



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**CUANTIFICACIÓN DE LAS SUPERFICIES AFECTADAS POR HELADAS
OCURRIDAS EN EL MES DE FEBRERO DE 2011, EN EL DISTRITO DE RIEGO 041,
RÍO YAQUI, UTILIZANDO IMÁGENES DE SATÉLITE Y SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

ABEL VAL NORIS

T E S I S

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

**MAESTRO EN TECNOLOGÍA
EN HIDROCIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

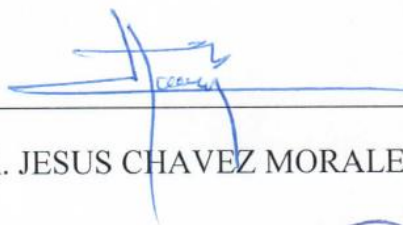
2013

La presente Tesis, Titulada: **“Cuantificación de las superficies afectadas por heladas ocurridas en el mes de Febrero de 2011, en el Distrito de Riego 041, Río Yaqui, Utilizando Imágenes de Satélite y Sistemas De Información Geográfica”**, realizada por el Alumno: **Abel Val Noris**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN TECNOLOGÍA
EN HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. JESUS CHAVEZ MORALES

DIRECTOR:



DR. JORGE ARTURO SALGADO TRANSITO

ASESOR:



DR. HECTOR FLORES MAGDALENO

Montecillo, Texcoco, México, agosto de 2013

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que contribuyeron a la culminación de la presente tesis, sin cuya ayuda valiosa no hubiese sido posible terminarla.

A la Comisión Nacional del Agua por darme la oportunidad para cursar la Maestría Tecnológica en Hidrociencias

Al Dr. Jesús Chávez Morales, por su acertada dirección y asesoría que contribuyeron a la realización de este trabajo de tesis de maestría.

Al Dr. Jorge Arturo Salgado Transito, por sus enseñanzas y apoyo durante la conducción del presente trabajo.

Al Dr. Héctor Flores Magdaleno, por su apoyo en la realización del presente trabajo.

A mis maestros de esta maestría, por transmitirme sus experiencias, que permitieron adquirir nuevos conocimientos, para afrontar y resolver con responsabilidad los problemas que se me presenten a lo largo de mi vida profesional.

A mis colaboradores por ayudarme a terminar mi trabajo José Sánchez Arellano y David Hernández Alfonso.

A mi esposa Natividad castillo Zavala

A mi hijo Ángel Abel Val Castillo

Por ayudarme a realizarme en mi vida profesional

CUANTIFICACIÓN DE LAS SUPERFICIES AFECTADAS POR HELADAS OCURRIDAS EN EL MES DE FEBRERO DE 2011, EN EL DISTRITO DE RIEGO 041, RÍO YAQUI, UTILIZANDO IMÁGENES DE SATÉLITE Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

RESUMEN

Las heladas son un fenómeno natural que se presenta en la mayor parte de la Tierra. En el norte y centro de la República Mexicana, durante los meses fríos del año, se presentan temperaturas menores de 0°C. Las regiones más afectadas están localizadas principalmente en la Mesa Centro-Norte del Altiplano y en la Sierra Madre Occidental, principalmente

Las imágenes de satélite y los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas que nos permiten manejar en forma conjunta la información geográficamente referenciada e información de cada conjunto de vectores e imágenes y nos auxilian para la detección y cuantificación de superficie afectada por dicho fenómenos meteorológico para representar los resultados en mapas de alta calidad.

En este estudio se evaluó la afectación por heladas ocurridas los días del 3 al 6 de febrero del 2011, en los cultivos de maíz de otoño y el trigo de invierno en el área del Distrito de Riego 041 Rio Yaqui, Sonora, México, Mediante imágenes de satélite, procesadas en el IDRISI andes para determinar los NDVI, del antes y después de haber ocurrido el evento y posteriormente la aplicación de los sistemas de información geográfica para su cuantificación.

Se utilizaron 2 imágenes satelitales del día 16 de enero antes y 14 de febrero del 2011 después del evento y con estas imágenes se calcularon los NDVI de las parcelas establecidas y las diferencias del NDVI, se clasificaron en cinco grados de acuerdo a su afectación con los siguientes resultados.

De las 8,089 hectáreas con las superficie que contaba el modulo de riego al momento de la helada 701.38 hectáreas de maíz fueron desbastadas y sin afectación 7,388.36 hectáreas. La información muestra que también los daños por frío intenso en esta etapa son importantes al igual que los

daños que ocasionan las altas temperaturas al amacollamiento, reportado e informado con antelación a los productores de maíz y trigo en esta región y que fue validado con los resultados comerciales al final de la cosecha, Se calculo la probabilidad de ocurrencia sobre heladas utilizando 40 años de datos históricos de temperaturas mínimas en la estación de Batevito, encontrándose que la probabilidad de que se presente una helada por debajo de los -2° C, es 1 en 100 años.

QUANTIFICATION OF THE AREAS AFFECTED BY FROSTS IN FEBRUARY 2011, IN THE IRRIGATION DISTRICT 041, YAQUI RIVER USING SATELLITE IMAGES AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

ABSTRACT

Frosts are natural phenomena that occur in the major part of the earth. Temperatures below zero Celsius degrees take place in the north and central part of Mexico, during the cold months of the year. The regions more affected by these events are located mainly in la Sierra Madre Occidental.

Satellite images and the Geographical Information Systems (GIS) are valuable tools that let to implement methodologies to detect and quantify affected surfaces by this meteorological phenomenon. GIS systems permit to generate maps and digital products that permit to highlight the areas more affected to implement actions to mitigate the impacts made.

In this study, an evaluation of the affected surface by the frost event that occurred from February 3 to 6 during 2011 was made. Affected surface was mainly planted with corn and wheat in the Irrigation District 041 Rio Yaqui, Sonora, Mexico. Satellite Images were processed to estimate the vegetation index NDVI before and after the frost date. IDRISI software was used to process the images and ArcView was used to quantify the impacted areas.

Two Rapid Eye satellite images for the dates of January 16 and February 14 were used. The hypothesis was that the plots affected by the frost will present a reduction in the NDVI. Plots affected by the frost were classified in five categories or affectation levels.

As a particular case of this analysis, a section of the Irrigation District was analyzed. It was found that 701.38 ha of this section were very affected by the frost events. Cold damages to the plants caused reductions in the yields.

Also a probability analysis of this event was made, using 40 years of minimum temperature for the climatological station Batevito, it was found that the probability of the occurrence of this event is 1 in 100 years using a critical temperature of -2°C .

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE ANEXOS	X
1. INTRODUCCIÓN.	1
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVO.	3
2.1. Hipótesis.	3
2.2. Objetivos.	3
2.2.1. Objetivo general.	3
2.2.2. Objetivos específicos.	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA.	4
3.1. Conceptos fundamentales de percepción remota.	4
3.1.1. Sistemas de información geográfica (SIG)	4
3.1.2. La tecnología satelital en la agricultura.	4
3.1.3. Tipos de imágenes de teledetección	8
3.1.3.1. Imagen multiespectral (MS).	8
3.1.3.2. Imagen pancromática (PAN).	9
3.1.3.3. Imagen fusionada (PS).	9
3.1.3.4. Imagen estéreo.	10
3.1.4. Satélites de teledetección	10
3.1.4.1. Eros-A / Eros-B.	10
3.1.4.2. Ikonos.	11
3.1.4.3. Landsat-7.	12
3.1.4.4. Quickbird.	13
3.1.4.5. Rapideye.	15
3.1.5. Reflexión del follaje	16
3.1.5.1. El enfoque semiempírico.	16
3.1.5.2. El enfoque estadístico.	17
3.1.5.3. El enfoque de modelación.	18
3.1.6. Los índices de vegetación.	19

3.2.	Delimitación de Cuencas Hidrológicas.	23
3.3.	Balance hidrológico	24
3.4.	Heladas	25
3.4.1.	Elementos meteorológicos que afectan la formación de heladas	25
3.4.1.1.	Viento.	25
3.4.1.2.	Temperatura.	26
3.4.1.3.	Nubosidad.	26
3.4.1.4.	Humedad atmosférica.	26
3.4.1.5.	Radiación Solar.	26
3.4.2.	Clasificación de las heladas	27
3.4.2.1.	Época de ocurrencia	27
3.4.2.2.	Proceso físico	27
3.4.2.3.	Efectos visuales	28
3.4.3.	Daños por heladas	28
3.4.3.1.	Primer grado.	28
3.4.3.2.	Segundo grado.	28
3.4.3.3.	Tercer grado.	28
3.4.3.4.	Cuarto grado.	28
4.	MARCO DE REFERENCIA	29
4.1.	Localización de la Cuenca del Río Yaqui	29
4.1.1.	Área de estudio	29
4.2.	Superficie total, física, regable y regada	32
4.3.	Volumen Sustentable	33
4.4.	Infraestructura hidroagrícola	35
4.5.	Factores que influyen en la producción	38
4.6.	Operación, Conservación y Administración del distrito de riego 041	41
5.	MATERIALES Y MÉTODOS	42
5.1.	Materiales	42
5.2.	Equipo	42

5.3. Métodos	43
6. <i>RESULTADOS ESPERADOS.</i>	46
7. <i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</i>	51
8. <i>BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.</i>	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	<i>Espectro electromagnético, donde se muestra las diferentes longitudes de onda</i>	19
Figura 3.2	<i>Firma espectral de una hoja en: a) planta sana y b) planta estresada</i>	22
Figura 4.1	<i>Ubicación del Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora.</i>	29
Figura 4.2	<i>Plano general con los Módulos de Riego del DR 041 Río Yaqui, Sonora.</i>	31
Figura 4.3	<i>Superficie física, regable y regada en el DR 041 Río Yaqui, Sonora, Fuente CONAGUA Y SRL del DR 041.</i>	32
Figura 4.4	<i>Superficie sembrada y volumen bruto utilizado en el D.R. 041 Río Yaqui Sonora. Fuente CONAGUA DR 041 y SRL del Río Yaqui.</i>	33
Figura 4.5	<i>Resultados de FUNVASO para el sistema de presas del Río Yaqui, Sonora.</i>	34
Figura 4.6	<i>Plano con la red menor del Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora.</i>	36
Figura 4.7	<i>Canales en mal estado y de reciente modernización en al año 2006.</i>	38
Figura 4.8	<i>Superficie física histórica en el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora en los últimos 18 años.</i>	39
Figura 4.9	<i>Superficie física histórica en el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora en los últimos 10 años</i>	40
Figura 5.1	<i>Obtención de constantes para cada banda</i>	43
Figura 5.2	<i>Corrección de objetos oscuros</i>	44
Figura 5.3	<i>Índice de vegetación de diferencias normalizadas</i>	45
Figura 6.1	<i>Histograma de NDVI (16 de enero 2011)</i>	47
Figura 6.2	<i>NDVI Cobertura vegetal 16 de enero de 2011</i>	47
Figura 6.3	<i>Histograma de NDVI (14 de febrero de 2011)</i>	48
Figura 6.4	<i>NDVI Cobertura vegetal 14 de febrero de 2011</i>	49

ÍNDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 4.1. Cálculo del volumen sustentable con FUNVASO para el sistema de presas del Río Yaqui, Sonora.</i>	<i>34</i>
<i>Cuadro 4.2. Infraestructura hidráulica a cargo de la Red Mayor del DR 041 Río Yaqui, Sonora.</i>	<i>35</i>
<i>Cuadro 4.3. Resumen del estado de la red de distribución del DR 041 Río Yaqui, Sonora.</i>	<i>37</i>
<i>Cuadro 6.1. Rangos de NDVI antes de la Helada Modulo No. 2 (16 de enero de 2011)</i>	<i>46</i>
<i>Cuadro 6.2. Rangos de NDVI después de la Helada Modulo No. 2 (14 de febrero de 2011)</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 6.3. Rango de Diferencias de NDVI de parcelas afectadas por la helada</i>	<i>49</i>

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A.	<i>Temperaturas mínimas de 40 años</i>	53
Anexo B.	<i>Probabilidad de presencia del evento por cada 100 años</i>	54
Anexo C.	<i>Grafica de la probabilidad de presencia del evento por cada 100 años</i>	54
Anexo D.	<i>Plano NDVI cobertura vegetal antes de la helada. Modulo No.2</i>	55
Anexo E.	<i>Plano NDVI cobertura vegetal después de la helada. Modulo No.2</i>	55
Anexo F.	<i>Plano parcelas afectas por las heladas. Modulo No. 2.</i>	55

1. INTRODUCCIÓN.

Actualmente, los frentes fríos en el valle del yaqui se han presentado en forma recurrente principalmente en los meses de Enero y Febrero dentro del ciclo otoño-invierno, lo que ha afectado en diferentes grados los rendimientos de los cultivos establecidos como es el caso del maíz y hortalizas que son muy susceptibles a temperaturas intensas por debajo de los 0°C. Otro de los cultivos que puede ser afectado es el trigo que es de los cultivos con mayor superficie en el Distrito de Riego con un 77%, y debido al alto porcentaje de superficie las fechas de siembra varían, una parte de esta superficie sufre el impacto de dichos fenómenos meteorológicos lo que representa una afectación significativa dependiendo de la etapa fenológica en la que se encuentra y por ende impacta directamente en la economía de la región.

