



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

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

**CAMPUS MONTECILLO**

**PROGRAMA DE POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

**EVALUACIÓN DEL ESTADO DE  
DESARROLLO DEL TRIGO EN  
FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES  
CLIMÁTICAS**

**JOSÉ LUIS ESPINOSA ESPINOSA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2018**

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe José Luis Espinosa Espinosa, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partcipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Enrique Palacios Vélez, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Evaluación del estado de desarrollo del trigo en función de las condiciones climáticas

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 20 de Noviembre de 2018

  
Firma del  
Alumno (a)

  
Dr. Enrique Palacios Vélez  
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: Evaluación del estado de desarrollo del trigo en función de las condiciones climáticas, realizada por el alumno: **José Luis Espinosa Espinosa**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

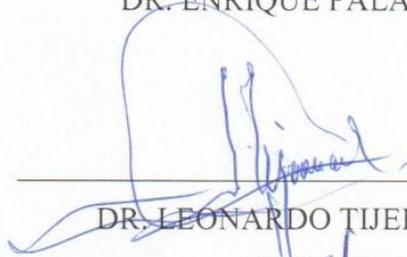
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



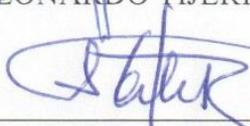
DR. ENRIQUE PALACIOS VÉLEZ

ASESOR



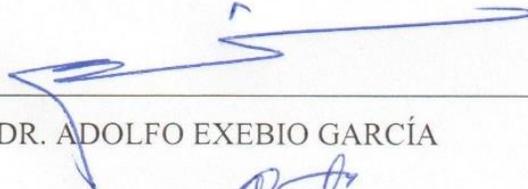
DR. LEONARDO TIJERINA CHÁVEZ

ASESOR



DR. CARLOS ALBERTO ORTIZ SOLORIO

ASESOR



DR. ADOLFO EXEBIO GARCÍA

ASESOR



DR. CESÁREO LANDEROS SÁNCHEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2018

# **EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DESARROLLO DEL TRIGO EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS**

**José Luis Espinosa Espinosa, Dr.**

**Colegio de Postgraduados, 2018**

## **RESUMEN**

El trigo es uno de los principales granos para la alimentación, el cual, junto con el maíz y el arroz, se producen en muchos países. Se cultiva trigo en más de 20 estados de la República Mexicana. Sin embargo, el 80% de la producción se concentra en la zona norte (principalmente en el noroeste) y en Guanajuato. En el Distrito de Riego No. 38, Río Mayo, en el sur del estado de Sonora México, el cultivo del trigo representa alrededor del 70% del área bajo riego, (unas 68,000 ha), por lo cual se han hecho varios estudios tendientes a relacionar los rendimientos del cultivo, con valores del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) obtenido de imágenes de los satélites Landsat 7, Landsat 8, Deimos y actualmente Sentinel 2A y 2B. El NDVI se utiliza ampliamente para mejorar la discriminación de cubiertas vegetales, medir el vigor de las plantas y la producción de la biomasa. Se ha observado que los cultivos requieren ciertas cantidades de energía para lograr cada etapa de su desarrollo, estas cantidades de energía se estiman de acuerdo a los grados-día acumulados. También se ha observado que hay una relación entre la variación del índice NDVI y los grados días acumulados. En los últimos años las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo del trigo se han estado comportando de manera errática, lo cual ha ocasionado reducciones importantes en los rendimientos del cultivo debido al cambio climático. En esta investigación se realizó una modelación del crecimiento del cultivo de trigo utilizando los valores acumulados de los índices NDVI y ajustando la variación a una función sigmoideal del tipo logístico. De esta manera, fue posible calcular las tasas de crecimiento de este cultivo para cada uno de los años y así mismo evaluar el estado de desarrollo del trigo en función de las condiciones climáticas, lo que permitió establecer un modelo de predicción temprana de rendimientos para el cultivo de trigo.

***Palabras clave:*** Agricultura de precisión, índices de vegetación, percepción remota, cambio climático, modelo logístico.

# EVALUATION OF WHEAT DEVELOPMENT STATE RELATED TO CLIMATIC CONDITIONS

**José Luis Espinosa Espinosa, Dr.**

**Colegio de Postgraduados, 2018**

## ABSTRACT

One of the main grains for food is wheat, which, together with corn and rice, is produced in many countries. Wheat is grown in more than 20 states of the Mexican Republic. However, 80% of its production is concentrated in the north (mainly in the northwest) and in Guanajuato. In the Irrigation District 38, Río Mayo, in the south of the state of Sonora Mexico, the cultivation of wheat represents around 70% of the area under irrigation, (approximately 68,000 ha), for this reason several studies tending to relate crop yields with the normalized difference vegetation index (NDVI) gathered from images of Landsat 7, Landsat 8, Deimos and currently Sentinel 2A and 2B have been carried out. The NDVI is widely used to improve the discrimination of vegetation cover and to measure the plant growth (vigor) and biomass production. It has been observed that crops require certain amounts of energy to achieve each stage of their development, these amounts of energy are estimated according to the accumulated degree-days. It has also been observed that there is a relationship between the variation of the NDVI index and the cumulative days. In recent years the optimal conditions for the development of wheat cultivation have been behaving erratically, this has caused significant reductions in crop yields due to climate change. In this research, a modeling of the crop growth was carried out by using the accumulated values of the NDVI indexes and adjusting the variation to a sigmoidal function of the logistic type, the growth rates of the wheat crop were calculated for each of the years, thus it was possible to calculate the growth rates of this crop for every year and also to evaluate the wheat development state according to the climatic conditions, which allowed to establish a model of early yield prediction for the wheat crop

**Keywords:** *Precision Agriculture, normalized difference vegetation indexes, remote perception, climate change, logistic model.*

## **RECONOCIMIENTO**

Mi reconocimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca que me otorgó para realizar estudios de doctorado y la presente investigación en el Postgrado de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados del campus Montecillo.

También mi reconocimiento al Distrito de Riego 038 Río Mayo, por su gran colaboración para realizar este trabajo, en especial al Ing. Ernesto Rodríguez Limón, encargado de Proyectos con Tecnología de la Jefatura de Riego y Drenaje, por su valioso apoyo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, Antonio Espinosa Espinosa y Patricia Espinoza Espinoza por creer en este proyecto y por todo su apoyo y cariño.

A mis hijos Joshua Espinosa Navarrete, Emiliano Espinosa Navarrete y Susana Espinosa Navarrete por el tiempo robado a ustedes en la realización de mis estudios.

Al Colegio de Postgraduados y su cuerpo académico por los conocimientos y habilidades adquiridos dentro de la formación académica.

Al Dr. Enrique Palacios Vélez, por todo el tiempo que dedicó para dirigir esta tesis.  
Gracias por su paciencia, orientación y buenas sugerencias.

A los miembros de mi consejo particular y sinodal, Doctores: Leonardo Tijerina Chávez, Carlos Alberto Ortiz Solorio, Adolfo Exebio García, Cesáreo Landeros Sánchez y Roberto Ascencio Hernández por su tiempo, sus valiosas observaciones, sugerencias, contribuciones y disposición en la elaboración del trabajo de investigación.

Al equipo de apoyo administrativo por los trámites y disponibilidad.  
María Elena Álvarez Barragán y Patricia Ibarra Alonso, muchas gracias.

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis:

A *Dios* por darme la oportunidad de vivir

A mis hijos: *Joshua, Emiliano* y *Susana* por ser mi razón de ser y mi orgullo e inspiración.

A mis padres: *Antonio Espinosa E.* y *Patricia Espinoza E.* que me han apoyado en todo momento y me han animado a seguir adelante.

A mis hermanas: *Alejandra, Judith, Angélica* y *Diana* porque siempre han creído en mí.

A mi hermano: *José Antonio* que siempre fue mi ejemplo a seguir, y a *Juan Carlos* porque siempre me ha brindado su valioso apoyo.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.2.    OBJETIVOS .....	4
1.2.1 <i>General</i> .....	4
1.2.2 <i>Específicos</i> .....	4
1.3.    HIPÓTESIS .....	4
1.3.1 <i>General</i> .....	4
1.3.2 <i>Particulares</i> .....	5
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
2.1IMPORTANCIA DEL CULTIVO DE TRIGO .....	5
2.2FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS RENDIMIENTOS DEL TRIGO .....	6
2.2.1 <i>Preparación, tipo de suelo y su fertilidad</i> .....	7
2.2.2 <i>Riego</i> .....	8
2.2.3 <i>Daño por altas temperaturas</i> .....	14
2.2.4 <i>Daño por frío</i> .....	19
2.2.5 <i>Época de siembra</i> .....	20
2.2.6 <i>Densidad de siembra</i> .....	22
2.2.7 <i>Variabilidad del suelo</i> .....	23
2.2.8 <i>Fertilización</i> .....	25
2.2.9 <i>Control de malezas</i> .....	26
2.3ESTUDIOS DE RESPUESTA DE LA PLANTA .....	27
2.3.1 <i>Unidad de Calor</i> .....	27
2.3.2 <i>Horas frío</i> .....	32
2.3.3 <i>Evapotranspiración del cultivo</i> .....	40
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>42</b>
3.1.    MATERIALES.....	42

3.2.	ÁREA DE ESTUDIO.....	42
3.3.	MÉTODOS.....	45
3.3.1.	<i>Descarga de imágenes satelitales .....</i>	45
3.3.2.	<i>Manejo de imágenes satelitales .....</i>	45
3.3.3.	<i>Método para obtener el NDVI de las imágenes satelitales en Qgis.....</i>	46
3.3.4.	<i>Generar base de datos con la información del NDVI para cada parcela y por ciclo .....</i>	51
3.3.5.	<i>Método para calcular la evapotranspiración.....</i>	56
3.3.6.	<i>Método para calcular la tasa de crecimiento del NDVI y ETC.....</i>	56
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>59</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>71</b>
5.1.	CONCLUSIONES.....	71
5.2.	RECOMENDACIONES .....	72
<b>6.</b>	<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Información sobre Módulo 15. NDVI y Unidades Calor.....	4
<b>Cuadro 2.</b> Pérdidas del rendimiento calculado por fecha de siembra, durante los ciclos agrícolas 2005-06 a 2007-08 en el sur de Sonora. ....	22
<b>Cuadro 3.</b> Elementos esenciales en la nutrición vegetal, símbolo químico y concentración foliar promedio.....	25
<b>Cuadro 4.</b> Registro promedio mensual de horas frío del 2004 a 2008.....	37
<b>Cuadro 5.</b> Total de horas frío acumuladas durante el período de noviembre al mes de abril de cada ciclo agrícola.....	37
<b>Cuadro 6.</b> Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> ) promedio comercial registrado en las zonas productoras de trigo en Sonora.....	37
<b>Cuadro 7.</b> Superficie por módulos de riego .....	43
<b>Cuadro 8.</b> Para el ciclo 2012-2013, 9 imágenes.....	53
<b>Cuadro 9.</b> Para el ciclo 2013-2014, 8 imágenes.....	53
<b>Cuadro 10.</b> Para el ciclo 2014-2015 11 imágenes.....	54
<b>Cuadro 11.</b> Para el ciclo 2015-2016 10 imágenes.....	54
<b>Cuadro 12.</b> Para el ciclo 2016-2017, 8 imágenes.....	55
<b>Cuadro 13.</b> Para el ciclo 2017-2018, 11 imágenes.....	55
<b>Cuadro 14.</b> Información sobre Módulo 15.....	61
<b>Cuadro 15.</b> Información sobre variación de rendimiento en 5 Módulos.....	62
<b>Cuadro 16.</b> Análisis de datos del NDVI y UC del 2013 al 2018 .....	68

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Tipos de textura de suelos del Distrito de Riego 038.....	8
<b>Figura 2.</b> Los puntos representan los valores NDVI obtenidos de las imágenes de satélite.....	12
<b>Figura 3.</b> Relación NDVI y Kc en una parcela de trigo.....	13
<b>Figura 4.</b> Relación lineal entre Kc y NDVI para uvas de mesa. ....	14
<b>Figura 5.</b> Dinámica de los umbrales térmicos durante las etapas fenológicas del trigo.....	18
<b>Figura 6.</b> Dinámica de acumulación de horas frío durante seis ciclos agrícolas en el sur de Sonora, en relación con el rendimiento de trigo .....	19
<b>Figura 7.</b> Variabilidad del índice NDVI en 27 parcelas.....	25
<b>Figura 8.</b> Tiempo térmico mínimo requerido por fase de desarrollo. ....	30
<b>Figura 9.</b> Unidades calor acumuladas en el Valle del Yaqui, según la fecha de siembra (Ciclos 2005-06 a 2009-10). ....	31
<b>Figura 10.</b> Radiación solar horaria medida quincenalmente a partir del 15 de noviembre del 2009 hasta 15 de mayo del 2010. B-910 del Valle del Yaqui, Sonora. ....	32
<b>Figura 11.</b> Expresión mensual de las horas frío por distrito de riego (período de siembra a madurez fisiológica del trigo; promedio de los ciclos cosechados en 2004 a 2009). ....	38
<b>Figura 12.</b> Relación Evapotranspiración del cultivo con el rendimiento del trigo. ....	41
<b>Figura 13.</b> Localización geográfica del área de estudio.....	43
<b>Figura 14.</b> Módulos del Distrito de Riego 038 Rio Mayo. ....	44
<b>Figura 15.</b> Descarga de imágenes satelitales desde la página web <a href="https://glovis.usgs.gov">https://glovis.usgs.gov</a> . ....	45
<b>Figura 16.</b> Importación del paquete con 10 imágenes del satélite Landsat 8. ....	46
<b>Figura 17.</b> Calculador de QGIS. ....	47
<b>Figura 18.</b> Imagen de los índices NDVI. ....	48
<b>Figura 19.</b> Propiedades de la capa.....	49
<b>Figura 20.</b> Imagen de NDVI en tonos verdes. ....	50

<b>Figura 21.</b> Diálogo para calcular los promedios de NDVI por parcela. ....	50
<b>Figura 22.</b> Cuadro con información de los píxeles por parcela. ....	51
<b>Figura 23.</b> Hoja de cálculo para crear base de datos con valores de NDVI. ....	52
<b>Figura 24.</b> Base de datos del NDVI en el DR038 Río Mayo, Sonora. ....	52
<b>Figura 25.</b> Cálculo de la evapotranspiración en las parcelas del distrito de riego. ....	56
<b>Figura 26.</b> Valores acumulados del índice NDVI y de la ETc del cultivo de cada parcela. ....	57
<b>Figura 27.</b> Ajuste de valores acumulados de NDVI y ETc a funciones logísticas. ....	57
<b>Figura 28.</b> Tasas de crecimiento de NDVI y ETc. ....	59
<b>Figura 29.</b> Superficie sembrada de trigo en el Distrito de Riego 038. Río Mayo. ....	60
<b>Figura 30.</b> Comparación de valores de NDVI y de rendimientos contra unidades calor. ....	61
<b>Figura 31.</b> Ajuste a una función Logística de valores acumulados de NDVI. ....	63
<b>Figura 32.</b> Tasas de crecimiento del NDVI acumulado en tres años, Módulo 15. ....	64
<b>Figura 33.</b> Relación grados día-NDVI y Relación simple. ....	65
<b>Figura 34.</b> Valores acumulados del NDVI en dos parcelas. ....	66
<b>Figura 35.</b> Modelo de crecimiento. ....	67
<b>Figura 36.</b> Tasa de crecimiento. ....	67
<b>Figura 37.</b> Ajuste a una función Logística de valores acumulados de NDVI 2016 - 2018. ....	68
<b>Figura 38.</b> Tasa de crecimiento del NDVI acumulado de los ciclos 2016 al 2018. ....	69
<b>Figura 39.</b> Superficies sembradas de trigo por módulos en el ciclo 2017-2018. ....	69
<b>Figura 40.</b> Comparación del modelo de crecimiento del acumulado del NDVI del distrito de riego y el módulo 15. ....	70
<b>Figura 41.</b> Comparación de tasas de crecimiento del distrito con el módulo 15 para los ciclos 2016 - 2018. ....	70
<b>Figura 42.</b> Imagen de la gráfica correspondiente al NDVI acumulado. ....	72
<b>Figura 43.</b> Ubicación de parcela para agregar al seguimiento. ....	73
<b>Figura 44.</b> Digitalización de la parcela o área de interés. ....	74
<b>Figura 45.</b> Lista de parcelas en seguimiento. ....	74
<b>Figura 46.</b> Valores de NDVI de la parcela. ....	75

<b>Figura 47.</b> Valor del NDVI para cada una de las imágenes satelitales. ....	75
<b>Figura 48.</b> Información del cultivo. ....	76
<b>Figura 49.</b> Inicio de seguimiento a la parcela. ....	76
<b>Figura 50.</b> Seguimiento de riegos. ....	77
<b>Figura 51.</b> Seguimiento de aplicaciones de fertilizantes, insecticidas y herbicidas.....	78
<b>Figura 52.</b> Etapas fenológicas del trigo.....	79

## 1. INTRODUCCIÓN

El trigo es uno de los principales granos para la alimentación, el cual, junto con el maíz y el arroz, se producen en muchos países. Después del maíz, el trigo también es muy importante para la dieta alimentaria del pueblo mexicano. Con él se elaboran varios productos de consumo masivo, como panes, tortillas, pastas, galletas, atoles, papillas, obleas y pasteles. El trigo contiene además nutrimentos y valor energético en mayor cantidad que los demás granos y nutricionalmente solo es comparable con la avena. Se cultiva trigo en más de 20 estados de la República Mexicana. Sin embargo, el 80% de la producción se concentra en la zona norte (principalmente en el noroeste) y en Guanajuato, en el ciclo otoño-invierno (O-I) bajo condiciones de riego. El resto se produce, en su mayoría, en regiones del centro y el altiplano central, en el ciclo primavera-verano (P-V) en condiciones de temporal. La producción de temporal es importante porque se localiza muy cerca de la mayor zona de procesamiento (molienda y panificación) industrial, hecho que permite reducir costos de transportación, que son elevados cuando el trigo se traslada desde sitios lejanos. Los rendimientos promedio de los ciclos O-I y P-V son de 5.3 y 2 t ha<sup>-1</sup> (Villaseñor y Espitia, 2000a).

Con base en estadísticas del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), la dependencia reportó un crecimiento en la producción de este cultivo de casi 500 mil toneladas de 2013 a 2016, al pasar de tres millones 352 mil toneladas a tres millones 841 mil, concentrándose en los estados de Sonora, Guanajuato, Baja California, Sinaloa, Michoacán y Jalisco.

La productividad y la calidad industrial del trigo están controladas principalmente por las características genéticas de la variedad que se cultiva. Sin embargo, estas características son parcialmente modificadas positiva o negativamente por el manejo agronómico (la disponibilidad de nutrimentos en el suelo, la fertilización nitrogenada, las fechas de siembra, el control de plagas y enfermedades) y por las condiciones climatológicas que prevalecen durante el ciclo de cultivo (la temperatura ambiental, el fotoperiodo [horas de luz natural] y la disponibilidad de agua). Por ende, para establecer una producción rentable, competitiva y sostenible de trigo, es indispensable conocer el potencial genético de rendimiento y calidad que caracteriza a cada variedad, así como las condiciones climatológicas y agronómicas bajo

las cuales pueda expresarse de manera óptima el potencial genético del cultivo (Peña, 2008). Por lo que es necesario aplicar *tecnología de vanguardia* (variedades mejoradas, sistemas de siembra, manejo agronómico) y, además, que todos los sectores de la cadena estuvieran organizados y comprometidos con el avance de la cadena.

En el Distrito de Riego No. 38, Río Mayo, en el sur del estado de Sonora México, el cultivo del trigo representa alrededor del 70% del área bajo riego, (unas 68,000 ha), por lo cual se han hecho varios estudios tendientes a relacionar los rendimientos del cultivo, con valores del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) obtenido de imágenes de los satélites Landsat 7, Landsat 8, Deimos y actualmente Sentinel 2A y 2B. El NDVI se utiliza ampliamente para mejorar la discriminación de cubiertas vegetales, medir el vigor de las plantas y la producción de la biomasa. El peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permite determinar si la vegetación se encuentra sana o si tiene algún grado de estrés. El cálculo del NDVI produce una medida cuantitativa que está relacionada con las condiciones de la vegetación y su biomasa. Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1. Diversos estudios y publicaciones señalan que valores por arriba de 0.2 indican presencia de vegetación, y entre más alto sea el valor las condiciones de vigor son mejores. Este parámetro es muy importante, ya que refleja el estado de un cultivo o de una cubierta vegetal, y permite dar seguimiento temporal a las condiciones de vigor o estrés (Vicente-Serrano *et al.*, 2004). También se han realizado estimaciones de la evapotranspiración de los cultivos (ETc), evaluada por dos métodos, mediante la relación  $ETc = Kcb * ETr$ , ( $ETr$ , Evapotranspiración de referencia); donde  $Kcb$  se estima como una función de los valores del índice NDVI, y mediante el método de balance de humedad METRIC. Específicamente para la estimación temprana se ha considerado una relación entre el rendimiento y el valor obtenido del índice NDVI durante la floración del cultivo, época en la que generalmente logra su valor máximo (Palacios, 2015). No obstante, este valor del NDVI no es suficiente para la estimación, por lo que puede utilizarse el valor acumulado de las unidades calor, ya que la temperatura y la humedad del ambiente influyen significativamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas. En las etapas iniciales de crecimiento, las altas temperaturas generalmente acortan el tiempo requerido para la diferenciación de órganos vegetativos y florales en las plantas, mientras que en las etapas de anthesis al llenado de grano, las altas temperaturas pueden causar

estrés, sobre todo cuando superan los valores críticos de crecimiento de los cultivos. Por ejemplo, en trigo el aumento en 1°C en la temperatura del aire durante el crecimiento del grano puede disminuir el rendimiento de grano en 4 % (Stapper y Fischer, 1990).

### **1.1. Planteamiento del problema**

En los últimos años las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo del trigo se han estado comportando de manera errática, lo cual ha ocasionado reducciones importantes en los rendimientos del cultivo debido al cambio climático. Durante los ciclos agrícolas: 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015 se hicieron mediciones del rendimiento del trigo mediante muestreos en varios de los módulos de riego del Distrito de Riego 038 Río Mayo, donde este cultivo está, predominante, ocupando entre el 75% y el 80% de la superficie de casi todos los módulos del Distrito. En los dos primeros ciclos, se encontró una buena relación entre el nivel máximo del NDVI y el rendimiento promedio del trigo con variación del orden del error estimado. Sin embargo, en el ciclo 2013-2014 se observó una pequeña disminución en el rendimiento respecto a lo esperado, pero para el ciclo agrícola 2014-2015, la disminución del rendimiento fue altamente significativa. Las diferencias estimadas en 6 de los módulos evaluados variaron entre 20% y 30% menos que el obtenido en el ciclo 2013-2014. Para el caso del módulo 15, la estimación del rendimiento medio del trigo se obtuvo, mediante muestreo, valores promedio de 6.91 t ha<sup>-1</sup> en el 2013, 6.62 t ha<sup>-1</sup> en el 2014 y 5.19 t ha<sup>-1</sup> para el 2015, una reducción de 1.72 t ha<sup>-1</sup> equivalente casi al 25% del rendimiento obtenido en 2013.

Posiblemente como efectos del cambio climático se presentaron condiciones meteorológicas poco favorables para lograr rendimientos satisfactorios, como se muestra en el Cuadro 1 donde se nota el efecto de la variabilidad climática observada en estos tres años en los rendimientos promedio del Módulo 15 del distrito de riego, con las unidades calor (UC) calculadas tanto totales así como a los días cuando se presentó el mayor valor del NDVI.

**Cuadro 1.** Información sobre Módulo 15. NDVI y Unidades Calor.

Año	Max NDVI	UC. total	Rend. t/ha	Día Max NDVI	UC.Val.Max
2013	0.89	2331	6.91	128	1663
2014	0.73	2169	6.62	144	1573
2015	0.77	1809	5.19	96	1180

En general hubo una reducción significativa de las Unidades Calor, lo que indica una menor acumulación de energía en el cultivo, lo que generó la reducción del rendimiento.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1 General**

Evaluar el estado de desarrollo del trigo en función de las condiciones climáticas, ajustando un modelo de predicción temprana de rendimientos.

### **1.2.2 Específicos**

- Ajustar un modelo de predicción de rendimientos en trigo con base en:
  - Fases fenológicas del cultivo
  - Variables climáticas
  - Índices de vegetación.
- Desarrollar una herramienta de predicción temprana de rendimientos para el cultivo de trigo que esté disponible para los productores del Distrito de Riego 038.

## **1.3. Hipótesis**

### **1.3.1 General**

El ajuste de un modelo de crecimiento, en función del NDVI, permite conocer el estado de desarrollo del trigo a través de su ciclo vegetativo, así como una predicción temprana de su rendimiento.

### **1.3.2 Particulares**

- El modelo de crecimiento, con base en datos sobre las condiciones climáticas, genera información fidedigna en relación con el estado de desarrollo del cultivo de trigo.
- Haciendo un seguimiento del NDVI del cultivo de trigo se puede ajustar un modelo logístico de crecimiento que haga posible contar con una predicción temprana de su rendimiento.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

La historia de los cereales, especialmente el trigo, y la civilización humana han estado muy vinculadas. Por tal motivo, constituye el cultivo más antiguo sembrado por el hombre en inmensas extensiones y en grandes cantidades (Moreno *et al.*, 1997). El trigo es una planta anual de crecimiento invierno primaveral, que debido a su gran diversidad genética, puede crecer y reproducir en ambientes muy diferentes entre sí. Este cultivo se extiende ampliamente en muchas partes del mundo, quizás por ser una especie que tiene un amplio rango de adaptación y por su gran consumo en muchos países. Por tal situación, en la actualidad ocupa el primer lugar entre los cuatro cereales de mayor producción mundial: trigo, arroz, maíz y cebada (Iglesias, 1996). La necesidad de producir trigo constituye una estrategia extraordinaria para la autosuficiencia económica de todos los países del universo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, 1997).

### **2.1 Importancia del cultivo de trigo**

La producción mundial de trigo en 2018 se estima en 722.4 millones de toneladas (FAO, 2018). Tal afirmación permite expresar que el trigo constituye la base estratégica para la autosuficiencia económica de todos los países del universo. Es un componente indispensable en la dieta humana y también se emplea como alimento verde en la dieta animal en forma de forraje (Cherney y Marten, 1982). El trigo constituye la base de las industrias panadera; es un alimento energético y aporta vitaminas a los organismos humano y animal. También puede ser utilizado como modelo experimental para el estudio de la relación planta-ambiente (Nonhebel, 1993). El trigo ha acompañado al hombre aproximadamente 90 siglos, lo que hace que se

considere uno de los cultivos más viejos que el hombre ha sembrado como fuente de alimentación (Moreno *et al.*, 1997).

En el estado de Sonora, la superficie anual establecida con trigo durante el período del 2000 al 2009, fue de 252,586 ha en promedio, con un máximo de 320,476 ha y un mínimo de 104,268 ha. En el mismo período, el rendimiento promedio fue de 5.80 t ha<sup>-1</sup>, para una producción de 1'464,408 t, con un valor de 3,040 millones de pesos. Para enero de 2011, la superficie establecida con trigo en Sonora fue de 287,574 ha, de las cuales 172,422 corresponden al Distrito de Desarrollo Rural 148-Cajeme y 80,134 al DDR-149-Navojoa, para un total de 252,556 ha en el sur del estado. El precio medio por tonelada fluctuó de \$1,200 en el 2002 a \$4,075 en el año 2008 (OEIDRUS, 2009), lo cual indica la enorme influencia que tiene el precio internacional del trigo sobre los indicadores de rentabilidad de este cultivo. A diferencia de los costos de producción, los cuales pueden ser modificados por el agricultor, los precios internacionales del trigo están completamente fuera de su control, motivo por el cual, es necesario que el productor disponga de tecnología que le permita producir de manera rentable aún en escenarios donde el precio del trigo este por abajo del promedio.

En Sonora, la orientación predominante de la producción es hacia el mercado internacional, sobre todo de los trigos cristalinos, mientras que en el caso de los trigos harineros, la producción es principalmente para satisfacer el mercado nacional. El agricultor deberá seleccionar las variedades que cumplan con los requerimientos del mercado objetivo, así como con las estrategias regionales para el control de la roya y el carbón parcial.

En la actualidad, el agricultor cuenta con una gran disponibilidad de variedades de trigo adaptadas al sur de Sonora, ya que el proceso de liberación de nuevos genotipos ha sido muy dinámico. Por el contrario, las recomendaciones para el manejo agronómico del trigo, han sido más estables a través de los años, pero es necesario actualizar la tecnología cuando un nuevo agroquímico sale al mercado, o una nueva plaga, maleza o enfermedad ataca al cultivo (Cortés *et al.*, 2011).

## **2.2 Factores que influyen en los rendimientos del trigo**

Los factores que influyen en los rendimientos del trigo son varios: •

- Preparación, tipo de suelo y su fertilidad •
- Riego •
- Daño por altas temperaturas •
- Daño por frío
- Época de siembra •
- Densidad de siembra •
- Fertilización •
- Control de malezas.

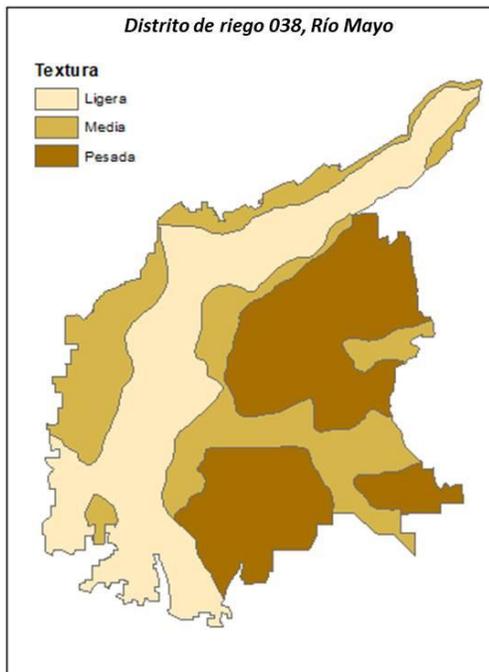
Muchos investigadores han estudiado estos factores en forma individual o de conjunto; por eso merece destacar algunos por su gran afectación en los rendimientos.

