentra ubicado en el Estado de Durango, en el municipio del mismo nombre, Tlahualilo. Se ubica en el extremo noreste del estado y colinda al norte con los municipios de Jiménez, Chihuahua y Sierra Mojada, Coahuila, al sur con Gómez Palacio, Durango al este con Francisco I. Madero, Coahuila, y al oeste con el municipio de Mapimí, Durango.

El Módulo VI pertenece a la Tercera Unidad de Riego del Sistema de Lázaro Cárdenas-Francisco Zarco. Limita al norte con el poblado Bermejillo, al sur con los ejidos Horizonte y Jauja, al este con el ejido La Campana y al oeste con el ejido Cartagena; todos del municipio de Tlahualilo. Tiene una extensión de 7,634.37 ha, de las cuales 3,895.47 ha son susceptibles de riego, y un volumen de agua concesionado de 43.546 hm<sup>3</sup>. Para la distribución de agua, el módulo cuenta con una concesión de infraestructura consistente en 27.949 km del canal principal Santa Rosa Tlahualilo, 38.808 km de canales laterales y 17.171 km de canales sublaterales, todos revestidos de concreto. (CONAGUA, 2010).

La población actual en el municipio es de 22,895 habitantes que representa el 1.30% del total en el estado. En lo referente a la densidad de población, habitan 4.8 habitantes por kilómetro cuadrado, siendo las comunidades principales: Tlahualilo de Zaragoza (Cabecera Municipal), El Lucero, San Francisco de Horizonte, Jauja, Banco Nacional y San Julio.

La agricultura de riego, en el módulo, se lleva a cabo con el agua concesionada, ya que no cuentan con pozos agrícolas en el área.



FUENTE: Elaboración propia.

Figura 4.2 Localización del Módulo VI Tlahualilo.

#### **4.1.2 Clima**

El clima de la región se clasifica como de tipo desértico y de los subtipos secos semicálidos, con escasas lluvias de verano y temperatura media anual de 20 a 22 °C. En el intervalo 1969-1999 la precipitación media anual varió en el área entre 100 y 300 mm. La temporada de lluvias abarca los meses de mayo a octubre, siendo escasas en noviembre; en el resto del año, las lluvias son muy escasas. Los vientos dominantes tienen dirección de norte a sur, con rango de velocidad de 27 a 44 km/h. La frecuencia de las heladas es de 0 a 20 días para el periodo 1971-2000 y granizadas de 0 a 1 día en la parte norte-noroeste, suroeste y de uno a dos días en la parte sureste para el mismo periodo. La precipitación anual en los últimos ocho años ha sido notablemente menor que la media, debido a la ocurrencia de una sequía severa y prolongada.

#### **4.1.3 Fisiografía**

El estado Durango, está dividido fisiográficamente en cuatro grandes provincias: La Sierra Madre Occidental, Cuencas y Sierras, La Mesa Central y La Sierra Madre Oriental.

Los sectores centro y poniente del área municipal Tlahualilo de Zaragoza, se ubican dentro de la provincia fisiográfica de Cuencas y Sierras; la parte oriental pertenece a la subprovincia Meseta de Coahuila, (Raisz, 1964). El dominio litológico predominante para la zona de estudio corresponde a rocas sedimentarias calcáreas, calcárea-pelítica mesozoica y en menor proporción a roca volcánica.

La provincia de Cuencas y Sierras se caracteriza por sierras aisladas y valles alargados de orientación preferencial NNW-SSE. Con respecto al entorno municipal Tlahualilo de Zaragoza, sus prominentes elevaciones son la sierra de Tlahualilo de 1,920 m.s.n.m., la sierra La Campana con una altura de 1,830 m.s.n.m y la sierra de Banderas con 1,430 m.s.n.m., y planicies muy amplias que fueron extensos cuerpos de agua.

#### 4.1.4 Geología

La geología de la República Mexicana es el resultado de múltiples procesos geotectónicos, que la han afectado durante su evolución. En cuanto a provincias geológicas, el área estudiada ocupa una porción de la provincia geológica Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas y un pequeño sector de dicha área, en la provincia Plataforma de Coahuila (Ortega G, 1991).

Regionalmente y con la finalidad de situar el marco geológico del área de estudio es necesario hacer una reseña de su historia geológica. Esta región se distingue por un ambiente de depósitos de tipo marino durante el Mesozoico, principalmente carbonatos y en menor proporción evaporíticos; estos se depositaron sobre un basamento Paleozoico y Precámbrico, posteriormente algunas zonas son emplazadas durante el Terciario por un arco continental, posteriormente se convierte en una falla transformante, que marca los límites entre los terrenos Sierra Madre y Coahuila. El rasgo fisiográfico más característico en la parte norte del territorio nacional es la flexión que sufre la Sierra Madre Oriental, que adquiere una dirección este-oeste, desde Monterrey hasta Torreón.

La provincia geológica Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas se caracteriza por la presencia de sierras alargadas y plegadas con orientación NNW-SSE, algunas de estas afectadas por fallas inversas o cabalgamientos, descansando sobre un basamento Precámbrico y Paleozoico, conformadas por depósitos marinos del Cretácico Medio (Albiano-Cenomaniano), emplazadas por rocas ígneas del Terciario, intercaladas con amplios valles rellenos de depósitos continentales del Cuaternario.

La provincia Plataforma de Coahuila se caracteriza por sierras alargadas con dirección preferencial N-S, descansando sobre un basamento Precámbrico y Paleozoico, conformada por sedimentos carbonatados y evaporíticos del Cretácico Medio, intercaladas con amplios valles rellenos de depósitos continentales del Cuaternario.

Las rocas que afloran en el área municipal son principalmente metamórficas, sedimentarias e ígneas. Las primeras son parte de basamento de esta región, mientras que las segundas son en su mayoría de origen marino y de edad Cretácica, que descansan sobre un basamento Paleozoico

representado por un pequeño afloramiento en la sierra de Tlahualilo, que consiste de rocas metamórficas como son pizarra, cuarcita y filita. Las rocas ígneas son principalmente extrusivas de composición ácida a intermedias de edad Oligoceno- Pleistoceno. Existen así mismos sedimentos continentales de finales del Paleoceno hasta el Holoceno.

En el contexto geotectónico de la región estudiada queda comprendida en la unidad tectonoestratigráfica Sierra Madre y Coahuila (Campa y Coney, 1983).

#### **4.1.5 Hidrología Superficial**

La totalidad del territorio municipal queda comprendida en las regiones Hidrológicas 35 y 36, pertenece a la vertiente Interior, que no cuenta con salida al mar. Dicha porción está compuesta por cuatro cuencas denominadas: Valle Hundido, Laguna del Rey, Laguna del Guaje-Lipanes y Arroyo La India-Laguna Palomas, que en total suman una superficie de 19,765 km<sup>2</sup>; cabe destacar que no existen en este sector de la región hidrológica escurrimientos de gran magnitud y las corrientes que se generan, son arroyos intermitentes de trayectorias cortas, algunos de los cuales llegan a descargar en depresiones topográficas (cuencas endorreicas), donde forman lagunas no permanentes.

Entre las principales cuencas hidrológicas que conforman al estado de Durango puede citarse la del Río Nazas, cuyas aguas provienen de los ríos Sextín y Ramos que drenan el flanco oriente de la Sierra Madre Occidental y se almacena en las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, de los que se benefician a la agricultura del municipio Tlahualilo de Zaragoza, por medio de sistemas de riego.

Los escurrimientos más importantes que se generan en el estado de Durango son a partir de la Sierra Madre Occidental, siendo los del flanco oriental que benefician a la parte central y noreste del mismo, mientras que los del sector poniente son aprovechados por el estado de Sinaloa, constituyendo la Vertiente del Océano Pacífico.

La disección del drenaje y su distribución, están influenciados fuertemente por el patrón estructural del área y la red hidrográfica se define por la litología; generalmente predomina el de tipo subparalelo a subdendrítico, y en menor proporción subdendrítico y radial.

Además, el municipio Tlahualilo de Zaragoza cuenta con 11 bordos que almacenan agua para uso agropecuario, que complementan el contexto hidrológico superficial.

Respecto al agua subterránea, existen depósitos aluviales con porcentajes de grava, arena y muy poca arcilla; en estos rellenos, la permeabilidad es buena, donde existen pocos pozos perforados para uso agropecuario y doméstico; considerando la escasa precipitación de esta región.

## 4.2 Herramientas y Software Utilizado

Para llevar a cabo la recopilación de información de campo, fue necesario tomar coordenadas de las parcelas seleccionadas mediante el uso de un equipo GPS en el Datum WGS84. Así también, fue necesario generar el archivo fotográfico, para lo cual se utilizó una cámara. Aunado a lo anterior, para realizar los recorridos de campo y traslado, fue indispensable el uso de vehículo. Además, fue utilizado equipo de cómputo para el procesamiento de la información recopilada y el análisis de las imágenes satelitales obtenidas, Cuadro 4.4.

**Cuadro 4.4** Descripción del equipo de campo utilizado.

<b>Equipo</b>	<b>Características</b>
Equipo de computo	<b>Z220 WorkStation HP</b> Intel Xeon CPU E3-1270 V2 a 3.50 GHz 32.0 Gb en RAM 3.0 tb en Disco Duro
GPS	<b>eTrex 30</b> Pantalla de 2.2 pulgadas Brújula electrónica de 3 ejes y altímetro barométrico Receptor compatible con WASS y GLONASS
Vehículo	<b>Camioneta pick-up</b>
Cámara fotográfica	<b>Sony CyberShot DSC-S930</b> Resolución de 10.1 Megapíxeles Zoom óptico 3x LCD de 2.4 pulgadas

FUENTE: Elaboración propia.