Dada la intensidad de las bajas temperaturas ocurridas en este período de tres días continuos, los daños fueron visibles a los tres días de iniciarse la helada. Esta situación, ocasiono que el productor tenga gran incertidumbre respecto al que hacer ante la presencia los notables en su cultivo de trigo, dado por la gama de respuestas que manifestó ante la variación en la intensidad de los daños presentes en diferentes predios de la región sur de Sonora.

De acuerdo a testimonios se conoce que desde el 3 de marzo de 1953, en esta región agrícola no se había registrado un fenómeno climatológico similar que afectara al cultivo de trigo. No obstante, en diciembre de 2003 una fuerte helada de un día afecto a cultivos hortícolas, maíz y papa en todo el estado de Sonora, principalmente por su ocurrencia en estadios muy tempranos no se observaron daños en el cultivo de trigo.

Mediante recorridos en campo para medir el impacto se llegó a la conclusión que no estamos preparados para tomar decisiones ante éste tipo de contingencias climatológicas, aún en cultivos que se consideraban resistentes al frío como el trigo, no se contaba con la información suficiente para medir los efectos que en algunos casos se consideraron predios devastados que se rastrearon para alternar con otro cultivo oportunamente.

Actualmente para cuantificar los daños por siniestros y en este caso las heladas, se hace de una forma tradicional directamente en campo, lo que implica mayor tiempo en la implementación de

las acciones para un plan de contingencia, por lo que el presente trabajo resulta de gran importancia para la prevención, cuantificación e implementación de acciones ante una helada.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVO.

2.1. Hipótesis.

El uso de imágenes satelitales permite determinar las superficies afectadas por la helada ocurrida en el Distrito de Riego 041 Río Yaqui.

2.2. Objetivos.

2.2.1. Objetivo general.

Determinación del efecto de las heladas, en el mes de febrero de 2011 del ciclo de otoño-invierno en los cultivos en el Distrito de Riego 041, Río Yaqui, mediante técnicas de percepción remota.

2.2.2. Objetivos específicos.

- Calcular el índice de vegetación NDVI para dos imágenes satelitales tomadas antes y después de la ocurrencia de la helada.
- Estimar las superficies afectadas por la helada
- Procesar la información meteorológica existente en el distrito de Riego 041, Río Yaqui, para determinar la probabilidad de ocurrencia de la helada presentadas en febrero de 2011.

3. REVISIÓN DE LITERATURA.

3.1. Conceptos fundamentales de percepción remota.

3.1.1. Sistemas de información geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta de software que permite almacenar, recuperar, analizar y desplegar información geográfica; de igual manera, integra operaciones comunes de bases de datos así como consultas y análisis estadístico, con el beneficio de la visualización y análisis geográfico que ofrecen los mapas.

Un SIG integra hardware, software y datos para capturar, gestionar, analizar y presentar todo tipo de información geográficamente referenciada. Del mismo modo, permite ver, comprender, cuestionar, interpretar y visualizar los datos en muchos aspectos que revelan las relaciones, patrones y tendencias en forma de mapas, informes y gráficos (Núñez et al. 2009).

Un sistema de información que está diseñado para trabajar con datos referenciados por coordenadas espaciales y geográficas, con capacidades para manejar datos espacialmente referenciados. También es un conjunto de operaciones para trabajar y analizar datos (Star y Estes, 1996).

3.1.2. La tecnología satelital en la agricultura.

La exploración del espacio exterior comenzó con el lanzamiento por la Unión Soviética el 4 de octubre de 1957, del satélite Sputnik 1. Éste fue el primer satélite artificial que se movió alrededor de la órbita terrestre. El análisis de las señales de radio que enviaba el satélite se utilizaba para obtener información sobre la concentración de los electrones en la ionosfera y otra información confidencial. Después de varios años, el número de satélites creció pero la mayoría de las imágenes que producían eran clasificadas, es decir, producidas y vistas principalmente por organizaciones de los gobiernos de la Unión Soviética y de los Estados Unidos con fines militares (NASA, 2007).

Los programas espaciales civiles dedicados a la observación de la tierra, tienen su inicio en el año de 1972 con el lanzamiento del satélite ERTS 1 (EarthResourceTechnologySatellite 1) de la

NASA. Inicialmente este satélite estuvo programado para operar por 1 año, sin embargo dejó de funcionar el 10 de enero de 1978, después de 5 años de operación continua. Un segundo satélite llamado ERTS-B fue desarrollado en base al anterior, equipado con el escáner explorador multiespectral (MSS) del ERTS-1. Cuando el ERTS-B entró en órbita el 22 de enero de 1975, fue llamado LANDSAT 2 oficialmente por la NASA, y el ERTS-1 fue nombrado LANDSAT 1. El programa satelital fue llamado LANDSAT (Satélites de la Tierra) para distinguirlo del programa oceanográfico SEASAT (Satélites del Mar) y de otros satélites considerados en el Programa Global Satelital de Recursos Terrestres (NASA, 2007).

Después de los Landsat 1, 2 y 3 vinieron los Landsat 4 y 5. Estos últimos dos satélites además del escáner explorador multiespectral (MSS) llevaba a bordo un nuevo sistema de sensores denominado Mapeador Temático (TM), con un mayor número de bandas espectrales y con una mejor resolución espacial de 30 metros. Para continuar con el programa LANDSAT se desarrolló un nuevo satélite, el Landsat 6, el mismo que fue lanzado el 5 de octubre de 1993, pero este satélite no pudo alcanzar su órbita. **Finalmente el Landsat 7 fue lanzado en abril de 1999 con nuevo sensor denominado EnhancedThematicMapper Plus (ETM+).** Los Landsat orbitan alrededor de la Tierra en órbita circular heliosincrónica, a 705 km de altura, con una inclinación de 98.2° respecto del Ecuador y un período de 99 minutos (NASA, 2007).

La administración y operación de los satélites depende de la NASA y la producción y comercialización de las imágenes del USGS (UnitedStatesGeologySurvey). En general, las imágenes de estos satélites demostraron su enorme utilidad en el conocimiento de los objetos que están en la superficie terrestre, de allí su aplicación en: uso y cobertura de la tierra, en la agricultura, urbanismo, hidrología, trazado de vías, oleoductos, poliductos, minería y otros usos (NASA, 2007).

Entre los satélites de observación de los recursos naturales, el programa LANDSAT puede considerarse el más fructífero de todos puesto que ha proporcionado datos multiespectrales de alta resolución a una amplia gama de usuarios durante más de 25 años, lo que representa el registro más largo de información sobre la superficie terrestre obtenido de forma global y repetitiva desde el espacio, lo cual ha permitido construir series de tiempo de áreas específicas principalmente de los recursos naturales (NASA, 2007).

La NASA financió un número importante de investigaciones para determinar la viabilidad del uso de la percepción remota a través del uso de imágenes de satélite sobre los recursos naturales de la tierra. Uno de éstos primeros estudios fue dirigido para analizar el crecimiento de la vegetación en la primavera y en el verano subsecuente y la senescencia de la vegetación de otoño desde el norte hasta el sur de la región de los grandes llanos centrales de los Estados Unidos, obteniéndose información muy valiosa y el desarrollo de los primeros índices de vegetación como el DVI [DifferenceVegetationIndex] (Jordan,1969), elRVI[RatioVegetationIndex] (Pearson y Miller, 1972), y el NDVI [NormalizedDifferenceVegetationIndex,] (Rouse *et al.*, 1974).

Los datos derivados de las imágenes de LANDSAT fueron el impulso primordial que llevó al desarrollo del concepto a escala mundial de investigaciones científicas sobre el sistema terrestre, lo cual implicaba el estudio de procesos y ciclos en la atmósfera, agua, hielo, tierra y ecosistemas de la tierra, además de la agricultura y ganadería, ocasionando que miles de artículos científicos se hayan publicado producto de investigaciones realizadas utilizando sus imágenes de satélite (NASA, 2007).

Entre las ventajas de la observación espacial por satélites, destacan la cobertura global y periódica de la superficie terrestre, amplia visión de los fenómenos geográficos que se producen en la tierra, y facilitan imágenes sobre áreas no accesibles así como información sobre regiones no visibles del espectro para el ojo humano, a un costo mucho menor que recorridos y mediciones de campo (NASA, 2007).

Entre otros sistemas satelitales existentes, tenemos también a los sistemas satelitales de navegación, que solucionan un problema muy antiguo en la historia de la humanidad: La necesidad de conocer la posición sobre la superficie terrestre. Sin esa capacidad los movimientos por tierra deben basarse en puntos de referencia conocidos, y los movimientos marítimos deben restringirse a una franja de mar en que la costa sea visible (Hoffmann-Wellenhof *et al.*, 1994).

La última generación de satélites para el posicionamiento global es conocido como GPS (Global PositioningSystem) o Sistema de Posicionamiento Global, aunque su nombre más correcto es NAVSTAR GPS y es un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), el cual permite

determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona, un vehículo o una nave, con una precisión hasta de centímetros usando un GPS diferencial. El GPS funciona mediante una red de 24 satélites (21 operativos y 3 de respaldo) en órbita sobre el globo a 20.2 km con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la tierra (Hoffmann-Wellenhof *et al.*, 1994).

La agricultura de precisión o agricultura satelital es un concepto agronómico para el manejo de parcelas agrícolas, basado en la existencia de la variabilidad en el terreno de cultivo. Requiere el uso de tecnologías de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) en equipos y tractores agrícolas diseñados para aplicación variable de insumos, sistemas automatizados y robotizados, sensores de diferentes tipos (rendimiento, humedad, nitrógeno, suelo, etc.), imágenes de satélite o aéreas junto con Sistemas de Información Geográfico (SIG), y programas computacionales específicos, para estimar, evaluar y entender dichas variaciones. La información recolectada puede ser usada para evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar la cantidad específica de fertilizante en cada parte del terreno, la frecuencia y lámina de riego óptima, mejorar la aplicación de insecticidas y además predecir con la mayor exactitud la producción de los cultivos en cada parte del terreno (Ess *et al.*, 1997).