### ***2.2.1 Preparación, tipo de suelo y su fertilidad***

El objetivo principal del laboreo es conseguir un estado físico favorable del suelo y eliminar las malas hierbas, para obtener una buena emergencia de los cereales, que son cultivos fáciles de implantar y cuya semilla está provista de elevadas reservas y buena germinación; debe realizarse la siembra en un lecho fino y húmedo (López, 1991).

Una adecuada preparación del terreno facilita la distribución de la semilla y del agua de riego, así como una buena germinación. La labranza del terreno depende de la rotación de cultivos, del tipo de suelo que se dispone y del método de siembra que se use; en dependencia de estas condiciones variará el número de labores a realizar en cada caso (Martínez, 1984). El trigo es una especie capaz de crecer en suelos muy disímiles, tanto en cuanto a propiedades físicas como químicas; tales características le permiten a la planta adaptarse y reproducirse en diferentes regiones. Sin embargo, si luego de la siembra se forma una costra en la superficie por el efecto de las lluvias, no se producirá la emergencia y la planta ya germinada puede perecer. Por eso, en presencia de tal situación se recomienda romper con la costra superficial para poder permitir la emergencia de la planta (INTA, 1981). Existe la tendencia hacia la simplificación del laboreo mediante la aplicación de aperos combinados o la siembra directa sobre los rastrojos de la cosecha anterior, por el consumo de tiempo, energía y los perjuicios que ocasionan sobre la estructura del suelo.

Los tipos de texturas de suelos predominantes en el Distrito de Riego 038, son arcillas o suelos pesados, después son los migajones o suelos medios y por ultimo arenas o suelos ligeros, como se puede ver en la siguiente imagen.



**Figura 1.** Tipos de textura de suelos del Distrito de Riego 038.

### 2.2.2 Riego

El trigo necesita, al igual que otras plantas, elevada cantidad de agua para crecer. Al igual que otros cereales de invierno, es una planta de eficiencia reducida. En este aspecto se confirma su condición de planta  $C_3$ , es decir, que posee moléculas de materia orgánica con tres átomos de carbono y se diferencia de las plantas  $C_4$ , con moléculas de cuatro átomos de carbono como el maíz, por ejemplo (Iglesias e Iglesias, 1995). Para que este cultivo produzca los máximos rendimientos por hectárea, es necesario que se cuente con cantidades de agua suficientes para el riego y en fechas oportunas, sobre todo si se han usado fertilizantes. Por eso, los riegos deben aplicarse antes de que la planta muestre síntomas de sequía, lo cual debe apreciarse por el enrollamiento de las hojas o porque se empiezan a secar las puntas (INTA, 1981). Este mismo autor estima que para producir 1 kg de materia seca se emplean 540 mm de agua como promedio y que la eficiencia del uso del agua puede variar de 225 a más de 1 000 unidades de agua por unidad de materia seca.

Se ha calculado que para obtener rendimientos de 3 000 kg de granos, son necesarios unos 450 mm de agua durante el ciclo del trigo, pero el consumo de tal cantidad de agua no es uniforme en todo su ciclo, ya que se concentra en los períodos de gran crecimiento reproductivo, así como cinco semanas posteriores a la floración. El trigo consume de 65 a 75 % del agua necesaria para todo su ciclo de vida (Iglesias e Iglesias, 1995). Otro aspecto a tener en cuenta es la afectación que se puede producir en la germinación del trigo por inundación del suelo. Al respecto, Iglesias (1996), en las condiciones de la región occidental de Cuba, estudió la influencia de diferentes manejos del agua en la germinación, la cual fue afectada desde un 36 % cuando se mantuvo la lámina de agua durante seis horas hasta un 82 % cuando el suelo se mantuvo saturado permanentemente, lo cual demuestra la susceptibilidad de este cultivo al sobrehumedecimiento. Algunos autores han encontrado que con la aplicación de seis riegos en el cultivo son suficientes, si estos se aplican en las etapas de iniciación de la corona, macollamiento, iniciación de la espiga, floración, estado lechoso y estado pastoso del grano (Koshta, 1993).

Una norma de riego para las condiciones de Cuba de 300 m<sup>3</sup> /ha distribuida en seis riegos en las siguientes etapas: 1. emergencia 2. a los 10 días después de la germinación 3. en el ahijamiento (15 días después del segundo) 4. comienzo de la floración (15 días después del tercero) 5. llenado del grano (15 días después del cuarto) adaptabilidad del cultivo a los diferentes sistemas.

La eficiencia general del uso del agua en la agricultura de riego se define como la proporción del volumen de agua usada por los cultivos, también la derivación como el consumo, la cantidad de agua extraída de las fuentes de suministro, además de la precipitación efectiva para el riego. Esta se representa por la siguiente función:

$$Ewu = \frac{Vu}{Ve + Vpe} \quad (1)$$

Dónde:  $Ewu$  - Eficiencia del uso del agua, adimensional;

$Vu$  - Volumen utilizado por los cultivos, m<sup>3</sup>;

$Ve$  – Volumen extraído de diferentes fuentes, m<sup>3</sup>;

$V_{pe}$  - Volumen de lluvia efectiva,  $m^3$ .

Debe tenerse en cuenta que en varios casos también se considera la cantidad de agua requerida por el cultivo para el lavado de sales, pero en este caso no se ha tenido en cuenta.

La evaluación de la eficiencia general del agua es importante porque nos permite estimar el agua desperdiciada, que es vital en el caso de México, donde este recurso es escaso en la mayoría de las áreas agrícolas del país donde se ha observado con preocupación que el área regada en los últimos 30 años no ha cambiado a pesar de las enormes inversiones que se han hecho.

En los distritos de riego de México, el agua se obtiene, en general, de diferentes fuentes, y se suele medir o estimar con una precisión aceptable. El volumen de precipitaciones efectivas es difícil de estimar, pero hay varios métodos empíricos que pueden hacer una evaluación razonable. La estimación del agua utilizada por cada cultivo y en cada parcela es la tarea más difícil de lograr.

Existen varios métodos para estimar el consumo de agua por las plantas ( $ET_c$ ), pero uno de los métodos más comúnmente utilizados es el de la denominada evapotranspiración de referencia ( $ET_r$ ) multiplicado por un coeficiente de cultivo sin limitaciones  $K_c$ , por lo que la función para el cálculo es:

$$ET_c = K_c ET_r \quad (2)$$

La evapotranspiración potencial y más recientemente llamada de referencia  $ET_r$ , es aquella que tiene lugar en un cultivo que no tiene restricción de agua generalmente de pequeño tamaño como hierba o alfalfa, que cubre completamente el suelo como se define por Rosenberg (1974). Hoy en día, esta variable se puede calcular con el método de Penman-Monteith, que ya se puede obtener de una estación meteorológica automática en la que se ha incorporado el software para este cálculo. (Palacios *et al.*, 2018)

El valor del coeficiente de  $K_c$  es más difícil de estimar debido a que implica la medición de la evapotranspiración real de un cultivo, lo que requiere un equipo especial, como un lisímetro de pesada con estructura de suelo inalterada o una estación de medición de flujo turbulento.

Sin embargo, el consumo de agua de cada cultivo puede ser muy variable, ya que depende no sólo del cultivo, sino también de otras variables como la fertilización y el estrés hídrico, entre otros, por lo que el cálculo puede realizarse utilizando diferentes métodos, como propone la FAO (Allen *et al.*, 2006), que considera cultivos realizados bajo condiciones estándar, que se producen en vastos campos bajo condiciones agronómicas excelentes sin limitaciones de humedad del suelo.

En el año 2000, el proyecto "DEmonstration of Earth observation Technologies in Routine irrigation advisory services" (DEMETER) financiado por la Comisión Europea, apoyó a las naciones mediterráneas de Europa para mejorar la eficiencia del uso del agua. Durante cinco años, se realizaron varias investigaciones, entre las cuales, una fue buscar una relación lineal entre el índice de vegetación NDVI y el Kc.

El NDVI se calcula a partir de la reflectancia de las bandas roja e infrarroja de las imágenes de satélite de acuerdo con la siguiente función:

$$NDVI = \frac{\rho_{ir} - \rho_r}{\rho_{ir} + \rho_r} \quad (3)$$

Dónde:  $\rho_{ir}$  - Reflectancia de banda infrarroja;

$\rho_r$  - Reflectancia de banda roja.

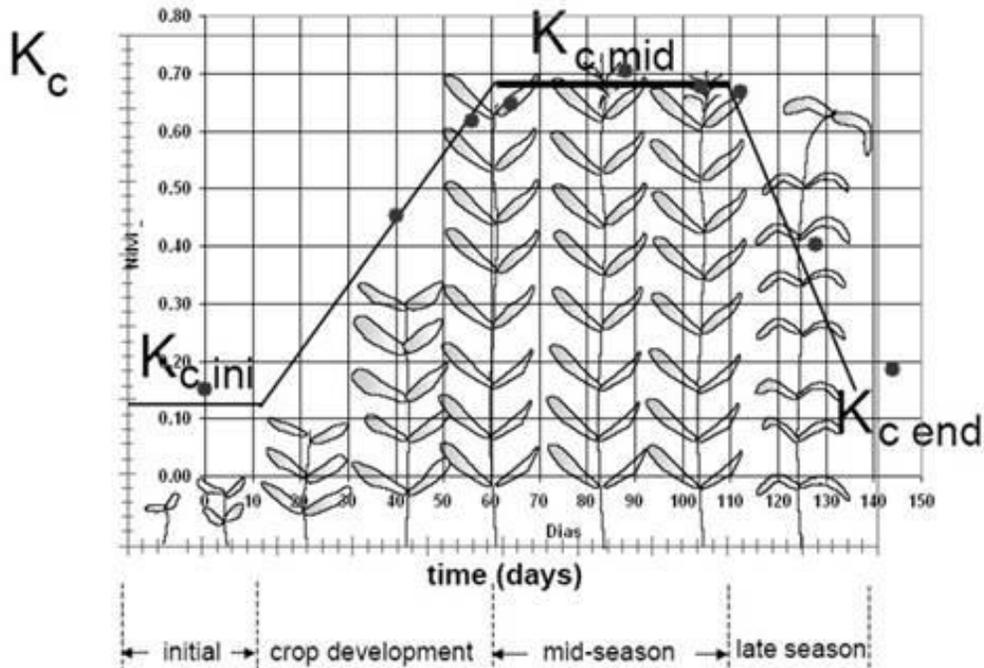
Por lo tanto, D'Urso y Calera en las Actas de la Conferencia AIP (2006) discutieron, con cierto detalle, esta relación lineal entre NDVI y Kc y la función general derivada relacionando estas dos variables como se muestra a continuación:

$$Kc = 1.25NDVI + 0.2 \quad (4)$$

Posteriormente, Calera y Gonzalez (2007), en un documento del proyecto "Herramientas participativas multi-nivel EO-asistida de agua para la gestión del riego y la decisión agrícola de apoyo" (PLEIADES), también financiado por el Comisión Europea, presentó una función específica para el trigo que fue:

$$K_c = 1.15NDVI + 0.17 \quad (5)$$

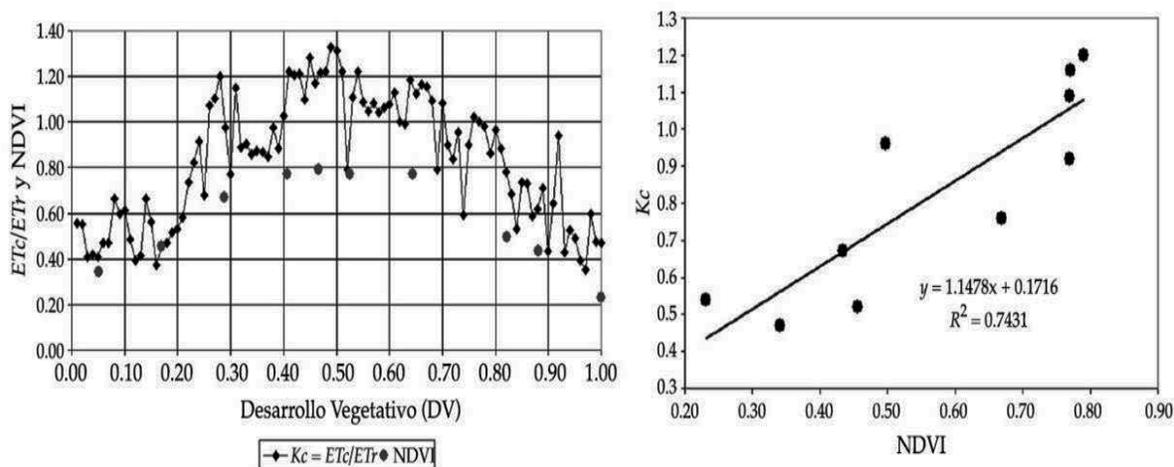
Esta relación lineal entre NDVI y  $K_c$  puede verse claramente al representar la cifra mencionada en la publicación de la FAO (2006) y añadir la posición de los valores de NDVI obtenidos de las imágenes de satélite, como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Los puntos representan los valores NDVI obtenidos de las imágenes de satélite.

Como parte del proyecto PLEIADES (2007 - 2010), se realizaron mediciones en el Distrito de Riego del Río Yaqui, Estado de Sonora, como una investigación de tres instituciones mexicanas (COLPOS, ITSON y USON), con apoyo adicional del IRD de Francia con un experimento para medir la evapotranspiración en cuatro bloques del distrito, incluyendo el uso de cuatro Scintilómetros.

En dicho experimento, la evapotranspiración del trigo se midió también con el equipo de Eddy Correlación y se calcularon los índices NDVI, utilizando 10 imágenes del satélite Landsat 5 y 7. Se obtuvieron resultados similares a los de Calera y González (2007). La relación se describe en un artículo de Palacios V. E. *et al.*, (2011), cuyo gráfico se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Relación NDVI y  $K_c$  en una parcela de trigo.

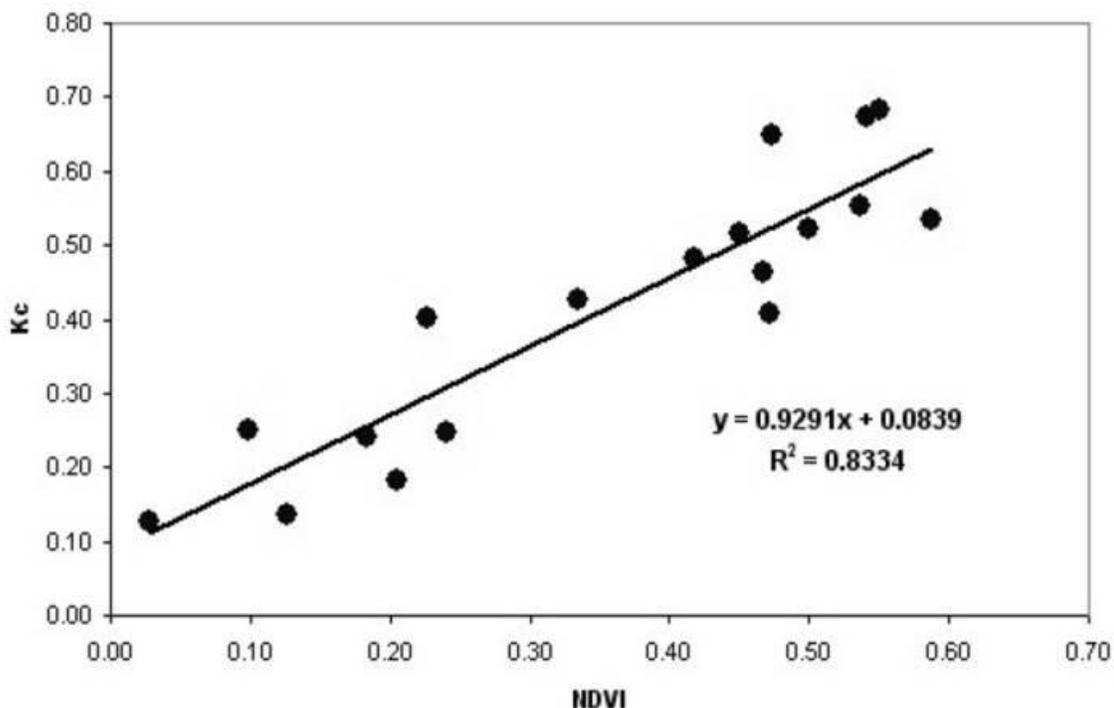
A la izquierda de la figura se muestra la variación de  $K_c$  durante la estación de crecimiento del trigo y los puntos oscuros son los valores NDVI obtenidos a partir de 10 imágenes de los satélites Landsat 5 y 7.

La función obtenida por Calera y González fue utilizada para estimar el consumo de agua para todos los cultivos, utilizando información  $ET_r$  de una estación meteorológica automática. En una página WEB de la Universidad Castilla la Mancha en España, se ha desarrollado un sistema en línea para los proyectos DEMETER y PLEIADeS para mostrar las condiciones de cultivo y las estimaciones de evapotranspiración utilizando esta metodología. Ahora, se está utilizando una pantalla mejorada en un nuevo proyecto llamado Riego Sostenible, gestión del agua y gobernabilidad de las cuencas hidrográficas: implementación de servicios impulsados por el usuario (SIRIUS).

El sistema en línea, SPIDER, utiliza diversos tipos de imágenes y sistemas de información geográfica, y permite a sus usuarios (todos los miembros del consorcio SIRIUS, incluyendo México) observar el estado de sus parcelas y calcular su consumo de agua por cultivos mediante un ingenioso método de integración gráfica, utilizando la función (5).

Se considera que esta función sólo es válida para los cultivos que cubren totalmente la superficie del suelo cuando alcanzan la floración. Para otros cultivos perennes tales como

huertos, que generalmente no cubren completamente el suelo, se requiere para calcular otras funciones. Como ejemplo, se puede mencionar la función encontrada por J. C. Rodríguez, para el cultivo de uvas de mesa, presentado en un artículo de Palacios *et al.*, (2010). Esta función obtenida en el "Distrito de Riego Costa de Hermosillo" se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Relación lineal entre Kc y NDVI para uvas de mesa.

Considerando que la función (5) puede ser válida para estimar el consumo anual de agua de los cultivos que cubren toda el área de riego al llegar a florecer, se podría utilizar para calcular el consumo de agua en cada parcela de un distrito de riego.

Bajo este supuesto, entonces es posible integrar el consumo total de agua por los cultivos en un distrito de riego.

### 2.2.3 Daño por altas temperaturas

La influencia de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de las plantas es ampliamente reconocida; la temperatura afecta a los procesos de crecimiento como expansión foliar, tasa de asimilación neta, tasa de aparición de hojas y tasa relativa de crecimiento (Milthorpe, 1959; Kirby, 1995), así como los procesos de desarrollo como iniciación de primordios foliares,

iniciación floral, formación de la espiguilla terminal en trigo o máximo número de primordios en cebada, anthesis y madurez fisiológica (López y Richards, 1994b; Kirby, 1995). Las altas temperaturas favorecen mayor actividad metabólica de la planta y mayor velocidad de los procesos fisiológicos determinantes de su crecimiento y desarrollo (Milthorpe, 1959).

Los cambios en temperatura influyen en la velocidad de las reacciones químicas, y los organismos vivos son producto de muchas de las reacciones químicas que ocurren en sus células (Pollock, 1990). La mayoría de los procesos fisiológicos se alteran con los cambios en la temperatura con respecto a valores mínimos (temperatura base, cese del crecimiento) o máximos (temperatura máxima, cese del crecimiento y posible muerte de la planta) (Pollock, 1990).

En trigo, existen numerosos trabajos que relacionan el efecto de la temperatura sobre el desarrollo. Nuttonson (1955), basándose en la información fenológica de trigos de Norteamérica, Unión Soviética y Finlandia, incorpora el efecto del fotoperiodo a la acumulación de días-grados. El mismo autor crea las unidades fototermales, que se comportan más uniformemente que los días-grados, respecto del desarrollo del trigo, en un rango más amplio de latitudes, altitudes y climas, para una misma variedad. Van Dobben (1962) establece que el tamaño final de las plantas, de trigo entre otras, está determinado por la independencia de la influencia de la temperatura sobre la tasa de crecimiento y desarrollo. Asana y Williams (1965) analizan el efecto del estrés térmico sobre el desarrollo del grano. Warrington, Dunstone y Green (1977) determinan que el efecto de la temperatura sobre los rendimientos en grano, es más importante durante la fase de desarrollo de la espiga. Darwinkel, Ten Hag y Kuizenga (1977) agregan que las fechas tardías de siembra decrecen sus rendimientos en grano, debido a una disminución del peso del grano y menor producción de granos por espiga. Ambos componentes del rendimiento, según estos autores, están relacionados con la tasa de desarrollo del vástago. Rahman y Wilson (1978) determinan variaciones en el número de espiguillas del trigo, al cambiar la temperatura durante el desarrollo de la espiga. Bauer y otros (1984) utilizan el índice de días-grados y unidades fototermales, para predecir los estados de desarrollo entre siembra y anthesis, en 16 cultivares de *Triticum aestivum* y tres de *T. durum*, concluyen que con ambos índices se consiguen buenas aproximaciones.

En condiciones normales, los trigos cultivados en Chile están sometidos a una secuencia climática estacional, que condiciona su evolución fenológica. El desarrollo vegetativo comienza lentamente en otoño y continúa en invierno, con temperaturas e intensidades luminosas relativamente bajas y días cortos. La diferenciación e iniciación floral se produce a medida que aumentan la temperatura, longitud del día y radiación solar incidente, durante la primavera. Los incrementos de temperatura y los déficit hídricos, frecuentes hacia el verano, ponen fin al período de llenado de granos. Castillo y Santibáñez (1987).

La dinámica del desarrollo vegetal muestra en gran medida un determinismo climático, el cual se ha tratado de cuantificar desde que R. Reaumur en 1730 inventó el termómetro (Wang 1960; Durand, 1969; Waggoner, 1974; Kiniry y Keener, 1982; Bauer, Frank y Black, 1984). En 1735, Reaumur introduce el concepto de unidad de calor o térmica, dando las primeras nociones de constancia térmica requerida para que una planta alcance su madurez y crea un método predictivo del desarrollo vegetal, en función de la temperatura (Wang, 1960; Durand, 1969; Kiniry y Keener, 1982). Desde esa fecha, se ha hecho numerosos intentos para mejorar el concepto de constante térmica de Reaumur, basándose en que la velocidad de desarrollo aumenta linealmente con la temperatura. Se crea así el concepto de días-grados, el cual considera la acumulación térmica efectiva por sobre una temperatura umbral. Un día-grado o una unidad térmica corresponde a un grado de la temperatura media por sobre este umbral.

La temperatura umbral o base varía con el vegetal, su estado de desarrollo o su condición fisiológica (Daubenmire, 1974). Esta puede determinarse haciendo una regresión entre la temperatura media y la tasa de desarrollo; la temperatura base es aquella en que la tasa de desarrollo es nula (Arnold, 1959).

La búsqueda de una constante fenológica, para definir el desarrollo vegetal, ha llevado a diversos investigadores a crear índices predictivos del estado de desarrollo, basándose principalmente en la temperatura. (Wang, 1960).

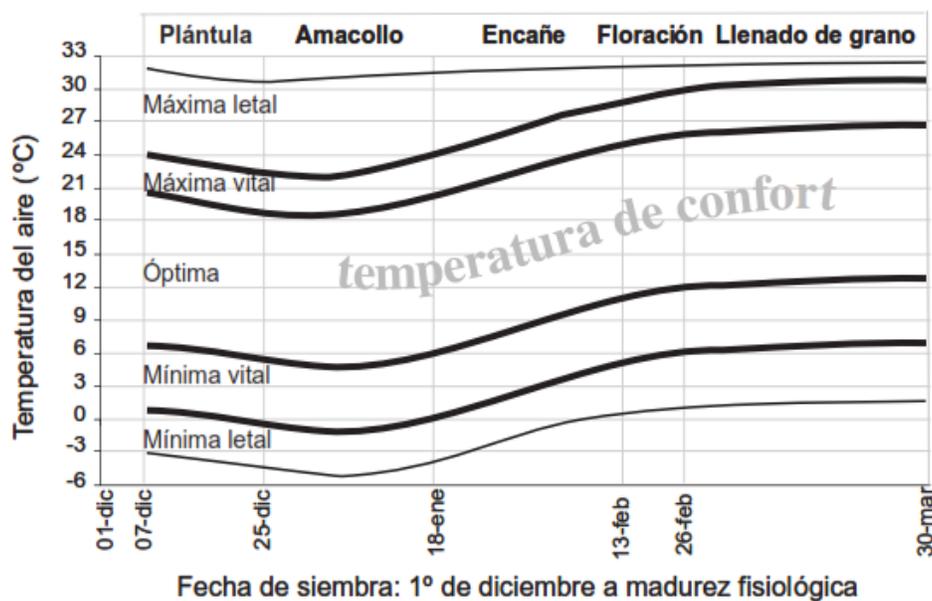
La temperatura del mes más frío es el elemento y el rasgo climático más importante para definir los ambientes para el desarrollo del trigo. Estos pueden clasificarse como sigue: muy calientes, cuando las medias son superiores a 22.5°C; calientes, cuando las medias están entre 22.5 y 17.5°C, y cálidas, cuando están entre 17.5 y 12.5°C (Iglesias y Pérez, 1995).

En el cultivo del trigo existe diversidad genética con respecto a la tolerancia al calor y hay evidencias de que con un apropiado manejo, son posibles en climas cálidos rendimientos respetables. Por ejemplo, en Sudán, en un medio ambiente muy caliente y seco, se han informado rendimientos más típicos de un medio ambiente más templado hasta 6 ton/ha (Acevedo, 1992). Refiriéndose a las altas temperaturas, algunos autores (Nonhebel 1993, Slafer, Rawson 1994 y Engels 1994) plantearon que estas afectan los rendimientos de las plantas aún en condiciones de buena irrigación, debido en parte a una reducción del período de algunas fases del desarrollo del vegetal.

Esto implica que existen menos días para acumular fotoasimilatos, lo que puede disminuir la producción total de biomasa. En cuanto a la floración, la temperatura influye grandemente. Se han encontrado pequeñas diferencias (Koshta, 1993) entre el genotipo en crecimiento y desarrollo floral a las altas temperaturas evaluadas (30/25 °C día/noche); además, hubo evidencias de que las altas temperaturas dieron lugar a la esterilidad de las flores. Al elevarse las temperaturas de 21/16 a 30/25 °C día/noche, durante los diez días que seguían a la primera antesis, las flores superiores fueron más afectadas que las basales dentro de una misma espiguilla y las flores de las espiguillas superiores fueron más sensitivas que las flores de las inferiores en la espiga (Tashiro y Wardlaw, 1990). La baja fertilidad asociada con las altas temperaturas en el momento de emergencia de la espiga, debe estar relacionada con el pobre desarrollo del polen (Dawson y Wardlaw, 1989). Otros autores (Miralles y Slafer, 1990) estudiaron dos niveles de temperatura durante el llenado de los granos (temperatura ambiente y aumento de esta con capas de polietileno). Las altas temperaturas luego de la antesis produjeron una rápida senescencia del área foliar total por planta, debido a una drástica senescencia de las láminas, mientras que las vainas y pedúnculos se vieron afectados en menos medida. El aumento de la temperatura durante la etapa de llenado de granos produjo una disminución en el peso de estos, que no fue atribuida a una disminución en el contenido de asimilatos disponibles, encontrándose un efecto de la temperatura sobre el tamaño del grano. Mientras que se encontró una alta correlación del número de hijos fértiles y la fertilidad de las espigas con el rendimiento (Acevedo, 1992), en condiciones de estrés de calor al final o al inicio del crecimiento y desarrollo del trigo. Así mismo, se determinó que el número de plantas/m<sup>2</sup>, los días a la iniciación de la floración, días a la antesis, el peso seco de la espiga, el peso de 1000 granos, el índice de cosecha, el número de granos por espiga y el peso individual

del grano, entre otras características son potencialmente útiles para ser usadas como punto de partida en la selección de genotipos en condiciones de estrés de calor. Trabajando con 20 variedades promisorias de diferentes especies de trigo, se encontró que los genotipos mostraron diferencias significativas (Nayeem y Dalvi, 1993) en todos los caracteres estomatales como densidad estomatal, índice de apertura y su diferencial. Un alto índice de apertura estomatal es un criterio apropiado para la selección de genotipos de trigo tolerantes al calor.

El calor acelera el desarrollo de cualquier etapa fenológica de la planta. La presencia de temperaturas que superan al límite máximo vital, Figura 5, puede causar daños que se acentúan en los tejidos jóvenes de la planta. El grado de daño depende del nivel de temperatura y es proporcional al tiempo que dura dicho nivel durante el día.

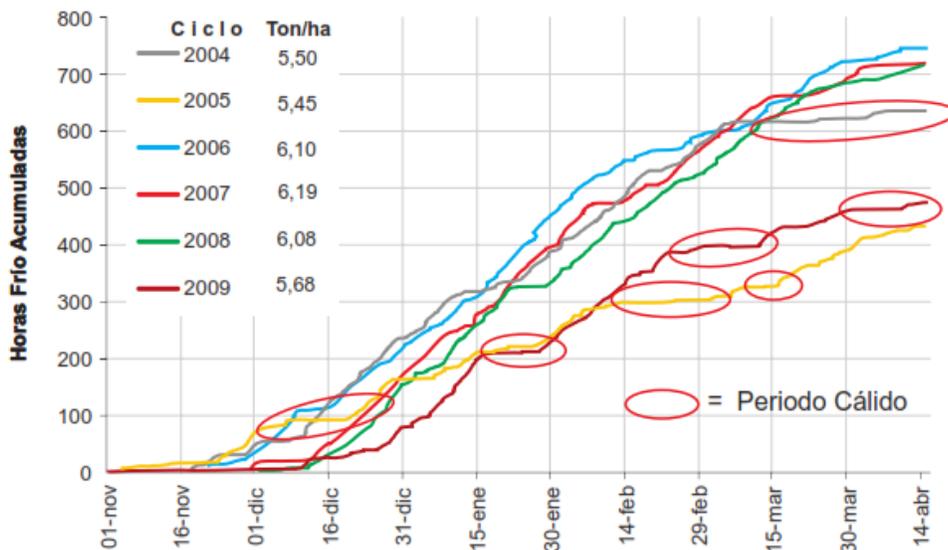


**Figura 5.** Dinámica de los umbrales térmicos durante las etapas fenológicas del trigo.

Dada las condiciones dominantes del clima en Sonora, el riesgo de daños por altas temperaturas es mayor que el riesgo por frío. Durante el ciclo agrícola 2003-04, se tuvo la experiencia de que durante la mayor parte del ciclo se presentó una condición de temperatura favorable para un desarrollo óptimo del cultivo, es decir, se había completado un número de horas frío que permitió una excelente expresión en el crecimiento de la planta, y se tenían

perspectivas de un buen rendimiento de grano; sin embargo, se presentó una onda de calor o incremento súbito de la temperatura durante la etapa inicial a intermedia del llenado del grano, asociado a restricciones del agua de riego, factores que incidieron en una reducción del rendimiento potencial, Figura 6.