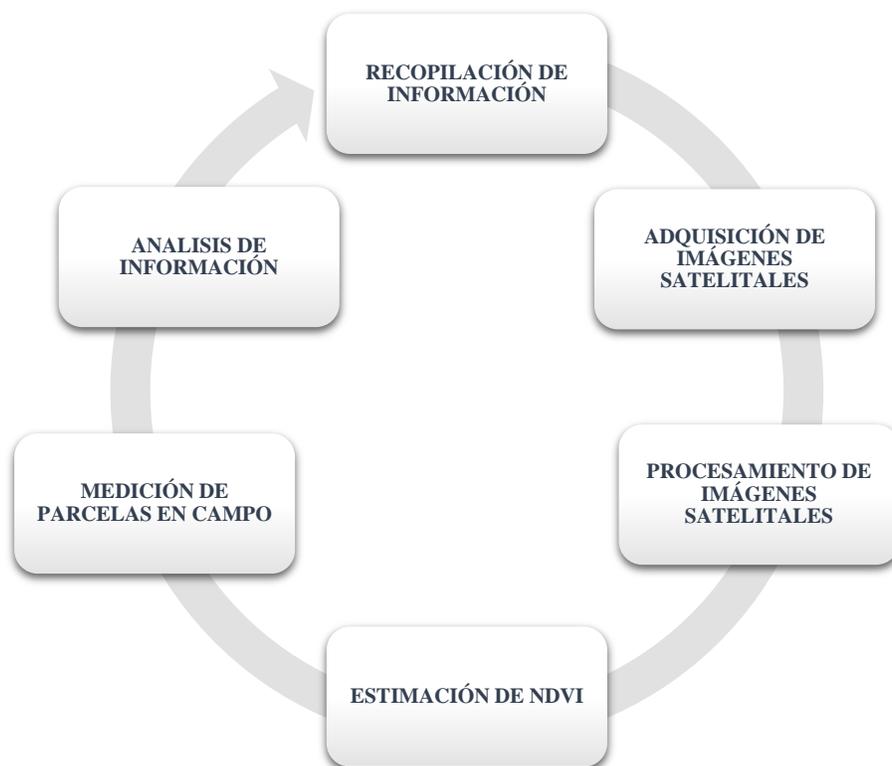
Por otra parte, fue necesario que el equipo de cómputo, además de contar con procesador de textos y de hojas de cálculo, tuviera instalado también el software de Open Source, QGis, para el procesamiento de la información geográfica recolectada.

### 4.3 Metodología

La investigación científica surge de la necesidad del hombre de dar solución a los problemas más acuciantes de la vida cotidiana, de conocer la naturaleza que lo rodea y transformarla en función de satisfacer sus intereses y necesidades. El carácter de la investigación científica es creativo e innovador aplicando lo último del conocimiento científico. (Cortes, *et. al.*, 2004).

En un proceso de investigación, la metodología es una de las etapas en que se divide la realización de un trabajo. En ella, el investigador o los investigadores deciden el conjunto de técnicas y métodos que emplearán para llevar a cabo las tareas vinculadas a la investigación.

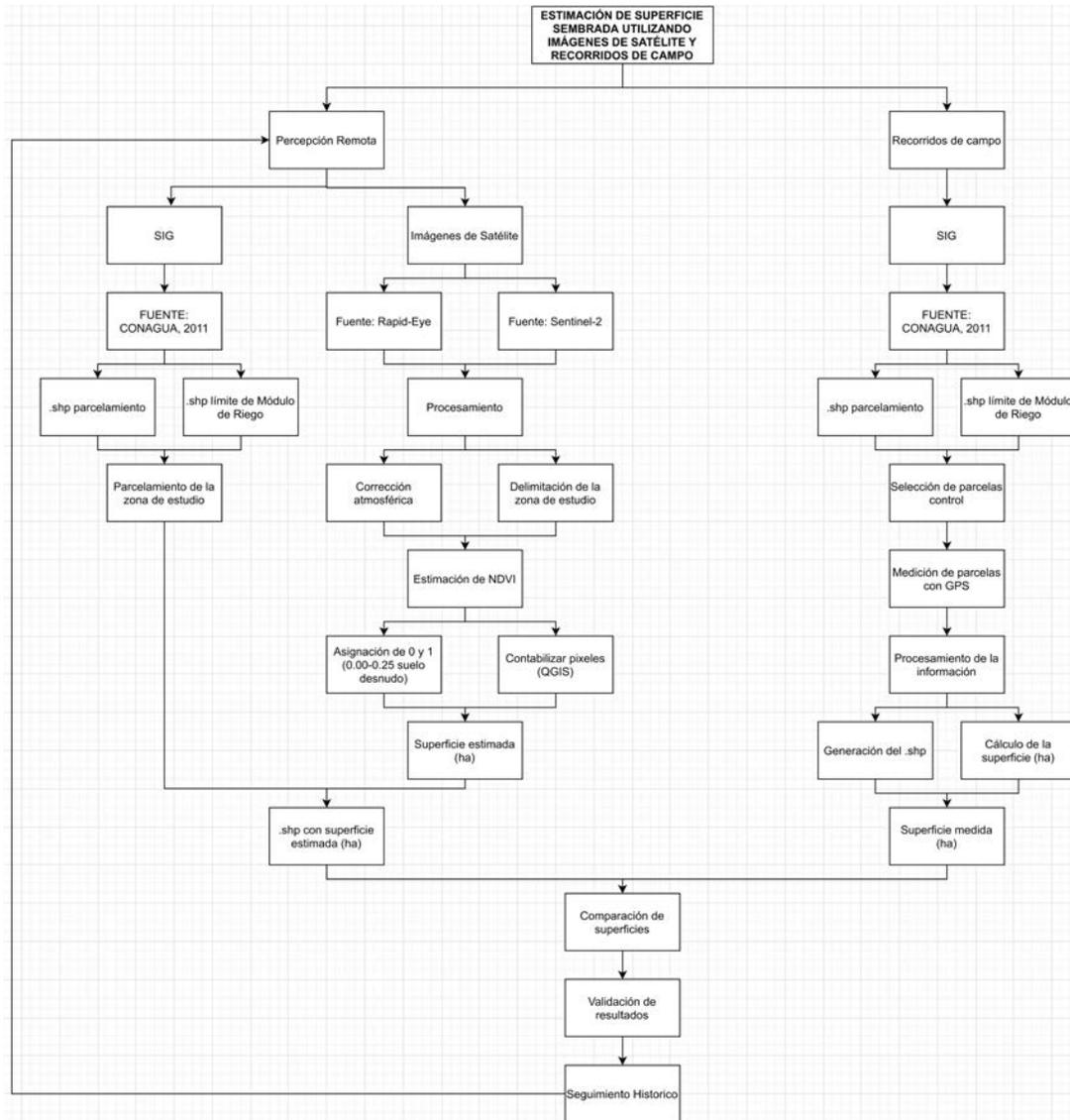
Así entonces, para llevar a cabo el presente trabajo, se utilizó la metodología que a continuación se sintetiza en la Figura 4.3:



FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 4.3** Metodología utilizada para la estimación de superficie sembrada en el Módulo VI Tlahualilo.

Básicamente, la metodología consta de tres etapas: Desarrollo con base en imágenes satelitales RapidEye, verificación en campo para su validación y su aplicación para evaluación temporal con imágenes satelitales Sentinel-2 para otros ciclos agrícolas. La metodología desarrollada se presenta esquemáticamente, Figura 4.4.



FUENTE: Elaboración propia.

Figura 4.4 Esquema de la metodología aplicada.

### **4.3.1 Recopilación de Información**

Para llevar a cabo la presente investigación, como primer paso, fue necesario recopilar toda la información referente al Módulo VI Tlahualilo.

Entre los principales elementos recabados fue el material cartográfico con el que se contaba para tener referencia de ubicación, tales como planos, catastro y archivos .shp.

El Distrito de Riego 017 Región Lagunera de la Comisión Nacional del Agua, proporcionó el Sistema de Información Geográfica, elaborado por el Colegio de Postgraduados en 2011. Las principales capas vectoriales recabadas fueron el parcelamiento o catastro que comprende el módulo y su red de conducción correspondiente.

Se recopilaron estadísticas agrícolas del periodo 2013-2020, con el objetivo de contrastar lo obtenido mediante la estimación satelital con lo reportado por la Comisión Nacional del Agua.