La agricultura de precisión tiene como objetivo optimizar el manejo de los terrenos agrícolas de los productores desde el punto de vista agronómico, mediante el ajuste de las prácticas de cultivo a las necesidades de la planta, como son la aplicación de nutrientes, agua y otros insumos. La protección medioambiental es otro objetivo que se persigue a través de la reducción del impacto vinculado a la actividad agrícola, como son las descargas de aguas residuales con altos contenidos de nutrientes y la reducción del uso de otros agroquímicos como insecticidas, herbicidas y fungicidas; además de objetivos económicos como son el aumento de la competitividad a través de una mayor eficiencia en el uso de insumos, una reducción de costos y el incremento del rendimiento por hectárea cultivada (Ess *et al.*, 1997; Lowenberg-DeBoer, 2000).

De acuerdo a Kreimer (2003), la Agricultura de Precisión no está disponible para todos los agricultores, es más probable que se limite a los que tengan una escala grande de producción, el costo de los equipos es percibido por los agricultores como elevado sin que estos analicen sus ventajas, existen problemas de compatibilidad con la maquinaria existente, se requieren ciertas habilidades informáticas para la implantación de los sistemas, hay poca cultura de innovación en

el sector, y sólo un 30% de los agricultores tiene computadora y hay resistencia del sector a pagar por la información tecnológica.

Sin embargo, la agricultura de precisión ha ido creciendo constantemente en los Estados Unidos aproximadamente el 32% de la superficie cultivada utiliza esta tecnología, en Inglaterra el 29%, en otros países de Europa el 19% y en América Latina solo Argentina, Chile y Brasil la utilizan en una superficie menor al 10% (Kreimer, 2003).

Con el incremento de precios en los últimos años en los insumos agrícolas como semillas, fertilizantes, diesel y otros agroquímicos, las perspectivas que su uso se incrementa es muy grande, debido al ahorro de insumos en un promedio del 35% que se ha obtenido con esta tecnología en las áreas agrícolas donde se ha utilizado.

3.1.3. Tipos de imágenes de teledetección

El tipo de producto más común que suministran los satélites de teledetección es una imagen digital tipo raster, donde cada píxel tiene asignado uno o varios valores numéricos (niveles digitales) que hacen referencia a la energía media recibida dentro de una determinada banda espectral (Labrador, et. al., 2012). Teniendo esto en cuenta, se pueden adquirir los siguientes tipos de imágenes:

3.1.3.1. Imagen multispectral (MS).

Imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. A priori, es el tipo de producto más útil ya que nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Así, por ejemplo, el satélite IKONOS proporciona una imagen multispectral con 4 bandas, que cubren las regiones espectrales correspondientes al azul, verde, rojo e infrarrojo próximo. Cuanto mayor sea el número de bandas que proporciona el sensor, mayor será la capacidad de análisis de los elementos presentes en la imagen.

Aparte de las multispectrales también existen las denominadas **imágenes hiperespectrales**, menos habituales. Vienen caracterizadas por poseer información en un gran número de bandas.

Se requieren para estudios de identificación y clasificación muy precisos, principalmente en mineralogía. A día de hoy provienen de algunos satélites de tipo experimental, como es el caso del sensor HYPERION (220 bandas), a bordo del satélite EO-1, por lo que su disponibilidad es bastante limitada.

3.1.3.2. Imagen pancromática (PAN).

Dispone de una sola banda espectral que abarca comúnmente gran parte del visible y comienzo del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen que habitualmente se representa en una escala de grises (imagen en blanco y negro). Como contrapartida, tienen la ventaja de poseer mayor resolución espacial que las multiespectrales que proporciona el mismo satélite. Es por ello que son muy interesantes para la detección de pequeños elementos de la superficie terrestre que no son distinguibles en la imagen multiespectral.

En aquellos satélites donde existe la posibilidad de obtener imágenes multiespectrales y pancromáticas de forma simultánea es habitual la opción de suministrar, bajo pedido, ambas imágenes en lo que se conoce como opción *Bundle*.

3.1.3.3. Imagen fusionada (PS).

Este tipo de imagen se obtiene mediante la fusión de una imagen multiespectral con una pancromática. Las siglas PS provienen de *pan-sharpened*, su denominación en inglés. Básicamente, consiste en asignar a cada píxel de la imagen pancromática los valores procedentes de un algoritmo que combina la imagen pancromática con la multiespectral. El resultado final es una imagen multiespectral con la resolución espacial de la pancromática. El inconveniente de este tipo de imágenes es que se modifica la información espectral original captada por los sensores a través de los algoritmos usados, por lo que se suelen utilizar únicamente como herramientas de interpretación visual y no para análisis espectral. Esta fusión se encuentra dentro de la oferta de los distribuidores oficiales de los satélites capaces de obtener una imagen multiespectral y pancromática. Dicha fusión, con el software adecuado, puede ser realizada por los usuarios.

3.1.3.4. Imagen estéreo.

En realidad se refiere a dos imágenes de una misma zona tomadas con ángulos de visión distintos. Muchos satélites tienen la capacidad de reorientar el sensor, lo que les permite tomar, en una o en sucesivas pasadas, este tipo de imágenes. Se suelen emplear para generar modelos de elevación del terreno.

3.1.4. Satélites de teledetección

3.1.4.1. Eros-A / Eros-B.

EROS (*EarthResourcesObservationSatellite*) es una serie de satélites comerciales de nacionalidad israelí diseñados por *Israel Aircraft Industries*. Los satélites son operados por la empresa *ImageSat International*.

En la actualidad se encuentran operativos dos, el EROS-A y el EROS-B, orbitando a 510 km de altura. El primero de ellos fue lanzado el 5 de diciembre de 2000, y el EROS-B el 25 de abril de 2006.

Las imágenes obtenidas por estos satélites son pancromáticas y se suelen utilizar en el control de cambios sobre el terreno, seguridad, aplicaciones militares, análisis de texturas, etc. El periodo de revisita para la latitud de Canarias (28°N), según información facilitada por *ImageSat*, es de 4 días de media.

Sensores

Los sensores de estos satélites son cámaras pancromáticas con una capacidad de visión lateral de hasta 45° respecto a la vertical, lo que se traduce en un corredor potencial para la toma de imágenes de unos 960 km. El ancho de barrido es de 14 km para el EROS-A y 7 km para el EROS-B. También son capaces de obtener imágenes estéreo.

Imágenes

Los satélites EROS adquieren y suministran los siguientes tipos de imágenes pancromáticas:

•**Basic Image:** El tamaño mínimo de escena es de 14 x 14 km para el EROS-A y de 7 x 7 km para el EROS-B. A petición del cliente la longitud se puede incrementar.

•**Estereo:** Dos imágenes superpuestas de la misma zona, tomadas con ángulos diferentes. Tamaño de escena: 14 x 14 km (EROS-A) y 7 x 21 km (EROS-B).

3.1.4.2. Ikonos.

Fue el primer satélite comercial en proporcionar imágenes de satélite de muy alta resolución espacial (1 m en el canal pancromático y 4 m en el multiespectral), lo cual supuso un importante hito en la historia de la observación de la Tierra desde el espacio.

Su lanzamiento, el 24 de septiembre de 1999, siguió al intento fallido de poner en órbita al IKONOS-1. Las imágenes comenzaron a ser comercializadas el 1 de enero del año 2000. El propietario actual de este satélite es la empresa *GeoEye*. El satélite gira en torno a la Tierra en una órbita heliosíncrona a 681 km de altura.

Sensor

El sensor que lleva a bordo el satélite IKONOS proporciona 4 bandas espectrales a una resolución de 4 m/píxel y una banda pancromática a 1 m/píxel. El ancho de barrido en la vertical es de 11,3 km, que permite un periodo de revisita de 3 a 5 días dependiendo del ángulo que se emplee para tomar las imágenes y de la latitud de la zona a la que se apunte.

Imágenes

Las características de las imágenes son exactamente iguales a las del satélite GEOEYE-1 en cuanto a los tipos (**PAN**, **MS** y **PS**) y al grado de procesado (*Geo*, *GeoProfessional* y *GeoStereo*), con la diferencia de que la resolución espacial del IKONOS es de 1 m en pancromática y **PS** y de 4 m en las imágenes multiespectrales.

3.1.4.3. Landsat-7.

Fue lanzado al espacio el 15 de abril de 1999, es hasta ahora el último satélite de la serie, que comenzó con la puesta en órbita del LANDSAT-1 en el año 1972. Los satélites que sucedieron a este primer lanzamiento han permitido disponer de la serie más larga existente hasta la fecha de imágenes satelitales comerciales de observación terrestre, con lo que se ha podido hacer un seguimiento de los grandes cambios acaecidos en la superficie de nuestro planeta. El satélite órbita a 705 km de altura y tarda 16 días en escanear toda la superficie terrestre dando 232 órbitas al planeta.

El programa LANDSAT está dirigido conjuntamente por la NASA y el USGS de Estados Unidos. La continuación del programa pone actualmente sus esperanzas en el satélite LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*), que tiene previsto su lanzamiento a finales del año 2012.

Sensor

•**ETM+** (*Enhanced Thematic Mapper +*): Este sensor es capaz de captar información en 6 bandas espectrales, desde el espectro visible al infrarrojo a una resolución espacial de 30 m/píxel. Posee además un canal en el infrarrojo térmico de 60 m/píxel y otro pancromático de 15 m/píxel, con el que se pueden elaborar imágenes fusionadas a partir de las imágenes multiespectrales (Tabla 12).

Este mayor número de bandas en comparación con otros satélites similares o de resolución espacial superior, permite usar las imágenes LANDSAT para multitud de estudios de vegetación o geológicos.

Desde el 31 de mayo de 2003, las imágenes de este sensor presentan un problema. El mecanismo que corregía el escaneado del sensor a medida que el satélite se desplazaba, dejó de funcionar. El resultado es la aparición de una serie de bandas sin datos que ocupan aproximadamente un cuarto de la superficie de cada imagen, como se muestra en la siguiente ilustración.

Imágenes

Las imágenes de LANDSAT-7 se sirven en distintos niveles de procesado. El primer nivel disponible es el **LOR**, que consiste en la imagen en bruto, que contiene la información auxiliar

requerida para realizar las correcciones geométricas y radiométricas, los metadatos, así como un archivo de calibración.

También se sirven imágenes de nivel **1** (**LIG**: imagen **LOR** corregida radiométrica y geoméricamente y **LIT**: imagen de máxima precisión geométrica obtenida tras utilizar puntos de control, modelos digitales del terreno e información del archivo de calibración).

Diariamente LANDSAT-7 toma unas 250 escenas fijas, de las cuales, las que poseen un 40% o menos de nubes pasan a formar parte de la colección de imágenes del programa. Las escenas tienen un tamaño de 172,8 x 183 km.

3.1.4.4. Quickbird.

Satélite comercial norteamericano de muy alta resolución operado por la compañía *DigitalGlobe*. El primer QUICKBIRD, lanzado el 20 de noviembre de 2000, no consiguió ponerse en órbita. Tomó su relevo el actual satélite, con un lanzamiento exitoso el 18 de octubre de 2001.

El satélite se situó en una órbita a 450 km de altura, aunque en marzo de 2011 se subió hasta los 482 km, con el fin de prolongar su vida útil.

QUICKBIRD, junto con los satélites WORLDVIEW-1 y WORLDVIEW-2, pertenecientes todos a *DigitalGlobe*, conforman una constelación de satélites de muy alta resolución, con una alta frecuencia de revisita.

Sensor

QUICKBIRD proporciona imágenes con una resolución espacial máxima de 2,44 m/píxel en multiespectral y 0,61 m/píxel en pancromático.

El ángulo de visión del sensor se puede forzar hasta los 45°, con lo que es capaz de apuntar a cualquier zona en una franja bajo su línea de paso de 1.036 km de ancho. El ancho de barrido es de 16,5 km en la vertical.