Gran parte del llenado de grano se lleva a cabo durante el mes de marzo. Un tercio de los años analizados muestra que en este mes las temperaturas superan los 30°C en el valle del Yaqui, y en el valle del Mayo la frecuencia es del 20%. Las medidas para tratar de reducir el impacto de las altas temperaturas en el rendimiento, es a través del manejo del cultivo con tecnología más precisa, principalmente en lo que se refiere al suministro de agua y la nutrición. Especial atención debe ponerse a las fechas de siembra posteriores al 15 de diciembre y para los ciclos agrícolas con limitación en el número de horas frío. La consulta permanente del pronóstico del clima, es una buena medida para tratar de aminorar el efecto de las altas temperaturas, (Valencia *et al.*, 2009).



**Figura 6.** Dinámica de acumulación de horas frío durante seis ciclos agrícolas en el sur de Sonora, en relación con el rendimiento de trigo

#### 2.2.4 Daño por frío

Las temperaturas menores e iguales a 0°C se han presentado históricamente con mayor frecuencia en el mes de enero. Su presencia en las áreas trigueras del estado de Sonora se da de sur a norte, de menor a mayor frecuencia. El riesgo de daño por frío en la planta de trigo es factible si se presentan heladas en el mes de febrero.

La etapa de crecimiento del trigo en el mes de enero (fin de amacollo a encañe) puede resistir temperaturas de 0°C sin afectar la producción. Sin embargo, este nivel puede afectar la etapa de floración y llenado del grano durante febrero, siendo más riesgoso para siembras tempranas de trigo, principalmente en la costa de Hermosillo, región de Caborca y San Luis R.C.

Las heladas que cíclicamente se presentan son de baja frecuencia e intensidad causando daños imperceptibles al trigo. La frecuencia de heladas se incrementa hacia la parte noroeste del Estado.

En el mes de diciembre se tiene registrada una helada ocurrida en cada uno de los días 29 y 30 de diciembre del 2003. El meteoro mostró una mega cobertura (107° NW-112° NW) que ocasionó pérdidas en la producción en una superficie mayor a las 43 mil hectáreas, afectó cultivos hortícolas y frutales en los distritos de San Luis R.C., región de Caborca, costa de Hermosillo, valle de Guaymas, valle del Yaqui y valle del Mayo. El cultivo del trigo no sufrió daños debido a la etapa de crecimiento en la que se encontraba.

La etapa de desarrollo de la planta de trigo más sensible a heladas, es durante la emergencia de la espiga y hasta el estado lechoso del grano. Si se presenta una helada, sólo se dañará la fracción de espiguillas expuestas al aire. Si la espiga ha emergido totalmente, se dañará la fracción que esté en crecimiento activo y posteriormente se detectarán espacios vacíos en las espiguillas. Si el grano se encuentra en la etapa inicial de desarrollo, se deshidrata y se desprende de su base. La identificación puede realizarse cinco días después de registrarse la helada.

También se puede presentar esterilidad de flores y daños durante la fase inicial del llenado del grano, cuando se está expuesto a varios días consecutivos de temperaturas nocturnas menores de 5°C. Dos o más períodos consecutivos expuestos a este nivel de temperatura pueden tener consecuencias graves sobre el rendimiento, (Valencia *et al.*, 2009).

### **2.2.5 Época de siembra**

La época de siembra es un factor importante para el éxito de cualquier cultivo, dado que el desarrollo de la planta en sus diferentes etapas de crecimiento se ve influido por las condiciones ambientales, unas veces favoreciéndolas y otras perjudicándolas. Una variedad

sembrada fuera de su época disminuye su rendimiento en forma notable, además, está expuesta a otros factores climáticos adversos, presencia de enfermedades y ataques de plagas. La elección de la época de siembra depende de las condiciones climáticas del área de cultivo y de la precocidad de la variedad que desea sembrarse. En la zona mediterránea se efectúa desde octubre a diciembre. La siembra será tanto más anticipada cuanto mayor sea la latitud o altitud (zonas frías) en relación con las zonas de latitud o altitud más bajas (zonas cálidas). La época óptima será aquella en la que el período máximo frío coincida con la planta de trigo en el estado de tres a cinco hojas. Otra cuestión a tener en cuenta es la sensibilidad del trigo en la fase de espigado a las heladas y en otros climas a los golpes de calor y vientos cálidos que provocan el asurado durante el estado de grano lechoso (López, 1991). Durante un ensayo de épocas de siembra efectuado con seis variedades de trigo en Cuba, durante la época comprendida entre el 9 de octubre de 1990 y el 1 de marzo del 1991, se encontró que la aparición de las espigas y la madurez ocurrieron generalmente entre el 26 de diciembre y el 20 de abril (Iglesias, 1992), con lo cual se garantizó un período relativamente fresco para el cultivo, teniendo en cuenta las condiciones de Cuba. La mayoría de las variedades alcanzaron sus mayores rendimientos cuando las fechas de siembra estuvieron entre el 10 de noviembre y el 30 de enero, destacándose las siembras del mes de diciembre como las de mayor rendimiento. Por su parte, se señala como la época de siembra del trigo desde el 10 de septiembre hasta el 15 de febrero y como fecha óptima el mes de noviembre (Iglesias, 1992).

La fecha de siembra es una de las decisiones más importantes que el productor de trigo debe tomar en cada inicio del ciclo agrícola, por lo que deberá considerar diversos factores que afectan directa e indirectamente el potencial de rendimiento de la variedad que vaya a utilizar; por ejemplo, en cuatro de los últimos cinco ciclos agrícolas se han presentado lluvias en la primera quincena de diciembre, lo cual ha obligado a retrasar la siembra.

Una frecuencia muy reducida de años muestra que en siembras muy tempranas, el cultivo podría sufrir daño por heladas en la etapa de fin de embuche e inicio de emergencia de la espiga, afectando las flores descubiertas. Por otra parte, la siembra tardía, produce rendimientos bajos que minimizan la ganancia de la inversión.

Los porcentajes en pérdidas de rendimiento calculados en relación a las fechas de siembra se describen en el Cuadro 2. En años críticos, las pérdidas han alcanzado un 40%, cuando las temperaturas máximas sobrepasan los 30°C por varios días consecutivos, lo cual se ha presentado principalmente en siembras de enero.

**Cuadro 2.** Pérdidas del rendimiento calculado por fecha de siembra, durante los ciclos agrícolas 2005-06 a 2007-08 en el sur de Sonora.

Fecha de siembra	% en pérdidas	Pérdidas en kg/ha
15-30 Noviembre	0 - 6	0 – 350
1-15 Diciembre	0	0
16-31 Diciembre	7 - 13	350 – 950
1-15 Enero	14 - 28	1,040 – 1,960

Fuente: Información obtenida en 70 parcelas comerciales, en tres ciclos de trigo.

Así, de acuerdo con estos resultados, en el valle del Yaqui los mejores rendimientos históricos se han obtenido cuando el trigo se siembra entre el 15 de noviembre y el 15 de diciembre, por lo que éste se considera como el intervalo idóneo para realizar la siembra de trigo en el sur de Sonora, (Valencia *et al.*, 2009).

### 2.2.6 Densidad de siembra

La respuesta del rendimiento en grano de trigo a las variaciones de la densidad de siembra puede ser representada por una curva parabólica, en la cual el rendimiento se reduce cuando la densidad se aleja, tanto en el exceso como en la disminución respecto al óptimo (García, 1993). El número de plantas logradas depende principalmente de la capacidad de macollaje del cultivar y de la humedad al momento de la siembra. Además, los mismos autores agregan que el número de plantas por unidad de superficie, el peso de 1000 semillas y el coeficiente de pérdidas deberán ser utilizados para un correcto cálculo de la cantidad de semillas a sembrar (Malaspina y Castellarim, 1994). Numerosos son los trabajos realizados en el mundo que han tenido como objetivos la determinación de la densidad óptima de siembra para este cereal, entre los que podemos citar los que plantean que 200 a 300 plantas/m<sup>2</sup> son suficientes para obtener los máximos rendimientos (García, 1993; Lerner, y Abbate, 1991; Singh, 1993; Guzmán, y Pozo, 1994). Se ha determinado que la densidad óptima de plantas, en trigos semienanos (Fisher, 1975) se hallaba entre los 40-100 kg de semilla/ha, que equivalen a 80-

200 plantas/m<sup>2</sup> y se estableció como la densidad óptima de 200-300 plantas/m<sup>2</sup> para trigo con germoplasma mexicano (Senigagliaesi y García, 1979). En cuanto a la respuesta sobre los efectos de la densidad (180, 560, 930 plantas/m<sup>2</sup>) en dos cultivares de trigo, se observó que el aumento de la densidad de siembra redujo el número de macollos, hojas, espiguillas y flores iniciales y aumentó la altura de las plantas (Lener y Cerri, 1990). Así mismo, a mayor densidad correspondió mayor tasa de formación de espiguillas y menor período y tasa de iniciación de floración. El rendimiento final por unidad de superficie no difirió ni entre cultivares ni entre densidades, porque al aumentar la densidad la disminución en el número de granos por espiga fue compensada por el mayor número de espigas. Al estudiar el efecto de tres densidades de siembra sobre la fotosíntesis y la producción de materia seca, se encontró que estas son afectadas. Se obtuvieron los mejores resultados con la densidad menor y a su vez el rendimiento en grano disminuyó cuando se incrementó la densidad de plantas de 80 a 240 plantas/m<sup>2</sup> (Yue *et al.*, 1992). Durante la campaña agrícola 1991/1992 en Pergamino, provincia de Buenos Aires, Argentina, se sembraron tres cultivares de trigo con cinco densidades de siembra (50; 75; 100; 125 y 150 kg de semilla/ha) y los resultados obtenidos indicaron que las tres variedades podrían ser sembradas en cualquiera de las densidades ensayadas, sin que se produjeran diferencias significativas en el rendimiento en grano, como resultado de la gran compensación producida por los cultivares (García, 1993). En general, se pueden alcanzar buenos resultados en los cultivares macolladores (Malaspina *et al.*, 1994) con 180-200 plantas/m<sup>2</sup> y 300-350 plantas/m<sup>2</sup> en los menos macolladores y que con el retraso de la siembra deberán incrementarse estos valores, mientras que con siembras de precisión y condiciones que favorezcan el macollaje, estos podrán reducirse. Estudiando tres densidades de siembra (167, 281 y 354 plantas/m<sup>2</sup>) en los cultivares, (García *et al.*, 1993), se observó que estas producen un incremento en el número de espigas/m<sup>2</sup> (Guzmán y Pozo, 1994), pero no así en el número de granos por espiga, donde sucedió lo inverso: a menor densidad menor número de espigas, pero mayor número de granos, debido al mayor número de espiguillas por espiga.

### **2.2.7 Variabilidad del suelo**

Otro factor que se ha estudiado, ha sido el efecto de la variabilidad del suelo en el rendimiento de los cultivos, la que afecta los rendimientos, no solamente en el trigo sino en general en todos los cultivos.

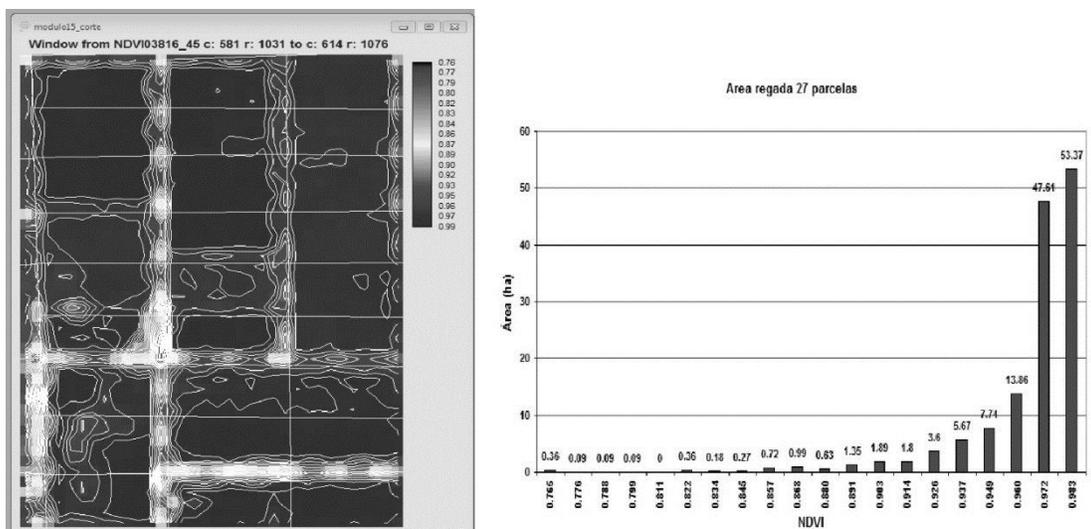
Es común que exista una variabilidad espacial en las parcelas, a veces esta variabilidad es muy significativa y por lo mismo afecta en forma negativa al rendimiento de los cultivos que se establezcan; por esta razón se ha desarrollado la denominada agricultura de precisión. Sin embargo, es factible detectar esta variabilidad mediante las imágenes satelitales, observado la variabilidad del valor de los píxeles.

Por otra parte, es muy común que en los distritos de riego de México, se compren los derechos de agua de parcelas pequeñas; es decir un productor puede rentar varias parcelas y en estos casos la variabilidad espacial puede aumentar, principalmente por la variabilidad que existe en colindancia entre estas parcelas y además la variabilidad dentro de cada parcela.

Como ejemplo se presentará un caso hipotético de un lote de 27 parcelas de aproximadamente 5 ha cada una dentro del Módulo de riego número 15 del Distrito de riego 038 del Río Mayo, que está comprendido por más de seis mil hectáreas, donde es muy común que sus parcelas ejidales sean de 5 ha en promedio y se renten en extensiones de consideración, en algunos casos llegan a ser del orden de las mil hectáreas.

Para el ejemplo, se seleccionó un lote de parcelas en la parte central del módulo y utilizando la imagen del satélite Landsat 8, correspondiente al 14 de febrero de 2016, cuando se alcanzó el mayor valor promedio del índice NDVI, para evaluar la variabilidad espacial de esta superficie sembrada con trigo.

El valor promedio del índice NDVI en las 27 parcelas fue bastante aceptable, por lo que se logró un buen rendimiento; sin embargo, podría haberse logrado un rendimiento mayor si no se hubiera tenido la variabilidad espacial principalmente por las regiones límite entre parcelas como se puede observar en la Figura 7, que del lado derecho se muestran las curvas de isonivel del índice NDVI. En esta misma figura se presenta una gráfica donde se muestra la superficie de 140 hectáreas dividida en 19 barras, mostrando cada una de ellas el área que le corresponde. El valor promedio de NDVI de todas las barras fue de 0.877 con una desviación estándar de 0.068, por lo que su coeficiente de variación fue de 7.78%, éste es un índice de variabilidad.



**Figura 7.** Variabilidad del índice NDVI en 27 parcelas.

### 2.2.8 Fertilización

El criterio general para elaborar un programa de fertilización consiste en determinar los elementos que deben aplicarse, la fuente de dichos elementos, la dosis, el método y época de aplicación. Una planta típica se compone de aproximadamente 90% de agua. El material sólido de la planta comúnmente llamado materia seca, está compuesto por 16 Elementos esenciales como se muestran en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Elementos esenciales en la nutrición vegetal, símbolo químico y concentración foliar promedio.

Elemento	Símbolo químico	Concentración foliar promedio (%)
Carbono	C	41
Hidrógeno	H	6
Oxígeno	O	42
Nitrógeno	N	4
Fósforo	P	0.5
Potasio	K	4
Calcio	Ca	1

Magnesio	Mg	0.5
Azufre	S	0.5
Hierro	Fe	0.02
Manganeso	Mn	0.02
Zinc	Zn	0.003
Cobre	Cu	0.001
Boro	B	0.006
Molibdeno	Mo	0.0002
Cloro	Cl	0.1

---

Fuente: Nelson, (1988).

El 90% de la materia seca está constituida por carbono, hidrógeno y oxígeno, elementos que la planta absorbe del agua y del aire, el 10% restante incluye 13 elementos, de los cuales 11 por lo general están disponibles en cantidades suficientes en el suelo. Los dos restantes, nitrógeno y fósforo, se encuentran deficientes en la mayoría de los suelos del sur de Sonora y son los elementos prioritarios en la fertilización de trigo. (Cortés *et al.*, 2011).

### 2.2.9 Control de malezas

Las malas hierbas que infestan los cultivos, representan uno de los principales factores limitantes de la producción, al grado que desde 1982 se ha estimado en forma general, que las pérdidas globales que ocasionan a la agricultura (42%), son mayores que las ocasionadas por las plagas insectiles (28%), enfermedades (27%) y los nematodos (3%) (Klighman y Ashton, 1982). Para el año 2008, el mercado mundial de plaguicidas mostró que de los 40,475 millones de dólares de venta, 48 por ciento correspondieron a herbicidas, 25 por ciento a fungicidas, 23 por ciento a insecticidas y 3 por ciento a otros (McDougall, 2008).

En México, el reporte del mercado de plaguicidas, señaló una venta de 856 millones de dólares; de los cuales, 38 por ciento correspondió a herbicidas, 32 por ciento a insecticidas, 20 por ciento a fungicidas y 9 por ciento a otros (Anónimo, 2008). En cereales en México, el mercado de plaguicidas reportó, que el 71 por ciento correspondió a herbicidas, el 24 por ciento a insecticidas y el 5 por ciento a otros (Rosales y Esqueda, 2010). Desde hace tres

décadas, se reportó que en trigo los costos ocasionados por el control de maleza a nivel mundial, representaban entre el 25 y 35% de los costos totales, lo que pone de manifiesto la magnitud del problema que estos organismos dañinos impactan en la productividad del cultivo (Moreno, 1990).

En el sur de Sonora, las pérdidas ocasionadas por la competencia de maleza han sido evaluadas de manera insuficiente; sin embargo, es evidente que éstas son muy elevadas, en la medida del incremento de las infestaciones y nuevas áreas invadidas reportadas durante los recientes ciclos agrícolas. El área infestada representa aproximadamente un 80% del área sembrada con trigo en la región (Cortés *et al.*, 2011).

## **2.3 Estudios de respuesta de la planta**

### **2.3.1 Unidad de Calor**

En las últimas décadas, el sistema de unidad de calor ha sido adoptado por muchos investigadores, especialmente como un medio de programar fechas de siembra. Otras aplicaciones han sido la programación de programas de pulverización para insectos, enfermedades y control de malezas. El sistema también es útil en la selección de áreas de cultivo adecuadas y de variedades de cultivos apropiadas para estas áreas.

El sistema de unidad de calor ha sido ampliamente adoptado debido a su valor para satisfacer las necesidades prácticas, más que por su precisión o su solidez teórica. Debido a que no se ha encontrado ningún otro sistema que pueda reemplazarlo adecuadamente, continúa gozando de gran popularidad. Los investigadores han aplicado este sistema a una amplia variedad de plantas, tanto nativas como cultivadas, y han realizado muchos ajustes en la metodología. Los resultados se han correlacionado con diversos eventos fenológicos de las plantas estudiadas. Además, entomólogos, patólogos de plantas, ornitólogos, zoólogos y otros han usado el sistema en sus campos de investigación.

Alrededor de 1730, René A. F. de Réaumur inventó una escala de temperatura en la cual 0° marca el punto de congelación y 80° el punto de ebullición del agua. Aunque su escala de temperatura, conocida como la escala de Réaumur, ahora es casi obsoleta. Otros han adoptado la idea de Réaumur como base para sus propios índices. Adanson (1750) lo tomó prestado,

pero ignoró todas las temperaturas por debajo de 0°C y tomó solo las sumas de temperaturas positivas en la escala Centígrada.

Al considerar la luz solar como un factor fisiológico importante, Humboldt (1794-1845) inició la idea de la constante actinométrica. Boussingault (1837) encontró que la duración del período desde la germinación hasta cualquier etapa dada es inversamente proporcional a la suma de las temperaturas diarias superiores a 0°C durante ese período. Edwards y Colin (1834), que estudian la germinación, llamaron la atención sobre el límite superior del crecimiento de la planta al calcular la suma térmica, la influencia de la luz solar y los estudios realizados sobre la constante térmica superior a 5°C desde la siembra hasta la cosecha de cereales.

Podol'skii (1958), al estudiar la fenología del algodón en la URSS, descubrió que ni la suma de calor ni la temperatura umbral son valores constantes. Al construir un nomograma de fenotemperatura para eliminar esta no linealidad, logró una mayor precisión en el pronóstico fenológico.

A pesar de las numerosas aplicaciones e intensas investigaciones llevadas a cabo durante más de dos siglos, el sistema de unidad de calor ha sido objeto de serias críticas, especialmente en los últimos años. Incluso sus usuarios fieles han encontrado fallas en el sistema y están buscando medios de mejora.

Sus desventajas se pueden resumir de la siguiente manera:

- Las plantas responden de manera diferente al mismo factor ambiental durante varias etapas de su ciclo de vida.
- La temperatura umbral tal como se empleó se considera una constante, aplicada a todo el ciclo de vida de una planta, esto es poco sólido, ya que los valores umbral cambian con la edad avanzada de la planta
- Usualmente las respuestas de temperatura en términos de la curva de crecimiento son sigmoideas y no lineales; de hecho, las altas temperaturas extremas a las que las plantas están sometidas en ocasiones tienen efectos negativos en su tasa de desarrollo. Podol'skii

descubrió que cuando se alcanza la temperatura óptima para el crecimiento, la cantidad de calor ya no es lineal.

- El sistema de unidades térmicas no tiene en cuenta muchos factores que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas, como humedad del suelo, déficit de presión de vapor, etc.
- Los problemas microclimáticos con respecto a la calidad representativa de los registros de temperatura utilizados para las evaluaciones de unidades térmicas se encuentran entre los problemas más complicados que aún no se han resuelto

Mejoras que se pueden hacer al sistema de unidad de calor:

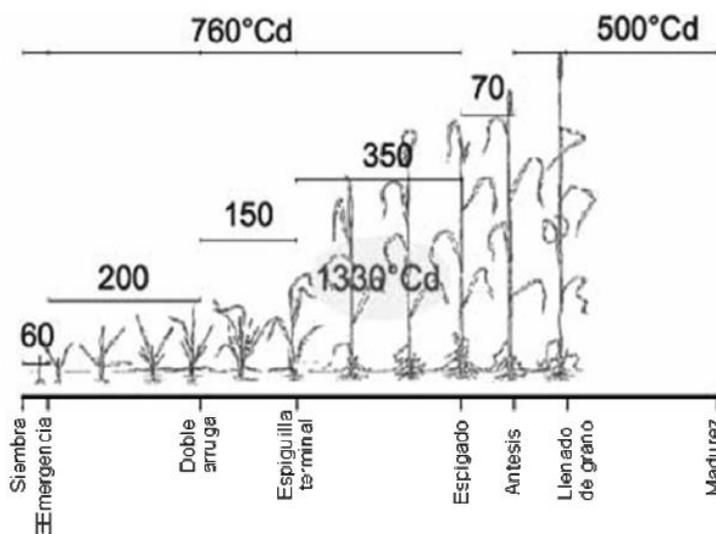
- Se deben tomar temperaturas representativas.
- La altura de las observaciones debe variar de vez en cuando según la altura de las plantas.
- Las observaciones deben hacerse al azar en varios lugares del campo.
- El número de lugares que se muestrearán dependerá del tamaño y la topografía del campo, así como de la variación en su microambiente.
- La temperatura umbral utilizada debería cambiarse según la edad de las plantas.
- El crecimiento y el desarrollo deben diferenciar, por ejemplo, la floración es un evento de desarrollo, mientras que la altura de una planta es el resultado de procesos de crecimiento.
- El parámetro ambiental debe ser ajustado. Por ejemplo, Wang (1958a) estudió el efecto de una combinación de día cálido y noche cálida durante el período significativo de 31 días antes de la madurez en el rendimiento de maíz.
- Los parámetros ambientales, como la lluvia y la temperatura, deben combinarse. Antes de que esto pueda hacerse, la lluvia y la temperatura deben reducirse a una unidad común y cada una debe tener en cuenta la respuesta del cultivo.

La mayoría de los métodos mencionados muestran una alta correlación con el crecimiento y desarrollo de las plantas pero igual se debe considerar que la acumulación de las unidades calor es diferente para cada cultivo, variedad de semilla y zona geográfica.

Aplicando estas metodologías hasta lograr tener el mejor ajuste, los productores pueden manejar de una forma más eficiente los calendarios de riego para cada cultivo. (Wang, 1960).

### 2.3.1.1 Estudio de Unidad de Calor para el cultivo de trigo en Sonora

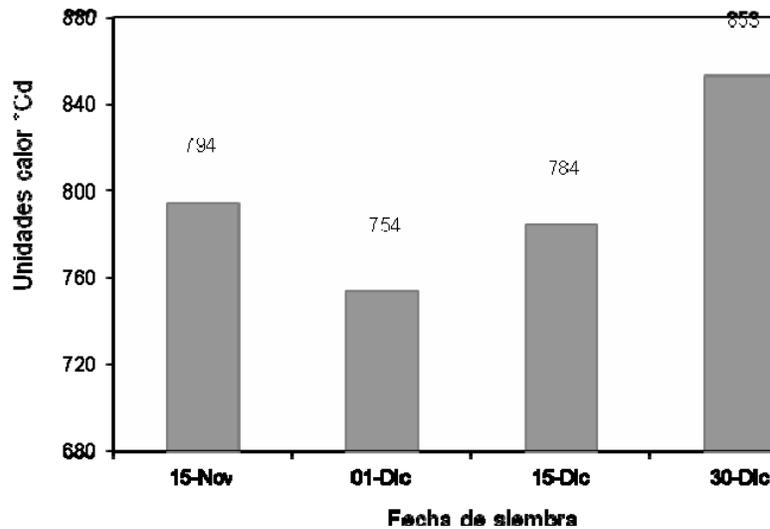
Cada fase del desarrollo requiere un mínimo de acumulación de temperatura para llegar a su término y que la planta pueda pasar a la fase siguiente. En efecto, la planta "mide" la temperatura cada día y agrega el promedio de ese día a un total requerido para esa fase. Este total se llama tiempo térmico o suma de calor y las unidades térmicas son grados/día ( $^{\circ}\text{Cd}$ ). La Figura 8 muestra el número mínimo de  $^{\circ}\text{Cd}$  necesario para cada fase (FAO, 2001).



**Figura 8.** Tiempo térmico mínimo requerido por fase de desarrollo.

Fuente: (FAO, 2001)

En la Figura 9 se reportan las unidades calor acumuladas según cuatro fechas de siembra para el cultivo de trigo en el Valle del Yaqui, Sonora, de acuerdo con información de agrosón ([www.agrosón.org.mx](http://www.agrosón.org.mx)), el método utilizado fue el de seno simple. Se utilizó el promedio de los ciclos 2005-06 al 2009-10 de las 14 estaciones climáticas.

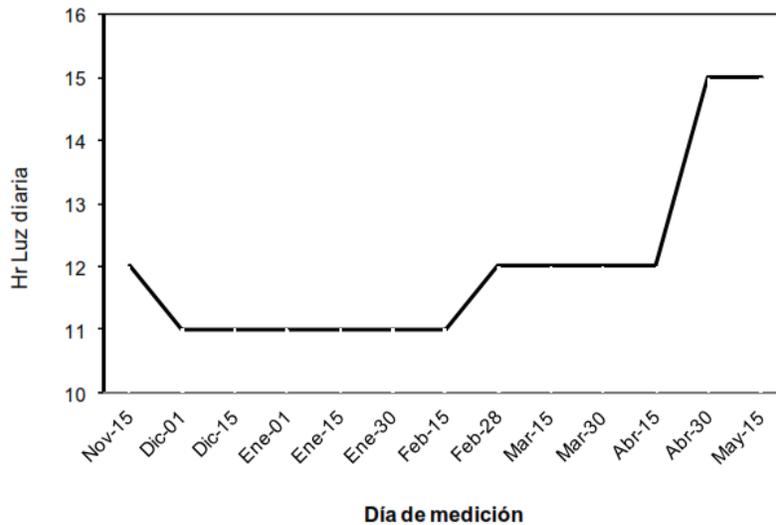


**Figura 9.** Unidades calor acumuladas en el Valle del Yaqui, según la fecha de siembra (Ciclos 2005-06 a 2009-10).

La fecha de siembra más tardía acumuló mayor cantidad de unidades calor, sin embargo es preciso evaluar el rendimiento de trigo según la fecha de siembra específica para correlacionar las unidades calor con esta variable.

El fotoperiodo, definido como el total de horas entre la primera y la última luz de cada día, es uno de los factores que pueden modificar algunos efectos de la temperatura, sin embargo su incidencia difiere de la fase y de la variedad de trigo establecida (Rawson *et al.*, 1998; citado por FAO, 2001). Los días más cortos demoran el desarrollo, este efecto se observa principalmente en los trigos de invierno.

La Figura 10 reporta la duración de horas luz medida durante el desarrollo del trigo (15 de noviembre a 15 de mayo) con mediciones quincenales.



**Figura 10.** Radiación solar horaria medida quincenalmente a partir del 15 de noviembre del 2009 hasta 15 de mayo del 2010. B-910 del Valle del Yaqui, Sonora.