### **4.3.2 Adquisición de Imágenes Satelitales**

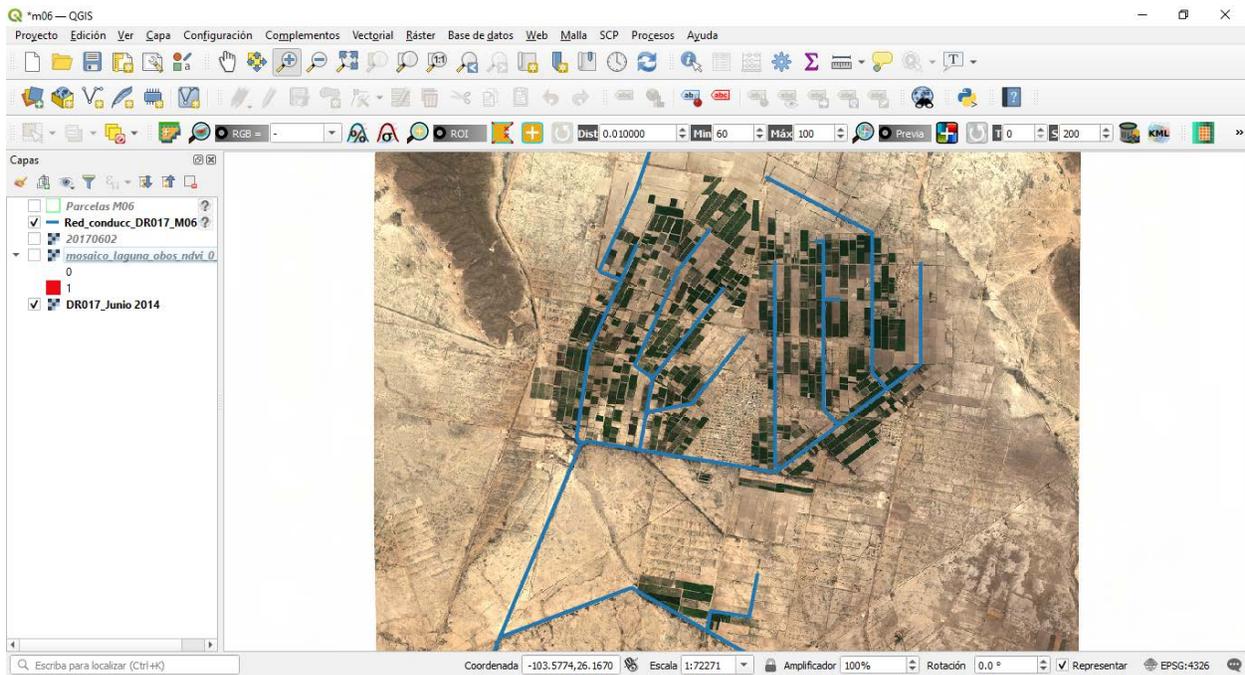
La etapa de adquisición de imágenes satelitales para la presente investigación, se llevó a cabo en dos etapas: la correspondiente al ciclo agrícola 2013-2014 y la correspondiente a los ciclos subsecuentes hasta el ciclo 2019-2020.

En la primera etapa se adquirieron imágenes de satélite tipo RapidEye durante el periodo de febrero a junio del ciclo agrícola 2013-2014. En total se obtuvieron cinco imágenes.

Cada imagen satelital consta de cinco bandas espectrales con una resolución espacial de 5 m, orto rectificadas bajo el sistema de coordenadas World Geodetic System (WGS) 84 y la Proyección Transversal de Mercator (UTM) zona 13 Norte.

Las imágenes RapidEye están organizadas en mosaico y cada una tiene un identificador específico, la zona de estudio se encuentra en el tile ID 1350921.

Para la segunda etapa, se adquirieron imágenes de satélite tipo Sentinel-2, durante el periodo de febrero a junio de los ciclos agrícolas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020. En promedio para cada ciclo agrícola, se obtuvieron 15 imágenes, como la que se muestra en la Figura 4.5.

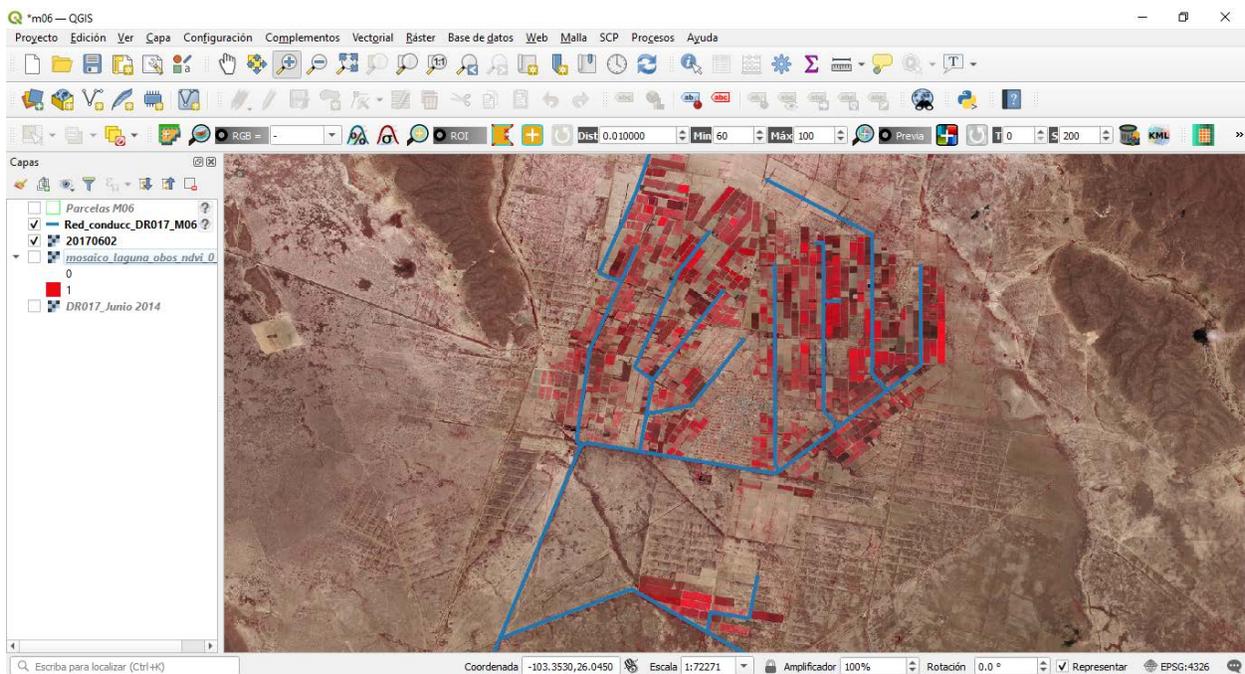


FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 4.5** Ejemplo de imagen RapidEye para el Módulo VI Tlahualilo.

En el caso de las imágenes tipo Sentinel-2, cada imagen consta de trece bandas espectrales con una resolución espacial de 10 m, orto rectificadas bajo el sistema de coordenadas World Geodetic System (WGS) 84 y la Proyección Transversal de Mercator (UTM) zona 13 Norte.

Los tiles ID correspondientes para el área de estudio son 13FRJ y 13RFK; en la Figura 4.6 se ilustra una de las imágenes adquiridas.



FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 4.6** Ejemplo de imagen Sentinel-2 para el Módulo VI Tlahualilo.

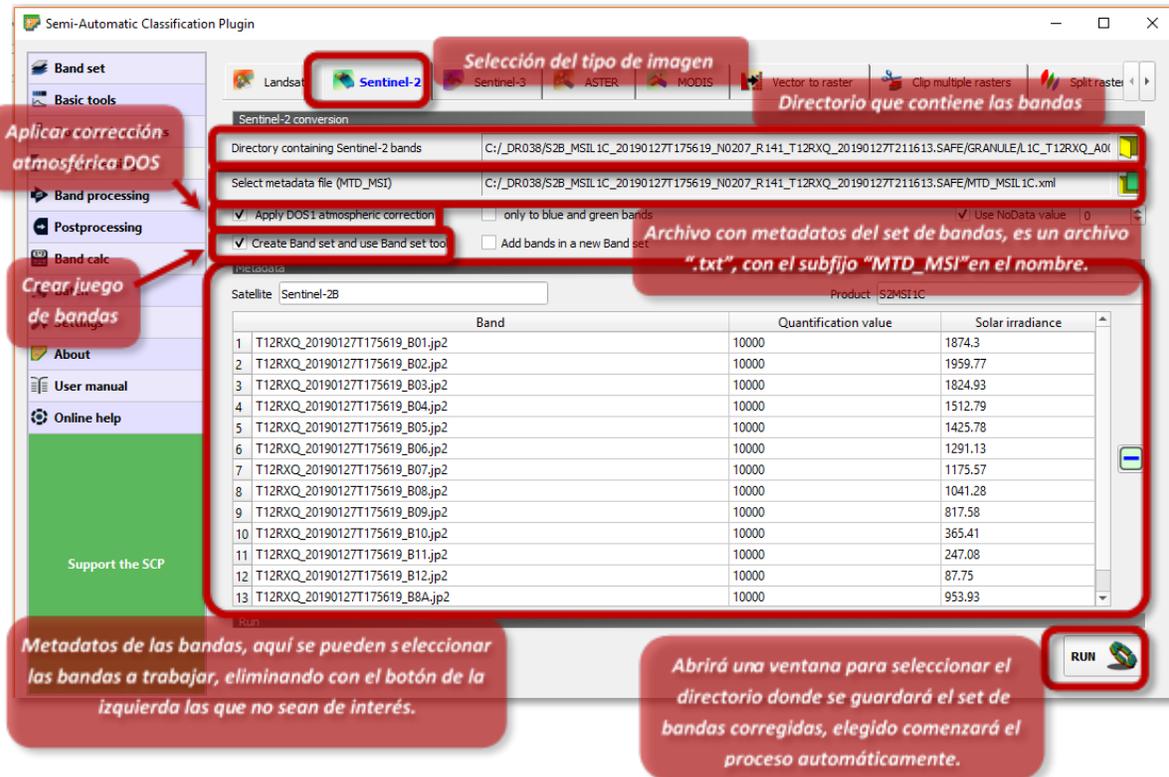
### 4.3.3 Procesamiento de Imágenes Satelitales

Posteriormente a la adquisición de las imágenes de satélite, fue necesario aplicar algunos procesos previos a la estimación del NDVI, entre los cuales se encuentra:

#### i. Corrección atmosférica

Los valores de los píxeles en las imágenes satelitales expresan la cantidad de energía radiante recibida por el sensor en la forma de valores relativos no calibrados simplemente llamados Números Digitales (ND) o brillo. La atmósfera puede afectar la naturaleza de las imágenes de sensores remotos de diferentes formas. Los modelos para efectuar las correcciones estiman el efecto atmosférico, y corrigen parcialmente los datos de acuerdo a la posición del sol y la transmitancia. El Modelo de Sustracción del Objeto Oscuro (DOS) fue propuesto por Chávez (1988) ha sido utilizado en numerosas aplicaciones probablemente por ser de aplicación simple. Postula que la bruma atmosférica incrementa los ND en áreas de las imágenes de agua limpia, profunda y calma, donde por las características físicas deben presentar reflectancia nula. El valor representativo de esa diferencia se sustrae, en cada banda, en todos los píxeles de la escena.