Imágenes

QUICKBIRD suministra tres tipos de imágenes:

- PAN:** Imagen pancromática, de 0,61 a 0,85 m/ píxel de resolución espacial.
- MS:** Imagen multiespectral de 4 bandas y de 2,44 a 2,88 m/píxel de resolución espacial.
- PS:** Una fusión de las imágenes **PAN** y **MS**, que consigue una imagen de 3 ó 4 bandas con una resolución espacial igual a la de la imagen pancromática.

Atendiendo al **grado de procesado** se suministran 4 tipos de imágenes:

- Basic:** Imagen corregida radiométricamente que incluye una depuración de las distorsiones del sensor. El producto va acompañado de la información necesaria para que los usuarios puedan acometer las correcciones geométricas y de localización. Este producto sólo puede adquirirse por escenas de 16,5 x 16,5 km.
- Estándar:** Esta imagen está corregida radiométrica y geoméricamente y está proyectada sobre un plano teniendo en cuenta un sistema de referencia y un datum, pero no está ortorrectificada. El proveedor suministra la información necesaria para su ortorrectificación con el apoyo de un modelo de elevación del terreno.
- Ortho:** En este nivel la imagen se encuentra proyectada en el sistema de coordenadas elegido por el usuario y ortorrectificada, lista para ser utilizada directamente con el resto de cartografía. Si la empresa suministradora no posee un modelo de elevación del terreno suficientemente preciso, éste debe ser aportado por el usuario. El uso de puntos de control de coordenadas conocidas mejora el resultado.
- Estéreo-imágenes:** Son dos imágenes de una misma zona tomadas desde distintos ángulos de visión y que permiten la elaboración de modelos digitales del terreno.

3.1.4.5. Rapideye.

Es una constelación formada por 5 satélites comerciales propiedad de *RapidEye AG*, compañía alemana proveedora de información geoespacial. Los cinco satélites, llamados TACHYS (Rapid), MATI (Eye), CHOMA (Earth), CHOROS (Space) y TROCHIA (Orbit), están equipados con sensores idénticos y situados en el mismo plano orbital, lo que multiplica su capacidad de revisita y de captación de imágenes. Los 5 satélites, puestos en órbita el 29 de agosto de 2008, orbitan a una altura de 630 km sobre la superficie terrestre.

La constelación fue construida por SSTL (*Surrey SatelliteTechnologyLtd*) y destaca por el pequeño tamaño de los satélites (alrededor de 1 m³).

En conjunto, los 5 satélites son capaces de cubrir una superficie de 4 millones de km² por día, aproximadamente 8 veces la superficie del estado español.

Imágenes

Dependiendo del grado de procesado, RAPIDEYE suministra dos tipos de imágenes:

- Nivel 1B:** Imagen corregida radiométricamente y sin las distorsiones que se producen por el escaneado y la óptica del sensor. Se suministra con los archivos RPC (*RationalPolynomialCoefficient*) correspondientes y los metadatos necesarios para que el usuario realice las correcciones geométricas necesarias.

- Nivel 3A:** Además de las correcciones que se realizan para el nivel **1B**, la imagen es ortorrectificada con un modelo de elevación del terreno y con puntos de control en el terreno. Estas imágenes se entregan a una resolución de 5 m/píxel.

Las imágenes se sirven siempre con los 5 canales que registra el sensor. El tamaño de las mismas es de unos 77 km de ancho y entre 50 y 300 km de largo.

3.1.5. Reflexión del follaje

El factor de reflectancia direccional hemisférica (HDRF) para radiación incidente no isotrópica, es el ratio de la radianza media que sale de la parte superior del follaje de la planta como radianza reflejada en un objetivo ideal Lambertiano en la misma geometría del rayo de luz e iluminado bajo idénticas condiciones atmosféricas (Martonchik *et al.*, 2000, citado por Knyazikhin y Mynene, 2004). Esta variable puede ser expresada en términos de la solución de la ecuación de transferencia radiativa como:

$$R = \frac{\int_0^{X_s} \int_0^{Y_s} I(x,y,0,\Omega) dx dy}{1/\pi \int_{2\pi-\mu'}^{\mu} |d\Omega'| \int_0^{X_s} \int_0^{Y_s} I(x,y,0,\Omega) dx dy} = \frac{\langle I(\Omega) \rangle_0}{\frac{1}{\pi} \int_{2\pi-\mu'}^{\mu} d\Omega'} , \mu > 0 \quad (3.1)$$

Donde μ y μ' y son el coseno de los ángulos polares superior Ω e inferior Ω' , respectivamente; los ángulos $\langle \rangle_0$ denotan la media sobre la superficie δVt del paralelepípedo V . El HDRF depende de la distribución angular de la radiación entrante, el área del límite superior δVt , la altura ZS y la dirección Ω . En percepción remota, la dimensión del límite superior δVt es llamada resolución y la dirección superior Ω es la dirección de vista (Knyazikhin y Mynene, 2004).

Considerando las bases teóricas antes señaladas, la estimación de los diferentes parámetros biofísicos y bioquímicos de las hojas de las plantas a través de la reflectancia, se ha realizado de diferentes formas o enfoques, Jacquemoud y Ustin (2001), especifican tres tipos de enfoques: el enfoque semiempírico, el enfoque estadístico y el enfoque de modelación.

3.1.5.1. El enfoque semiempírico.

Este enfoque consiste en relacionar índices espectrales con características de las hojas de las plantas. La combinación de bandas espectrales es el enfoque clásico; por ejemplo, todos los índices de vegetación como el RVI, NDVI, TSI, SAVI, MSI, etc. se basan en este enfoque. Una simple función f es generada entre el componente bioquímico o biofísico de interés C y las propiedades ópticas de las hojas.

$$C = f(\rho(\lambda_1), \dots, \rho(\lambda_n)) \quad (3.2)$$

Entre los componentes estudiados tenemos, la concentración de clorofila y el contenido de agua (Jacquemoud y Ustin, 2001), los cuales han sido determinados de esta forma. El medidor de clorofila SPAD-502 de Minolta, diseñado para estimar la concentración de clorofila in situ, está basado en este enfoque. Cambios espectrales caracterizados por la longitud de onda λ del punto de inflexión en la región del límite del rojo (670-780 nm), son índices específicos para instrumentos de alta resolución espectral que han sido usados para determinar las concentraciones de clorofila y nitrógeno (Horler *et al.*, 1983; Belanger, 1990; Curran *et al.*, 1990; Curran *et al.*, 1991; Gitelson *et al.*, 1996; citados por Jacquemoud y Ustin, 2001) y tienen la siguiente forma:

$$C_{ab} = f(\lambda_i) \text{whit} \frac{\partial^2 \rho(\lambda)}{\partial \lambda^2} = 0 \text{ at } \lambda_i \quad (3.3)$$

Otros índices son utilizados también para determinar el contenido de agua en las hojas como el MSI, el NDWI y otros, que se basan en las bandas espectrales del infrarrojo medio (Tucker, 1980; Gao, 1996).

3.1.5.2. El enfoque estadístico.

En este enfoque, las características de las hojas son determinadas estadísticamente, como la fuente de las longitudes de onda de los constituyentes bioquímicos de las hojas. Un primer método llamado análisis espectral de la mezcla, reduce la información espectral $\rho(\lambda)$ en fuentes independientes de variabilidad. A nivel de hoja uno considera los coeficientes específicos de absorción $k_i(\lambda)$ de clorofila, agua, proteínas, celulosa y lignina, entre otros y los coeficientes C_i que son las concentraciones a recuperar (Goetz *et al.*, 1990; Aber *et al.*, 1994; Hlavka *et al.*, 1997; citados por Jacquemoud y Ustin, 2001).

$$\rho(\lambda) = (a + b\lambda)^{-\sum_{i=1}^n k_i(\lambda)C_i} \quad (3.4)$$

Las concentraciones desconocidas C_i son aquellas que producen el mejor ajuste de $\rho(\lambda)$. El análisis HFBA (Hierarchical Foreground/Background Analysis) propuesto por Pinzon *et al.* (1998) es más una técnica de mezcla espectral general y sofisticada equivalente a una sola neurona en una red neuronal. Otra aproximación es el MSRA (Multiple Stepwise Regression Analysis) en el cual se establece una ecuación de regresión directa entre la reflectancia de la hoja con unas pocas

longitudes de onda $\rho(\lambda_i)$ seleccionadas por el mismo procedimiento y el contenido bioquímico de uno de sus componentes C.

$$C = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho(\lambda_i) \quad (3.5)$$

Un número restringido de muestras o set de calibración es usado para determinar los coeficientes α_i los cuales son probados en un set mayor o set de validación. Curran *et al.* (1992), Martin y Aber (1994), Jacquemoud *et al.* (1995), Yoder y Pettigrew-Crosby (1995), Bolster *et al.* (1996), Grossman *et al.* (1996), Fourty y Baret (1998), han obtenido buenos resultados con este método en material fresco y seco (Jacquemoud y Ustin, 2001).

La principal crítica es que las longitudes de onda seleccionadas no son muy consistentes dependiendo si la regresión es ajustada con reflectancia o transmitancia en hojas fresca o secas. Finalmente las redes neuronales que se han convertido muy populares en estudios a nivel de follaje tienen un potencial de aplicación pero han sido poco probadas a nivel de hoja.

3.1.5.3. El enfoque de modelación.

Mientras las mediciones de las propiedades de las hojas son procesadas, modelos determinísticos basados sobre diversas representaciones de la interacción de la luz con las hojas de las plantas son desarrollados. Estos modelos son distinguidos por su soporte en la física y por la complejidad de la hoja modelada. Los más sencillos consideran la hoja como una simple capa de difusión y absorción. En los modelos más complicados, todas las celdas son descritas en detalle como forma, posición, y contenido bioquímico. Independientemente del tipo de modelo, la información del índice de refracción y el coeficiente específico de absorción es requerido.

Ustin *et al.* (1999), hace una revisión extensiva de modelos basados en la hoja desde los años sesenta hasta 1999, que han mejorado nuestro entendimiento de la interacción de la luz con las plantas. Estos se pueden clasificar en cuatro tipos de modelos, de acuerdo a su grado de complejidad: Modelos de placas, modelos de flujo de nitrógeno, modelos estocásticos y de transferencia radiativa y los modelos *RayTraicing*. Los modelos Prospect y Sail son ejemplos de este tipo de enfoque.

En un análisis de diversos trabajos de investigación, Jacquemoud y Ustin (2001), consideran que existe un rango de reflectancia en las plantas donde se producen la mayoría de los fenómenos biofísicos de importancia, y está ubicado en el dominio óptico de los 400 nm a los 2500 nm y puede ser dividido en tres partes, la parte visible (400-800nm), caracterizada por una fuerte absorción de la luz por los pigmentos fotosintéticos de las hojas verdes; la parte del infrarrojo cercano (800-1100 nm) donde la absorción es limitada por la materia seca pero donde hay múltiple dispersión dentro de la hoja, relacionada a la fracción de espacios con aire generados por la estructura interna y los niveles de reflectancia y transmitancia; y la parte del infrarrojo medio (1100-2500 nm) que también es una zona de fuerte absorción, debido principalmente por el agua existente en las hojas y además por la materia seca que se forma cuando las hojas se marchitan.

3.1.6. Los índices de vegetación.

Los índices de vegetación están basados en una parte del espectro electromagnético, que consiste en todas las longitudes de onda de la energía emitida por el sol. El espectro continuo se subdivide en algunos tipos familiares de energía electromagnética como los rayos X, rayos ultravioletas (UV), visibles, infrarrojo (IR), microondas y ondas de radio como se aprecia en la Figura 3.1. Estos distintos tipos de energía electromagnética son categorizados por su posición o longitud de onda, en el espectro electromagnético. Los rayos X tienen longitudes de onda muy pequeñas, alrededor de 0.0001 micrómetros, y las ondas de radio pueden tener longitudes de onda grandes, hasta de 100 m (Jensen, 2000).