Fuente. ([www.agroson.org.mx](http://www.agroson.org.mx)).

Las fechas de siembra recomendadas por el INIFAP cumplen con las necesidades lumínicas para un crecimiento adecuado de las etapas de amacollamiento a fin de embuche (días cortos). En la etapa de emergencia de la espiga se requieren días largos y con la fecha de siembra mencionada anteriormente se cumple este requisito. Para el llenado de grano también se requieren días largos, ya que esta etapa es sensible a la falta de luz, que en dado caso se presentará por días nublados y repercutiría en reducción del peso específico del grano y alargamiento del período. Aun con temperaturas favorables, la fecha de siembra después del 15 de diciembre provoca una aceleración de las etapas de encañe y llenado de grano por efecto de alargamiento de día, los tallos se desarrollan con menor cuerpo y altura, lo cual registra índices de área foliar menores a los de las fechas de siembra óptimas. (Valencia *et al.*, 2009).

### 2.3.2 Horas frío

La mayoría de los procesos fisiológicos que se relacionan con el proceso de crecimiento y desarrollo de las plantas, dependen directamente de la temperatura, en términos generales su influencia principal radica en el control de la proporción de las reacciones químicas involucradas en los diferentes procesos que ocurren dentro de la planta, tales como la solubilidad de minerales, la absorción del agua, nutrimentos y gases. La temperatura además,

afecta los mecanismos hormonales que determinan el desarrollo vegetativo, la floración y la fructificación de las plantas, así como la presencia cíclica de períodos de reposo en los que todo crecimiento visible se ve radicalmente disminuido.

Dentro de los elementos climáticos, las Horas Frío es un indicador que influye de manera directa en el desarrollo de los mismos. La mayoría de las plantas experimentan en algún momento de su ciclo vital periodos durante los cuales su crecimiento queda temporalmente suspendido o al menos retardado; es entonces cuando se dice que las plantas se encuentran en dormancia, lo cual representa un medio de defensa ante factores climáticos adversos. Muchas plantas necesitan pasar un período mayor o menor de tiempo durante el cual las temperaturas deben bajar de un cierto umbral; estas necesidades son también diferentes para cada tipo de planta y se manifiestan en dos fenómenos, la vernalización y la parada de crecimiento vegetativo o de reposo invernal.

Las horas frío se definen como el número de horas que pasa la especie vegetal, durante el período de reposo invernal, a temperaturas iguales o inferiores a un determinado umbral. La acumulación de horas frío posibilita los cambios fisiológicos responsables de la floración y fructificación normal del cultivo (Gil-Albert, 1992; Melgarejo *et al.*, 1997).

A la duración media específica del reposo de una determinada especie o variedad se denomina necesidades de frío, y se ha estimado contando el número de horas que pasa la planta durante el período de reposo invernal, a temperaturas inferiores a un umbral, comprendido entre 4 y 12°C, siendo muy frecuente que esta temperatura umbral se fije en 7°C. (Vélez y García, 2012).

Las variedades de trigo que se cultivan en Sonora, muestran una expresión favorable entre la acumulación bien distribuida de horas frío durante el ciclo de cultivo y el rendimiento de grano. Su respuesta varía con la localización geográfica y el efecto dominante del fenómeno climático anual, el cual es conocido como “La Niña” y “El Niño” o condición fría, neutra o caliente de la temperatura, y que está históricamente relacionado con las variaciones anuales de los rendimientos promedios de trigo en cada distrito de riego. La base de datos disponible del rendimiento y de la temperatura, proporciona la oportunidad de predecir ambos para fines específicos destacando que su utilidad en la agricultura es amplia, como también sirve para

proponer ajustes en el manejo agronómico previo a la siembra en cada nuevo ciclo agrícola. (Valencia *et al.*, 2009).

Existen varias metodologías para valorar la importancia de la temperatura del aire y poder explicar el comportamiento fenológico de los cultivos, entre los que destacan las sumas térmicas (horas calor, horas frío) como índices bioclimáticos, que permiten relacionar el desarrollo de la planta con períodos extremos del clima. Esta metodología simplista de sumas térmicas (Confalone y Navarro, 1999) puede explicar la variabilidad en el desarrollo de la planta hasta en 98% como lo señala Arnold (1959).

Los resultados obtenidos en diversos estudios, han demostrado que cada especie frutal requiere una cantidad muy particular de frío para romper el reposo invernal e incluso dentro de una misma especie existe una amplia variación en este aspecto, dependiendo del cultivo o variedad de que se trate.

Las grandes diferencias encontradas entre especies y entre variedades en cuanto a los requerimientos en frío han planteado algunas interrogantes sobre ¿Qué causas determinan estas diferencias? ¿Qué es lo que causa la recurrencia cíclica del reposo? Y ¿Qué condiciones climáticas son las más favorables para el crecimiento? (Bustillos, 1988)

Durante mucho tiempo se propusieron diversas teorías que trataron de dar respuesta a tales interrogantes. Las de Muller-Thungaru (1910) y Howard (1915), citadas por Samish (1954), por ejemplo, suponen que la inhibición del crecimiento podía deberse a múltiples factores como la sequía, el manejo, podas severas, etc., pero que el requerimiento del frío ha sido fijado con el curso de los años, en el plasma celular como un carácter hereditario. Posteriormente Lesley (1944) mostró que el requerimiento del frío depende de genes múltiples, algunos de los cuales son de carácter intermedio.

En relación a lo anterior, Baur (1911) y Gassner (1918) citados por Vegis (1964), mencionaron que las plantas poseen la capacidad hereditaria para responder a la acción individual o combinada de ciertos factores externos, que se manifiestan en un tipo de actividad de crecimiento muy específico, lo cual determina su comportamiento de adaptación a las condiciones climáticas del área geográfica donde se originaron. Algunas investigaciones en

especies forestales han demostrado que un mismo genotipo, expuesto a diferentes condiciones climáticas varía notablemente su actividad de crecimiento.

Por su parte Chandler, mencionado por Samish (1954) señaló el hecho de que el requerimiento de frío que las especies deben completar para reanudar crecimiento normal al inicio de la primavera, es una característica que determina en gran medida su adaptabilidad al medio ambiente, lo cual ha garantizado su supervivencia a través del tiempo. Por lo tanto, en regiones frías, las plantas con bajos requerimientos de frío pueden ser dañadas por la presencia de inviernos cálidos o por heladas tardías debido a su brotación temprana. En contraste con lo anterior, en regiones cuyas condiciones climáticas se acercan a las tropicales, las plantas con altos requerimientos de frío tendrían pocas posibilidades de satisfacer tales requerimientos, viéndose seriamente amenazada su capacidad de adaptación y de supervivencia.

De acuerdo con lo señalado por Ortiz (1984), la valoración cuantitativa de las exigencias del frío comenzó a generalizarse a partir de que Nightingale y Blake (1934), determinaron que los 7°C representaba el límite mínimo para el crecimiento de ramitas de duraznero y manzanos. Este valor se ha usado por mucho tiempo como límite superior de las temperaturas favorables a la acción del frío, definiéndose como “Horas Frío” (HF), “horas de enfriamiento” o “unidades de dormición” a la cantidad de horas durante las cuales la temperatura ambiental permanece por debajo de los 7°C.

El mismo Ortiz (1984), mencionó que, aunque este valor no es uniforme ni puede ser aplicable a todas las especies y variedades, éste ha sido convencionalmente aceptado como límite medio adecuado para el cómputo de HF. De igual manera su utilización ha permitido explicar con éxito las variaciones fenológicas y productivas que representan las especies caducifolias y en especial los frutales cultivados que deben cumplir su período de descanso bajo diferentes grados de enfriamiento de acuerdo con las condiciones climáticas de la región donde se desarrollan.

Chandler *et al.*, (1973), establecieron como límite 7.2°C para que las yemas completaran el reposo. Por su parte, Erez y Lavee (1971), bajo condiciones controladas observaron que una temperatura de 6°C (43°F) fue la que contribuyó más a la terminación del reposo que a cualquier otra de las temperaturas estudiadas. Encontraron además que 10°C fue alrededor de

la mitad de eficiencia que la de 6°C en el rompimiento del reposo y que 21°C alterados diariamente con bajas temperaturas, nulificaron el efecto de éstas últimas. Mencionaron además que temperaturas alrededor de los 7°C incluso un poco mayores pueden también ser efectivas, aunque el uso de este valor como límite para la acumulación de Horas Frío es todavía cuestionable.

En estudios posteriores realizados por Richardson *et al.*, (1974), señalaron que es difícil aceptar que un fenómeno tan complejo como es el reposo, el cual además de las condiciones ambientales está regulado en gran medida por cambios químicos al interior de la planta, deba ser sujeto a un límite fijo de temperatura. Los resultados obtenidos por Yarnell (1939), es evidente que el desarrollo progresivo de las yemas hacia su apertura total está fuertemente condicionada tanto por las bajas como por las altas temperaturas; por esta razón existe un amplio rango de respuesta de una sola variedad, en términos de acumulación de Horas Frío, bajo diferentes condiciones climáticas. Entonces es imposible establecer un mínimo requerimiento de frío para una variedad y que éste sea válido para todas las condiciones, sin embargo, es posible clasificar las variedades en términos generales de acuerdo con su necesidad de frío y proporcionar recomendaciones prácticas para su observación y manejo en cualquier región en particular y sobre estas bases lograr una mejor adaptación, conocer el tiempo que el árbol requiere para completar su período de reposo y en última instancia poder predecir el momento en que tendrá lugar la apertura de yemas.

### **2.3.2.1 Estudio de horas frío para el cultivo de trigo en sonora**

La productividad anual de un área agrícola se explica en gran medida por la oscilación de la temperatura. El conocimiento de este insumo puede ser capitalizado para planear las tecnologías más apropiadas, como medida para disminuir las mermas y los riesgos en la producción, o también, para implementar alternativas de manejo agronómico para el aprovechamiento máximo de las condiciones climatológicas de un ciclo o de un área específica, que exprese mayor aptitud para el rendimiento de trigo. (Valencia *et al.*, 2009). En el Cuadro 4 se muestra un gradiente de horas frío en los meses del año, mientras que en el Cuadro 5 se observan las tendencias anuales del frío en cada ciclo de crecimiento por localidad. Esta información de horas frío presentada en los Cuadros 4 y 5, puede ser utilizada

para cotejar la relación existente con la producción promedio de trigo de los últimos seis años de cada distrito de riego en el estado de Sonora, la cual se muestra en el Cuadro 6.

**Cuadro 4.** Registro promedio mensual de horas frío del 2004 a 2008.

Región*	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
V. Mayo	173	147	113	38	4	1	1	1	9	4	16	123
V. Yaqui	186	156	117	41	5	1	1	1	2	2	23	152
V. Guaymas	180	99	69	9	1	0	0	0	0	3	9	130
C. Hermosillo	218	203	97	33	3	0	0	0	9	9	51	214
San Luis R.C.	260	191	113	33	2	0	0	0	0	9	72	271

Fuente: Información de la red de estaciones climatológicas de INIFAP- COFUPRO-PIEAES, instaladas en diferentes distritos de riego.

**Cuadro 5.** Total de horas frío acumuladas durante el período de noviembre al mes de abril de cada ciclo agrícola.

Ciclo	Valle del Mayo	Valle del Yaqui	Valle de Guaymas	Costa de Hermosillo	San Luis R.C.
2004-05	500	619	--	773	--
2005-06	792	828	381	884	1078
2006-07	788	817	635	948	1059
2007-08	843	916	700	942	1077
2008-09	575	648	427	785	968
<b>Promedio</b>	<b>700</b>	<b>766</b>	<b>536</b>	<b>866</b>	<b>1045</b>

Fuente: Promedio del número de estaciones climatológicas activas de INIFAP-COFUPRO-PIEAES.

**Cuadro 6.** Rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ ) promedio comercial registrado en las zonas productoras de trigo en Sonora.

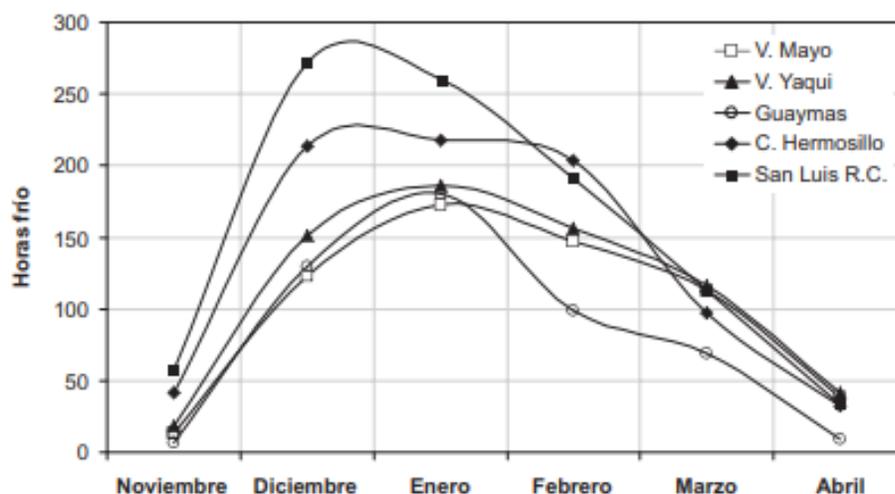
Ciclo	Valle del Mayo	Valle del Yaqui	Valle de Guaymas	Costa de Hermosillo	San Luis R.C.
2003-04	5.000	4.900	5.000	6.000	6.500
2004-05	5.200	5.451	4.318	5.800	5.936
2005-06	6.000	6.166	4.200	6.145	6.812
2006-07	6.100	6.251	4.313	6.214	6.184
2007-08	6.100	6.077	4.767	6.286	6.757
2008-09	5.620	5.685	5.119	5.958	6.318
<b>Promedi</b>	<b>5.670</b>	<b>5.755</b>	<b>4.619</b>	<b>6.067</b>	<b>6.418</b>

Fuente: OEIDRUS-SAGARPA.

La Figura 11 muestra el inicio y término del frío durante la estación de crecimiento del trigo. También indica la intensidad anual del período de frío lo cual es importante, para señalar ajustes específicamente en la fecha de siembra óptima entre zonas de producción.

De manera general, las condiciones de temperatura más apropiadas para todas las localidades inician el 15 de noviembre y terminan el 15 de abril. Las diferencias de frío que se muestran entre localidades al inicio del ciclo puede ser importante para definir con mayor precisión el inicio de la siembra y la variedad a emplear.

De acuerdo con el Cuadro 5 y la Figura 11, la zona agrícola con menor aptitud para la producción de trigo es el valle de Guaymas, donde anualmente se siembra un promedio de 2,655 ha (2004 - 2009) con un rendimiento medio de 4.6 t ha<sup>-1</sup>. La baja acumulación de frío del mes de febrero y el registro frecuente de altas temperaturas puede ser una de las causas del bajo rendimiento medio de esta región.



**Figura 11.** Expresión mensual de las horas frío por distrito de riego (período de siembra a madurez fisiológica del trigo; promedio de los ciclos cosechados en 2004 a 2009).

Las parcelas de trigo comerciales que fueron monitoreadas en la zona agrícola de Guaymas, arrojaron índices de crecimiento similares a los registrados en las demás áreas del Estado. Por lo tanto, para el máximo aprovechamiento del período de frío de esta zona, la siembra deberá realizarse en un lapso más corto de tiempo; entre el 20 de noviembre al 10 de diciembre. Otra opción es la utilización de variedades de trigo con un ciclo 10 a 15 días más corto que las

variedades usadas actualmente. También, la productividad de ésta zona agrícola, bien pudiera incrementarse con la reconversión de este cereal por cultivos de invierno de ciclo más breve, con necesidades térmicas ajustadas al período de frío que manifiesta la región.

El valle del Mayo muestra menor acumulación de frío durante el ciclo de trigo que el Valle del Yaqui, con una diferencia menor de 66 HF, siendo más evidente en el mes de diciembre. Los registros históricos de la temperatura máxima del aire muestran que la zona del valle del Mayo es 1°C menor que el área del valle del Yaqui. Esta diferencia de temperatura favorable para la zona agrícola del valle del Mayo, disminuye el riesgo por oscilación térmica, ventaja que se manifiesta, en las unidades de producción con mayor acercamiento costero.

Las zonas de producción de trigo de la costa de Hermosillo y de San Luis R.C., son las que muestran mayor cantidad de horas frío, relacionado fuertemente con mayores volúmenes en la producción unitaria de trigo. En comparación a la zona sur del Estado, la costa de Hermosillo muestra un potencial mayor a 300 kilos por hectárea en su rendimiento medio, mientras que la región de San Luis R.C. se cosecha un promedio de 700 kilos de grano más por hectárea (Cuadro 6).

Entre otras ventajas, la mayor frecuencia de temperaturas por debajo del límite inferior de 10°C que se registran en ambas regiones, ha permitido seleccionar genotipos de trigo con mayor potencial de rendimiento expresado sólo bajo este nivel de exposición al frío. Como respuesta de las evaluaciones, la variedad de trigo harinero Borlaug F95 se liberó específicamente para su explotación comercial en las regiones de San Luis R.C. y Mexicali, B.C. Es concluyente, a partir de la información disponible, que el potencial de rendimiento del trigo que se expresa en los cinco distritos de desarrollo rural en el estado de Sonora, se debe básicamente a las condiciones de temperatura fría que prevalecen durante el ciclo de cultivo.

Muchos de los métodos para obtener las HF dependen de las variedades del cultivo, del suelo, de la zona geográfica entre otros factores que se deben considerar, además el umbral para la medición de las HF debe de ser adecuado para cada etapa fenológica del trigo, hacer un seguimiento por cada ciclo agrícola como el presentado por INIFAP permitiría poder conocer a detalle el desarrollo del cultivo dependiendo de las condiciones climáticas (Valencia *et al.*, 2009).

### 2.3.3 Evapotranspiración del cultivo

La estimación de la eficiencia del uso del agua a nivel de parcela ha sido un reto, ya que no es fácil medir la evapotranspiración de los cultivos. El método gravimétrico, que consiste en tomar muestras de suelo para determinar el contenido de humedad mediante el pesaje del suelo húmedo y luego seco, y para estimar el peso específico de cada muestra en varios lugares de una parcela, es muy difícil y costoso. Debido a la variabilidad espacial del suelo, se requiere tomar varias muestras de cada parcela de cada cultivo, lo que implicaría a muchas personas para realizar esta tarea.

El uso del lisímetro es otro método que requiere la construcción de estos dispositivos que se hace generalmente en instituciones de investigación, pero su uso no es posible en cada cosecha o parcela de interés. También se usan dispositivos de medida de flujo turbulento (Eddy Correlation), pero el costo es alto y generalmente se usa para calibrar otros métodos más simplistas.

Existen varios métodos empíricos o semi-empíricos que han sido utilizados para estimar el uso del agua de los cultivos por muchos años, entre ellos, el método de Thornthwaite, Blaney y Criddle, Penman-Monteith, que generalmente intentan estimar la evapotranspiración potencial o de referencia, que mide la demanda de evapotranspiración por factores climáticos. Por otro lado, la evapotranspiración del cultivo es generalmente muy variable ya que depende del desarrollo vegetativo del cultivo, de la variabilidad espacial del suelo, del estrés hídrico en la planta y de muchos otros factores, por lo que es difícil de evaluar. Las estaciones meteorológicas automáticas actualmente disponibles pueden utilizarse para estimar la evapotranspiración de referencia mediante la ecuación de Penman-Monteith, con software instalado en la estación meteorológica automática (Palacios, 2002).

Como se mencionó anteriormente, la evapotranspiración de los cultivos es muy variable y generalmente se estima multiplicando a la evapotranspiración de referencia por un factor adimensional denominado coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) (Allen *et al.*, 2005). El coeficiente de cultivo cambia acorde a su desarrollo. Este factor puede estimarse a partir de un índice de vegetación denominado NDVI, que puede obtenerse mediante imágenes satelitales. A este respecto, cabe señalar que, en comparación con METRIC, un modelo desarrollado por la

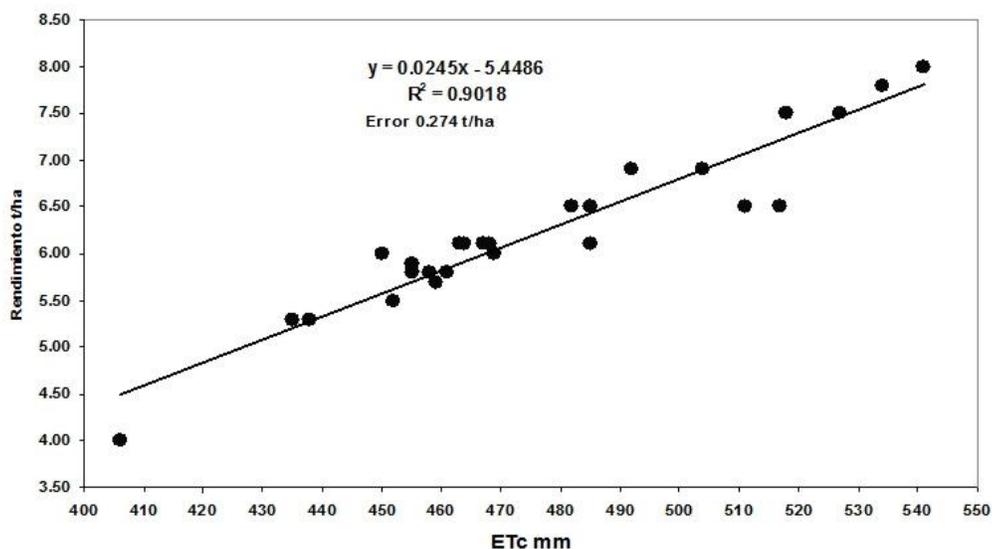
Universidad de Idaho, el método descrito por Palacios *et al.*, (2018) es más fácil de desarrollar y da resultados similares en la estimación de la eficiencia del uso del agua cuando se usa adecuadamente. (Palacios y Flores 2013).

Una forma en que se ha podido estimar la evapotranspiración del cultivo del trigo utilizando la relación  $ET_c = K_c E_{Tr}$ , donde  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo,  $E_{Tr}$  es la evapotranspiración de referencia, que puede calcularse mediante la fórmula de Penman-Monteith y  $K_c$  coeficiente del cultivo, y puede estimarse en función de los valores del NDVI, como lo han demostrado varios autores; como Choudhury *et al.*, (1994) y específicamente para el cultivo del trigo, Calera y González, (2007) encontraron una relación lineal entre el  $K_c$  y el valor del NDVI obtenido de cada imagen de los satélites Landsat, cuyo valor es:

$$K_c = 1.147 \text{ NDVI} + 1.1716 \quad (6)$$

En el mismo artículo de E. V. Palacios et al. 2010 se muestra una relación similar obtenida en el distrito de riego 038 del Río Mayo como se vio en la formula (5):

La evapotranspiración del cultivo estimada con esta función, para cada una de las 26 parcelas se relacionó con el rendimiento obtenido y se obtuvo una función con un ajuste estadístico bueno como se muestra en la Figura 12.



**Figura 12.** Relación Evapotranspiración del cultivo con el rendimiento del trigo.

Finalmente, en el mencionado artículo se muestra una relación no lineal entre el MSI y el rendimiento del trigo que es:

$$R = - 18.848 \text{ MSI}^2 + 6.504 \text{ MSI} + 7.856 \quad (7)$$

Con  $R^2 = 0.794$  y un error estándar de  $0.443 \text{ t ha}^{-1}$ ; como es de esperarse la función es inversa, de manera que conforme aumenta el MSI, disminuye el rendimiento. Es de mencionarse que valores cercanos a la unidad de este índice indican que las plantas han llegado al Porcentaje de Marchitamiento Permanente.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Materiales**

- a) Computadora HP 650, con Procesador Intel Core i3, memoria RAM de 8 GB.
- b) 58 imágenes de satélite entre Landsat 7, 8 y Sentinel 2A, para el seguimiento de los ciclos agrícolas 2012 al 2018.
- c) Se han utilizado datos diarios de dos estaciones meteorológicas que son la de SEMAY de la REMAS y la de Etchojoa.
- d) Paquetería de Office 2013.
- e) Software QGIS, programas desarrollados para manipulación de imágenes satelitales.
- f) Archivos vectoriales del Distrito de Riego 038 Rio Mayo.

#### **3.2. Área de estudio**

El trabajo de investigación se llevó a cabo en el Distrito de Riego No. 038, Río Mayo en el Sur del estado de Sonora, Figura 13. La superficie actual del Distrito está situada en los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, y comprende un área de 114,000 ha, de las cuales están empadronadas 97,891 ha de las que se riegan 88,124 ha, pero que en algunos ciclos agrícolas se incrementan hasta 92,000 ha, considerando terrenos agrícolas localizados fuera de su perímetro.

Este Distrito se localiza en el sur del Estado de Sonora en la zona denominada Valle del Mayo, entre las latitudes 27° 15' y 26° 45' al norte del Ecuador, así como los meridianos 109° 20' y 109° 50' con respecto al meridiano de Greenwich, ubicado en las coordenadas UTM zona 12 N, X=620010, Y=3019310, esquina superior izquierda y X=677490, Y=2955150, esquina inferior derecha. Cubre una franja de 60 por 50 kilómetros.



**Figura 13.** Localización geográfica del área de estudio.

En noviembre de 1991 de acuerdo a la documentación de la transferencia de operación y administración de la infraestructura hidroagrícola del Distrito de Riego 038 a los usuarios, la organización se integró en 16 módulos de riego cuyas superficies se describen en el siguiente cuadro.

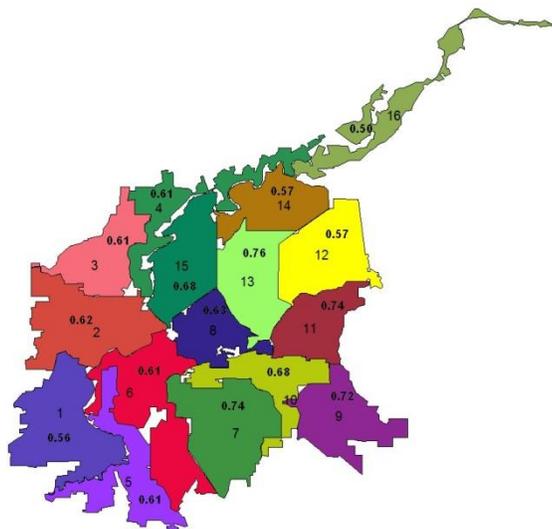
**Cuadro 7.** Superficie por módulos de riego

No. Modulo	Propiedad ejidal		Propiedad particular		T o t a l	
	No. usuarios	Superficie	No. usuarios	Superficie	No. usuarios	Superficie
1	653	4,073.00	430	3,825.01	1,083	7,898.01
2	819	6,098.43	225	2,538.22	1,044	8,636.65
3	430	4,164.65	81	1,049.03	511	5,213.68
4	513	2,762.54	337	2,705.71	850	5,468.25
5	321	1,390.42	600	3,898.08	921	5,288.50
6	472	2,302.72	374	5,572.45	846	7,875.17
7	1,132	6,219.82	63	1,910.62	1,195	8,130.44

<b>8</b>	246	2,371.86	92	1,394.49	338	3,766.35
<b>9</b>	286	2,744.85	91	3,317.81	377	6,062.66
<b>10</b>	355	2,873.71	93	2,280.00	448	5,153.71
<b>11</b>	364	3,407.99	38	1,760.38	402	5,168.37
<b>12</b>	95	488.07	183	6,543.72	278	7,031.79
<b>13</b>	240	2,775.78	97	3,769.41	337	6,545.19
<b>14</b>	508	2,460.45	249	2,336.97	757	4,797.42
<b>15</b>	1,055	5,158.10	144	927.54	1,199	6,085.64
<b>16</b>	361	1,757.48	770	2,167.46	1,131	3,924.94
<b>TOTAL</b>	<b>7,850</b>	<b>51,049.87</b>	<b>3,867</b>	<b>45,996.90</b>	<b>11,717</b>	<b>97,046.77</b>

Fuente: Distrito de Riego 038 Río Mayo. S. DE R.L. DE I.P. Y C.V. Gerencia de operación, área de hidrometría y estadística

Este distrito dispone del sistema de información geográfica (SIG), con 15,022 parcelas detectadas y se encuentra dividido en 16 módulos de riego, como se muestran en la Figura 14, los cuales son administrados por 16 Asociaciones de Usuarios del Agua (AUA) y una Sociedad de Responsabilidad Limitada, que se encarga de la operación y mantenimiento de la infraestructura de la red mayor de canales, drenes y estructuras.



**Figura 14.** Módulos del Distrito de Riego 038 Río Mayo.

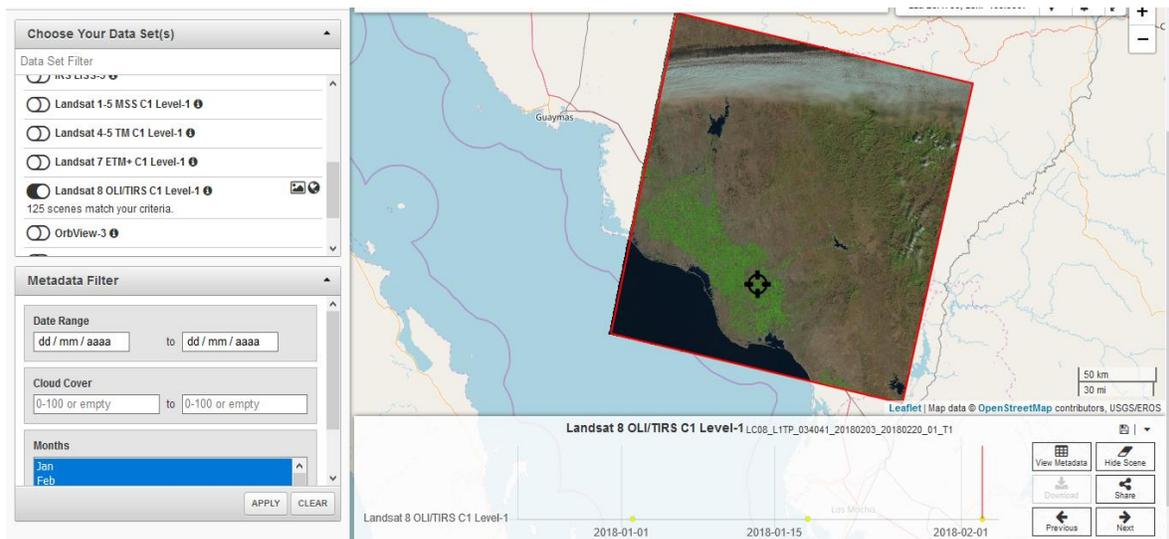
La principal fuente de abastecimiento de agua es la presa “Adolfo Ruiz Cortínez” con una capacidad del orden de los 1,100 hectómetros cúbicos, además de 130 pozos profundos.