Para llevar a cabo el proceso, fue utilizado el plugin *Semi-Automatic Classification*, disponible en QGis, como se muestra en Figura 4.7:



FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 4.7** Corrección atmosférica Modelo DOS con Semi-Automatic Classification Plugin.

Para fines de la presente investigación, como se citó anteriormente, se usó el método DOS para la corrección atmosférica, manteniendo la resolución espacial de las bandas y se creó un nuevo set de bandas corregidas.

#### 4.3.4 Estimación de NDVI

Después de llevar a cabo la corrección atmosférica de las imágenes de satélite obtenidas, se procedió a realizar el proceso de estimación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), utilizando el método Rouse et. al. (1974).

Como recordaremos, la fórmula utilizada es:

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{ROJA}) / (R_{NIR} + R_{ROJA}) \quad (4.1)$$

Donde:

$R_{NIR}$  = Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano.

$R_{ROJA}$  = Reflectancia de la banda del rojo visible.

Para el caso de las imágenes RapidEye, la fórmula de Rouse queda como:

$$NDVI = (B5 - B3) / (B5 + B3) \quad (4.2)$$

Donde:

$B5$  = Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano en imágenes RapidEye.

$B3$  = Reflectancia de la banda del rojo visible en imágenes RapidEye.

Mientras que para imágenes Sentinel-2, queda como sigue:

$$NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4) \quad (4.3)$$

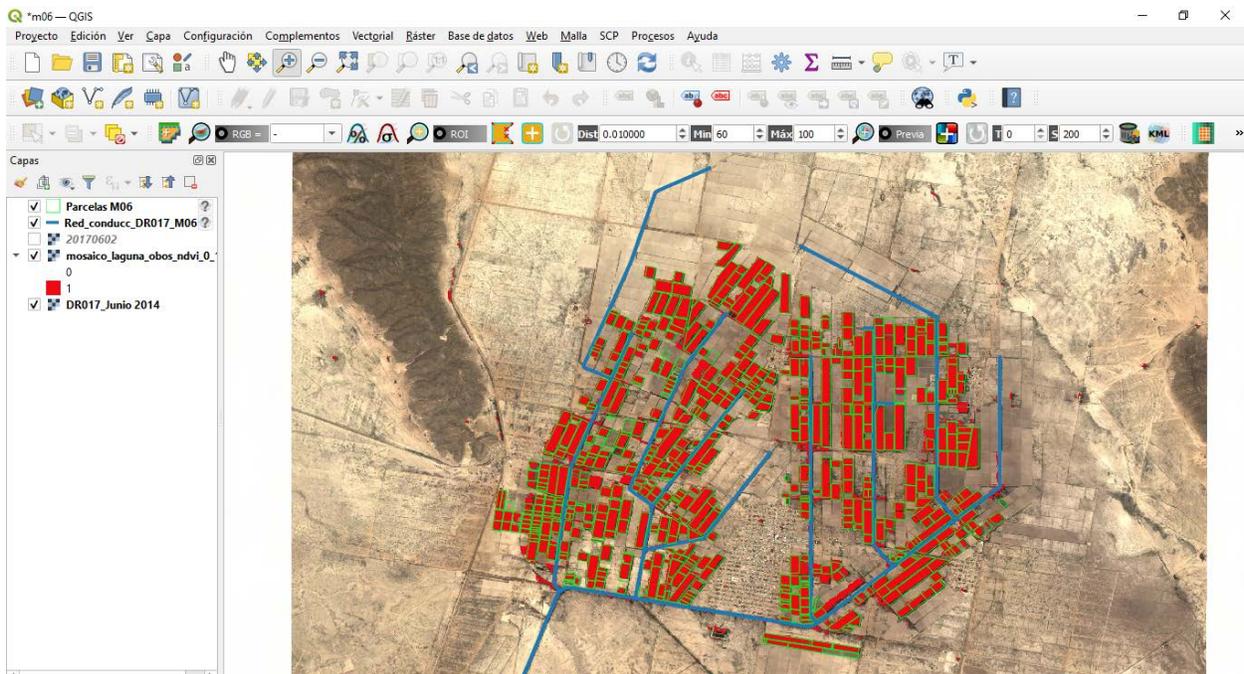
Donde:

$B8$  = Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano en imágenes Sentinel-2.

$B4$  = Reflectancia de la banda del rojo visible en imágenes Sentinel-2.

Así, a partir de la operación con las bandas espectrales se obtuvo una imagen con valores de NDVI para cada píxel. A partir de esta, se clasificaron los píxeles en forma binaria, en valores de 1 y 0; cuando el NDVI fue mayor que 0.22 se consideró vegetación y se les asignó el valor de 1, de lo contrario un 0.

Con el archivo tipo raster el cual contenía los valores binarios 1 y 0, se utilizó el algoritmo *zonal statistics* de QGIS; se realizó la contabilización de píxeles y su asignación a un archivo tipo vector (shape de parcelas), Figura 4.8.



FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 4.8** Visualización de archivo raster (imagen satelital) y archivo vector (shape) del Módulo VI Tlahualilo.

Posteriormente y tomando en cuenta el tamaño de píxel, la sumatoria fue convertida a superficie en hectáreas.

Con la superficie calculada del shape de parcelas correspondiente al SIG, no se consideraron aquellas parcelas en donde el porcentaje de cobertura vegetal era menor al 20% según el cálculo de NDVI.

#### **4.3.5 Medición de Parcelas en Campo**

El ciclo agrícola en el Distrito de Riego 017 Región Lagunera inicia el 1 de octubre del año en curso y termina el 30 de septiembre del año siguiente. Sin embargo, no es hasta los primeros días del mes de marzo cuando el agua proveniente del sistema de presas recorre la infraestructura hidroagrícola para iniciar el riego a las parcelas.

Ahora bien, como parte de la presente investigación, de las áreas identificadas con cultivos agrícolas, se seleccionaron al azar 15 parcelas control y se evaluaron en campo con el objetivo de realizar comparaciones. Se midieron utilizando un equipo Global Positioning System (GPS) marca Garmin modelo etrex30, con una precisión mínima de 2 m, con este mismo equipo se registraron las coordenadas geográficas en los bordes de la parcela, se tomaron fotografías de la parcela y el cultivo, en el mes de junio.

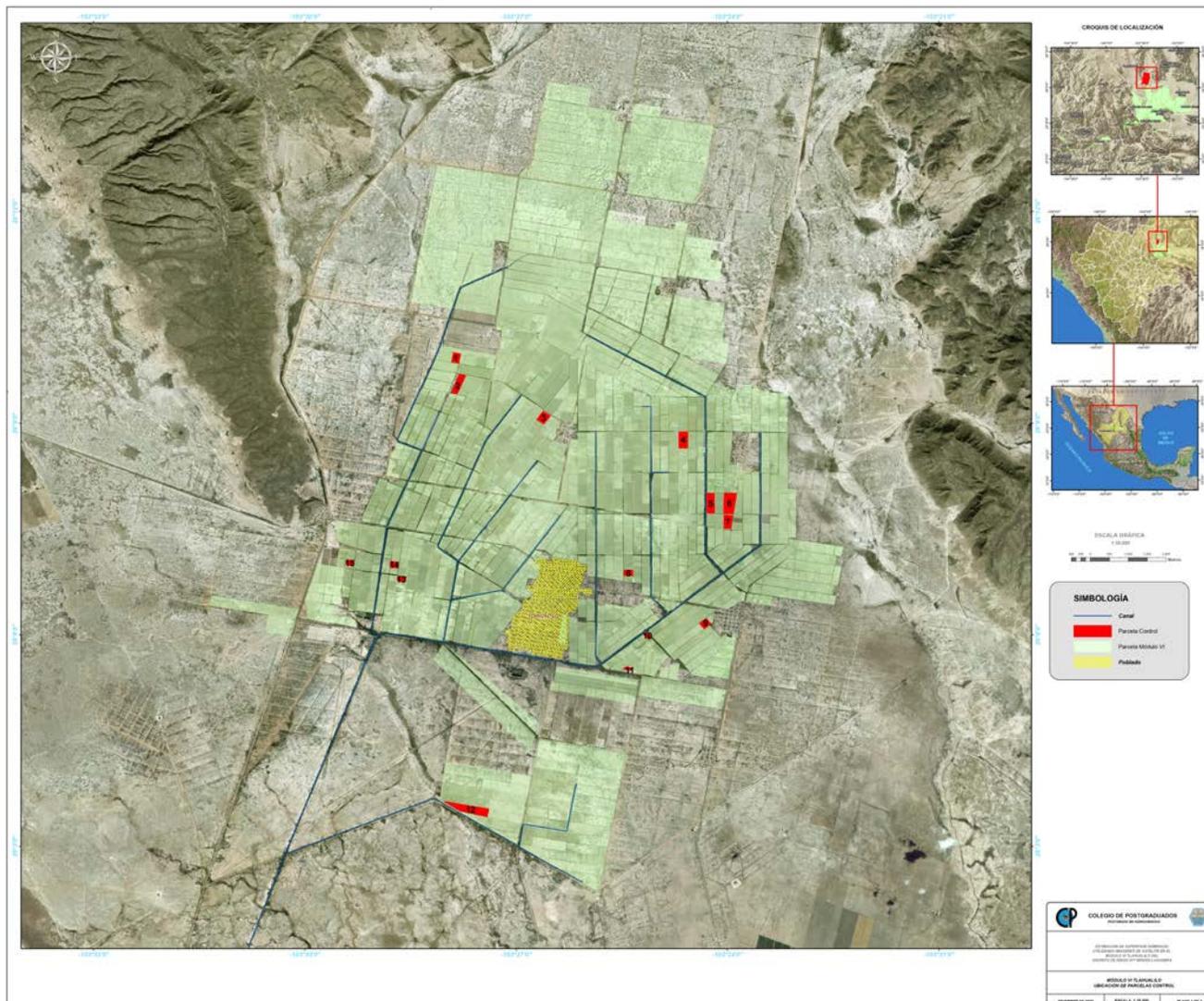
En el Cuadro 4.5 se encuentran identificadas las parcelas evaluadas:

**Cuadro 4.5** Parcelas control seleccionadas en el Módulo de Riego VI Tlahualilo.

ID	Cuenta en Padrón de Usuarios	Sección de Riego	Ejido	Superficie Física † ha
1	6744-00	33	Oquendo	4.11
2	6754-00	33	Oquendo	8.01
3	7105-00	34	Rosas	6.95
4	6626-00	35	Loma Verde	9.27
5	6789-00	36	Palomar	10.30
6	6820-00	36	Palomar	14.79
7	6845-00	36	Zaragoza	7.73
8	7319-00	35	Zaragoza	3.61
9	6884-00	36	Pamplona	4.04
10	6392-00	36	Ceceda	1.64
11	6824-00	36	Ceceda	1.19
12	2788-48	32	Pequeña Propiedad	19.60
13	7275-00	33	Zaragoza	2.75
14	7212-00	33	Zaragoza	3.52
15	6175-00	33	Balcones	2.31

† Superficie física estimada de acuerdo al polígono trazado en el SIG.

La información obtenida en campo se procesó mediante el software Qgis para formar los polígonos correspondientes, calcular la superficie e integrarla al SIG, en una nueva capa de información, que después se comparó con la superficie calculada mediante imagen satelital como se muestra en la Figura 4.9.



FUENTE: Elaboración propia.

Figura 4.9 Ubicación de las parcelas control en el Módulo VI Tlahualilo.

#### **4.3.6 Análisis de información**

La información geográfica recopilada en campo se procesó a través con el software QGis, vinculada con las imágenes satelitales y con las capas shapefile reunidas.

Finalmente, toda la información digital fue integrada y se realizaron los siguientes análisis:

**i. Contraste de la información obtenida mediante imágenes satelitales y la obtenida en campo.**

Como se ha mencionado anteriormente, la primera información relevante que fue obtenida y contrastada, fue la que se obtuvo para el ciclo agrícola 2013-2014; en el cual fueron utilizadas imágenes de satélite RapidEye para calcular NDVI y estimar la superficie sembrada a nivel parcela en el Módulo VI Tlahualilo. De manera simultánea fueron seleccionadas al azar 15 parcelas, las cuales fueron medidas en campo utilizando GPS y procesando la información mediante QGis.

Ambas superficies, NDVI y medición en campo, fueron contrastadas con la finalidad de conocer la precisión del método utilizado y lo cual nos dará la certeza de la información generada por medio de Percepción Remota.

**ii. Seguimiento histórico de la superficie sembrada al ciclo 2019-2020.**

Por otro lado, se realizó el seguimiento histórico de la superficie sembrada estimando NDVI utilizando imágenes de satélite Sentinel-2 y el Sistema de Información Geográfica del Módulo VI Tlahualilo.

Los datos calculados fueron contrastados con las cifras oficiales correspondientes a la superficie programada para cada ciclo agrícola, iniciando el análisis en el ciclo 2014-2015, llevando la estimación por los ciclos subsecuentes y terminando en el ciclo 2019-2020.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los principales resultados obtenidos del presente trabajo fueron los que a continuación se enlistan:

### 5.1 Contraste de la información obtenida mediante imágenes satelitales y la obtenida en campo

Se estimaron las superficies a nivel parcelario en el Módulo VI Tlahualilo a partir de imágenes de satélite RapidEye, de los meses de febrero a junio del ciclo agrícola 2013-2014; se tomó como superficie calculada la correspondiente a la del mes de junio, toda vez que se observó es el mes con mayor índice NDVI, pues todos los cultivos están en la etapa de máximo desarrollo; mientras que en la imagen de febrero y marzo se observa vegetación endémica, en abril los cultivos tienen un índice de vegetación NDVI, en promedio, de 0.32, estando aún en etapa inicial; en el mes de mayo el valor de NDVI, en las parcelas con cultivos, va en aumento pues se encuentran ya bien establecidos y la cobertura vegetal va aumentando. Como referencia en el Cuadro 5.1, se muestran los resultados de la superficie medida para el mes de junio, en las parcelas control:

**Cuadro 5.1** Superficie sembrada calculada a partir de NDVI en el mes de junio en las parcelas control.

ID	Cuenta en Padrón de Usuarios	Sección de Riego	Ejido	Superficie Física † ha	Superficie NDVI ha
1	6744-00	33	Oquendo	4.11	4.10
2	6754-00	33	Oquendo	8.01	7.76
3	7105-00	34	Rosas	6.95	5.84
4	6626-00	35	Loma Verde	9.27	9.27
5	6789-00	36	Palomar	10.30	10.30
6	6820-00	36	Palomar	14.79	14.79
7	6845-00	36	Zaragoza	7.73	7.73
8	7319-00	35	Zaragoza	3.61	3.61
9	6884-00	36	Pamplona	4.04	3.94
10	6392-00	36	Ceceda	1.64	1.64
11	6824-00	36	Ceceda	1.19	0.78
12	2788-48	32	Pequeña Propiedad	19.60	19.53
13	7275-00	33	Zaragoza	2.75	2.46
14	7212-00	33	Zaragoza	3.52	3.21
15	6175-00	33	Balcones	2.31	1.97

† Superficie física estimada de acuerdo al polígono trazado en el SIG.

Como verificación, se realizaron recorridos de campo para medir 15 parcelas control sembradas y beneficiadas con agua de riego y, con equipo GPS y cámara fotográfica se identificaron las superficies de las parcelas control, en el ciclo agrícola 2013-2014. Los resultados obtenidos de la medición mediante recorridos de campo se muestran en el Cuadro 5.2.

**Cuadro 5.2** Superficie sembrada medida a partir de recorridos de campo en las parcelas control.

<b>ID</b>	<b>Cuenta en Padrón de Usuarios</b>	<b>Sección de Riego</b>	<b>Ejido</b>	<b>Superficie Física † ha</b>	<b>Superficie Medida ha</b>	<b>Cultivo</b>
1	6744-00	33	Oquendo	4.11	4.43	Sorgo
2	6754-00	33	Oquendo	8.01	7.83	Algodón
3	7105-00	34	Rosas	6.95	5.70	Sorgo
4	6626-00	35	Loma Verde	9.27	8.97	Algodón
5	6789-00	36	Palomar	10.30	9.41	Sorgo
6	6820-00	36	Palomar	14.79	13.34	Sorgo
7	6845-00	36	Zaragoza	7.73	6.70	Melón
8	7319-00	35	Zaragoza	3.61	3.18	Sorgo
9	6884-00	36	Pamplona	4.04	3.84	Sorgo
10	6392-00	36	Ceceda	1.64	1.65	Sorgo
11	6824-00	36	Ceceda	1.19	1.31	Sorgo
12	2788-48	32	Pequeña Propiedad	19.60	17.09	Nogal
13	7275-00	33	Zaragoza	2.75	2.42	Melón
14	7212-00	33	Zaragoza	3.52	3.08	Algodón
15	6175-00	33	Balcones	2.31	2.65	Algodón

† Superficie física estimada de acuerdo al polígono trazado en el SIG.