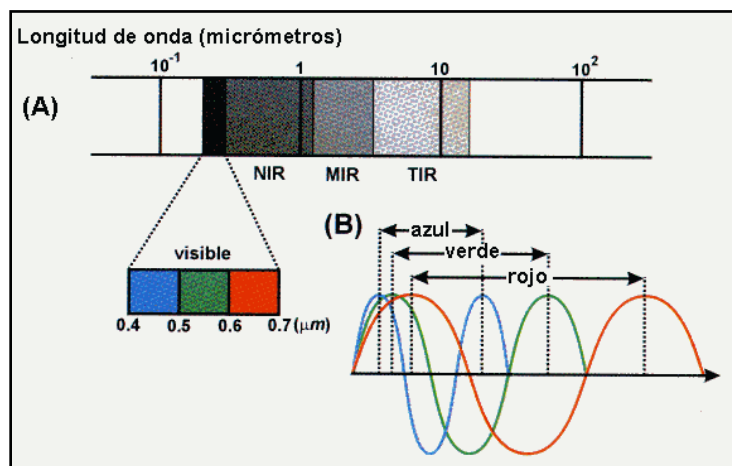


Figura 3.1 Espectro electromagnético, donde se muestra las diferentes longitudes de onda

La energía reflejada y emitida de los objetos es la que se mide en la percepción remota. Por ejemplo, una planta verde se ve de ese color porque la clorofila en sus hojas absorbe la mayor parte de la energía en las longitudes de onda azul y el rojo, y refleja principalmente las longitudes de onda verde e infrarroja, esta última no es visible por el ojo humano (Jensen, 2000).

Las hojas típicas de las plantas verdes muestran una muy baja reflectancia y transmitancia en las regiones del espectro visible (400 a 700 nm) debido a la fuerte absorbancia por los cloroplastos y otros pigmentos de la planta (Chappelle *et al.*, 1992). Por el contrario la reflectancia y transmitancia son ambos usualmente altos en las regiones del espectro del infrarrojo cercano (NIR, 700 a 1300 nm), esto se debe a la pequeña absorbancia por las partículas o pigmentos subcelulares y también porque es considerable la dispersión en el mesófilo en la interface de la pared celular (Gausman, 1974; Gausman, 1977; Slaton *et al.*, 2001).

Las propiedades ópticas de las hojas en la tercera región del espectro, el infrarrojo medio o infrarrojo de onda corta (MIR, 1300 a 2500 nm), está fuertemente influido por el agua en los tejidos. La reflectancia en esta región es relativamente alta para la vegetación que crece vigorosamente pero disminuye en tejidos deshidratados. Sin embargo, la investigación sugiere que en tejidos deshidratados la reflectancia en MIR puede disminuir no lo suficiente para detectar cambios biológicos significantes en el contenido de agua en la planta, aunque puede utilizarse esta longitud de onda en el diagnóstico del estrés hídrico en los cultivos (Bowman, 1989; Carter, 1991).

La calidad espectral de la luz reflejada desde las hojas, manifestada como el color de la hoja ha sido considerada desde hace tiempo como un indicador de estrés de la planta. Un número importante de estudios han sido relacionados con la respuesta a la reflectancia, transmitancia y absorbancia espectral en las hojas con el estrés fisiológico (Carter y Knapp, 2001).

Las plantas estresadas y/o las plantas en senescencia natural por madurez presentan cierto color amarillo, tienen típicamente bajas concentraciones de clorofila lo cual permite la expresión de otros pigmentos de la hoja como los carotenos y xantofilas que dan ese color a la hoja. Esto tiene el efecto de ampliar el pico verde de la reflectancia (situado normalmente cerca de los 550 nm)

hacia longitudes de onda más largas, aumentando la reflectancia visible (Adams *et al.*, 1999), y haciendo a los tejidos aparecer cloróticos. Al mismo tiempo la reflectancia en el NIR disminuye no obstante proporcionalmente menos que los incrementos que en el espectro visible. Con el incremento en el estrés, la abrupta transición o borde del rojo (the red edge) que es normalmente visto entre el espectro visible y el NIR en la vegetación verde, comienza a cambiar de lugar hacia longitudes de onda más cortas y en el caso de la vegetación en senescencia puede desaparecer totalmente.

La base para el desarrollo de los índices de vegetación es la firma espectral de las plantas, normalmente solo se consideran el espectro visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo medio. Una planta sana tiene una firma espectral muy específica como se aprecia en la Figura 3.2. La firma espectral inicia en las bandas del espectro visible con valores bajos de reflectancia en la banda del azul (400-500 nm), posteriormente sube en el verde (500-600 nm) y vuelve a bajar en el rojo (600-700 nm), posteriormente en el infrarrojo cercano o NIR (700-1300 nm) existe un gran incremento en la reflectancia, ese cambio brusco del rojo al infrarrojo se conoce como el borde del rojo (the red edge) y tiene mucha importancia por su aplicación en la percepción remota. Esta diferencia tan grande en las propiedades de la reflectancia entre las longitudes de onda del espectro visible del rojo y el NIR sostiene la mayoría de los enfoques para el manejo y monitoreo de las comunidades de plantas cultivadas y vegetación natural (Knipling, 1970; Bauer, 1975). Después en el infrarrojo medio o MIR (1300-8000 nm) hay otras 2 reducciones fuertes (Huete *et al.*, 1999).

En cambio en una planta con estrés hídrico (Figura 3.2), se incrementa la reflectancia en el infrarrojo medio, debido a que es la banda de absorción por el agua de las hojas, que al estar restringida incrementa la reflectancia al disminuir la absorción.

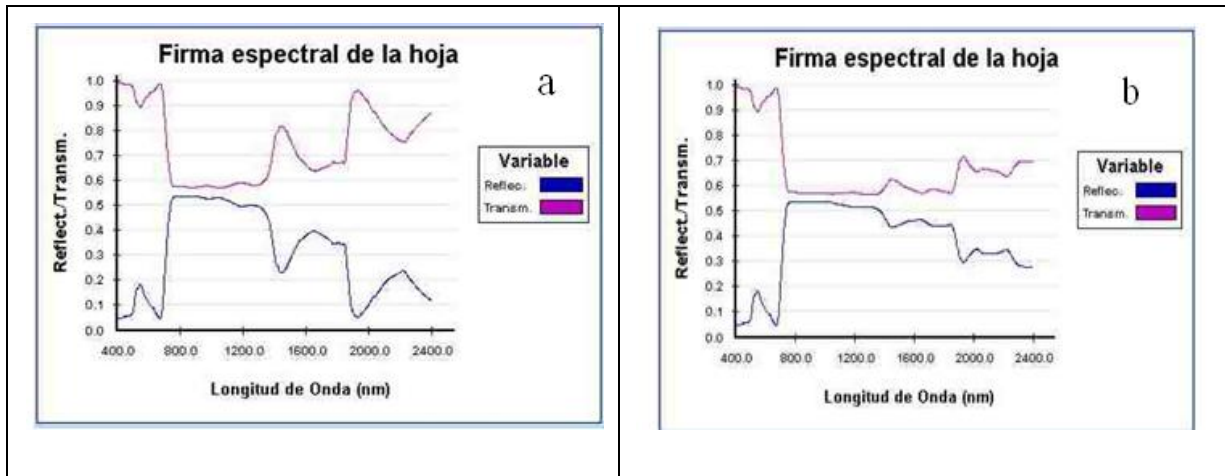


Figura 3.2 Firma espectral de una hoja en: a) planta sana y b) planta estresada

La reflectancia y transmitancia espectral de las plantas dependen del ángulo de incidencia de la radiación solar y de la longitud de onda; por ello, existe una marcada absorción en el espectro visible y una reflexión en el infrarrojo cercano. Tucker *et al.*, (1985), mencionan que a partir de la década pasada, los Índices de Vegetación derivados de las bandas visible del rojo e infrarrojo cercano han constituido una herramienta muy valiosa para determinar la variación espacial y los cambios fenológicos en la vegetación.

Se han definido diferentes índices de vegetación (Jackson y Huete, 1991), el primero de todos fue el Índice de Vegetación de Diferencias o DVI [DifferenceVegetationIndex]; (Jordan, 1969) que es la simple diferencia entre el NIR y el rojo, $DVI = NIR - R$, posteriormente surgió el Radio Índice de Vegetación [Ratio VegetationIndex], (Pearson y Miller, 1972), $RVI = NIR/R$ que es la simple división del infrarrojo cercano y el rojo, pero el más usado actualmente es el denominado Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI, NormalizedDifferenceVegetationIndex) que se define como una función normalizada de la relación de reflectancias entre las bandas visible e infrarrojo cercano $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ (Rouse *et al.*, 1974).

El empleo del NDVI ha tenido un gran impulso para abordar los cambios en la vegetación, pues permite conocer el estado de vigor vegetal, así como dar seguimiento a superficies cultivadas (Granados *et al.*, 1996), hacer el inventario de cosechas (Teng, 1990), y corregir deficiencias de

nutrimentos en praderas establecidas (Taylor *et al.*, 1998). Wiegand y Richardson (1984) concluyen que el NDVI caracteriza el follaje de las plantas en términos de intercepción de luz y de rendimiento, ya que se utiliza como una herramienta importante para cuantificar el efecto del estrés sobre el desarrollo del follaje y el rendimiento de grano.

Uno de los primeros usos de datos obtenidos con percepción remota ha sido la detección de diferencias relativas en la densidad del follaje de la planta (Jordan, 1969). Los datos de reflectancia se han relacionado con las características de la planta tales como la biomasa o la fracción interceptada de la radiación fotosintéticamente activa (Pinter *et al.*, 1994). Las porciones rojas e infrarrojo cercano del espectro se han encontrado particularmente útiles en el análisis de la vegetación. Korobov y Railyan (1993) encontraron las porciones del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo del espectro tenían la correlación más alta con las variables de la planta (altura, densidad, y porcentaje de cobertura). Gupta (1993) observó que el cociente del NIR en los canales rojos proveyó de una correlación más alta en el desarrollo del cultivo en las etapas tempranas y últimas de crecimiento, mientras que el índice de diferencias normalizadas de la vegetación NDVI tenía una correlación linear cercana en la etapa de crecimiento del cultivo con una cubierta de las plantas del 15 al 80%.

3.2. Delimitación de Cuencas Hidrológicas.

La delimitación de cuencas hidrológicas consiste en definir su parteaguas a partir de hidrografía y su configuración topográfica.

El estudio de las cuencas hidrológicas es muy importante para definir las cantidades de agua que se precipitan dentro de ella y los escurrimientos resultantes. El aprovechamiento de los recursos hidráulicos en una cuenca comprenden los usos del agua dentro de ella y su ordenamiento de tal forma que este recurso natural nos sea sobreexplotado, considerando los compromisos de las necesidades hídricas dentro de la cuenca. A continuación se presentan definiciones de cuencas por diferentes autores:

La Comisión Nacional del Agua mediante la Ley de Aguas Nacionales, define cuenca hidrológica como: La unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas o divisoria de las aguas- aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad-, en donde ocurre el agua en distintas formas y ésta se almacena o fluye hacia un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en una principal , o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con estos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituyen la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica esta a su vez integrada por subcuencas y estas ultimas integradas por microcuencas.

La Cuenca hidrológica o de drenaje, es el área total que contribuye al escurrimiento y que proporciona todo o parte del flujo de la corriente principal y sus corrientes tributarias, De Wiest, 1967.