### 3.3.Métodos

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, se han realizado las siguientes actividades.

#### 3.3.1. Descarga de imágenes satelitales

Desde la página web <https://glovis.usgs.gov> se puede acceder al repositorio de imágenes Satelitales Landsat y Sentinel, Se selecciona el tipo de sensor y la fecha de la imagen a descargar.



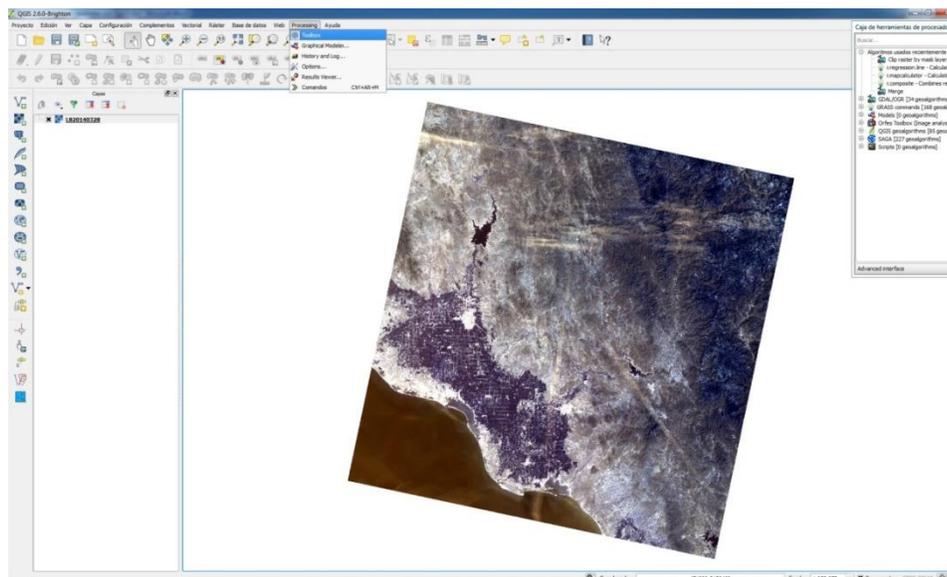
**Figura 15.** Descarga de imágenes satelitales desde la página web <https://glovis.usgs.gov>.

#### 3.3.2. Manejo de imágenes satelitales

Se considera de mucha importancia el uso del software QGIS, debido a que es gratuito y tiene un potencial considerable para el manejo de sistemas de información geográfica y de imágenes satelitales, por lo que se utilizó para darle seguimiento al desarrollo de los cultivos con imágenes del satélite Landsat7, 8, y Sentinel 2A, para la obtención del NDVI de cada imagen satelital y para cada parcela del distrito de Riego 038, Rio Mayo, utilizadas en este trabajo.

Para mostrar el uso de este software, se usarán una imagen del satélite Landsat 8, que se usó para dar seguimiento al desarrollo de los cultivos en el distrito de riego 038, Río Mayo, en el estado de Sonora, mediante índices de vegetación.

En la Figura 16, se muestran la imagen importada como un paquete, también se ha abierto la caja de herramientas al hacer clic sobre la primera barra en donde dice “processing” y aparece un cuadro como se muestra en la parte superior de esta misma figura de donde se escoge “Toolbox”, que se ha desplegado a la extrema derecha.



**Figura 16.** Importación del paquete con 10 imágenes del satélite Landsat 8.

En la caja de herramientas se hacen notar las principales fuentes de algoritmos que son GDAL/OGR, GRASS, MODELOS, QGIS gealgorithm, Orfeo Toolbox, SAGA y Scripts.

### **3.3.3. Método para obtener el NDVI de las imágenes satelitales en Qgis**

Para el monitoreo temporal del desarrollo fenológico de los cultivos, se usan índices de vegetación como: el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI por sus siglas en inglés, Rouse *et al.*, 1974) y el índice de estrés de humedad (MSI, por sus siglas en inglés, Rock *et al.*, 1986).

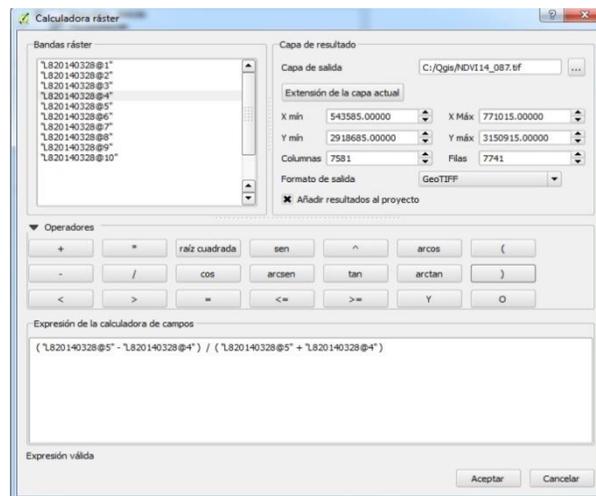
El NDVI está constituido por las reflectancias en las bandas roja e infrarroja cercana de acuerdo a la fórmula (3):

Este índice varía entre -1 y 1, los valores negativos generalmente se presentan donde hay agua, valores menores que 0.2 generalmente se muestran cuando hay suelo desnudo y para la vegetación verde, usualmente se tienen valores que varían entre 0.25 hasta valores cercanos a 1 cuando la vegetación está en pleno desarrollo.

Como primer paso, se calculará el índice de vegetación denominado NDVI, para lo cual se utilizará el calculador de algebra de mapas, el cual se encuentra en el primer renglón donde dice “Raster” y al dar el clic aparece como primera aplicación el Calculador raster, el que se abre y en el lado izquierdo aparecen las 10 imágenes del Landsat 8, como se muestra en la Figura 17. Se observa, que el calculador muestra las coordenadas UTM del extremo superior derecho y del extremo inferior izquierdo, así como el número de columnas y filas que tienen las imágenes. También en la parte central se muestran todas las operaciones que se pueden realizar.

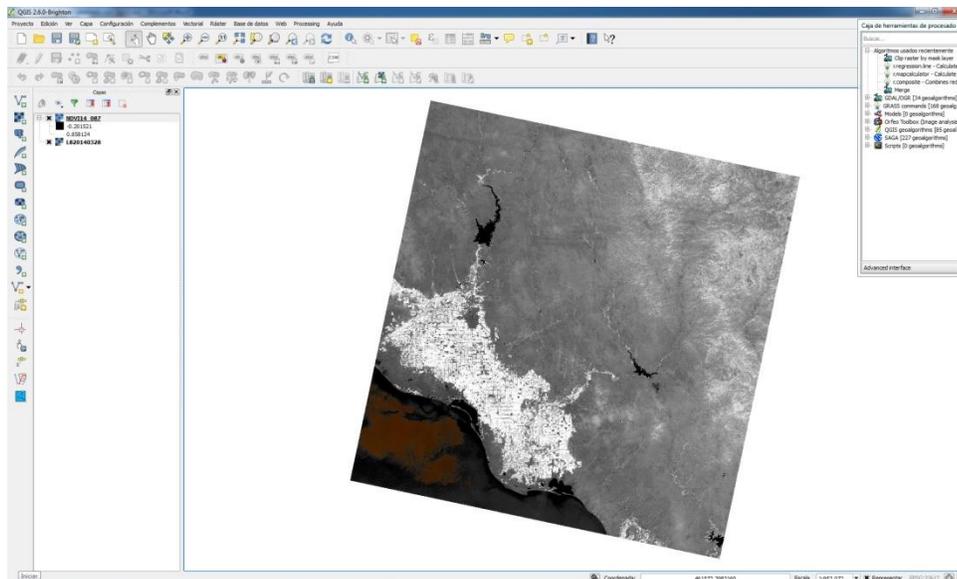
Para el cálculo del índice NDVI, se utilizarán las imágenes número 4, banda roja y número 5, banda infrarroja cercana, poniendo la operación que permite su cálculo. También se observa en el extremo inferior izquierdo del cuadro que dice “Expresión válida”, así cuando se pretende llevar al cabo una operación que no puede realizar el calculador, aparece “Expresión no válida”.

En la parte superior derecha, se solicita definir donde quedará la capa de salida, que para el caso es C:/Qgis/NDVI14\_087.tif.



**Figura 17.** Calculador de QGIS.

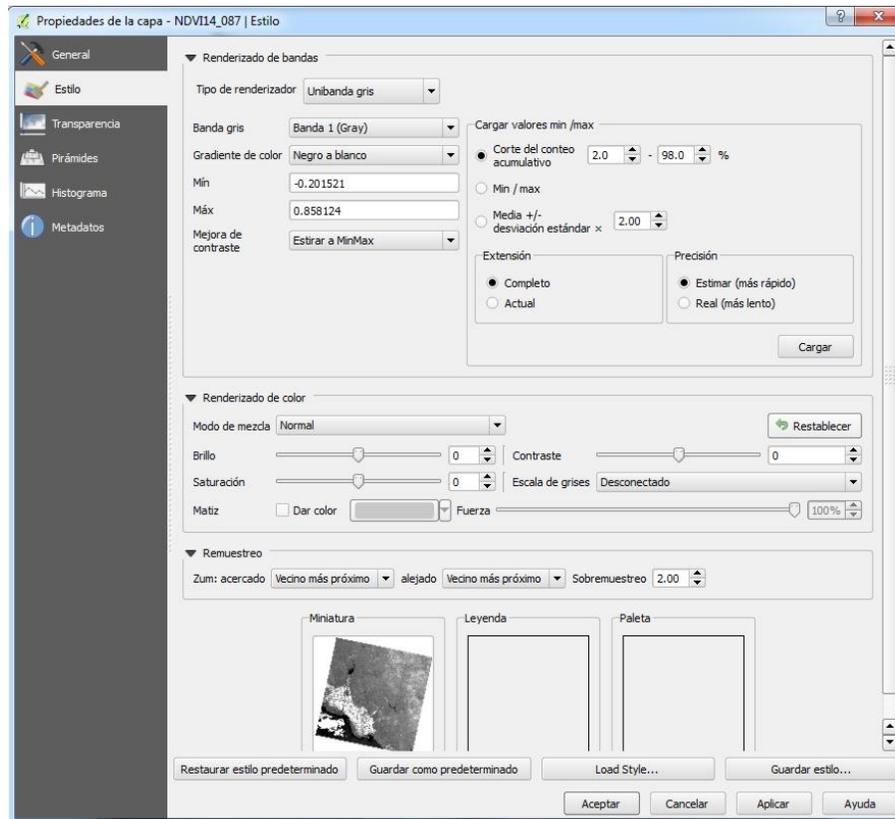
Al aceptar la operación aparece en el lado izquierdo de la Figura 18, el nombre de la imagen, además en la parte inferior junto a encuadro negro se muestran los valores extremos del NDVI que son -0.201521 y 0.858124 y aparece una figura en tono de grises.



**Figura 18.** Imagen de los índices NDVI.

Obsérvese que en la parte inferior izquierda se muestran las coordenadas UTM en cualquier punto donde se ponga la + del cursor del ratón, también se muestra la escala a la que aparece la imagen, así como un valor EPSG:32612, la clave del Datum correspondiente a las coordenadas WGS 84/UTM zona 12N.

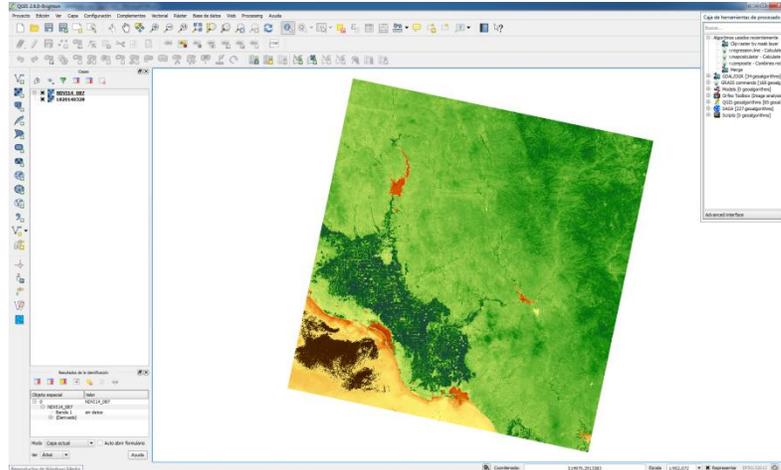
Ahora en propiedades de la imagen, se podrá conocer toda la información relacionada con la imagen y aparecerá un cuadro como el que se muestra en la Figura 19.



**Figura 19.** Propiedades de la capa.

Del lado superior izquierdo aparecen unas figuras con la siguiente información: General, Estilo (destacado), Transparencia, Pirámide, Histograma y Metadatos.

Para cambiar el color de la imagen del NDVI a tonos de verde, se hizo una paleta que genera colores verdosos denominada “ndvi\_qgis.txt”, guardada en la misma carpeta de trabajo y en “Estilo” a donde se va a cambiar el color, aparece una nueva imagen que en la parte superior tiene unos cuadros con diferentes nombres y el primero dice “Tipo de renderizador” y dentro del cuadro se escoge el que dice “Unibanda pseudocolor”, se selecciona carpeta y se busca “ndvi\_qgis.txt” y se da aplicar, cambia el color de la imagen de tonos de gris a tonos verdes como se muestra en la Figura 20.



**Figura 20.** Imagen de NDVI en tonos verdes.

Es conveniente calcular el valor promedio del NDVI en cada parcela para formar una base de datos, integrada por estos valores, para cada vez que se disponga de una imagen del satélite. Este valor promedio se calcula con el “Calculador de Raster”, buscando “Estadísticas de Zona”; al hacer clic con el ratón se despliega un cuadro de diálogo como se muestra en la Figura 21, donde se pone la capa raster que se utilizara, que para el caso es “Maskndvi14\_087, con los polígonos de las parcelas y el prefijo “ndvi”.



**Figura 21.** Diálogo para calcular los promedios de NDVI por parcela.

Al aceptar se inicia el cálculo y al finalizar se abre la tabla de atributos de parcelas. Abriendo se presenta un cuadro que al final tiene 3 columnas que son “ndvicount” (cuenta el número de píxeles enteros), “ndvisum”, que es la suma de los valores del NDVI en los píxeles contados y

finalmente el promedio por píxel, que para este caso será el que necesitamos, como se muestra en la Figura 22.

	SUPRIE_HA	AREA_POL	SUP_RIEGO	SUP_CALC	PERIM_CALC	ndvcount	ndvisum	ndvimean
0	24.7000	24.7447	24.7447	24.7448	2145.54	265.0000000000...	196.2731089591...	0.740653241355...
1	10.0000	10.0159	10.0159	10.0160	1761.94	107.0000000000...	83.63179242610...	0.781605536692...
2	10.0000	10.0023	10.0023	10.0023	1698.06	117.0000000000...	82.42265483736...	0.704467135362...
3	10.0000	10.0164	10.0164	10.0164	1624.07	109.0000000000...	76.82548141479...	0.704820930410...
4	10.0000	10.0017	10.0017	10.0018	1530.93	107.0000000000...	71.77014520764...	0.670749020632...
5	10.0000	10.0080	10.0080	10.0081	1434.02	113.0000000000...	60.42845368385...	0.534765076848...
6	10.0000	10.0091	10.0091	10.0091	1329.00	108.0000000000...	49.28113868832...	0.456306839706...
7	10.0000	5.3987	5.3987	5.3988	1097.72	53.0000000000...	31.39158868789...	0.592294126186...
8	10.0000	10.0396	10.0396	10.0396	1284.72	108.0000000000...	81.74626833200...	0.756909891963...
9	10.0000	10.0216	10.0216	10.0216	1302.04	112.0000000000...	84.89508986473...	0.757991873792...
10	10.0000	10.9354	10.9354	10.9354	1398.69	122.0000000000...	91.90476405620...	0.753317738165...
11	10.0000	10.3401	10.3401	10.3402	1433.28	114.0000000000...	97.35057312250...	0.853952395811...
12	10.0000	9.5887	9.5887	9.5888	1501.48	103.0000000000...	87.21733617782...	0.846770254153...
13	10.0000	10.0579	10.0579	10.0019	2040.65	93.0000000000...	74.25545483827...	0.798445750949...
14	10.0000	10.0579	10.0579	10.0019	2040.65	18.0000000000...	14.64172446727...	0.813429137070...
15	10.0000	8.8264	8.8264	8.8264	1548.64	95.0000000000...	74.07527199387...	0.779739705198...
16	10.0000	10.2940	10.2940	10.2940	1418.71	109.0000000000...	95.59018111228...	0.876974138644...
17	10.0000	10.9698	10.9698	10.9699	1439.64	123.0000000000...	109.8595811128...	0.893167326120...
18	10.0000	10.3262	10.3262	10.3262	1412.65	114.0000000000...	99.17309558391...	0.869939434946...
19	10.0000	10.0185	10.0185	10.0186	1393.94	105.0000000000...	93.14279097318...	0.887074199744...
20	10.0000	10.0026	10.0026	10.0026	1395.01	111.0000000000...	98.07816421985...	0.883587065043...
21	10.0000	10.0205	10.0205	10.0206	1391.74	109.0000000000...	94.21571201086...	0.864364330374...
22	10.0000	10.8069	10.8069	10.8069	1421.09	120.0000000000...	99.39731997251...	0.828310999770...

**Figura 22.** Cuadro con información de los píxeles por parcela.

### 3.3.4. Generar base de datos con la información del NDVI para cada parcela y por ciclo

Como el objetivo será crear una base de datos con la información de los valores promedios del NDVI para cada parcela del distrito de riego, cada vez que pase el satélite por la zona de estudio, con objeto de tener toda la serie de imágenes y conocer cómo varían estos valores durante el desarrollo del cultivo, se pueden copiar de esta tabla de atributos, varias columnas de interés para distinguir las parcelas. Las columnas importantes son: la primera columna denominada “ID\_MOD” que es el número corrido de la parcela, el “NOM\_CTA” que es el número de cuenta, “MODULO” donde se encuentra la parcela y finalmente “ndvimean” el valor promedio de los píxeles. La base de datos puede crearse en EXCEL 2003 o bien con otra hoja de cálculo libre como Libre Office 4, quedando en la forma como se muestra en la Figura 23.

	A	B	C	D	E	F
1	ID_MOD	NOM_CTA	MODULO	SUP_CALC	ndvimean	
2	1	4061-0-30	9	24.7448	0.7407	
3	2	3905-0-330	9	10.0160	0.7816	
4	3	3908-0-330	9	10.0023	0.7045	
5	4	3909-0-330	9	10.0164	0.7048	
6	5	3914-0-330	9	10.0018	0.6707	
7	6	3912-0-330	9	10.0081	0.5348	
8	7	3910-0-330	9	10.0091	0.4563	
9	8	3823-0-330	9	5.3988	0.5923	
10	9	3906-0-340	9	10.0396	0.7569	
11	10	3907-0-340	9	10.0216	0.7580	
12	11	3911-0-340	9	10.9354	0.7533	
13	12	3918-0-340	9	10.3402	0.8540	
14	13	3917-0-340	9	9.5888	0.8468	
15	14	3916-0-340	9	10.0019	0.7984	
16	15	3916-0-340	9	10.0019	0.8134	
17	16	3915-0-340	9	8.8264	0.7797	
18	17	3920-0-350	9	10.2940	0.8770	
19	18	3919-0-350	9	10.9699	0.8932	

**Figura 23.** Hoja de cálculo para crear base de datos con valores de NDVI.

Como las imágenes del satélite se pueden obtener cada 16 días, si no cubren las nubes la zona de estudio, se genera una base de datos con las fechas para cada promedio por parcela del NDVI, durante todo el desarrollo de los cultivos, que para el caso del distrito de riego del río Mayo, la mayor parte de estos se riegan entre el mes de noviembre hasta el mes de mayo cuando salen la mayoría de los cultivos que cubren el área regada. En la Figura 24 se muestra parte de la base de datos generada en el ciclo agrícola 2013-2014, donde en las últimas columnas se tienen los valores promedio del NDVI, así como el valor máximo logrado en el periodo considerado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	NUMERO	MODULO	CUENTA	AREA (HA)	NOVA_2013	DIC22_2013	ENE7_2014	ENE23_2014	FEB8_2014	FEB24_2014	MAR28_2014	ABR06_2014	ABR21_2014	MAY15_2014	MAY31_2014	NDVI_MEDIC	NDVI_MAX
2	1	9	4061-0-30	24.74480	0.14456	0.47116	0.86460	1.64569	2.44438	3.26022	3.95272	4.37133	4.55897	4.71835	4.87835	0.44349	0.81584
3	2	9	3905-0-330	10.01600	0.13145	0.45805	0.85148	1.63258	2.43127	3.24711	3.98261	4.35821	4.54586	4.70524	4.86524	0.44542	0.81753
4	3	9	3908-0-330	10.00230	0.13295	0.34094	0.70563	1.42287	2.15960	2.97713	3.75593	4.29430	4.50546	4.73359	4.90111	0.45318	0.81923
5	4	9	3909-0-330	10.01640	0.13784	0.43395	0.91895	1.67015	2.41164	3.23086	3.93544	4.35348	4.57955	4.81681	4.98983	0.45006	0.80102
6	5	9	3914-0-330	10.00180	0.14466	0.45740	0.96000	1.67213	2.39715	3.19817	3.90303	4.32126	4.55214	4.78929	4.95748	0.45222	0.80660
7	6	9	3912-0-330	10.00810	0.15037	0.51147	1.03674	1.75750	2.48277	3.28338	3.95446	4.34446	4.57590	4.81208	4.98014	0.42876	0.77544
8	7	9	3910-0-330	10.00910	0.15782	0.56046	1.06810	1.79445	2.50891	3.28435	3.82158	4.12859	4.33907	4.55977	4.72377	0.40309	0.73818
9	8	9	3823-0-330	5.39880	0.16124	0.53740	1.02403	1.71919	2.39755	3.13572	3.59325	3.86100	4.06385	4.27568	4.43746	0.38317	0.69664
10	9	9	3906-0-340	10.03960	0.12397	0.38188	0.78538	1.36123	1.96928	2.66552	3.26058	3.58824	3.79607	4.01572	4.18088	0.48000	0.84360
11	10	9	3907-0-340	10.02160	0.12864	0.53025	0.96018	1.74900	2.50411	3.34771	4.10462	4.60030	4.83580	5.06779	5.29343	0.48469	0.85017
12	11	9	3911-0-340	10.93540	0.13125	0.54208	0.99576	1.78781	3.40427	4.16226	4.64674	4.87768	5.10702	5.33418	0.49211	0.84647	
13	12	9	3918-0-340	10.34020	0.14207	0.56638	1.14991	1.94902	2.71924	3.56571	4.31903	4.75587	4.97868	5.20151	5.42406	0.46474	0.85395
14	13	9	3917-0-340	9.58880	0.15108	0.35102	0.74385	1.40428	2.13860	2.96809	3.82205	4.45192	4.70819	4.94892	5.12117	0.45540	0.84519
15	14	9	3916-0-340	8.39150	0.15565	0.34203	0.70641	1.34969	2.07407	2.90162	3.74681	4.35927	4.60963	4.84773	5.01848	0.43746	0.80036
16	15	9	3916-0-340	1.66640	0.16521	0.36293	0.70608	1.33931	2.03985	2.84021	3.63865	4.17907	4.41717	4.65469	4.82163	0.42259	0.81522
17	16	9	3915-0-340	8.82640	0.15279	0.31532	0.63906	1.08583	1.70429	2.46547	3.28069	3.90318	4.21181	4.45952	4.63605	0.41706	0.77797
18	17	9	3920-0-350	10.29400	0.12616	0.30184	0.62494	1.19108	1.84847	2.62644	3.40230	3.91972	4.15788	4.38865	4.55502	0.45316	0.87432
19	18	9	3919-0-350	10.96990	0.12130	0.28098	0.51269	1.19849	1.82315	2.75406	3.62837	4.29767	4.57247	4.82058	4.98587	0.46273	0.89122
20	19	9	3923-0-340	10.32620	0.12693	0.28054	0.52337	1.19968	1.93543	2.78119	3.67241	4.39643	4.67586	4.92753	5.09568	0.44911	0.86796
21	20	9	3921-0-340	10.01860	0.12591	0.28251	0.51042	1.17702	1.89749	2.72739	3.59534	4.28117	4.53363	4.76816	4.93919	0.48803	0.88590
22	21	9	3922-0-340	10.00260	0.13383	0.30508	0.76505	1.49181	2.23011	3.07487	3.96077	4.65129	4.88098	5.12419	5.37624	0.48879	0.88063
23	22	9	3925-0-340	10.02060	0.14523	0.32445	0.76605	1.50506	2.24456	3.08934	3.96998	4.67341	4.89172	5.13881	5.38811	0.46718	0.86310
24	23	9	3927-0-340	10.80690	0.14702	0.33454	0.71032	1.37993	2.09429	2.92634	3.78944	4.44979	4.67316	4.90744	5.14075	0.47435	0.82733
25	24	9	4619-0-340	10.21850	0.15607	0.40619	0.89968	1.60961	2.33505	3.16117	3.98850	4.56157	4.80613	5.04949	5.22687	0.45737	0.81950
26	25	9	3930-0-40	10.14190	0.14846	0.36505	0.80280	1.43255	2.12117	2.92963	3.74913	4.33130	4.55400	4.78536	5.02351	0.42918	0.81917
27	26	9	3936-0-40	10.48970	0.14598	0.33495	0.77730	1.24073	1.96213	2.77130	3.57235	4.08842	4.31708	4.55035	4.71763	0.44196	0.83666
28	27	9	3929-0-40	10.23740	0.15014	0.34867	0.64197	1.33718	2.05900	2.88966	3.69848	4.22618	4.45874	4.69848	4.86663	0.45402	0.83082
29	28	9	3931-0-40	9.12340	0.14724	0.36463	0.76012	1.46410	2.17911	3.00993	3.82609	4.35953	4.59149	4.82498	4.99130	0.43409	0.80767
30	29	9	3929-0-40	9.65820	0.16516	0.36311	0.72014	1.35387	2.03884	2.84652	3.64195	4.17018	4.40290	4.62738	4.79294	0.45404	0.88883
31	30	9	3932-0-350	10.80140	0.15803	0.32308	0.60897	1.25617	1.94568	2.77187	3.62270	4.36394	4.63713	4.81613	4.98733	0.43200	0.87164
32	31	9	3933-0-350	9.24910	0.17904	0.33527	0.68869	1.08869	1.68869	2.49545	3.36709	4.06069	4.37303	4.60742	4.77634	0.39843	0.76209
33	32	9	3933-0-20	1.29610	0.17193	0.35099	0.69807	1.06023	1.68298	2.29059	3.05307	3.68340	3.96388	4.19781	4.37567	0.38971	0.76955

**Figura 24.** Base de datos del NDVI en el DR038 Río Mayo, Sonora.

Para este trabajo se procesaron 57 imágenes satelitales que comprenden de los ciclos 2012 al 2018, se obtuvieron los acumulados del NDVI, se hizo un ajuste logístico para un modelo de crecimiento y se sacaron las tasas de crecimiento para cada ciclo como se muestran en los siguientes cuadros.

**Cuadro 8.** Para el ciclo 2012-2013, 9 imágenes

No. de Imagen	Día	NDVI Acum. 2013	Modelo Logístico 2013	Tasa de crecimiento calculado 2013
1	1	0.15267	0.11654	0.00408
2	32	0.31155	0.30405	0.01027
3	48	0.44741	0.48823	0.01588
4	64	0.77801	0.76448	0.02343
5	80	1.29897	1.15403	0.03233
6	112	2.00755	2.24218	0.04629
7	115	2.40950	2.35546	0.04682
8	<b>128</b>	2.81146	2.83883	<b>0.04713</b>
9	144	3.61173	3.37453	0.04379

**Cuadro 9.** Para el ciclo 2013-2014, 8 imágenes

No. de Imagen	Día	NDVI Acum. 2014	Modelo Logístico 2014	Tasa de crecimiento calculado 2014
1	1	0.15000	0.08183	0.00282
2	48	0.36000	0.42404	0.01351
3	64	0.58000	0.70985	0.02109
4	80	1.14000	1.13515	0.03011
5	96	1.78000	1.70193	0.03790
6	110	2.13500	2.27252	0.04089
7	<b>112</b>	2.49000	2.35574	<b>0.04092</b>
8	144	3.24000	3.52772	0.03027

**Cuadro 10.** Para el ciclo 2014-2015 11 imágenes

No. de Imagen	Día	NDVI Acum. 2015	Modelo Logístico 2015	Tasa de crecimiento calculado 2015
1	1	0.14365	0.37216	0.01114
2	8	0.33966	0.45868	0.01348
3	24	0.63166	0.72588	0.02011
4	40	1.14183	1.10838	0.02803
5	48	1.72196	1.34577	0.03201
6	76	2.04657	2.35861	0.04098
7	<b>80</b>	2.37118	2.51333	<b>0.04121</b>
8	96	3.08951	3.10749	0.03927
9	120	3.76048	3.82189	0.03102
10	136	4.11149	4.14762	0.02512
11	144	4.37772	4.26942	0.02256

**Cuadro 11.** Para el ciclo 2015-2016 10 imágenes

No. de Imagen	Día	NDVI Acum. 2016	Modelo Logístico 2016	Tasa de crecimiento calculado 2016
1	16	0.006	0.189	0.000
2	36	0.253	0.383	0.009
3	56	0.742	0.751	0.024
4	72	1.354	1.233	0.039
5	88	2.032	1.912	0.050
6	104	2.710	2.748	0.055
7	<b>109</b>	3.051	3.024	<b>0.055</b>
8	120	3.392	3.623	0.054
9	128	4.017	4.030	0.049
10	136	4.564	4.396	0.040

**Cuadro 12.** Para el ciclo 2016-2017, 8 imágenes

<b>No. de Imagen</b>	<b>Día</b>	<b>NDVI Acum. 2017</b>	<b>Modelo Logístico 2017</b>	<b>Tasa de crecimiento calculado 2017</b>
1	11	0.223	0.306	0.007
2	27	0.501	0.489	0.014
3	59	1.074	1.158	0.027
4	67	1.565	1.404	0.035
5	91	2.279	2.307	0.041
6	<b>107</b>	2.932	2.976	<b>0.042</b>
7	123	3.617	3.608	0.037
8	139	4.152	4.139	0.029

**Cuadro 13.** Para el ciclo 2017-2018, 11 imágenes

<b>No. de Imagen</b>	<b>Día</b>	<b>NDVI Acum. 2018</b>	<b>Modelo Logístico 2018</b>	<b>Tasa de crecimiento calculado 2018</b>
1	1	0.213	0.047	0.014
2	46	0.836	0.857	0.049
3	56	1.333	1.485	0.071
4	62	1.893	1.987	0.088
5	66	2.451	2.365	0.099
6	<b>71</b>	3.025	2.869	<b>0.103</b>
7	78	3.657	3.584	0.099
8	86	4.281	4.328	0.086
9	96	4.943	5.043	0.063
10	111	5.591	5.658	0.030
11	141	6.117	6.019	0.008

### 3.3.5. Método para calcular la evapotranspiración

De esta base de datos se parte para calcular la evapotranspiración de los cultivos, bajo el supuesto de que esta vale:  $ET_c = K_c \cdot ET_r$  donde  $ET_r$  es la evapotranspiración de referencia calculada en la estación meteorológica central del distrito de riego y  $K_c = 1.15 \cdot NDVI + 0.17$  como valor aproximado calculado para el cultivo del trigo, dominante en el distrito de riego. El cálculo se realiza en una hoja de cálculo como se muestra en la Figura 25, mediante una función condicional: Si  $NDVI > 0.22$  entonces  $K_c = 1.15 \cdot NDVI + 0.17$ , si no  $K_c = 0$  y  $ET_c = 0$ .