Ahora bien, partiendo de la superficie obtenida mediante percepción remota y la obtenida mediante recorridos de campo, tenemos los siguientes análisis plasmados en el Cuadro 5.3:

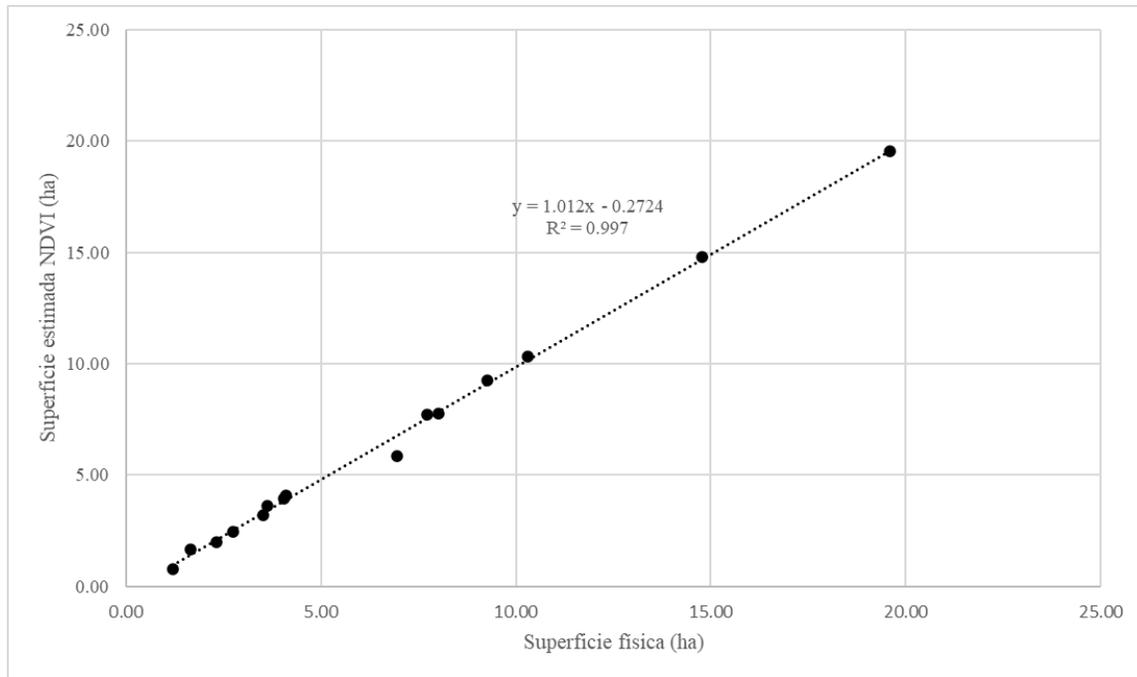
**Cuadro 5.3** Análisis de diferencias de superficies para las 15 parcelas control.

ID	Superficie Física ha	Superficie NDVI ha	Diferencia <sup>‡</sup> %	Superficie Medida ha	Diferencia <sup>‡</sup> %
1	4.11	4.10	-0.24	4.43	7.22
2	8.01	7.76	-3.12	7.83	-2.30
3	6.95	5.84	-15.97	5.70	-21.93
4	9.27	9.27	0.00	8.97	-3.34
5	10.30	10.30	0.00	9.41	-9.46
6	14.79	14.79	0.00	13.34	-10.87
7	7.73	7.73	0.00	6.70	-15.37
8	3.61	3.61	0.00	3.18	-13.52
9	4.04	3.94	-2.48	3.84	-5.21
10	1.64	1.64	0.00	1.65	0.61
11	1.19	0.78	-34.45	1.31	9.16
12	19.60	19.53	-0.36	17.09	-14.69
13	2.75	2.46	-10.55	2.42	-13.64
14	3.52	3.21	-8.81	3.08	-14.29
15	2.31	1.97	-14.72	2.65	12.83
<b>Media</b>	<b>6.65</b>	<b>6.46</b>	<b>-6.05</b>	<b>6.11</b>	<b>-6.32</b>

<sup>‡</sup>Respecto a la superficie física.

Se observa que existen diferencias en cuanto a las mediciones realizadas con respecto a la superficie física de las parcelas control. Sin embargo, mientras que la superficie media estimada vía imagen satelital presenta una diferencia media del -6.05%, la superficie media medida mediante recorridos de campo, presenta una diferencia media del -6.32%, valores muy aproximados.

Con los valores de superficie resultantes, se elaboró un modelo de regresión lineal para cada uno de los métodos de medición, tal como podemos apreciarlo en la Figura 5.1, para la estimación de superficie vía imagen satelital; como en la Figura 5.2, para la medición realizada mediante recorridos de campo:

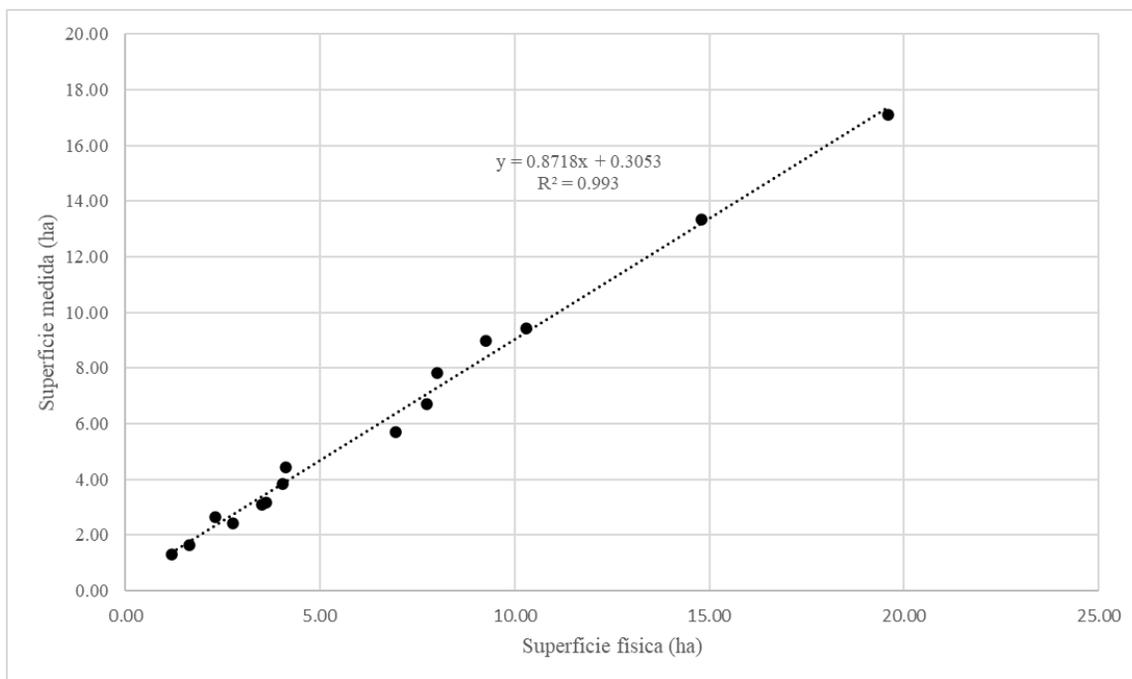


FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 5.1** Relación lineal de la superficie física vs la superficie obtenida mediante imagen satelital.

La correspondencia de los datos obtenidos para la superficie medida mediante recorridos de campo y la superficie física registrada, se ajustó a un modelo de correlación lineal, con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.993, por lo que se puede concluir que la medición de parcelas en campo y la registrada en el padrón de usuarios es precisa.

Los datos del Cuadro 5.3 para la relación que existe entre la superficie física y la de NDVI obtenida mediante imágenes satelitales se ajustaron a un modelo lineal con  $R^2$  de 0.997, lo que implica que la metodología es precisa.



FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 5.2** Relación lineal de la superficie física vs la superficie medida mediante recorridos de campo.

Si bien los resultados de ambos métodos de medición de superficie tuvieron una correspondencia altamente precisa contrastadas con la superficie física de las parcelas, también se hizo una comparación entre los resultados obtenidos por ambos métodos, la cual se muestra en el Cuadro 4.

**Cuadro 5.4** Análisis de diferencias de superficies obtenidas por los dos métodos para las 15 parcelas control.

ID	Superficie Medida ha	Superficie NDVI ha	Diferencia %
1	4.43	4.10	8.03
2	7.83	7.76	0.87
3	5.70	5.84	-2.01
4	8.97	9.27	-3.24
5	9.41	10.30	-8.64
6	13.34	14.79	-9.80
7	6.70	7.73	-13.32
8	3.18	3.61	-11.91



Asimismo, como se mencionó en párrafos anteriores, se realizó la estimación de superficie sembrada a nivel parcelario mediante imágenes satelitales para la totalidad de la extensión del módulo, de la cual los resultados se plasman en el Cuadro 5.5:

**Cuadro 5.5** Superficie estimada mediante imágenes satelitales para el módulo VI Tlahualilo.

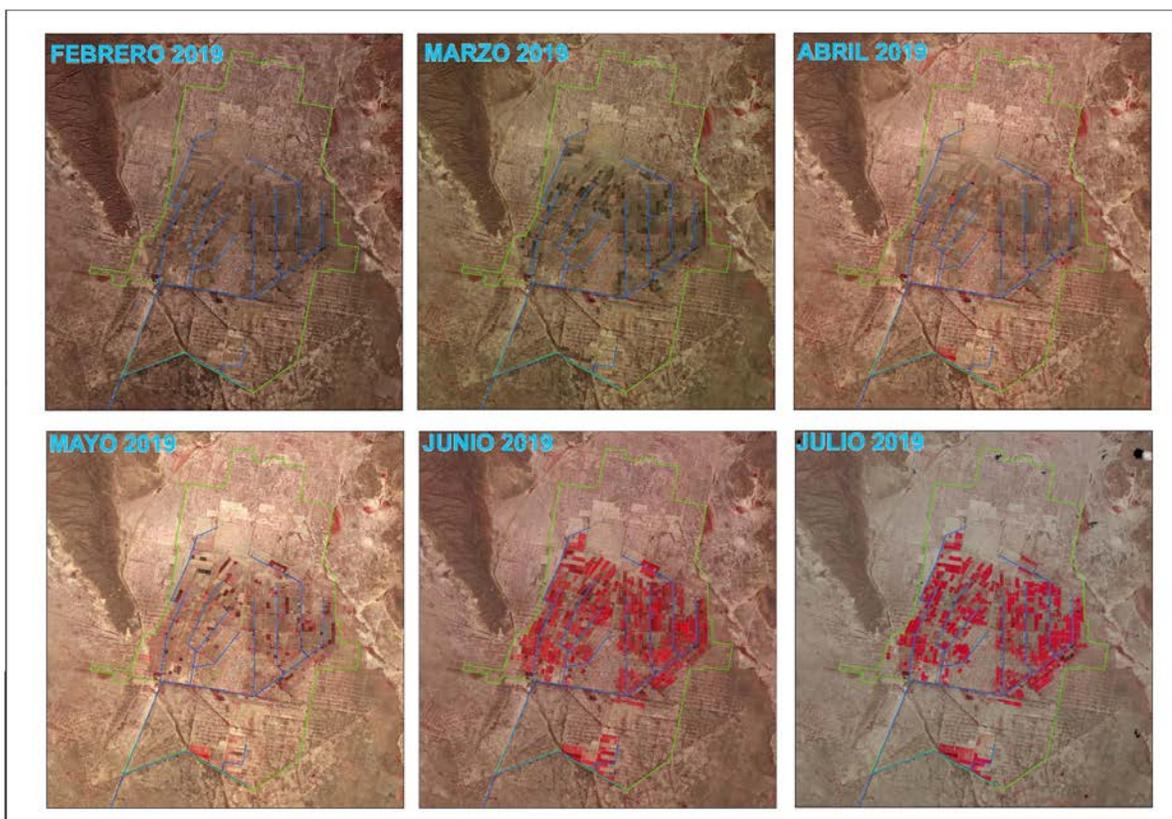
<b>Tile ID</b>	<b>Fecha de Adquisición</b>	<b>Superficie NDVI ha</b>
1350921	15 de febrero de 2014	21.77
1350921	18 de marzo de 2014	22.83
1350921	16 de abril de 2014	41.39
1350921	19 de mayo de 2014	106.44
1350921	22 de junio de 2014	2,853.99

## **5.2 Seguimiento histórico de la superficie sembrada al ciclo 2019-2020**

Como una aplicación, se dio seguimiento histórico de la superficie sembrada de los ciclos 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020. Se utilizaron imágenes Sentinel-2, <https://eos.com/landviewer>, del mes de junio, mes cuando se detectó se presenta el nivel máximo de superficie establecida.

Las imágenes que se adquirieron, como se mencionó anteriormente, provienen del satélite Sentinel-2; el cual es un satélite óptico que fue lanzado el 23 de junio de 2015 y cuyo objetivo es obtener imágenes que ayudan a observar los cambios terrestres. Tiene un escaner multi-espectral que permite obtener información en las dos longitudes de onda, visibles e infrarrojos, permitiendo monitorizar los cambios en la tierra y en la vegetación, así como vigilar a nivel mundial el cambio climático, con una resolución de 10 m. Las imágenes están disponibles de manera gratuita y su frecuencia de revisita es de 5 días.

En la Figura 5.4 se ejemplifica el progreso de la cobertura vegetal durante el ciclo agrícola 2018-2019 utilizando imágenes Sentinel-2.



FUENTE: Elaboración propia.

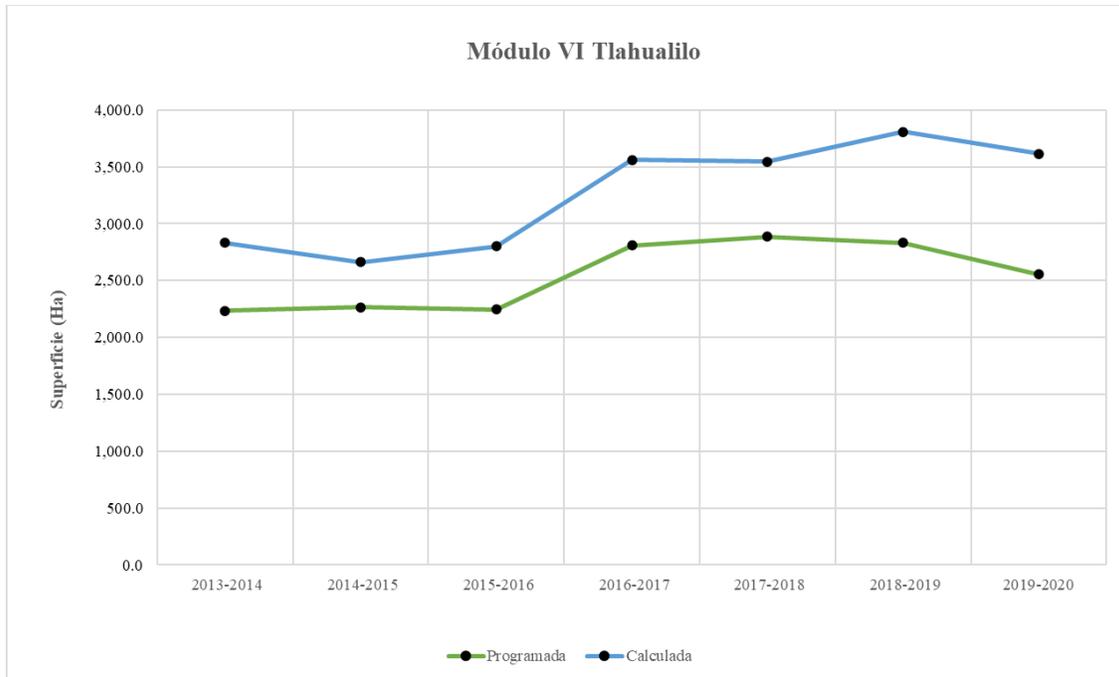
**Figura 5.4** Progreso de la cobertura vegetal en el Módulo de Riego VI Tlahualilo para el ciclo agrícola 2018-2019.

Enseguida, las superficies obtenidas mediante la estimación vía percepción remota fueron contrastadas con las cifras oficiales reportadas por la Comisión Nacional del Agua.

En el Cuadro 5.6 y Figura 5.5 podemos observar los resultados obtenidos:

**Cuadro 5.6** Comparación de superficies programadas y superficies estimadas con imágenes de satélite, Módulo VI Tlahualilo, en los ciclos agrícolas 2013-2014 a 2019-2020.

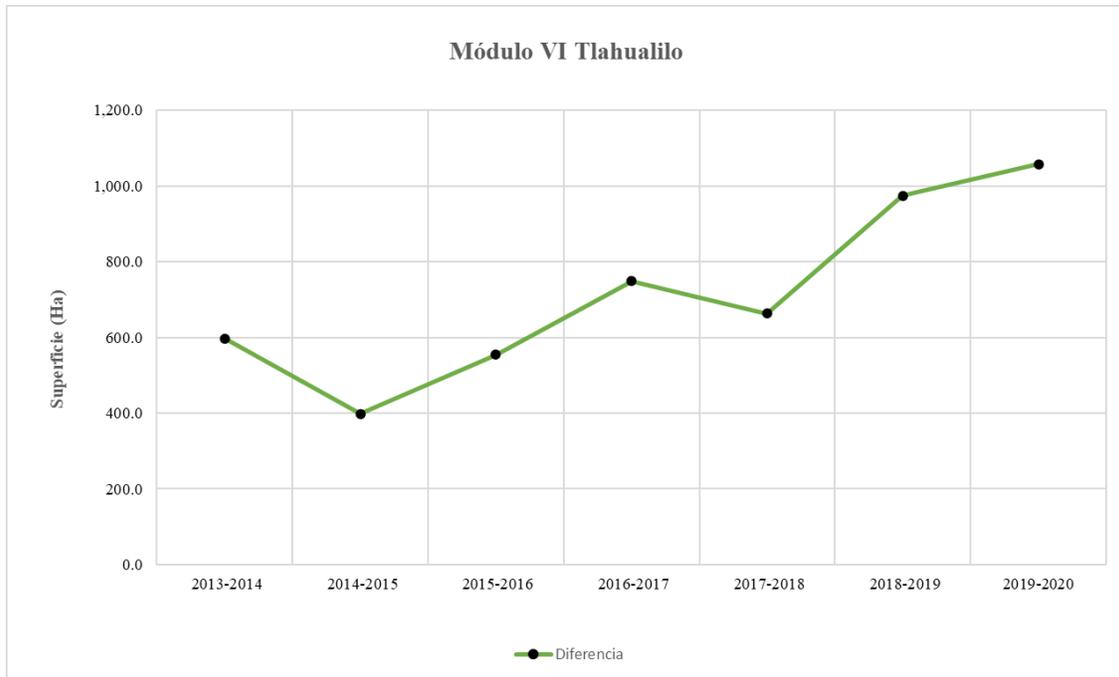
Superficie (ha)	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	PROMEDIO
<b>Programada</b>	2,235.40	2,265.00	2,246.00	2,810.00	2,884.00	2,830.90	2,555.00	<b>2,546.60</b>
<b>Estimada con NDVI</b>	2,832.20	2,662.90	2,800.60	3,559.10	3,546.70	3,805.80	3,612.62	<b>3,260.00</b>
<b>Diferencia (ha)</b>	<b>596.80</b>	<b>397.90</b>	<b>554.60</b>	<b>749.10</b>	<b>662.70</b>	<b>974.90</b>	<b>1,057.60</b>	<b>713.40</b>
<b>Porcentaje</b>	<b>27%</b>	<b>18%</b>	<b>25%</b>	<b>27%</b>	<b>23%</b>	<b>34%</b>	<b>41%</b>	<b>28%</b>



FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 5.5** Superficies programadas y estimadas para el Módulo de Riego VI Tlahualilo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera.