Para llevar a cabo el estudio de una cuenca hidrológica, además de reconocerla físicamente, es necesario tener su representación cartográfica, mapa de la cuenca en la que se plasmen clara y dimensionalmente todas sus características cualitativas y cuantitativas. Obtener información existente referente al área de estudio, como la geográfica, geodésica, cartográfica, climatológica, hidrológica y de estudios realizados anteriormente, si existen. El material cartográfico se refiere a material existente como mapas, fotografías aéreas y/o satelital. En nuestro país mucha de esta información la produce el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI.

3.3. Balance hidrológico

En todo sistema o subsistema del ciclo hidrológico, el principio que indica que agua ni se crea ni se destruye se refleja en la denominada ecuación del balance hidrológico, la cual permite relacionar las cantidades de agua que circulan por el ciclo, Campos 1998.

La ecuación general del balance hidrológico simple, puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$I - Q = \frac{ds}{dt} \quad (3.8)$$

3.4. Heladas

Ocurre cuando, en una determinada región, se presentan bajas temperaturas iguales o menores al punto de congelación del agua, dando como resultado daños en las plantas, por la formación intracelular de cristales de hielo en los tejidos, marchites, órganos reproductores deshidratados, granos chupados o su muerte. Para efecto de la presente Regla, la helada ocurre cuando los efectos de las bajas temperaturas afectan la etapa fenológica de los cultivos, pastizales y plantaciones en un lapso que les provoque daños irreversibles.

3.4.1. Elementos meteorológicos que afectan la formación de heladas

El estado de la atmósfera se manifiesta a través de elementos del tiempo, como son la temperatura, la precipitación, la humedad, la dirección y velocidad del viento, la presión atmosférica, la nubosidad, la radiación solar y la visibilidad, los cuales presentan una variación espacial y temporal. Los principales elementos del tiempo que influyen en la formación de las heladas son el viento, la nubosidad, la humedad atmosférica y la radiación solar (Matías *et al.*, 2001).

3.4.1.1. Viento.

El viento es fundamental para que se desarrolle una helada. Cuando hay corrientes se mezcla el aire frío, que se encuentra cercano al suelo, con el más caliente que está en niveles superiores, lo que hace más difícil el desarrollo de una helada. Por tanto, una de las condiciones que favorece la ocurrencia de heladas es la ausencia de viento.

3.4.1.2. Temperatura.

La temperatura del aire disminuye conforme aumenta su distancia a la superficie del suelo. Sin embargo, existe una inversión térmica cuando la temperatura es mayor conforme aumenta la elevación. Diversas condiciones meteorológicas producen las inversiones térmicas (las cuales se describen en la sección de clasificación de las heladas); cuando se presenta una inversión térmica, las capas de aire son arrastradas por otras descendentes y más frías. Este fenómeno se manifiesta en los valles, principalmente en invierno y está asociado con los cielos despejados y temperaturas bajas cercanas a la superficie del suelo.

3.4.1.3. Nubosidad.

Las nubes son extensos conjuntos de pequeñas gotas de agua y cristales de hielo suspendidos en el aire. Cuando el cielo está cubierto por nubes, éstas disminuyen la pérdida de calor del suelo por radiación hacia la atmósfera y devuelven parte de ese calor a la Tierra, evitando con esto la helada.

3.4.1.4. Humedad atmosférica.

Cuando disminuye la temperatura a los 0° C o menos, y el viento es escaso, el vapor de agua contenido en el aire, se condensa; si la humedad es abundante, ésta produce niebla y cuando tiene poco contenido de humedad, se forma la helada. Por ello una gran humedad atmosférica reduce la probabilidad de ocurrencia de heladas.

3.4.1.5. Radiación Solar.

Una cantidad de radiación solar es absorbida por la superficie de la Tierra y otra es devuelta desde su superficie a la atmósfera (radiación reflejada). Durante el día el suelo retiene el calor y durante la noche lo pierde; estos procesos dependen de la nubosidad y del viento que existan sobre ciertas regiones del planeta. Cuando los días son más cortos y las noches más largas, aumenta la ocurrencia de heladas; porque habrá una menor acumulación de calor en el suelo y un mayor tiempo para que se transmita hacia el aire.

3.4.2. Clasificación de las heladas

Las heladas se pueden clasificar por su época de ocurrencia, por el proceso físico que les da origen y por los efectos visuales que causan sobre los cultivos (Torres, 1983; Romo y Arteaga, 1989; Matías *et al.*, 2001)

3.4.2.1. Época de ocurrencia

Heladas otoñales. Son las primeras heladas de la temporada de invierno y ocurren normalmente durante el otoño.

Invernales. Ocurren en plena temporada de invierno. Son las que menor daño provocan, dado que en esa época la mayoría de las plantas se encuentran en reposo y por lo tanto en condiciones de soportar bajas temperaturas.

Heladas primaverales. Son las últimas heladas de la temporada fría y ocurren normalmente durante la primavera.

3.4.2.2. Proceso físico

Heladas de advección. Son provocadas por un vuelco de aire frío. Este tipo de helada se caracteriza por la presencia de vientos con velocidades iguales o superiores a 15 km/hora y la variación de la temperatura con la altura en negativo, sin inversión térmica.

Heladas de radiación. Este tipo de heladas se caracteriza por gran pérdida de calor del suelo durante la noche, favorecida por el escaso o nulo viento y por un cielo sin nubosidad, que provoca un fuerte enfriamiento de suelo y de las capas de aire en contacto con él. La helada radiativa es precedida por la ocurrencia de inversión térmica, por lo que la temperatura es más baja en la zona cercana a la superficie terrestre y aumenta con la altura. La inversión térmica se forma una vez que se rompe el ciclo convectivo del aire, debido al enfriamiento del suelo.

Heladas mixtas. Se denominan de este modo cuando además del vuelco de aire frío, existe simultáneamente un enfriamiento por pérdida de calor del suelo.

3.4.2.3. Efectos visuales

Helada blanca. Ocurre cuando se forma hielo sobre la superficie de las plantas y objetos expuestos libremente a la radiación nocturna. La temperatura es menor o igual a 0°C.

Helada negra. La helada negra ocurre cuando el descenso de la temperatura por debajo de 0°C no va acompañado de formación de hielo por la escasa humedad relativa en el ambiente. Su designación responde a la visualización de la coloración negruzca que adquieren al día siguiente algunos órganos vegetales, debido a la destrucción causada por el frío.

3.4.3. Daños por heladas

Los daños por heladas ocurren cuando la temperatura del aire alcanza niveles próximos al punto de congelación del agua. El grado de daño ocasionado por la helada depende de la fase vegetativa en la que se encuentra el cultivo durante la ocurrencia del fenómeno, así como del tiempo de duración e intensidad de la misma (Torres, 1983; Romo y Arteaga, 1989). En cultivos agrícolas se pueden establecer los siguientes grados de daños:

3.4.3.1. Primer grado.

Muerte de algunos órganos vegetativos como hojas y tallos tiernos; perturbación de funciones del resto de los órganos.

3.4.3.2. Segundo grado.

Destrucción de gran porcentaje de las flores y partes vegetativas.

3.4.3.3. Tercer grado.

Destrucción de frutos en formación, y deformación de los sobrevivientes.

3.4.3.4. Cuarto grado.

Muerte de toda la planta.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. Localización de la Cuenca del Río Yaqui

4.1.1. Área de estudio

El Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora se localiza en el Noroeste de la República Mexicana, en la parte sur del estado de Sonora, abarcando parcialmente los municipios de Cajeme, Bacúm, San Ignacio Río Muerto, Etchojoa, Navojoa y Benito Juárez; geográficamente se ubica entre los paralelos 27° 00' y 27° 40' latitud Norte y entre los meridianos 109° 45' y 110° 20' longitud Oeste. Su altura sobre el nivel del mar fluctúa entre los 16 y 70 m y sus suelos presentan una pendiente media de 1.5m por km. Ver figura 4.1.

Administrativamente el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora, se encuentra adscrito al Organismo de Cuenca Noroeste de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y tiene sus oficinas de la Jefatura de Distrito en Avenida Sinaloa e Hidalgo, Cd. Obregón, Sonora.



Figura 4.1 Ubicación del Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora.

De conformidad con el artículo 65 de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora, es operado, administrado y conservado en su red mayor y menor por los usuarios del mismo Distrito, quienes se han organizado en una Sociedad de Responsabilidad Limitada, de Interés Público y Capital Variable y 42 Asociaciones Civiles de Usuarios en los términos de la propia Ley de Aguas Nacionales y en su Reglamento. La CONAGUA otorgó a la SRL y a estas Asociaciones, concesiones para su explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del Distrito, así como de la infraestructura hidráulica federal requerida para proporcionar el servicio de riego y de otro tipo a los usuarios.

Los derechos de agua de los Módulos de Riego del Distrito de Riego, registrados en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), considerando los volúmenes anuales de agua superficial son en total de 1,910,691,000 Mm³ para todo el Distrito de Riego. El volumen concesionado de agua superficial es considerado a entregar como agua en bloque a nivel de puntos de control de Módulos, los cuales se localizan sobre los canales principales del Distrito.

Las aguas subterráneas provenientes de los acuíferos Valle del Yaqui y Cocoraque, también se utilizan para el riego de los suelos del Distrito de Riego, mediante 148 pozos oficiales que opera la Sociedad de Responsabilidad Limitada, de Interés Público de Capital Variable, (S. de R. L., de I. P. y C. V.), 58 pozos colectivos de propiedad particular y 94 pozos y cárcamos de retorno que explotan usuarios particulares para beneficio directo de sus parcelas, totalizando 300 aprovechamientos. Actualmente se están instalando 147 pozos adicionales por lo que el total de pozos ascenderá a 447 aprovechamientos subterráneos.

El volumen de agua subterránea concesionado en 1992 es de 295.01 Mm³. En total, el volumen concesionado a nivel Distrito incluyendo ambos tipos de agua, era de 2,205,692 Mm³, tal y como se muestra en el Cuadro 1.1.1 siguiente. En el presente año (mayo del 2007) se amplía la concesión de agua subterránea en 101.3316 Mm³, sólo que éste volumen está a nombre de Distrito de Riego del Río Yaqui, S. de R.L., de I.P de C.V, lo que amplía el volumen concesionado subterráneo a un total de 396.3326 Mm³. En total, el volumen concesionado actual a los usuarios en sus puntos de control es de **2,307.023 Mm³**.

El Distrito es operado, conservado y administrado en su red menor por los usuarios del mismo, quienes se han organizado en asociaciones en los términos de la propia Ley y su Reglamento. La Comisión otorgó a estas asociaciones las concesiones para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del Distrito, así como la infraestructura hidráulica federal requerida para proporcionar servicio de riego y de otros tipos a los usuarios. Asimismo, otorgó permiso para la utilización de obras de infraestructura hidráulica de la red mayor a la sociedad constituida por las asociaciones. La Comisión continuará siendo la autoridad en el Distrito descentralizado y tendrá a su cargo la operación, conservación, mantenimiento y administración de las obras de cabeza.