1	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN
2		16	16	16	16	39	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
3	0.14406	0.17015	0.27721	0.62260	0.68826	0.74026	0.66903	0.30331	0.10123	0.03892	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.14215	0.16812	0.29555	0.53431	0.75948	0.83193	0.77278	0.39878	0.12761	0.09678	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.14580	0.15940	0.26391	0.47818	0.72744	0.82097	0.76865	0.39107	0.12162	0.09513	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.14837	0.19133	0.40737	0.63352	0.77858	0.83570	0.70143	0.32674	0.12809	0.09632	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.15332	0.19896	0.40647	0.61969	0.77383	0.83800	0.69537	0.32203	0.12961	0.09400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.15482	0.20283	0.39451	0.58887	0.75887	0.81302	0.67654	0.29920	0.11712	0.08809	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.16485	0.21641	0.39681	0.53669	0.69072	0.79583	0.62966	0.25204	0.11073	0.07743	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.16631	0.19982	0.29671	0.43660	0.61426	0.75000	0.66301	0.29756	0.07753	0.03752	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.16544	0.24892	0.52601	0.73841	0.83858	0.84607	0.68792	0.30537	0.13542	0.11281	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.13636	0.16872	0.24656	0.29186	0.38645	0.60711	0.76883	0.62235	0.40710	0.19311	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.14212	0.15737	0.20145	0.20683	0.28782	0.55375	0.77951	0.68705	0.48737	0.26496	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.15137	0.17939	0.22281	0.28927	0.53045	0.74981	0.76351	0.48099	0.22489	0.19343	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.15728	0.18983	0.22328	0.25054	0.45461	0.70720	0.77739	0.46152	0.19609	0.15245	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.15897	0.19022	0.27273	0.34329	0.53413	0.73912	0.70759	0.35156	0.15019	0.09764	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.16294	0.19433	0.24283	0.30269	0.51636	0.73054	0.65554	0.28962	0.12416	0.07512	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.16643	0.20776	0.30163	0.59512	0.78443	0.85308	0.68843	0.31225	0.14287	0.10990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.13751	0.21899	0.26967	0.38453	0.57303	0.78890	0.78756	0.46192	0.16925	0.05411	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.13847	0.21831	0.25248	0.25753	0.53352	0.78207	0.62471	0.51453	0.18799	0.08295	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.14960	0.20366	0.40039	0.32099	0.59398	0.80252	0.80887	0.47889	0.16172	0.05160	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.14329	0.21283	0.42520	0.64756	0.81062	0.85062	0.70766	0.33516	0.12914	0.09093	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.14721	0.16246	0.18776	0.19662	0.36401	0.64855	0.80728	0.64657	0.38298	0.18796	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.15020	0.16827	0.21951	0.29617	0.40350	0.64854	0.78996	0.60443	0.32714	0.14484	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.16398	0.20868	0.39728	0.64071	0.82068	0.85821	0.75262	0.38281	0.13050	0.06665	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.16117	0.21209	0.36633	0.56855	0.75780	0.81727	0.68883	0.19757	0.09121	0.07096	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.16022	0.18962	0.23218	0.37602	0.64912	0.80607	0.75647	0.40263	0.16560	0.08113	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.15750	0.17246	0.22919	0.39115	0.67153	0.81774	0.77825	0.42872	0.17586	0.08382	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.15791	0.17585	0.24223	0.39869	0.67934	0.82665	0.79100	0.44761	0.18533	0.15707	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.16320	0.18887	0.23635	0.35569	0.60378	0.77517	0.77907	0.45879	0.20860	0.16570	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.16113	0.19125	0.22391	0.18976	0.23968	0.48072	0.70012	0.54790	0.35065	0.21576	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.17107	0.23147	0.31668	0.25403	0.26189	0.47838	0.68664	0.58483	0.44404	0.27053	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33	0.19029	0.26842	0.35402	0.27236	0.23399	0.42975	0.64016	0.49787	0.35857	0.21827	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	0.20317	0.21206	0.21731	0.20643	0.15192	0.38305	0.66669	0.51613	0.36866	0.19258	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.17793	0.18468	0.19286	0.18058	0.25133	0.48323	0.64460	0.49099	0.33275	0.19113	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.16555	0.18931	0.20246	0.18316	0.22953	0.46140	0.69141	0.59026	0.40663	0.20864	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.17090	0.18911	0.19323	0.19240	0.30172	0.56288	0.72904	0.56769	0.30739	0.11522	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	0.17444	0.18041	0.19269	0.17934	0.20867	0.43834	0.68955	0.61161	0.46281	0.32287	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39	0.17082	0.18289	0.19647	0.17639	0.19447	0.39786	0.62844	0.55236	0.42573	0.32070	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.18797	0.23291	0.25868	0.18176	0.19680	0.39760	0.62099	0.45083	0.36666	0.21978	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 25. Cálculo de la evapotranspiración en las parcelas del distrito de riego.

### 3.3.6. Método para calcular la tasa de crecimiento del NDVI y ETC

Se pueden acumular los valores de NDVI, así como los de ETC para ajustarlos a una función logística la cual puede ser de ayuda para evaluar el desarrollo de los cultivos. Esta función tiene como característica que sus parámetros tienen un significado para esta evaluación. Por otra parte se observa un ajuste muy aceptable desde el punto de vista estadístico a este tipo de función. Así, en la Figura 26, se muestra la base de datos con valores del NDVI y del ETC acumulados.

Número	MODULO	CUENTA	Area (ha)	NDVI13_298	NDVI13_330	NDVI13_346	NDVI13_362	NDVI14_12	NDVI14_44	NDVI14_60	NDVI14_76	NDVI14_108	NDVI14_124	Etc
1	9 4051-0-30	23 7448	0.1730	0.4358	0.4938	1.1184	1.9711	2.8432	3.7448	4.6264	4.8662	5.0001	0.00	0.00
2	9 3905-0-330	10 0160	0.1624	0.3476	0.4640	0.8063	1.5306	2.3659	3.2430	4.1079	4.6691	4.7208	0.00	0.00
3	9 3908-0-330	10 0023	0.1487	0.3157	0.4149	0.7016	1.3695	2.2225	3.1145	4.0007	4.3357	4.5840	0.00	0.00
4	9 3908-0-330	10 0164	0.1519	0.3126	0.4109	0.6631	1.2482	2.0762	2.9603	3.8384	4.2197	4.4687	0.00	0.00
5	9 3914-0-330	10 0018	0.1534	0.3042	0.4132	0.6654	1.2021	2.0023	2.8760	3.7425	4.1638	4.3511	0.00	0.00
6	9 3912-0-330	10 0081	0.1504	0.3083	0.4471	0.8863	1.5485	2.3676	3.2456	4.0848	4.3841	4.6056	0.00	0.00
7	9 3910-0-330	10 0091	0.1603	0.3281	0.4784	0.8925	1.4899	2.2328	3.0517	3.8264	4.0823	4.3179	0.00	0.00
8	9 3925-0-330	9 3988	0.1665	0.3241	0.4668	0.8214	1.3751	2.0735	2.9525	3.8107	3.8893	4.1647	0.00	0.00
9	9 3906-0-340	10 0396	0.1552	0.3308	0.4374	1.0039	1.7883	2.6386	3.5230	4.3788	4.7085	4.9455	0.00	0.00
10	9 3907-0-340	10 0216	0.1381	0.2964	0.4004	1.0057	1.8295	2.7079	3.6126	4.4862	4.7798	5.0181	0.00	0.00
11	9 3911-0-340	10 0354	0.1473	0.3008	0.4170	1.0607	1.9665	2.7811	3.6921	4.5469	4.8224	5.0594	0.00	0.00
12	9 3918-0-340	10 3402	0.1510	0.3107	0.4095	0.7380	1.3610	2.2053	3.0950	3.9694	4.3410	4.5933	0.00	0.00
13	9 3917-0-340	9 5888	0.1529	0.3214	0.4183	0.6887	1.2902	2.1550	3.0585	3.9554	4.3278	4.5808	0.00	0.00
14	9 3916-0-340	8 3915	0.1536	0.3340	0.4399	0.7223	1.1123	2.1207	2.9896	3.8361	4.1807	4.4365	0.00	0.00
15	9 3916-0-340	1 6664	0.1689	0.3288	0.4482	0.7510	1.3555	2.1204	2.9367	3.6910	3.9765	4.2243	0.00	0.00
16	9 3916-0-340	8 8264	0.1637	0.3458	0.5037	0.9332	1.6314	2.4159	3.2569	4.0823	4.3769	4.6205	0.00	0.00
17	9 3920-0-350	10 2940	0.1693	0.3286	0.4541	0.7568	1.4012	2.2434	3.1258	3.9939	4.4585	4.7158	0.00	0.00
18	9 3919-0-350	10 9699	0.1619	0.3165	0.4065	0.6777	1.3278	2.2351	3.1593	4.0751	4.6084	4.8652	0.00	0.00
19	9 3923-0-340	10 3262	0.1621	0.3171	0.4224	0.6939	1.3417	2.2327	3.1476	4.0520	4.5994	4.8504	0.00	0.00
20	9 3921-0-340	10 0186	0.1602	0.3002	0.3956	0.5602	1.0744	1.9504	2.8010	3.6217	4.1491	4.6566	0.00	0.00
21	9 3922-0-340	10 0026	0.1659	0.3122	0.4075	0.5727	1.0792	1.9892	2.9233	3.8483	4.4528	4.7047	0.00	0.00
22	9 3925-0-340	10 0206	0.1626	0.3216	0.4042	0.5678	1.0412	1.9145	2.8330	3.7405	4.2696	4.5257	0.00	0.00
23	9 3921-0-340	10 8089	0.1598	0.3297	0.4324	0.7147	1.2998	2.1535	3.0562	3.8991	4.3637	4.6140	0.00	0.00
24	9 4619-0-340	10 2195	0.1729	0.3682	0.4865	0.8425	1.5147	2.3830	3.2793	4.1658	4.6622	4.9109	0.00	0.00
25	9 3930-0-40	10 1418	0.1790	0.3643	0.4858	0.8885	1.6544	2.4892	3.3606	4.2187	4.6151	4.7562	0.00	0.00
26	9 3936-0-40	10 4897	0.1711	0.3426	0.4478	0.8884	1.6817	2.5456	3.4428	4.3193	4.6246	4.8667	0.00	0.00
27	9 3928-0-40	10 2314	0.1769	0.3366	0.4468	0.8651	1.6323	2.5025	3.4020	4.2934	4.6039	4.8376	0.00	0.00
28	9 3931-0-40	9 1234	0.1764	0.3321	0.4422	0.7692	1.4205	2.2570	3.1349	4.0046	4.3471	4.5842	0.00	0.00
29	9 3929-0-40	8 6582	0.1859	0.3635	0.4789	0.7841	1.4316	2.2791	3.1711	4.0483	4.4000	4.6627	0.00	0.00
30	9 3932-0-350	10 8014	0.1672	0.3382	0.4464	0.8108	0.8905	1.5964	2.4542	3.3245	3.9166	4.1809	0.00	0.00
31	9 3933-0-350	8 2491	0.1711	0.3587	0.4797	0.6679	0.9547	1.6118	2.4194	3.2468	3.6491	4.0360	0.00	0.00
32	9 3933-0-20	1 2961	0.1930	0.3758	0.5065	0.7133	0.9733	1.4866	2.1908	2.8672	3.3493	3.6204	0.00	0.00
33	9 4818-0-30	9 5986	0.1608	0.3223	0.4781	1.0396	1.8074	2.6665	3.5113	4.4011	4.6549	4.9065	0.00	0.00
34	9 3948-0-50	10 0135	0.1506	0.3141	0.4246	0.7542	1.4566	2.2985	3.1819	4.0475	4.3244	4.5640	0.00	0.00
35	9 3940-0-20	9 8763	0.1614	0.3334	0.4958	1.0243	1.7160	2.5476	3.4274	4.2876	4.5997	4.8152	0.00	0.00
36	9 3935-0-30	9 1112	0.1562	0.3374	0.4750	0.9699	1.7532	2.5853	3.4795	4.3154	4.6483	4.7896	0.00	0.00
37	9 3950-0-30	9 9764	0.1535	0.3182	0.4452	0.9318	1.7097	2.5661	3.4454	4.2586	4.5286	4.7406	0.00	0.00
38	9 3948-0-30	9 8142	0.1587	0.3316	0.4475	0.7897	1.4185	2.2201	3.0738	3.9004	4.1557	4.3817	0.00	0.00
39	9 3960-0-30	10 3567	0.1530	0.3255	0.4519	0.9507	1.7273	2.5893	3.4747	4.3160	4.5408	4.7723	0.00	0.00
40	9 5396-0-30	10 3960	0.1696	0.3379	0.4706	0.7197	1.0985	1.7262	2.5378	3.3529	3.8711	4.1539	0.00	0.00

Figura 26. Valores acumulados del índice NDVI y de la ETC del cultivo de cada parcela.

En la Figura 27, se muestra el ajuste a la función logística tanto del NDVI acumulado como del ETC (evapotranspiración del cultivo) acumulado, con un ajuste estadístico bastante aceptable, en ambos casos con valor del coeficiente de regresión mayor a 0.99 y un error estándar también pequeño en un caso del 9% y en el segundo caso del 7% aproximadamente.

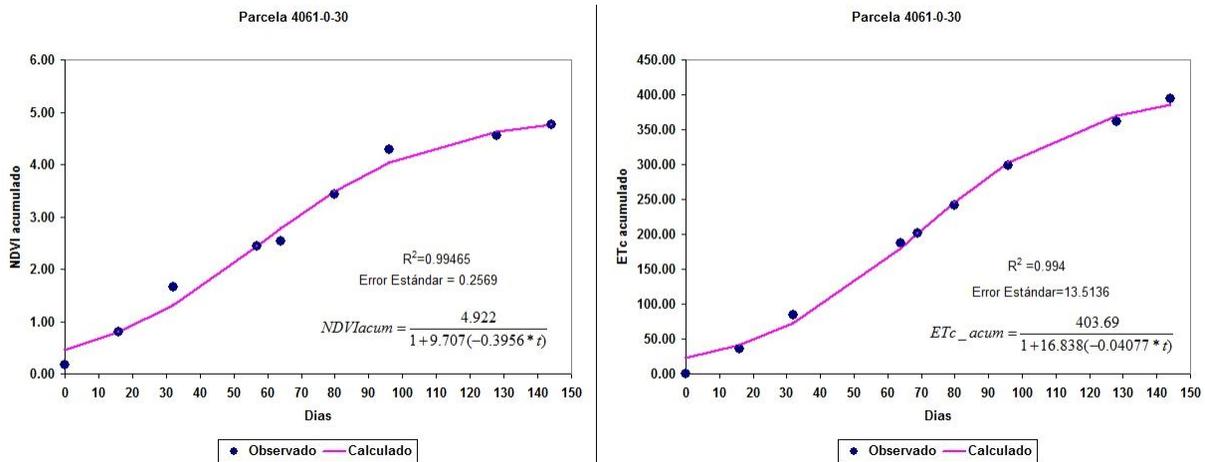


Figura 27. Ajuste de valores acumulados de NDVI y ETC a funciones logísticas.

Bajo el supuesto de que el índice NDVI representa un indicador del desarrollo de la biomasa del cultivo, las bases matemáticas de la función logística, parten de la ecuación diferencial que relaciona la variable biomasa denominada "y" cuyo crecimiento en el tiempo "t" es

proporcional ( $k$ ) a la diferencia entre el valor máximo de la biomasa “ $Y_m$ ” y el valor actual de “ $y$ ”, de acuerdo a la ecuación (8) que se presenta a continuación.

$$\frac{dy}{dt} = k(Y_m - y)y \quad (8)$$

La integral de esta ecuación se muestra en la ecuación (9) donde se observa el valor de los parámetros de la función logística:

$$y = \frac{Y_m}{1 + \frac{Y_m - y_0}{y_0} \exp(-ct)} \quad (9)$$

La cual suele representarse como se observa en la ecuación (10)

$$y = \frac{a}{1 + b \exp(-ct)} \quad (10)$$

Donde:

$$a = Y_m ; b = \frac{Y_m - y_0}{y_0} ; c = k * Y_m$$

De lo anterior se deduce que el valor del parámetro “ $a$ ” es el valor al que la función se vuelve asintótica, es decir un valor máximo de la biomasa ( $Y_m$ ) y es un indicador del posible valor máximo que tendería el rendimiento del cultivo, por otra parte también (8) representa la tasa de crecimiento del cultivo que puede escribirse como:

$$\frac{dy}{dt} = cy - ky^2 \quad (11)$$

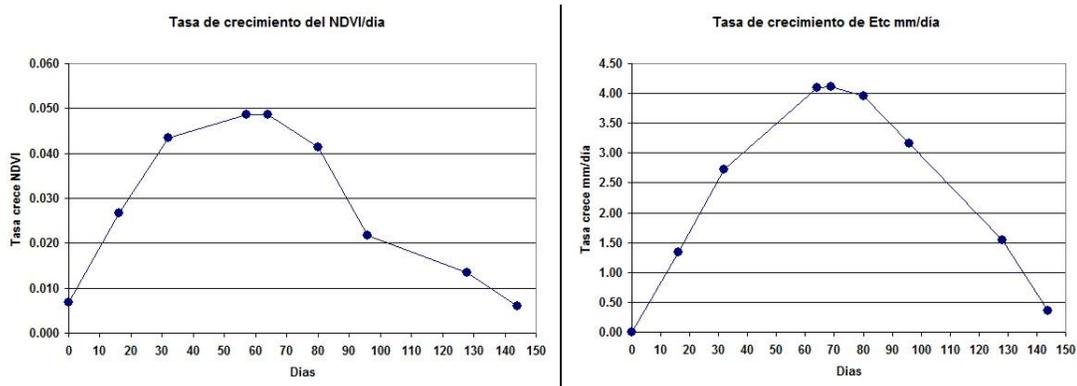
Tomando la segunda derivada de esta ecuación e igualándola con cero se despeja el valor de  $y$  cuando la tasa de crecimiento es máxima que vale  $y = \frac{c}{2k} = \frac{a}{2}$ ; se observa que esta tasa máxima se presenta a la mitad del valor  $Y_m$  y el tiempo cuando esta se presenta puede obtenerse al substituir la  $y$  en (10) y despejar  $t$  cuyo valor es:  $t = \frac{1}{-c} \text{Ln} \left[ \frac{1}{b} \right]$  (12)

Para el ejemplo que se está analizando la tasa de crecimiento del NDVI es:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0.039558y - 0.008036y^2; \text{ donde } y \text{ es NDVI acum.}$$

y la tasa de crecimiento de la ETc es:  $\frac{\partial y}{\partial t} = 0.04077y - 0.000101y^2$ ; donde y es la ETc acum.

En la Figura 28 se muestra la variación de las tasas en ambos casos:



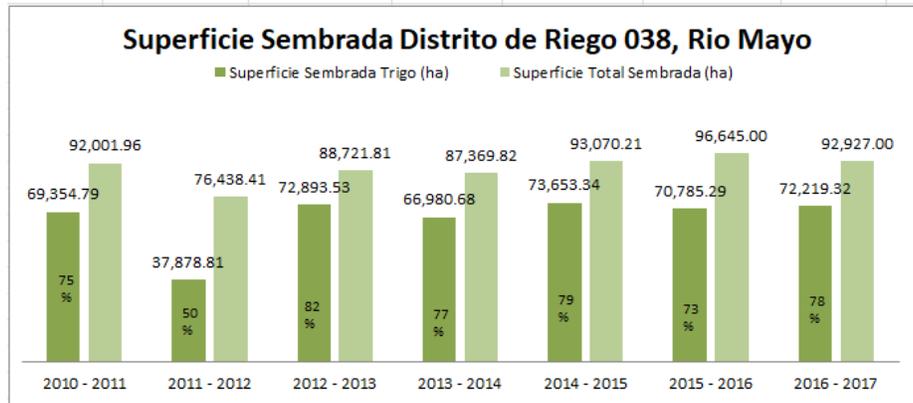
**Figura 28.** Tasas de crecimiento de NDVI y ETc.

En el caso de la tasa de crecimiento del NDVI la máxima se presenta a los 64 días y para el caso del ETc se presenta a los 69 días, valores obtenidos con la función (12).

Por la duración del cultivo y los valores obtenidos para la función logística, se puede afirmar que la parcela analizada estaba sembrada con trigo, cuya duración de su ciclo es del orden de los 140 días.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante los ciclos agrícolas: 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015 se hicieron mediciones del rendimiento del trigo mediante muestreos en varios de los módulos de riego del distrito Río Mayo, donde este cultivo es predominante, ocupando entre el 75% y el 80% de la superficie como se puede observar en la Figura 29.



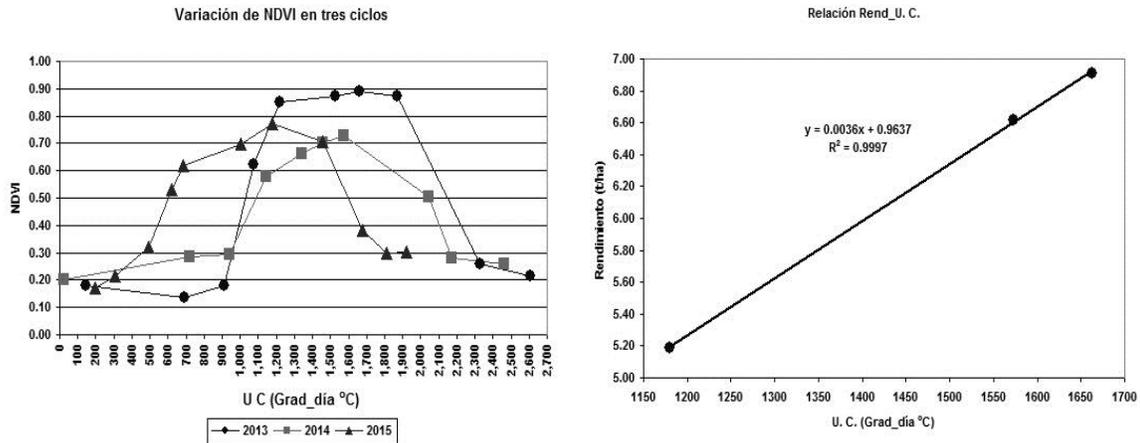
**Figura 29.** Superficie sembrada de trigo en el Distrito de Riego 038. Rio Mayo.

En los dos primeros ciclos, se encontró una buena relación entre el nivel máximo del NDVI y el rendimiento promedio del trigo con variación del orden del error estimado; sin embargo, en el ciclo 2013-2014, se observó una pequeña disminución en el rendimiento respecto a lo esperado, pero para el ciclo agrícola 2014-2015, la disminución del rendimiento fue altamente significativa, las diferencias estimadas en 6 de los módulos evaluados variaron entre el 20% y el 30% menos que el obtenido en el ciclo 2013-2014. Para el caso del módulo 15, la estimación del rendimiento medio del trigo obtuvo mediante muestreo valores promedio de 6.91 t ha<sup>-1</sup> en el 2013, 6.62 t ha<sup>-1</sup> en el 2014 y 5.19 t ha<sup>-1</sup> para el 2015, una reducción de 1.72 t ha<sup>-1</sup> equivalente casi al 25% del rendimiento obtenido en 2013.

Posiblemente como efectos del cambio climático se presentaron condiciones meteorológicas poco favorables para lograr rendimientos satisfactorios, como se muestra en el Cuadro 14 donde se nota el efecto de la variabilidad climática observada en estos tres años en los rendimientos promedio del Módulo 15 del distrito de riego con las unidades calor (UC) calculadas tanto totales así como a los días cuando se presentó el mayor valor del NDVI.

En general hubo una reducción significativa de las Unidades Calor, lo que indica una menor acumulación de energía en el cultivo, lo que generó la reducción del rendimiento.

Con objeto de entender las diferencias observadas se graficaron los valores promedio de NDVI observados contra las Unidades Calor (UC) en Grados-día (°C) y también el valor de las UC para el máximo del NDVI en cada año contra los rendimientos como se muestra en la Figura 30.



**Figura 30.** Comparación de valores de NDVI y de rendimientos contra unidades calor.

Como complemento a esta figura, se muestra en el Cuadro 14, un resumen de la información que puede obtenerse de ella.

**Cuadro 14.** Información sobre Módulo 15

Año	Max	U.C.	Rend. t/ha	Día Max.	U.C.
	NDVI	total		NDVI	Val Max
2013	0.89	2331	6.91	128	1663
2014	0.73	2169	6.62	144	1573
2015	0.77	1809	5.19	96	1180

De la Figura 30 y del Cuadro 14, se deduce que la acumulación de Unidades Calor (UC) para cuando se presentó el valor máximo del NDVI se redujo muy significativamente en el año 2015 respecto a los años anteriores y lo mismo ocurre de los acumulados totales de UC al término del cultivo, cuando los valores del NDVI alcanzan un mínimo de 0.3. Estas disminuciones implican que el cultivo no acumuló la suficiente energía para lograr rendimientos mayores.

También se hizo un análisis del comportamiento del cultivo en otros módulos donde el trigo es el cultivo predominante, que son el Módulo 5, el 6, el 10, y el 13, cuyos resultados se muestran resumidos en el Cuadro 15 que se presenta a continuación.

**Cuadro 15.** Información sobre variación de rendimiento en 5 Módulos

Módulo	Año	U.C. a		Rend. t/ha	Dif.
		NDVI Max	U.C Total		Rend.
Mod_05	2014	1573	2169	6.24	
Mod_05	2015	1006	1678	4.81	<b>1.43</b>
Mod_06	2014	1573	2463	6.51	
Mod_06	2015	1180	1809	5.42	<b>1.09</b>
Mod_10	2014	2046	2464	7.08	
Mod_10	2015	1180	1921	5.19	<b>1.89</b>
Mod_13	2014	1573	2464	6.83	
Mod_13	2015	1180	1809	4.68	<b>2.15</b>
Mod_15	2014	1573	2169	6.62	
Mod_15	2015	1180	1809	5.19	<b>1.43</b>

Como se puede observar en este cuadro, en todos los casos hubo una reducción significativa de los rendimientos en todos los Módulos de riego considerados, en el caso del Módulo 13 la reducción fue de casi la tercera parte del rendimiento obtenido en el 2014.

En general hubo una reducción significativa de las Unidades Calor, lo que indica una menor acumulación de energía en el cultivo, lo que generó la reducción del rendimiento. Para analizar con más detalle la reducción del rendimiento, se ha llevado a cabo un análisis más detallado para el caso del Módulo 15, donde se tiene información detallada de los rendimientos debido a que el muestreo fue más amplio y cuidadoso por la participación de sus directivos que son productores que rentan superficies considerables.

Para este caso se realizó una modelación del crecimiento del cultivo, utilizando los acumulados de los índices NDVI, ajustando la variación a una función sigmoideal del tipo Logístico y se calcularon las tasas de crecimiento del cultivo del trigo para cada uno de los tres años cuando se dispone de sus rendimientos.

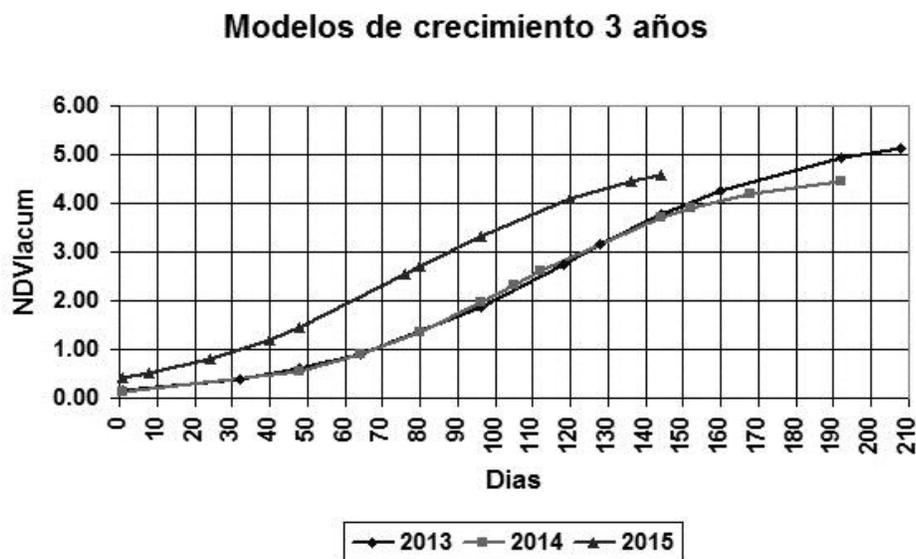
Se probó ajustar los valores acumulados a una función Logística o Gompertz. Los datos se ajustaron mejor al modelo Logístico.