Se observa que existe una diferencia una diferencia entre la superficie autorizada y la estimada con la metodología propuesta, calculada, por lo menos en los ciclos agrícolas inmediatamente anteriores, Figura 5.6.



FUENTE: Elaboración propia.

**Figura 5.6** Diferencia de superficies programadas y estimadas para el Módulo de Riego VI Tlahualilo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera, en los ciclos agrícolas 2013-2014 al 2019-2020.

Como se observa, siempre se presentó una superficie sembrada superior a la programada, entre 18 y 41% y 28% en promedio lo que, lógicamente, requirió mayores volúmenes de agua.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

Los Sistemas de Información Geográfica han demostrado ser una herramienta de gran ayuda para el presente estudio, toda vez que permite procesar e interpretar gran cantidad de información, a fin de convertirse en una herramienta en la toma de decisiones en el uso y manejo sustentable del recurso hídrico. Por otro lado, el ritmo de los avances tecnológicos requiere de herramientas modernas, comunicaciones eficientes, actualización permanente de información, estrategias y metodologías. La velocidad de comunicación que ofrece internet y su llegada irrestricta a todas las computadoras conectadas a la red, hacen que sea un medio ideal para cubrir esas necesidades. (Delgado, 2018).

En el presente trabajo se compararon las superficies calculadas mediante imágenes de satélite y las obtenidas mediante recorridos de campo, mutuamente, así como cada una con la superficie física de las parcelas, y se observó que ambos cálculos presentan un alto grado de fiabilidad.

A partir de las comparaciones anteriores, se expresa la confiabilidad de aplicar las estimaciones con Percepción Remota, la cual fue muy alta respecto a la medición en campo, para la obtención de superficies con precisión, por lo cual son herramientas eficientes para la toma de decisiones. Entonces, pueden ser utilizados en la planificación y manejo de recursos en busca de dar respuesta a las demandas hídricas.

Con la integración de información de acuerdo al objetivo, se pueden estimar volúmenes de agua requeridos por zona o por cultivo, programar riegos de forma eficiente y oportuna, padrón de cultivos, usos consuntivos, eficiencias en infraestructura y sistemas de riego, solo por mencionar algunas aplicaciones.

La combinación de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, permite a los usuarios de sistemas de riego, mantener un control en el seguimiento del desarrollo vegetativo de cultivos, con un mínimo de personal en tiempo real. Generando desde material de apoyo, como

planos y estadísticas, hasta emitir recomendaciones y tomar medidas en caso de eventos extraordinarios, como desastres o contingencias.

Por otro lado, al realizar una revisión histórica sobre las superficies autorizadas en el plan de riego y las que se estiman a través de imágenes de satélite, para el periodo 2013-2020, se observa que en cada ciclo agrícola se ha establecido una superficie mayor a la programada; dando un promedio superior del 28% con relación a la superficie programada y autorizada, lo que naturalmente requirió volumen de agua adicional.

Finalmente, el valor agregado del presente trabajo se da al brindar una herramienta para la implementación o seguimiento de programas de manejo enfocados a los aspectos de: programación, seguimiento y análisis de superficies y volúmenes de riego.

## 6.2 Recomendaciones

Considerando las conclusiones anteriormente planteadas en el presente trabajo, se pueden llegar a las siguientes recomendaciones:

- Resulta necesario que los usuarios del Distrito de Riego 017 Región Lagunera y en particular, los que pertenecen al Módulo de Riego VI Tlahualilo, conozcan y reconozcan la problemática que se ha venido presentando desde ciclos anteriores para adoptar medidas para su solución de manera consensuada.
- La dotación volumétrica puede ser una forma de fomentar el uso más eficiente del agua.
- Otorgar prioridad en la aplicación del riego a la superficie comprometida en programa, es decir la que es amparada por derechos de riego.
- Mantener un gasto adecuado en la toma, acorde con la superficie y el cultivo establecido, para evitar desperdicios y mala distribución interna.
- Mantener un control estricto en los puntos de entrega al Módulo de Riego VI Tlahualilo, con el fin de entregar solo los gastos programados.
- En futuros ciclos de riego, implementar un seguimiento desde la programación del ciclo agrícola, a fin de ubicar antes del riego de presiembra, las superficies y, hasta donde sea posible, los cultivos que se van a establecer, para con ello poder programar las láminas de riego con mayor precisión; así también, a nivel de toma granja y por canal de riego. Con esta acción mejorar la eficiencia en la distribución del agua.

Finalmente, destacar que existen elementos que no han sido considerados en el análisis de Percepción Remota, pues no es posible identificarlos, tales como parcelas tecnificadas o parcelas que son regadas con el método de dotación volumétrica; aspectos que, si bien no es realmente significativo, en un estudio más detallado se deberían incluir.

## VII. LITERATURA CITADA

- Alperín, M. I., V. G. Borges y R. Sarandón. 2002. *Caracterización espacial de los tipos de cobertura de suelo usando técnicas geoestadísticas a partir de información satelital*. Rev. Fac. Agron. 105(1): 40-51.
- Capuccio, L., et al., 2017. *Tecnología satelital y sensores remotos en agricultura*. 16° Curso Internacional de Agricultura y Ganadería de Precisión. Expo de Máquinas Precisas. Argentina.
- CONAGUA, 2006. *Informe del DR 017, Funcionamiento y Operación*. México.
- CONAGUA, 2007. *Estadísticas del agua en México, 2007*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, disponible en: [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM\\_JUNIO2005.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_JUNIO2005.pdf)
- CONAGUA, 2010. *Reglamento del Distrito de Riego 017 “Región Lagunera”, Coahuila-Durango*. Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte.
- CONAGUA, 2011. *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2008-2009*. México.
- De Lira, V.; Barbosa da Silva, B.; Dantas Neto, J.; Sobral de Farias, M. S.; Cândido Bezerra, M. V.; Soares Franco, E. y Centeno, C. R. M. 2009. *Análise espectral de índice de vegetação em área irrigada com cana-de-açúcar*. Engenharia Ambiental 6(1):113-120.
- Espinosa H., José M. 2014. *Clasificación supervisada de cultivos agrícolas usando imágenes de satélite tipo RapidEye en el Distrito de Riego 017, Región Lagunera*. Colegio de Postgraduados. México.
- Espinosa E., José L. 2013. *Tecnologías para ofrecer servicios de asesoramiento en riego*. Colegio de Postgraduados. México.
- Delgado, Hugo. 2018. *Ventajas y beneficios de tener una página Web en Internet*. Universidad de Guadalajara. Disponible en: [www.disenowebakus.net](http://www.disenowebakus.net). Fecha de consulta: 03 de agosto de 2020.
- Gilabert M., A., et al., 1997. *Acerca de los índices de vegetación*. Revista de Teledetección. No. 8. España.
- Huete A. 1988. *A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)*. Remote Sensing of Environment 25: 295-309.
- López, L. A. y A. Sánchez C. 2010. *Comarca Lagunera: procesos regionales en el contexto global*. UNAM, Instituto de Geografía. México. 436 p.
- Manjarraez D., C., C. Pinedo A., C.E. Vélez S., y A. Pinedo A. 2007. *Separabilidad espectral de cultivos agrícolas con Imágenes Landsat TM*. Tecnociencia Chihuahua. 1(2): 48-56.
- Martín F., Corbera J., Marchan J. F., and Gonzáles A. 2011. *RapidEye and the Rededge band for modelling the vegetation and the recovery of the soil moisture*. Mapping 50:10-20.

- Muñoz A., Pedro. 2013. *Apuntes de teledetección: índices de vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales. Chile.
- Ortega Sánchez, J.L., R. Hernández S. y P. Rodríguez C. 2006. *Prevalencia de Coccidiosis (Eimeria Spp) Y Trichostrongylosis (Trichostrongylus Spp) caprina en los municipios de Tlahualilo, Gómez Palacio, Lerdo Dgo., Matamoros y San Pedro, Coahuila*. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas. 2006, V(2), 217-223.
- Palacios V., E. and H. Flores M. 2013. *Crop evapotranspiration estimation through the use of satellite images*. Journal of Earth Science and Engineering 3: 663-671
- Palacios E., J. Palacios y L. Palacios. 2011. *Agricultura de riego asistida con satélites*. Tecnología y Ciencia del Agua 2: 69-81.
- Paz P., F., E. Palacios V., M. Martínez M. y L.A Palacios S. 2005. *Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos*. Agrocienca. 39: 293-301.
- Ramírez P., F., F. Paz P., M. Martínez M., E. Palacios V., E. Mejía S., y E. Rubio G. 2010. *Clasificador genérico de objetos en imágenes AVHRR*. Terra Latinoamericana 28 (1): 1-13.
- Rocha R., M. y Vélez B., J. 2006. *Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio de Tlahualilo de Zaragoza, Durango*. Fideicomiso de Fomento Minero del Servicio Geológico Nacional. México.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering. 1974. *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS*. Third ERTS Symposium, NASA SP-351. Washington, D. C. 1:309-317.
- Silleos N., G., K. Alexandridis T., K. Gitas, Z. Gitas L., and K. Peakis (2006). *Vegetation Indexes: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the last 30 years*. Geocarto International. 21:4. 21-28.
- Tucker, C. J. 1979. *Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation*. Remote Sensing of Environment, 8(2):127-150.
- Zenteno C., G. A., E. Palacios V., L. Tijerina C. y H. Flores M. 2017. *Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol. 8, núm.7, pp. 1575-1586.
- Zhang, P. and B. Anderson. 2005. *Potential monitoring of crop production using a satellite-based Climate-Variability Impact Index*. Agricultural and Forest Meteorology. 132(3):344-358.