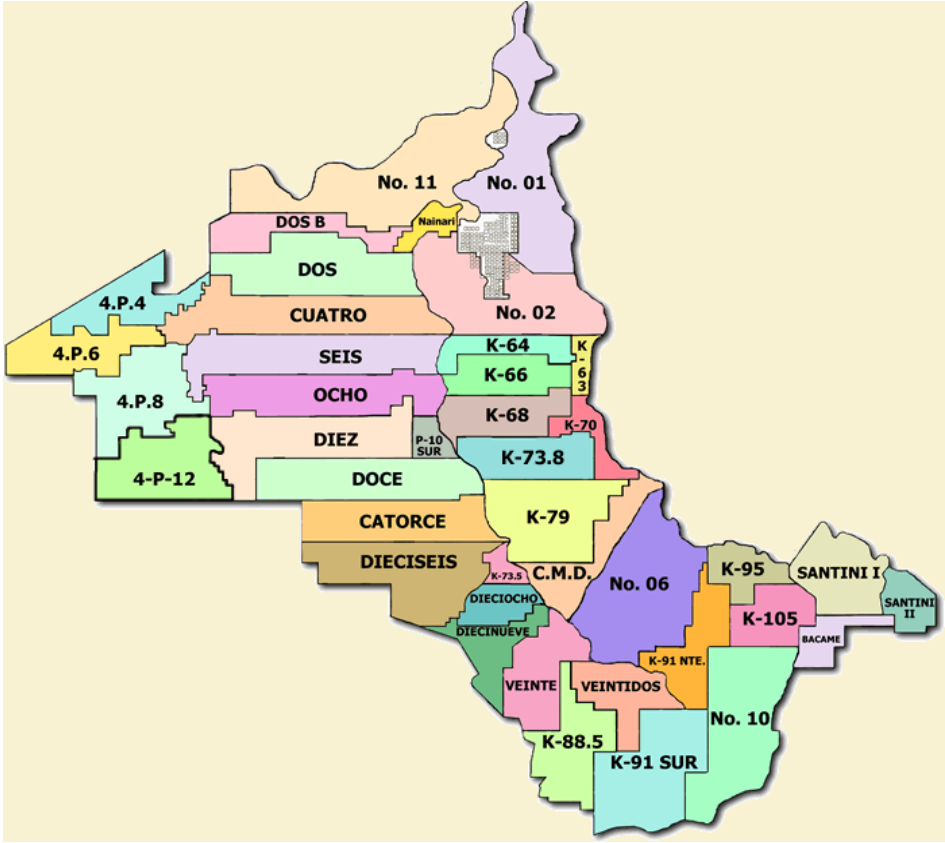


Figura 4.2 Plano general con los Módulos de Riego del DR 041 Río Yaqui, Sonora.

4.2. Superficie total, física, regable y regada

De acuerdo con el reglamento del Distrito de Riego, existe una superficie física de 237,456 ha y una superficie regable total dominada de aproximadamente 227,890 ha, de las cuales, en promedio en los últimos 17 años se ha regado un total de 196,500 ha, de acuerdo con datos de CONAGUA, distribuidas en seis subciclos agrícolas. En la figura 4.3 puede apreciarse la evolución de la superficie sembrada en el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora en el período de los ciclos agrícolas comprendidos entre 1989 y 2006.

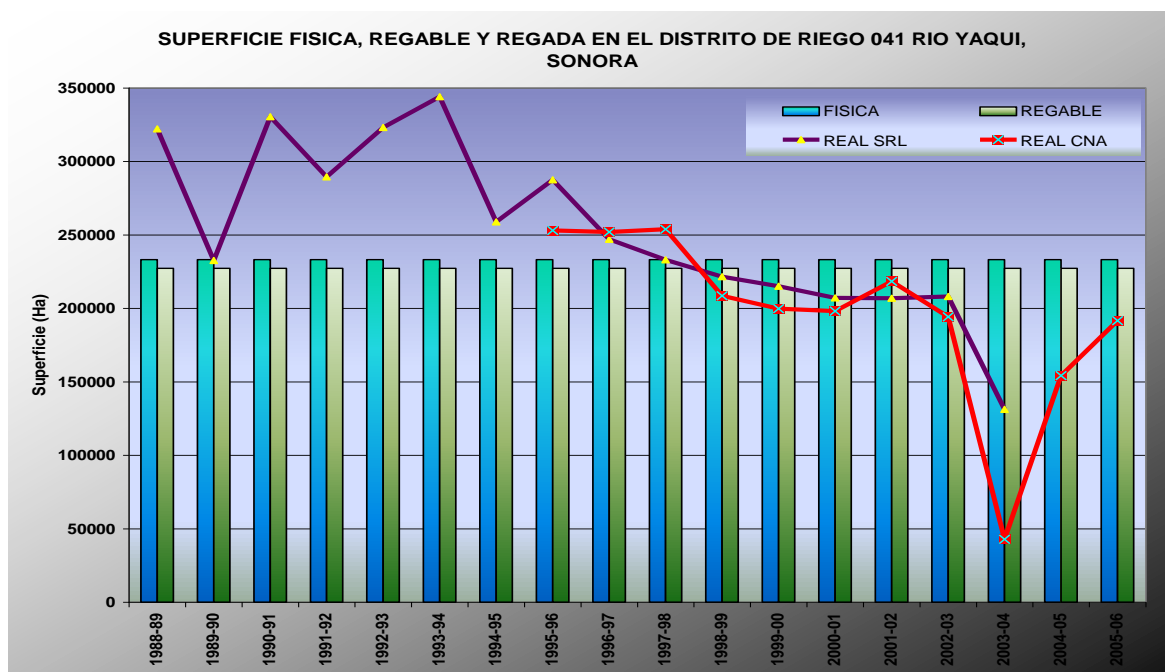


Figura 4.3 Superficie física, regable y regada en el DR 041 Río Yaqui, Sonora, Fuente CONAGUA Y SRL del DR 041.

Los sesgos en la información de superficie física regable son con relación a las superficies reportadas por CONAGUA y los usuarios. Debido al problema de disminución de la precipitación y la disponibilidad de agua en la región, ha habido una disminución significativa en la superficie sembrada en los últimos 10 años.

La figura 4.4 permite analizar que la superficie física regada en los años 80's y principios de los 90's llegó a ser hasta casi 350,00 ha, con segundos cultivos. Un índice de repetición mayor a 1.5 anual. Sin embargo, desde el año 1993 a la fecha, se ha presentado una caída en la superficie sembrada que ha derivado en la no apertura de la presa en el año 2003 y en el promedio actual de 196,500 ha, sin segundos cultivos, predominando el subciclo otoño-invierno con el trigo como su principal cultivo.

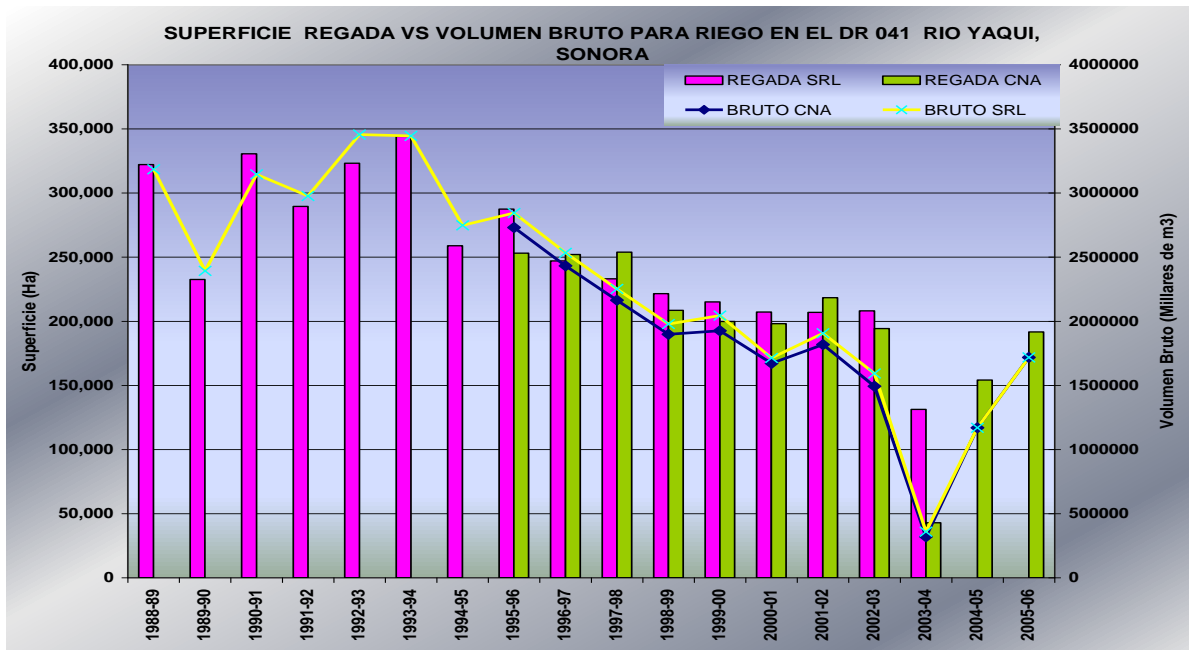


Figura 4.4 Superficie sembrada y volumen bruto utilizado en el D.R. 041 Río Yaqui Sonora. Fuente CONAGUA DR 041 y SRL del Río Yaqui.

4.3. Volumen Sustentable

De acuerdo con los datos obtenidos en el análisis de escurrimientos por el software FUNVASO, se tienen un valor de **2,018.98 Mm³** para el sistema de presas de la Cuenca del Río Yaqui, considerando las lluvias y otras aportaciones deducidas, éste valor se considera a nivel de extracción de la Presa Álvaro Obregón y considera toda el Sistema de Presas. El cálculo

completo se muestra en el cuadro 4.1 de la página siguiente. El análisis anterior, a continuación se muestra en la figura 4.5.

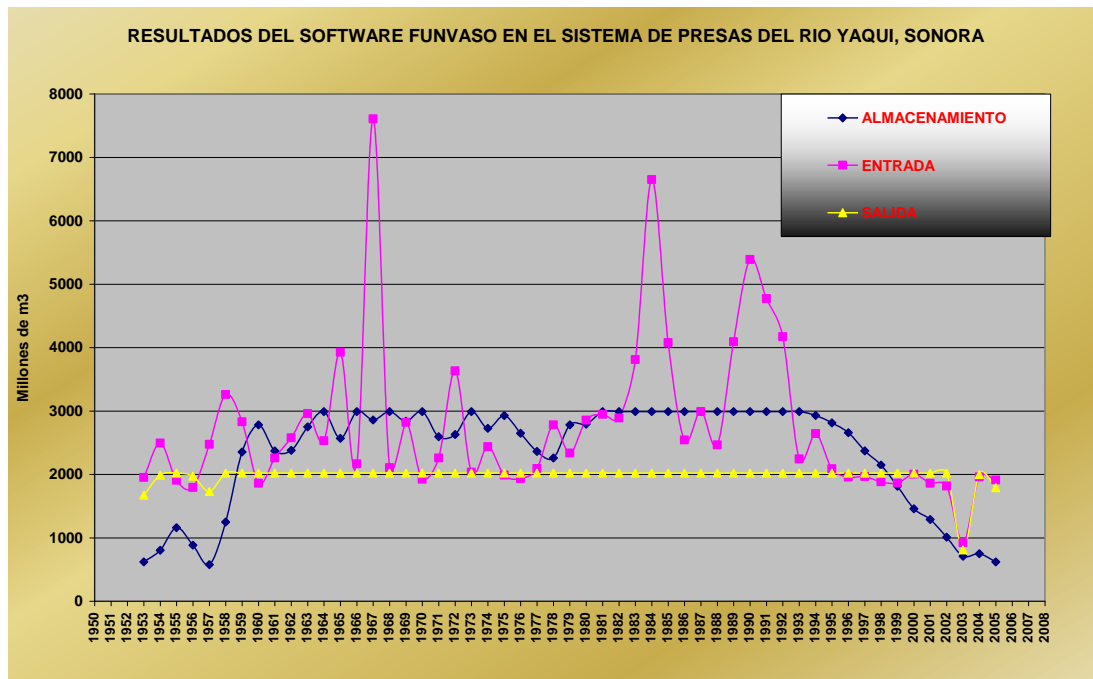


Figura 4.5 Resultados de FUNVASO para el sistema de presas del Río Yaqui, Sonora.

Cuadro 4.1. Cálculo del volumen sustentable con FUNVASO para el sistema de presas del Río Yaqui, Sonora.