Para el 2013 el modelo:  $y = \frac{5.479}{1 + 33.638 * \exp(-0.0298 * t)}$  con  $R^2 = 0.9916$ , Error Estándar = 0.202

Para 2014 el modelo:  $y = \frac{4.672}{1 + 40.137 * \exp(-0.035 * t)}$  con  $R^2 = 0.994$ , Error Estándar = 0.128

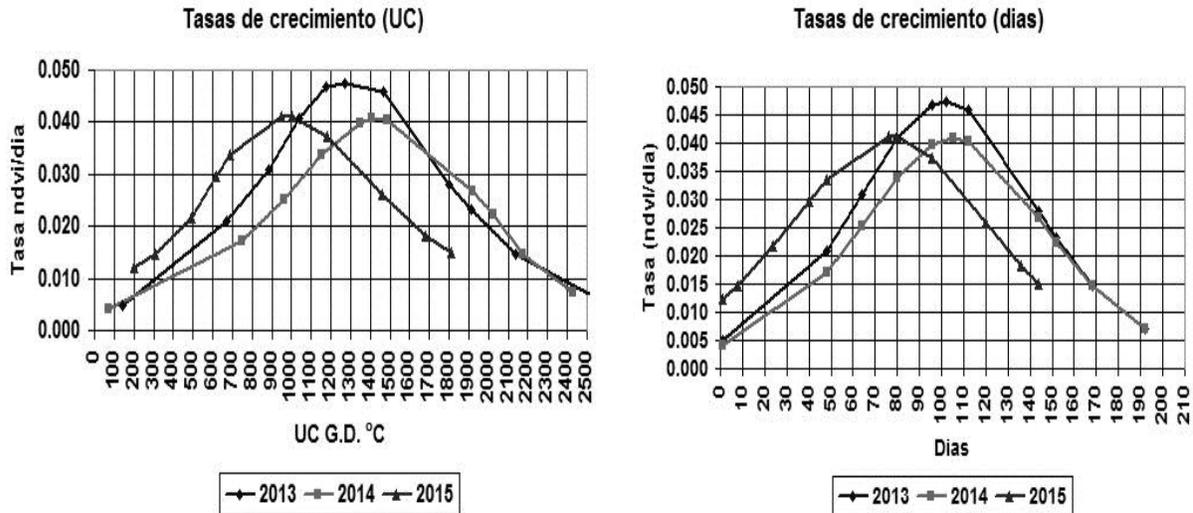
Para 2015 el modelo:  $y = \frac{5.105}{1 + 11.769 * \exp(-0.032 * t)}$  con  $R^2 = 0.989$ , Error Estándar = 0.201

Se observa que a mayor duración del cultivo, se tuvo mayor rendimiento, como puede observarse en la Figura 31, donde en el año 2013 tiene una mayor duración el cultivo que en al 2015 y en 2014 se tiene un valor intermedio.



**Figura 31.** Ajuste a una función Logística de valores acumulados de NDVI.

Al calcular las tasas de crecimiento del cultivo del trigo en estos tres años, se observa que los valores de las Unidades Calor para el máximo valor de NDVI en cada año, tienen diferencias, las cuales se acentúan significativamente entre el año 2013 y el 2015, como se hace notar en la Figura 32, donde además de graficar las tasas respecto a las UC también se ha hecho en días. En ambos caso se nota la diferencia entre 2013 y 2015.



**Figura 32.** Tasas de crecimiento del NDVI acumulado en tres años, Módulo 15.

En las figuras se observa que las tasas de crecimiento en los años 2013 y 2014, muestran cierta similitud, con la variante de un valor máximo en 2013; sin embargo, es evidente de que la curva del 2015 se encuentra totalmente desfasada, el valor máximo se presentó prematuramente, lo cual concuerda con la posición de los valores del NDVI de las imágenes mostradas en la Figura 31.

La razón de la notable variación observada en el año 2015, entre otras condiciones meteorológicas, se observó en este año, muchos días nublados, lo cual probablemente generó un efecto de invernadero, que aceleró el desarrollo del cultivo e impidió la acumulación de energía, lo que se nota en la menor acumulación de UC.

Al calcular la evapotranspiración promedio para el módulo 15, se observa que a pesar de las diferencias en el desarrollo del cultivo, la evapotranspiración en el año 2013, fue prácticamente igual a la del 2015, alrededor de 390 mm lo que implica que la tasa evapotranspirativa diaria en el 2015 fue mayor, este hecho también puede explicar el efecto de invernadero generado por la nubosidad, que aceleró el crecimiento del cultivo.

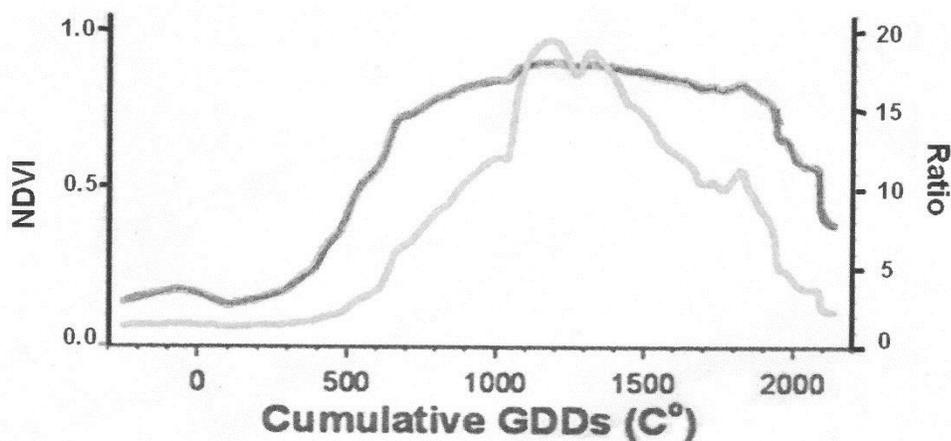
En los años agrícolas 2013-2014 y 2014-2015 se presentaron condiciones meteorológicas poco favorables para el cultivo del trigo; las horas frío disminuyeron, sobre todo en el año 2014-2015 y en consecuencia las unidades calor no fueron suficientes para lograr

rendimientos buenos; en este año agrícola el rendimiento tuvo una reducción cercana al 30%, como se mostrará.

Se ha observado que los cultivos requieren ciertas cantidades de energía para lograr cada etapa de su desarrollo, estas cantidades de energía se estiman de acuerdo a los grados-día acumulados. También se ha observado que hay una relación entre la variación del índice NDVI y los grados días acumulados, (Miller P. et al, 2001) como se observa en la Figura 33, donde en las ordenadas se muestran los grados días acumulados (en inglés Growing Degree Days GDD) y en las abscisas la variación de los índices NDVI (línea gruesa) y la Relación simple:

$$Ratio = \frac{R}{NIR} \quad (13)$$

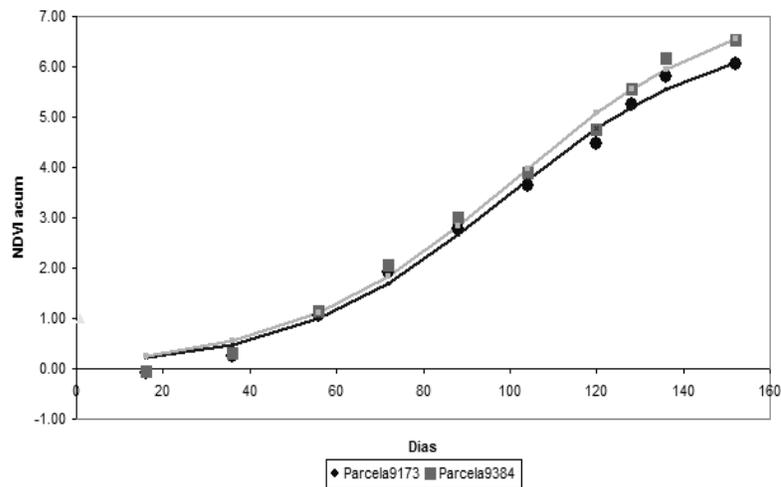
Donde R y NIR ya fueron definidos.



**Figura 33.** Relación grados día-NDVI y Relación simple.

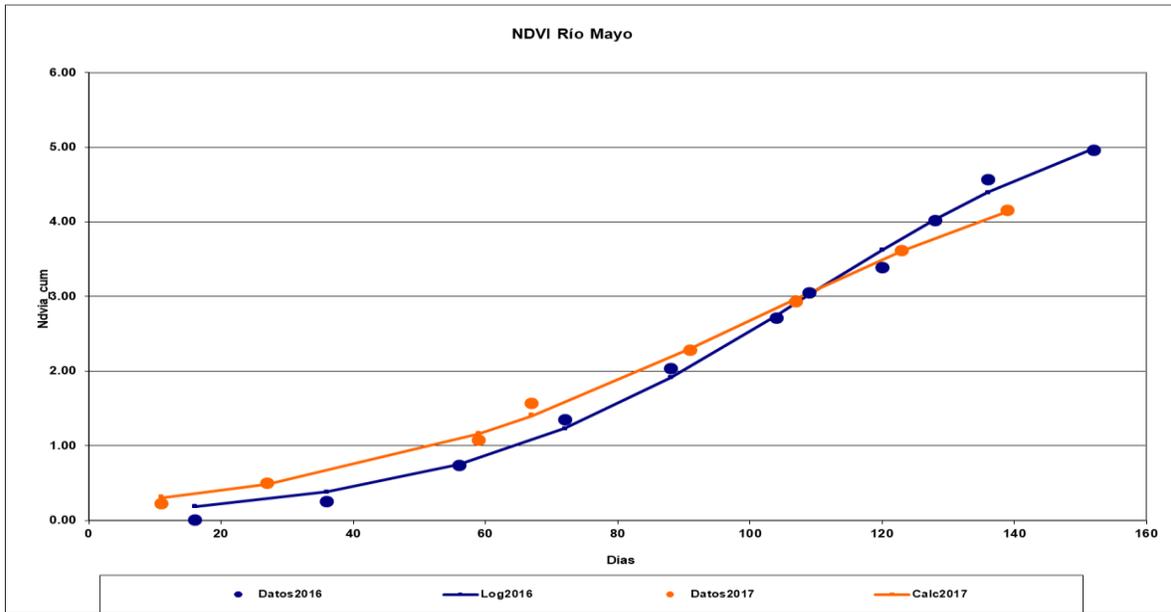
El acumulado de la curva de desarrollo del NDVI, es una sigmoide, es decir una curva en forma de una S, la cual se puede ajustar a una función matemática como la Logística. Como ejemplo puede verse en la Figura 34, los valores acumulados del NDVI de dos parcelas del módulo 15, donde se observa que en la parcela 9173 el valor acumulado del índice quedó abajo del de la parcela 9384 y en efecto, en la primera se obtuvo un rendimiento de 6.8 t/ha de

trigo y en la segunda su rendimiento fue de 7.1 t/ha. También en la Figura 34, se muestra en ambos casos en línea continua el ajuste a una función logística.



**Figura 34.** Valores acumulados del NDVI en dos parcelas.

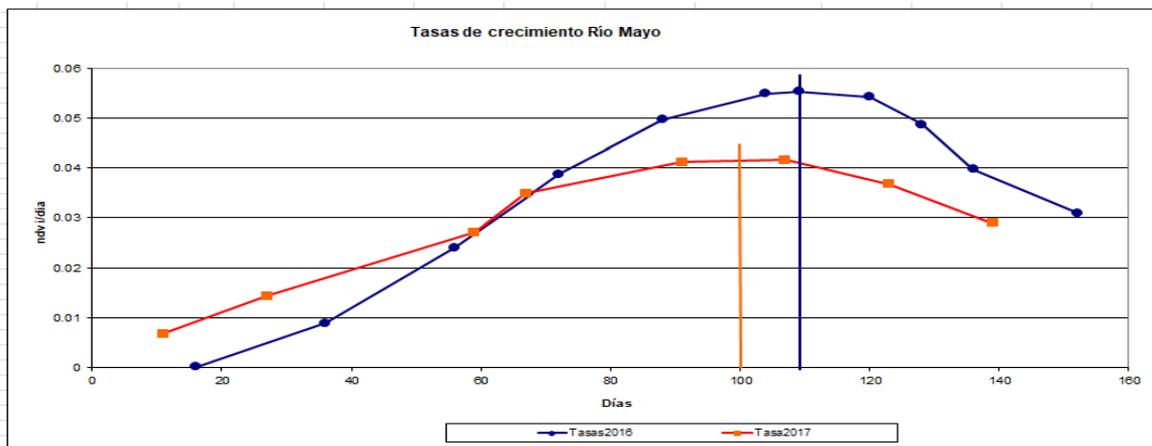
También se hizo un análisis del desarrollo del trigo para los años 2016 y 2017 para comparar la evolución promedio de este cultivo en el Distrito de Riego. En la Figura 35, se presenta el ajuste de funciones Logísticas al promedio de todas las parcelas del acumulado del NDVI. Como puede observarse, en el crecimiento del trigo en el año agrícola 2016-2017 fue acelerado en las primeras etapas del ciclo vegetativo, posiblemente por falta de horas frío, para posteriormente disminuir.



**Figura 35.** Modelo de crecimiento

Este crecimiento acelerado al principio del ciclo, provocó que la tasa de crecimiento se adelantara 10 días en comparación con el año 2015-2016, asimismo el valor máximo de esta tasa fue inferior.

En la Figura 36 se muestra la variación de las tasas de crecimiento del acumulado del NDVI.



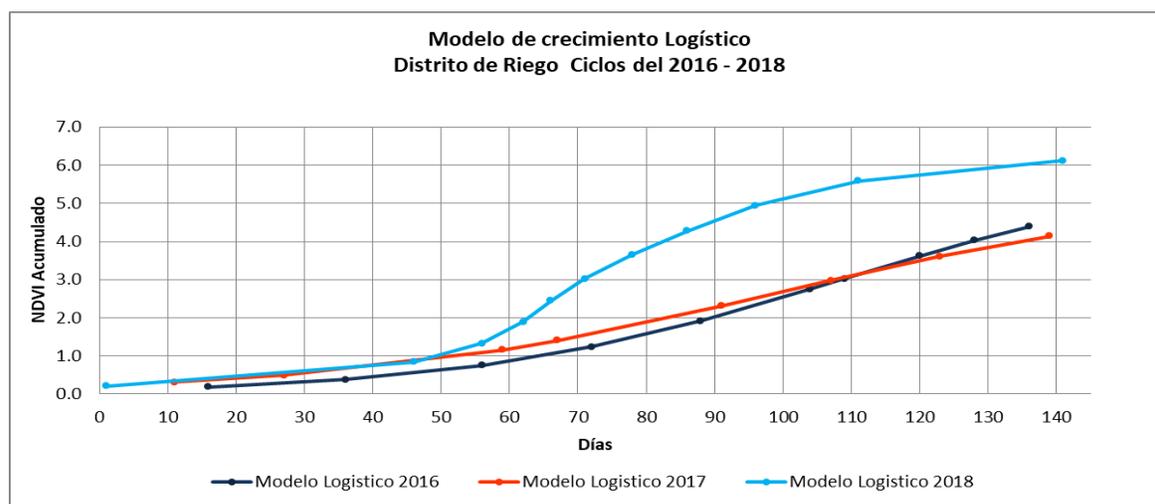
**Figura 36.** Tasa de crecimiento.

Las condiciones del desarrollo del trigo en 2017, indican que el rendimiento promedio en el distrito fue inferior al alcanzado en el 2016. La disminución en rendimiento posiblemente fue causa de la infestación de la roya de la hoja en muchas parcelas del distrito.

Para el ciclo actual 2017-2018 los datos que se observan tanto en el modelo de crecimiento y en la tasa de crecimiento en comparación con los ciclos pasados se comportan de diferente forma como se puede ver en el Cuadro 16 donde para el ciclo 2012-2013 que tiene un rendimiento de 6.91 t ha<sup>-1</sup> y el total de las UC fue de 2331, el día donde el NDVI fue el máximo se presentó al 128 día, para el ciclo 2017 - 2018 el rendimiento fue de 7.53 t ha<sup>-1</sup> con un total de UC de 1851, el día donde el NDVI fue el máximo se presentó a los 96 días, con una diferencia significativa de 32 días y 480 UC menos que las obtenidas en el ciclo 2012 - 2013, lo que pareciera que es otro cultivo el que predominó en este ciclo, como se puede observar en la Figura 37.

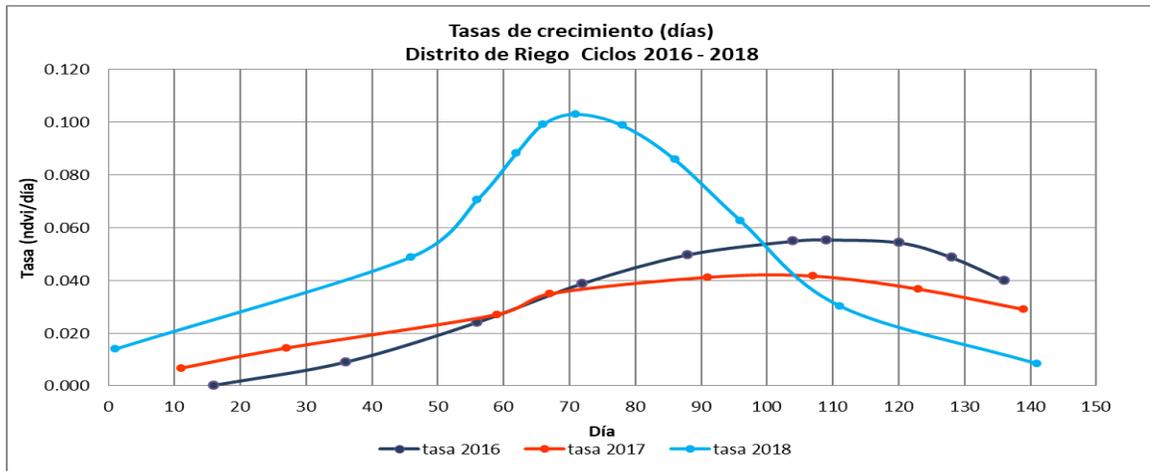
**Cuadro 16.** Análisis de datos del NDVI y UC del 2013 al 2018

Año	Max NDVI	U.C. Total	Rend. t/ha	Día Max. NDVI	U.C. Val Max
2013	0.89	2331	<b>6.91</b>	128	1663
2014	0.73	2169	<b>6.62</b>	144	1573
2015	0.77	1809	<b>5.19</b>	96	1180
2016	0.83	1636	<b>6.14</b>	88	1069
2017	0.82	1758	<b>6.66</b>	80	1108
2018	0.85	1851	<b>7.53</b>	96	1436



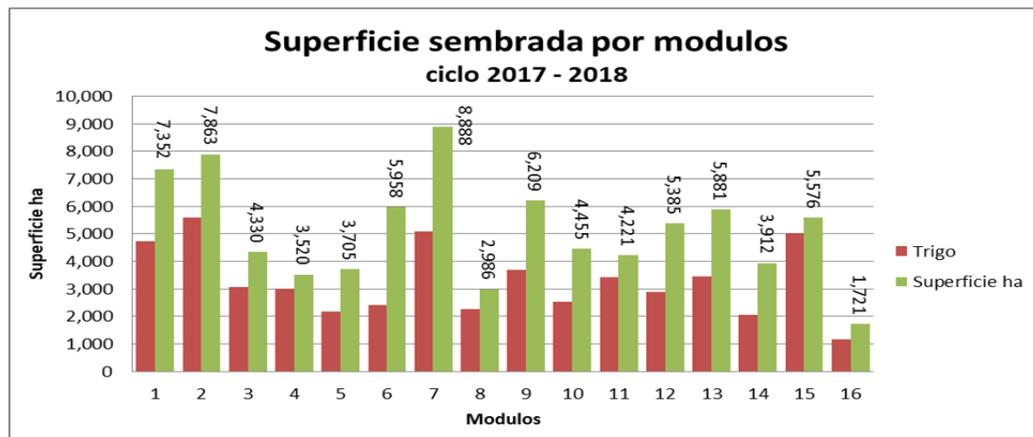
**Figura 37.** Ajuste a una función Logística de valores acumulados de NDVI 2016 - 2018

Sucede lo mismo con la tasa de crecimiento 2018 comparada con 2016 y 2017 muestra gran diferencia como se puede ver en la Figura 38.

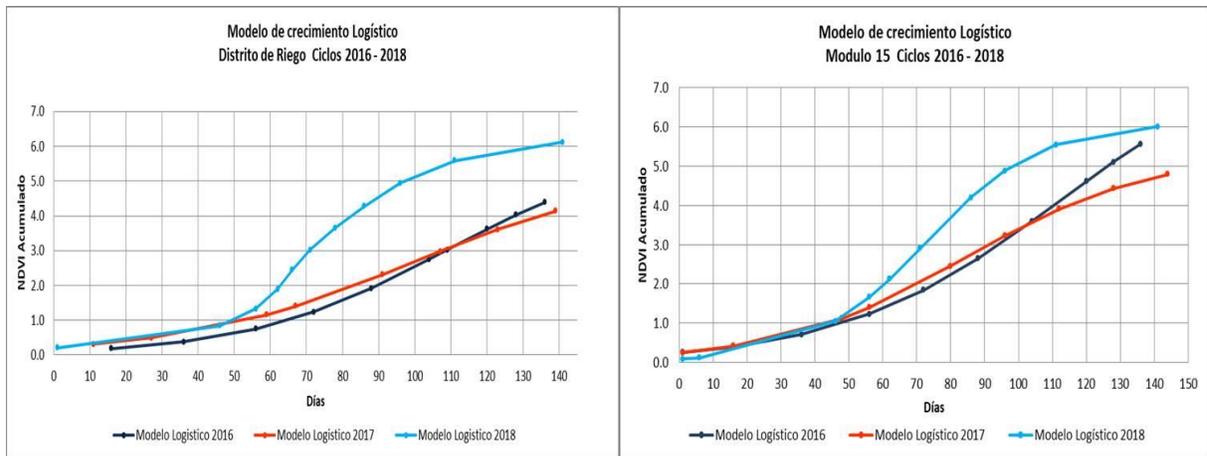


**Figura 38.** Tasa de crecimiento del NDVI acumulado de los ciclos 2016 al 2018.

Cabe señalar que los valores acumulados del NDVI que sirven para obtener el modelo de crecimiento y la tasa de crecimiento son el promedio de cada imagen satelital de todas las parcelas para todo el distrito de riego, por lo que se realizó un ejercicio adicional donde solo se contempla el promedio del Módulo 15 siendo este uno de los módulos donde el predominante cultivo sembrado es el trigo, como se puede ver en la Figura 39, y los valores observados son semejantes a los obtenidos de todo el distrito como se puede ver en la Figura 40.

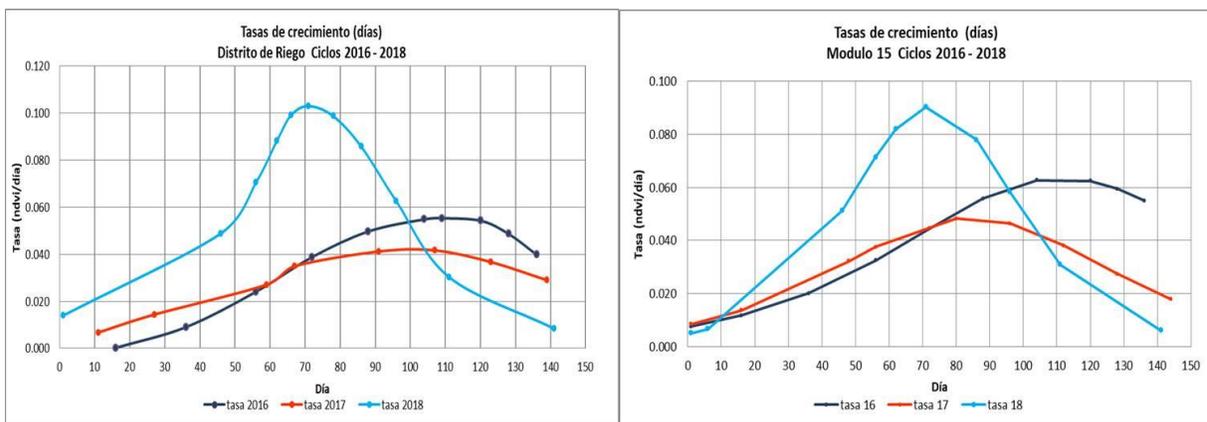


**Figura 39.** Superficies sembradas de trigo por módulos en el ciclo 2017-2018.



**Figura 40.** Comparación del modelo de crecimiento del acumulado del NDVI del distrito de riego y el módulo 15

También se compararon las tasas de crecimiento del distrito de riego con la del Módulo 15 como se muestra en la Figura 41, donde se puede observar que el comportamiento entre ambas tasas de crecimiento tienen gran similitud.



**Figura 41.** Comparación de tasas de crecimiento del distrito con el módulo 15 para los ciclos 2016 - 2018

De las figuras 40 y 41 se puede deducir que el crecimiento del cultivo se desarrolló más rápido que en los ciclos pasados y el comportamiento fue muy diferente a los ciclos pasados. Otra posible causa por la que este comportamiento es diferente es que en este ciclo solo se sembró el 70% de la superficie de todo el distrito de riego por falta de agua ya que fue un año seco y los productores que pudieron sembrar trigo optimizaron el recurso agua para lograr un mejor rendimiento.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

Los factores meteorológicos o del clima, tienen una influencia notable en los rendimientos de los cultivos; sin embargo, es poco lo que puede hacerse para modificar su efecto negativo; no obstante el seguimiento de su evolución mediante su medición con estaciones meteorológicas automáticas, permite hacer algunas previsiones para moderar sus impactos económicos y evaluar el impacto negativo en la economía del productor, con objeto de que pueda tomar decisiones anticipadas para aminorar las posibles pérdidas.

Para lograr ajustar un modelo de predicción temprana del cultivo de trigo es necesario monitorear el seguimiento de la evolución del cultivo y considerar varios aspectos como por ejemplo tipo de suelo, variedad de semilla, Unidad de Calor por etapa fenológica, así como Horas frío, el NDVI, fertilización, entre otras cosas, esto se debe hacer por parcela para generar una base de datos donde se puedan hacer comparaciones y obtener los mejores rendimientos para un buen modelo de predicción temprana.

Es de mucha importancia el asesoramiento a los productores con nuevas tecnologías para lograr mejores rendimientos, como el *Sistema de Monitoreo Satelital* ayuda a los productores del Distrito de Riego por medio de las imágenes satelitales y el NDVI obtenido de las mismas ya que la información que se genera a partir del vigor del cultivo es una de las más relevantes aportaciones, y permite al usuario identificar y reconocer los rasgos del cultivo en ese momento en una parcela, como las diferencias en suelo, nutrientes y riego.

El tener un seguimiento de siembra por ciclos permite al agricultor y/o técnico planificar de forma eficaz las fechas de siembra, los riegos y tener información acerca de la evolución temporal del cultivo

Se puede ver que las tecnologías de observación de la Tierra han alcanzado el punto de madurez y desarrollo en la generación de productos que hace posible plantearnos su integración en el funcionamiento diario de los Servicios de Asesoramiento en Riego para conseguir, entre otros aspectos, una mejor eficiencia del agua para riego.

El apoyo a la agricultura en general y a la de riego en particular, mediante el uso de imágenes satelitales combinadas con Sistemas de Información Geográfica, son herramientas de mucho valor que ayudarán a los usuarios del agua a mejorar su utilización, a fin de aumentar el rendimiento de sus cultivos.

Mediante estos métodos, es posible evaluar cómo se desarrollan los cultivos y, en su caso, los productores pueden tomar las medidas conducentes a corregir errores en el manejo de sus cultivos. Esto es la base de la agricultura de precisión.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Tomando en consideración los diferentes problemas en el rendimiento del trigo, ya sea por temperatura o manejo se implementó un sistema de monitoreo satelital en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, que permite que los productores puedan visualizar el seguimiento y desarrollo de sus cultivos por medio del Índice de Vegetación por Diferencias Normalizadas (NDVI) como se puede ver en la Figura 42, así mismo puede compararse con el mayor rendimiento de los ciclos pasados con el fin de tomar decisiones necesarias de manejo oportuno para obtener un mejor rendimiento en el ciclo actual, Espinosa-Espinosa *et al.*, (2017).



**Figura 42.** Imagen de la gráfica correspondiente al NDVI acumulado.

Es conveniente mencionar que las gráficas en el NDVI acumulado para cada parcela pueden variar en cada ciclo ya que muchos de los dueños rentan sus terrenos a diferentes productores

y cada productor no siempre siembra el mismo cultivo en los diferentes ciclos agrícolas, o bien la fecha de siembra no es la misma para los diferentes ciclos.

Este sistema presenta algunas deficiencias, por ejemplo las parcelas sembradas no corresponden al polígono digitalizado y esto da valores erróneos en el NDVI, también no cuenta con un seguimiento de manejo de cultivos, es por eso que actualmente se está desarrollando mejoras a la aplicación del sistema de monitoreo satelital, el cual permite a técnicos así como a productores llevar el monitoreo a detalle del desarrollo de los cultivos por parcela con imágenes satelitales por medio del NDVI, también podrán ingresar datos de manejo del suelo así como de cultivo y llevar un seguimiento fenológico del cultivo.

A continuación se describen los procesos dentro del sistema de monitoreo.

- **Agregar parcela y seguimiento**

El usuario registrado podrá agregar su parcela para monitorear ubicándola desde la imagen satelital.



**Figura 43.** Ubicación de parcela para agregar al seguimiento.

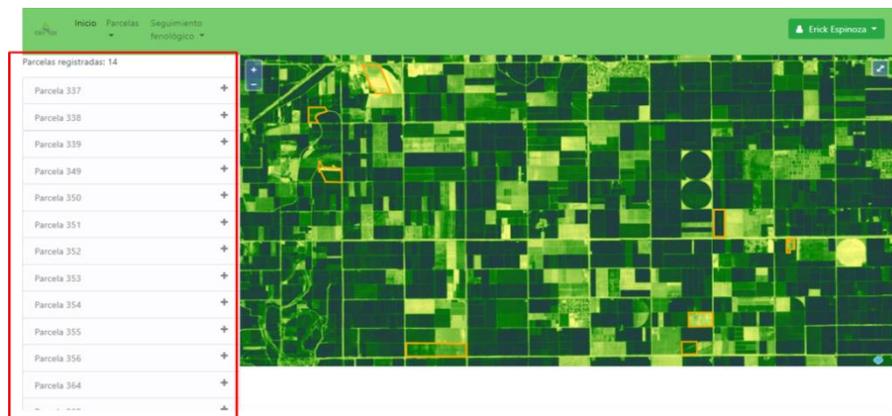
- **Dibujar el polígono de la parcela**

Ya ubicada la parcela el usuario podrá dibujarla o digitalizar el área de interés, esto permitiendo hacer un seguimiento específico.



**Figura 44.** Digitalización de la parcela o área de interés.

El sistema igual permite que un productor pueda tener más de una parcela en seguimiento.



**Figura 45.** Lista de parcelas en seguimiento.

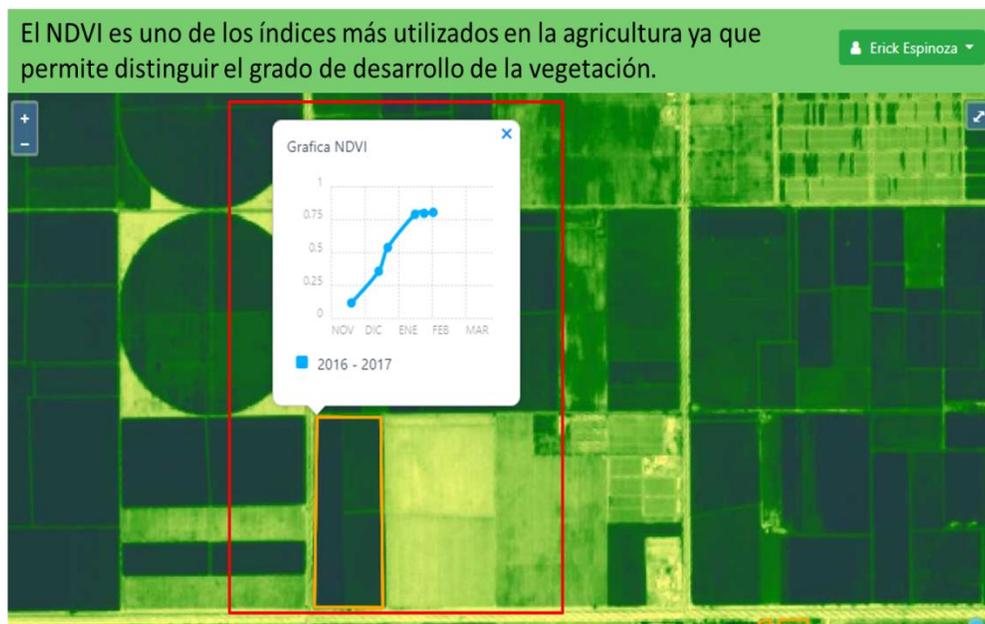
- **Agregar seguimiento por parcela**

Al momento de agregar la parcela el sistema mostrara el valor del NDVI para las diferentes imágenes satelitales que existan.



**Figura 46.** Valores de NDVI de la parcela.

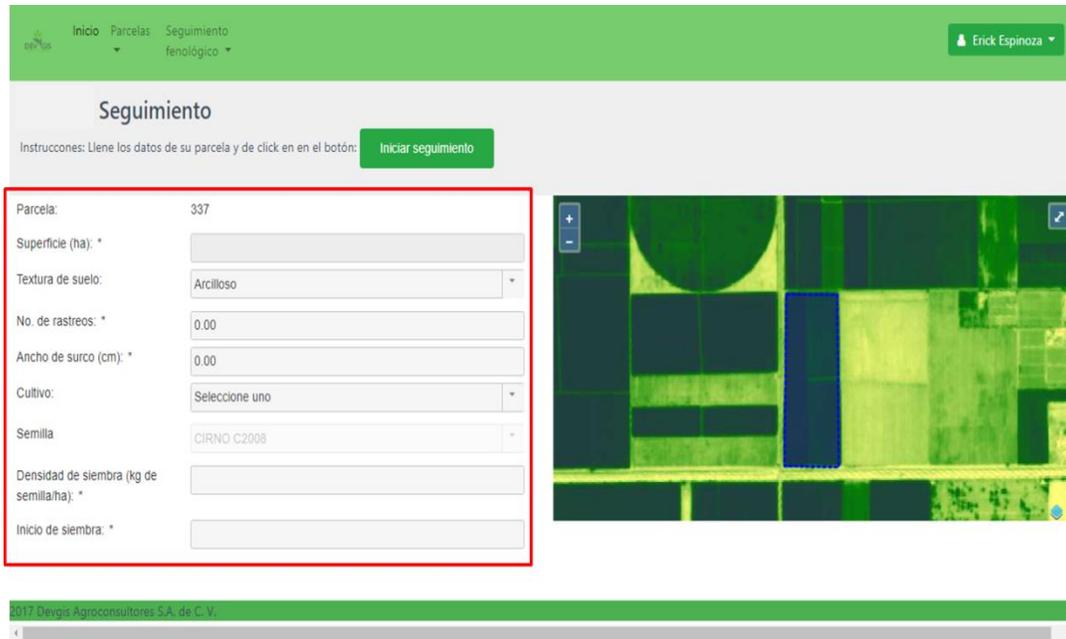
La gráfica indica que entre más alto sea el valor NDVI, el rendimiento también será mayor para condiciones óptimas.



**Figura 47.** Valor del NDVI para cada una de las imágenes satelitales.

- **Manejo de cultivo**

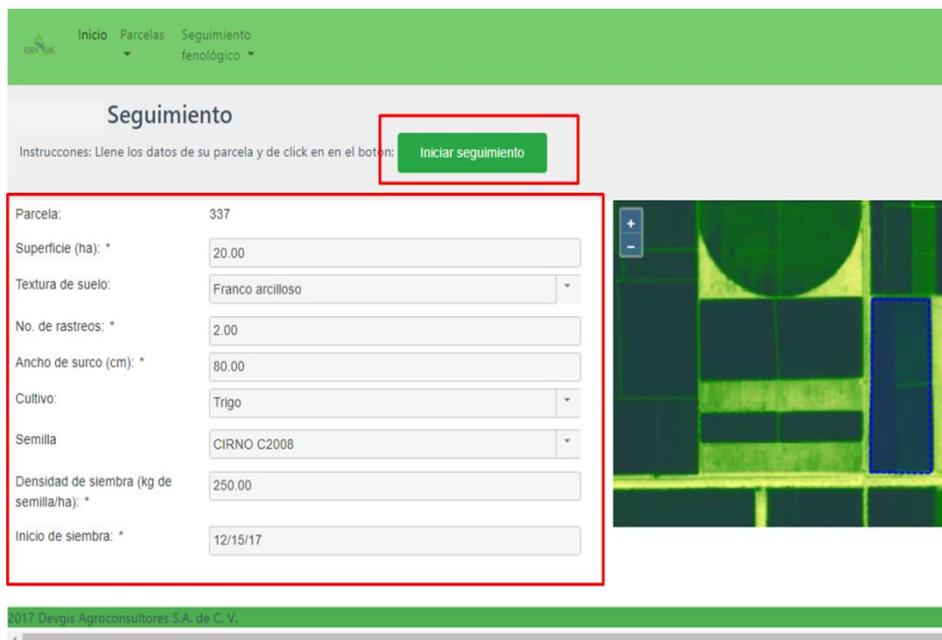
Aquí el productor deberá ingresar datos que son de importancia para hacer un seguimiento adecuado.



**Figura 48.** Información del cultivo.

○ **Iniciar seguimiento**

Una vez que el productor agrega los datos, debe darle en el botón de iniciar seguimiento.



**Figura 49.** Inicio de seguimiento a la parcela.

- **Seguimiento de riegos**

También se le solicita al productor agregar los riegos que se le den a la parcela, esto ayudando a saber que fechas son las que se hicieron los riegos.

Aplicación de Riegos

Agregar riego

Etapa Aplicación \* Presiembra

Lamina (cm) \* Presiembra

Fecha \* Primer riego

Agregar

Segundo riego

Tercer riego

Etapa Aplicación	Lámina	Fecha	Acciones
Presiembra	22.5	2017-12-01	x

**Figura 50.** Seguimiento de riegos.

- **Seguimiento de aplicaciones de fertilizantes, insecticidas y herbicidas.**

De igual forma el productor debe agregar las aplicaciones de dosis y fechas de fertilizantes, insecticidas y herbicidas como se muestra en la Figura 51.

**Aplicación de fertilizantes**

**Agregar fertilizante**

Etapa Aplicación: Presiembra

Fertilizante: Urea

Cantidad (kg/ha o lts/ha):

Agregar

Fertilizante	Cantidad (kg/ha o lts/ha)	Etapa	Acciones
No records found.			

**Aplicación de insecticidas**

**Aplicar insecticida**

Insecticida: Engeo

Fecha de aplicación:

Agregar

Insecticida	Fecha de aplicación	Acciones
No records found.		

**Aplicación de herbicidas**

**Aplicar herbicida**

Herbicida: Situi

Fecha de aplicación:

Agregar

Herbicida	Fecha de aplicación	Acciones
No records found.		

**Figura 51.** Seguimiento de aplicaciones de fertilizantes, insecticidas y herbicidas.

○ **Etapa Fenológica del Trigo**

Por último y lo más importante el productor deberá de ir anotando la fecha en que se está presentando cada etapa fenológica en el trigo, para así poder ver en la gráfica si el cultivo se está adelantando o atrasando y también podemos ir acumulando tanto las horas frío como las unidades calor, esto nos permitiría conocer un anticipado rendimiento.

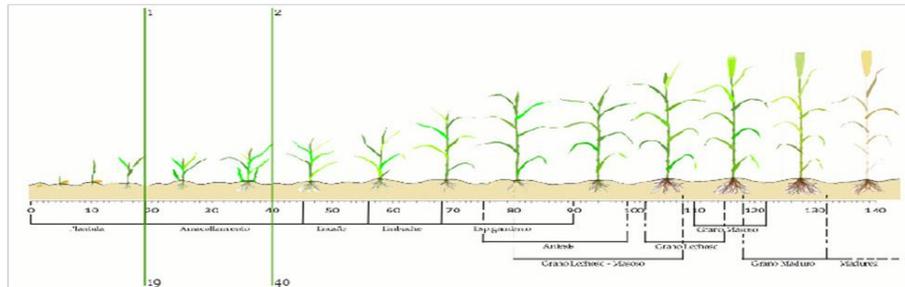
## Seguimiento Etapa Fenológica

**Seguimiento**

Etapa fenológica

Fecha \*

### Gráfica de seguimiento



**Figura 52.** Etapas fenológicas del trigo.

### *Los beneficios esperados*

Con base en los datos del NDVI y la temperatura podemos monitorear la Evapotranspiración para conocer las demandas de agua del cultivo y tomar decisiones en los riegos.

Con base en las fechas de siembra, los riegos y los datos de las estaciones climatológicas se dará el seguimiento a las parcelas lo cual nos sirve para obtener la fenología del cultivo y saber si va atrasado o adelantado respecto a cada etapa fenológica, lo cual puede afectar el rendimiento.

Cada parcela llevará un seguimiento conforme pase cada ciclo agrícola, de tal modo que conforme se tenga un mayor número de ciclos, se podrán hacer comparativos y conocer con anticipación si la parcela tendrá o no un buen rendimiento.

Entre más información agregamos al polígono (parcela), tendremos más información para comparar y conocer la situación actual e histórica.

Implementado el sistema de monitoreo podremos consultar geográficamente parcelas por rendimientos, por niveles de demanda de agua, por salinidad, por niveles de tecnificación, por texturas de suelo, etc. Todo para la mejor toma de decisiones y para el ahorro de recursos económicos y naturales como el agua, agroquímicos y fertilizante.

## 6. LITERATURA CITADA

- Acevedo E., 1992. Preface en Results of the First International Heat Stress Genotype Experiment.- C. México : CYMMYT, 1992.-p.1-2.
- Allen R. G., Pereira L. S., Smith M., Raes D. y Wright J. L. 2005. The FAO-56 dual crop coefficient method for predicting evaporation from soil and application extensions. J. Irrig. Drain. Eng., 131, 2-13.
- Arnold C.Y. 1959. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. Proceeding of the American Society of Horticultural Science 74:430-445.
- Asana, R. D. y Williams, R. F. 1965. The effect of temperature stress on grain development in wheat. Aust. J. Agric. Res. 16: 1-13.
- Bauer A.; Frank, A. B. y Black, A. L. 1984. Estimation of spring leaf growth rates and anthesis from air temperature. Agron. J. 76: 829-835.
- Boussingault, J. J. B. D. 1837. Economie rurale considerée dans ses rapports avec la chimie, la physique et la météorologie. 1st ed., 8°, Paris.
- Bustillos V. F. 1988. Determinación de horas frío en el estado de Zacatecas. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx.
- Calera B. Alfonso y José González Piqueras. 2007. "*Parámetros biofísicos de la cubierta vegetal: Relaciones operativas para obtención de mapas de estos parámetros desde las imágenes de satélite*". Grupo de teledetección, Universidad Castilla la Mancha. Documento de PLEIADeS.
- Chandler W. H. Kimball M. H., Phillips G. L., Tufts W. P. y Weldon, G. P. 1973 Chilling requirements for opening buds on deciduous orchard trees and some other plants in California. Bulletin 611.
- Cherney J. H y Marten G. C. 1982. Small grain crop forage potential: I. Biological and chemical determinants of quality and yield. Crop Science, vol. 22, p. 227.
- Choudhry B. J., Ahmed N. U., Idso S. B. Reginato R. J., Daught C. S. T. 1994. *Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations*. Remote Sensing of Environment. 50: 1-7.

- Confalone, A. E. y Navarro, D. M. 1999. Comparación de modelos de tiempo térmico para maíz. Comparison of corn thermal time models. *Revista Brasileira de Agrometeorología*, Santa María 7(2):207-211
- Cortés J. J. M., Fuentes D. G., Ortiz E. J. E., Tamayo E. L. M., Cortez M. E., Ortiz A. A., Félix V. P., Armenta C. I. 2011. *Agronomía del trigo en el sur de Sonora*, Centro de Investigación Regional del Noroeste, Campo Experimental Norman E. Borlaug. Libro Técnico No. 6. Cd. Obregón, Sonora. Noviembre. ISBN 978-607-425-588-1
- Darwinkel A.; Ten Hag, B. A. y Kuizenga, J. 1977. Effect of sowing date and seed rate on crop development and grain production of winter wheat. *Neth. J. Agric. Sci.*25: 83-94.
- Daubenmire R. F. 1974. *Plant and Environment. A text book of autoecology*. John Wiley and Sons, New York. 424 p.
- Dawson, I. A. y Wardlaw, I. F. 1989. The tolerance of wheat to high temperatures during reproductive growth. III. Booting to anthesis. *Australian Journal of Agricultural Science*, vol. 40, p. 965-980.
- Durand R. 1969. Signification et ported des sommes de temperatures. *Bulletin Technique d'Information. Ministere de l'Agriculture. France*. 238: 185-190.
- D'Urso G. y A. Calera en las Actas de la Conferencia AIP (2006)
- D'Urso G., and Calera Belmonte, A. 2006: Operative approaches lo determine crop water requirements from Earth Observation data: methodologies and applications. *AIP conference proceedings 8S2: Earth Observation for Vegetation and Water Management*, pp. 14-25.
- Edwards M. and M. Colin. 1834. De influence de la temperature sur la germination. *Ann. Sci. Nat., Ser. 2, 1: 257-270*.
- Engels C. 1994. Effect of root and shoot dry matter partition of the internal concentration of nitrogen are carbohydrates in maize and wheat. *Annals of Botany*, vol. 73, p. 221-219.
- Erez A. and Lavee S. 1971. "The effect of climatic coditions on Dormancy Development of peach buds. *Jout. Smrt. Dov. Hort. Sci.*m96 (6): p. 711-714

- Espinosa-Espinosa, J. L., Palacios-Vélez, E., Tijerina-Chávez, L., Flores-Magdaleno, H., & Abel Quevedo-Nolasco (enero - febrero, 2017). Sistema de monitoreo satelital para el seguimiento y desarrollo de cultivos del Distrito de Riego 038. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 95-104
- FAO. 1997. Anuario de producción. vol. 51, p. 176.
- FAO. 2001. Trigo regado, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. ISBN 92-5-304488-8. Disponible en.  
<http://www.fao.org/docrep/006/x8234s/x8234s00.htm#Contents>
- FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. vol. 56, p. 100. ISSN 0254-5293
- FAO. 2018. Situación Alimentaria Mundial. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>
- Fischer, R. A. et al. 1975. Density and row spacing effects on irrigated shot wheats at low latitude. *Journal of Agricultural Science*, vol. 87, p. 137-147.
- García, R. et al. 1993. Efectos de la densidad de siembra sobre el rendimiento en grano y sus componentes de tres cultivares de trigo: Prointa Isla verde granero INTA y Prointa Federal. Pergamino Est. Exp. Agropecuaria. Boletín de divulgación técnica, no. 97, p. 19.
- Gil-Albert, F. 1992. Tratado de arboricultura frutal. Vol. II. La ecología del árbol frutal. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 207 p.
- Guzmán, L. y Pozo, J. L. 1994. Efecto de la densidad y fertilización nitrogenada sobre el rendimiento en granos y sus componentes de dos cultivos de trigo. Informe del IV Curso de manejo del cultivo del trigo y transferencias de tecnología INTA-CIMMYT. Pergamino.
- Iglesias, L. A., 1992. Primer ensayo sobre el comportamiento de seis variedades de trigo (*Triticum aestivum* L.) durante diferentes fechas de siembra en suelos dedicados al arroz en Cuba. *Cultivos Tropicales*, vol. 13, no. 2-3, p. 82-88.
- Iglesias, L. A. 1996. Dinámica de la germinación de la semilla de trigo (*Triticum aestivum* L.) con diferentes manejos del agua. *Cultivos Tropicales*, vol. 17, no. 1, p. 13-15.

- Iglesias, L. A. e Iglesias, L. 1995. Clasificación del comportamiento de variedades de trigo en Cuba mediante el método de análisis de componentes principales. *Cultivos Tropicales*, vol. 16, no. 2, p. 66-69.
- Iglesias, L. A. y Pérez, N., 1995. El cultivo del trigo en condiciones tropicales y posibilidades para su siembra en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 1995, vol. 16, no. 1, p. 52-61.
- INTA. El cultivo de trigo, Buenos Aires. Ministerio de la Agricultura y Ganadería de la nación. 1981, p. 95-120.
- Kiniry J. R. and Keener M. E., 1982. An enzyme kinetic equation to estimate maize development rate. *Agron. J.* 74: p. 115-119.
- Kirby E. J. M. 1995 Factors affecting rate of leaf emergence in barley and wheat. *Crop Sci.* 35: p. 11-19.
- Koshta L. D.; Tiwari B. P. y Kurmania S. 1993. Efecto del riego, los niveles de fertilidad y la aplicación fraccionada de nitrógeno sobre el rendimiento y la calidad del trigo enano var Lok-1. *Research and Development Reporter*, vol. 10, p. 1-91.
- Lerner S. E. y Cerri A. M. 1990. Generación de macollas, espiguillas y flores en trigo (*Triticum aestivum* L). Efecto de la densidad de siembra. II Congreso Nacional de Trigo 17/ 19 octubre, Pergamino: 59-69.
- Lerner S. y Abbate P. E. 1991. Influencia de la densidad de siembra sobre la estación de los estados apicales del trigo. *Revista de la Facultad de Agronomía*, vol. 12, no. 3, p. 219-226.
- López C. C., Richards A. R. 1994b. Variation in temperate cereals in rainfed environments. II. Phasic development and growth. *Field Crops Res.* 37: 63-72.
- López, L. B. 1991. Cultivo de herbáceos. vol. 1. Ediciones Mundi-Prensa.
- Malaspina, A. Pedrol y Castellarim, H. 1994. Intensificación de la producción de trigo, cultivares. Boletín de información técnica. Investigación triguera campaña 1994-1995. Centro regional INTA. Santa Fe. Serie trigo No5.
- Martínez, J., et al. 1984. Guía para producir trigo en el sur de Sonora. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, INIA. Folleto para productores. Sonora México.

- Melgarejo, P.; Martínez, V. R.; Guillamón, J. M.; Miro, M.; Amorós, A. 1997. Phenological stages of the pomegranate tree (*Punica granatum* L.). *Ann. Appl. Biol.* 130:135-140.
- Miller Perry, Will Lanier and Stu Brand. 2001. "*Using Growing Degree Days to predict Plant Stages.pdf*" Montana State University. Pp 7.
- Milthorpe F. L. 1959 Studies on the expansion of the leaf surface. 1. The influence of temperature. *J. Exp. Bot.* 10 (29): p. 233-249.
- Miralles, D. J. y Slafer, G. A. 1990. Efecto de la temperatura, fecha de siembra y el tamaño del destino sobre la duración del área foliar durante la etapa de llenado de grano en trigo. II Congreso Nacional de Trigo. 17 al 19 octubre: 98-113. Pergamino, Argentina.
- Moreno I., Plana R., Ramírez A. e Iglesias, L. 1997. Comportamientos fenológico y agrícola de 10 variedades de trigo para el occidente de Cuba. *Cultivos Tropicales*, vol. 18, no. 2, p. 16-18.
- Moreno, R.O.H. 1990. Tecnología para la producción de trigo con énfasis en los sistemas de siembra en surcos. CIFAP-SON. INIFAP-SAGAR. México.
- Nayeem K. A. y Dalvi D. G. 1993. Stomatal density, aperture index and their differentials in wheats (*Triticum* sp) at low and high temperatures. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, vol. 63, no. 4, p. 215.
- Nelson, P.V. 1998. Greenhouse operation and management. Fifth edition. Simon and Schuster. New Jersey.
- Nonhebel, S. 1993. Effect of changes in temperature and CO<sub>2</sub> concentration on simulated spring wheat yield in The Netherlands. *Climate Change*, vol. 24, p. 311-329.
- Nuttonson M. Y. 1955. Wheat - climate relationships and the use of phenology in ascertaining the thermal and photo-thermal requirements of wheat. Am. Institute of Crop Ecology. Washington D.C.
- OEIDRUS. 2009. Oficina estatal de información para el desarrollo rural sustentable de Sonora. Avance de cosecha de trigo. Mayo 4, 2009
- Ortiz C. A. 1984. "Elementos de agrometeorología cuantitativa". Depto. de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx.

- Palacios E. V., L. S. Palacios, J. C. Rodríguez and Palacios J. S. 2010. “*Earth Observation as a Support to Improve Water Use in Irrigated Agriculture*”. Journal of Agriculture Science and Technology, Volume 4, Num. 6 (Serial No 31) pp 1:7.
- Palacios V. Enrique 2002. *¿Porque, Cuando, Cuanto y Como Regar?: Para lograr mejores cosechas*. Editorial Trillas, México.
- Palacios, V. E. and H. Flores M. 2013, *Crop Evapotranspiration Estimation through the Use of Satellite Images*. Journal of Earth Science and Engineering. Vol. 3, pp 663-671
- Palacios, V. E., L. S. Palacios S., J. C. Rodriguez and J. E. Palacios S. 2010: *Earth Observation as a support to improve water use in irrigated agriculture*. Journal of Agriculture Science and Technology. Volume 4, Number 6. December 2010.
- Palacios, V. E., L. S. Palacios S., y J. E. Palacios S. 2011. *Agricultura de Riego Asistida con Satélites*. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. II, núm. 2, abril-junio 2011.
- Palacios-Vélez, E., Espinosa-Espinosa, J., & Palacios-Sánchez, L. 2018. Evaluation of water use efficiency in irrigated agriculture supported by satellite images. Tecnología y Ciencias del Agua, 9 (1), 31-38. doi:<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-02>
- Podol'skii A. S. 1958. Novyi metod fenologicheskikh prognozov i agroklimaticheskikh otsenok po teplovomu faktoru. (A new method for phenological prognosis and agroclimatic appraisal using the heat factor). Doklady Akad. Nauk SSSR (n.s.) 121(5): 932-935. (In Russian; English translation available from Amer. Institute of Biol. Sciences, Washington, D. C.).
- Pollock C. J. 1990. The response of plants to temperature change. J. Agric. Sci. Cambridge 115:1-5.
- Rahman M. S. and Wilson J. H. 1978. Determination of spikelet number in wheat. III. Effect of varying temperature on ear development. Aust. J. Agric. Res. 29: p. 459-467.
- Rawson, H. M., Zajac, M., and Penrose, L. D. J. 1998. Effect of seedling temperature and its duration on development of wheat genotypes differing in vernalization response. Field Crops Research 57:289-300
- Richardson E. A., Steeley D. S., and Walker, R. D. 1974. “A model for estimating the completion of rest for Redheaven and Elberta peach trees”. Hort. Sci. Vol. 9 (4) 331-332.

- Rosales, R. E. y Esqueda, E. V. A. 2010. Clasificación y uso de herbicidas por su modo de acción. Memoria Curso Precongreso XXXI Congreso Mexicano de la Ciencia de la Maleza. México. pp. 2948.
- Rosenberg N. J. 1974: *Microclimate: The biological environment*. John Willey & Sons. New York.
- Samish R. M. 1954. "Dormancy in Woody plants". The Agricultural Research Station and Hebrew University Rehovot, Israel. *Ann Rev. Plant Physiology* 5:183-204.
- Senigagliaesi C. y García R. 1979. Efecto de la densidad de planta sobre la productividad de trigo en relación a la fertilidad del suelo, Pergamino. *Est. Exp. Agropecuaria INTA. Carpeta de producción vegetal. Tomo II información No17*.
- Singh, G. et al. 1993. Response of wheat (*Triticum aestivum* L) to planting method, seed rate fertility in late-sown conduction. *Indian Journal of Agronomy*, vol. 38, no. 2, p. 195-199.
- Slafer G. A. y Rawson, H. M. 1994. Sensitivity of what phasic development of some assumptions made by physiologists and modellers. *J. Plant Physiol.* vol. 21, p. 393-426.
- SIAP. 2007. Estadísticas sobre producción de trigo en Mexico. SIAPSAGARPA.
- Stapper M., R. A. Fischer 1990. Genotype, sowing date and plant spacing influence in high-yielding irrigated wheat in southern New South Wales. III. Potential yields and optimum flowering dates. *Aust. J. of Agric. Res.* 41: 1043-1056.
- Tashiro T. and Wardlaw I. F. 1990. The effect of high temperature at different stages of ripening on grain set, grain weight and grain dimensions in the semidwarf wheat "Banks". *Annals of Botany*, vol. 65, p. 51-61.
- Valencia P. F., Enríquez J. E. O., Dávila G. F., Quiróz J. G. Q., Grageda J. G. 2009. Horas frío en relación al rendimiento de trigo. Folleto técnico No. 63, INIFAP, Ciudad Obregón, México. ISBN 9786074251593
- Van Dobben, W. H. 1962. Influence of temperature and light conditions on dry-matter distribution, development rate and yield in arable crops. *Neth. J. Agric. Sci.* 10 (15): Special issue: p. 377-389.
- Vegis A. 1964. "Dormancy in higer plants". *Plant Physiology*. Vol. 25: p. 185.224.

- Vélez O. R. y García B. G. 2012. “Cálculo de horas frío en el municipio de Puebla de Zaragoza”, San Juan Acateno, Teziutlán, Pue. En línea:  
<http://www.agrohidraulicaiah-guadalupe.blogspot.com/2012/05/calculo-de-horas-frio.html>
- Vicente-Serrano, S. M.; Pons-Fernández, X. and Cuadrat-Prats, J. M., 2004. Mapping soil moisture in the central Ebro river valley (northeast Spain) with Landsat and NOAA satellite imagery: a comparison with meteorological data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, N° 20, p. 4325-4350.
- Villaseñor M., H. E. y E. Espitia R. 2000a. Características de las Áreas Productoras de Trigo de Temporal: Problemática y Condiciones de Producción. En: Villaseñor M., H. E. Y E. Espitia (Ed.). *El Trigo de Temporal en México. Libro Técnico No.1.* Chapingo, Edo. de México., México. SAGAR, INIFAP, CEVAMEX. p 85-98.
- Villaseñor Mir, H. E. 2000. Importancia del trigo. En: *El Trigo de Temporal en México.* Ed. H. E. Villaseñor Mir y E. Espitia R. Libro Técnico No.1. INIFAP-CIRCE-CEVAMEX. pp: 7-24.
- Waggoner, P. E. 1974. Modeling seasonality. En: *Phenology and Seasonality Modeling.* (Ed.) H. Lieth. Springer Verlag, New York. Heidelberg, Berlin, p: 301-327.
- Wang J. Y. 1958a. An evaluation of some techniques in agrometeorology. (Methods relating to problems in cultivated plants). Ph.D. Thesis, University of Wisconsin.
- Wang J. Y. 1960. A Critique of the Heat Unit Approach to Plant Response Studies. Wiley on behalf of the Ecological Society of America. *Ecology*, Vol. 41, No. 4 (Oct., 1960), pp. 785-790
- Warrington J. J.; Dunstone R. L.; and Green L. M. 1977. Temperature effects at three development stages on the yield of the wheat ear. *Aust. J. Agric. Res.* 28: 11 -27.
- Yarnell S. H. 1939. “Texas studies on the cold requirement of peaches”. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* p. 349-352
- Yue S. S.; Qi X. H. and Yu S. L. 1992. Canopy photosynthesis and dry matter production of winter wheat at late stages of growth and development. *Journal of Shandong Agricultural University*, vol. 23, p. 1-13.