CONCEPTO	VOLUMEN Mm ³
VOLUMEN SUSTENTABLE A NIVEL DE LA PRESA ALVARO OBREGON	2019.00
VOLUMEN BRUTO CONCESIONADO AGUA POTABLE CD OBREGON	-100.00
VOLUMEN DISPONIBLE A EXTRAER PRESA ALVARO OBREGON	1919.00
DISTRITO DE RIEGO 018 COLONIAS YAQUIS	250.00
VOLUMEN DISPONIBLE DISTRITO DE RIEGO 041 RIO YAQUI	1669.00
VOLUMEN DE POZOS PROFUNDOS CONCESION ORIGINAL	295.00
VOLUMEN DE POZOS PROFUNDOS NUEVA CONCESIÓN (26/05/2007)	101.33
VOLUMEN TOTAL POZOS PROFUNDOS CON NUEVA CONCESIÓN	396.33
VOLUMEN TOTAL DISPONIBLE PARA RIEGO AGRICOLA EN PRESA ALVARO OBREGON INCLUYENDO POZOS EN PLAN COLECTIVO	2065.33

De acuerdo con los datos anteriores y bajo la metodología de FUNVASO, el volumen disponible (superficial y subterráneo) para riego agrícola, es de 2,065.33 Mm³, de un volumen total de

extracción de la presa y de los pozos de 2,415.31 Mm³, mismo que se considera para cubrir la totalidad de los usos consuntivos de la Presa Álvaro Obregón.

4.4. Infraestructura hidroagrícola

La infraestructura principal del Distrito de riego está integrada por las obras siguientes:

- Tres presas de Almacenamiento
- 354 Pozos y 36 plantas de bombeo
- 269 km de canales principales
- 3,057 km de canales en red menor y 8,124 estructuras
- 2,446 km de la red de drenaje
- 2,613 km de caminos de operación y servicio

En el cuadro 4.2 se presentan las características y datos relevantes de los canales principales Bajo y Alto.

Cuadro 4.2. Infraestructura hidráulica a cargo de la Red Mayor del DR 041 Río Yaqui, Sonora.

PLAN DIRECTOR DISTRITO DE RIEGO 041, RÍO YAQUI, SON.							
Nombre	Longitud	Capacidad	NÚMERO DE ESTRUCTURAS				Organismo
canal	(m)	(m ³ /s)	Represas	Tomas	Sifones	Túneles	Operador
CPA	120	100	24	110	4	2	S. de R.L. opera 106 km
CPB	100	120	14	91			S. de R.L. opera 100 km
Porfirio Díaz	32	13	5	33			S. de R.L. opera 13 km
Nuevo P. Díaz	15	13	3	12			S. de R.L. opera 4 km
Canal 4	17	27	9				S. de R.L. opera 17 km
4 prolongación	26	23	11	55			S. de R.L. opera 26 km

La extensa red de canales secundarios, está bajo la operación, conservación y administración de las 42 Asociaciones de Usuarios que conforman el Distrito de Riego 041 Río Yaqui. La red de

distribución está integrada por canales laterales (945.6 km), canales sublaterales (1,184.7 km) y canales ramales y subramales (926.7 km), dando una longitud total de **3,057 km**; cuenta con **8,124** estructuras de diferente tipo. Ver figura 4.6.

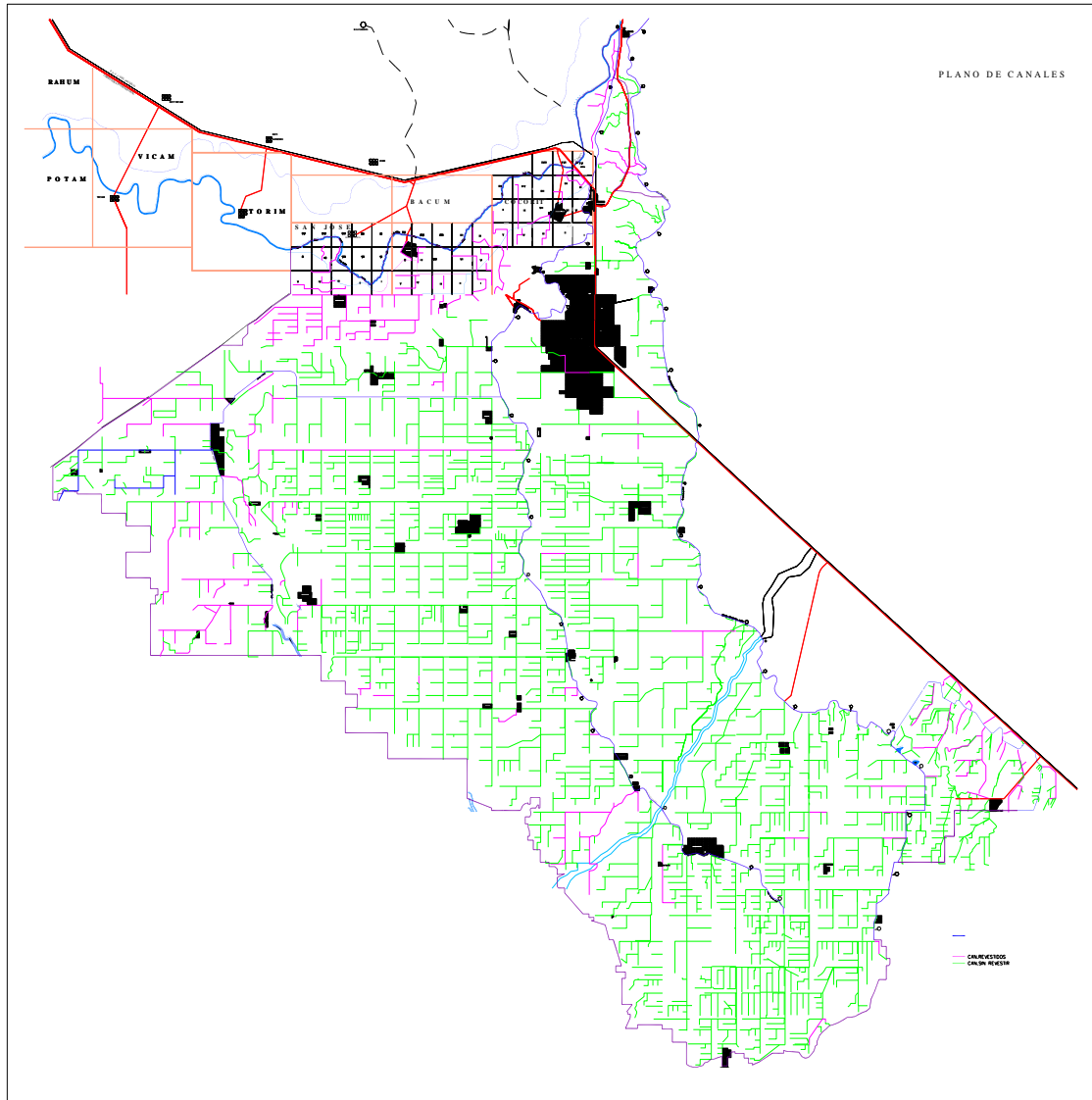


Figura 4.6 Plano con la red menor del Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora.

En el cuadro 4.3 se presenta un resumen de la longitud de estos canales. De la longitud total indicada de la red de conducción del distrito incluyendo red mayor y menor, 3269.77 km, sólo el 20.19% se encuentra revestido (660.22 km); las condiciones físicas de los canales revestidos en la

mayoría de los casos son buenas, al igual que sus estructuras y se estima que todavía tienen más de quince años de vida útil. Para el caso de los revestimientos y estructuras realizados en los últimos 6 años (aproximadamente 133 km), la vida útil restante estimada es de más 30 años.

Cuadro 4.3. Resumen del estado de la red de distribución del DR 041 Río Yaqui, Sonora.

Tipo de Canal	Longitud	Revestido.	Entubado	No revestido	% de la Red	% de la Red	% de la Red
	(Km)	(Km)	(Km)	(Km)	Revestido	Entubado	No Revestido
Principal	220.00	42.00	0.00	178.00	1.28	0.00	5.44
Lateral	933.15	434.36	8.26	490.53	13.28	0.25	15.00
Sublateral	1181.93	109.85	3.24	1068.84	3.36	0.10	32.69
Ramal	784.99	9.91	0.00	775.08	0.30	0.00	23.70
Subramal	149.70	2.69	0.00	147.01	0.08	0.00	4.50
SUBTOTAL	3269.77	598.81	11.50	2659.46	18.31	0.35	81.33
Obra no definida SRL	72.1	61.41	10.69				
TOTAL	3341.87	660.22	22.19	2659.46	19.76	0.66	79.58

En los canales sin revestir la situación es diferente, la cubeta del canal es de forma irregular y con un perímetro mojado muy amplio, como resultado de los trabajos de conservación que sobre ellos se realiza, lo que origina fuertes pérdidas por infiltración, y durante la operación es

necesario incrementar el gasto que circula por ellos para dar las cargas hidráulicas necesarias en las tomas, presentándose también un aumento de crecimiento de vegetación indeseable, etc. Por lo que respecta a las estructuras, muchas de ellas datan de los años 40's y 50's del siglo pasado; en general se puede decir que en un alto porcentaje de estos canales y estructuras, las condiciones físicas van de regulares a malas y funcionan en forma deficiente.



Figura 4.7 Canales en mal estado y de reciente modernización en al año 2006.

4.5. Factores que influyen en la producción

En el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora, en los últimos dieciocho años se han sembrado un promedio de 237,077 ha, incluyendo primero y segundos cultivos tal y como se muestra en la Figura 4.8

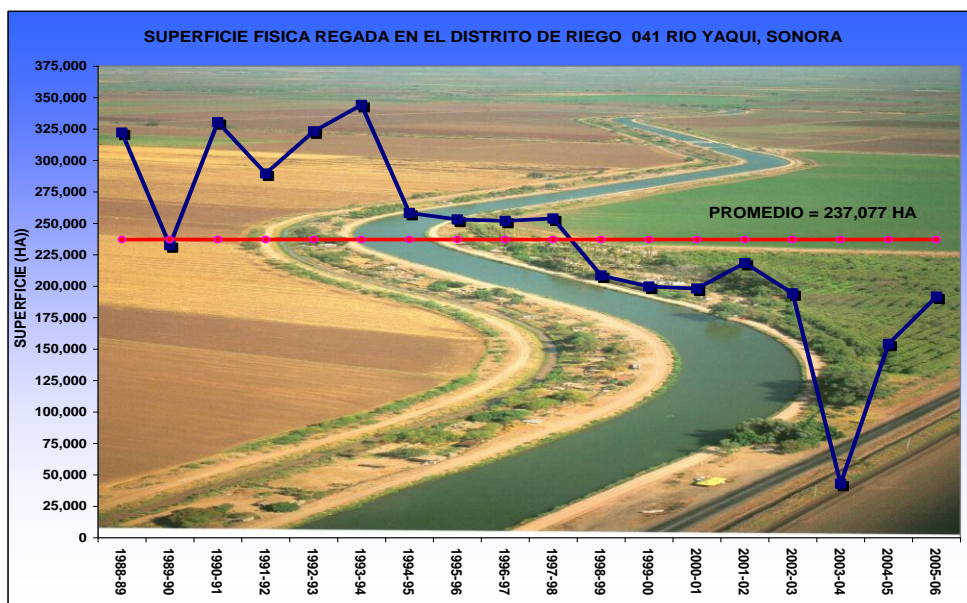


Figura 4.8 Superficie física histórica en el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora en los últimos 18 años.

Sin embargo, en los últimos 10 años, el promedio de la superficie física sembrada, disminuyó notablemente a alrededor de 196,893 ha, una diferencia del orden de 40,184 ha, equivalentes al 16.96% tal y como se muestra en la Figura 4.9.

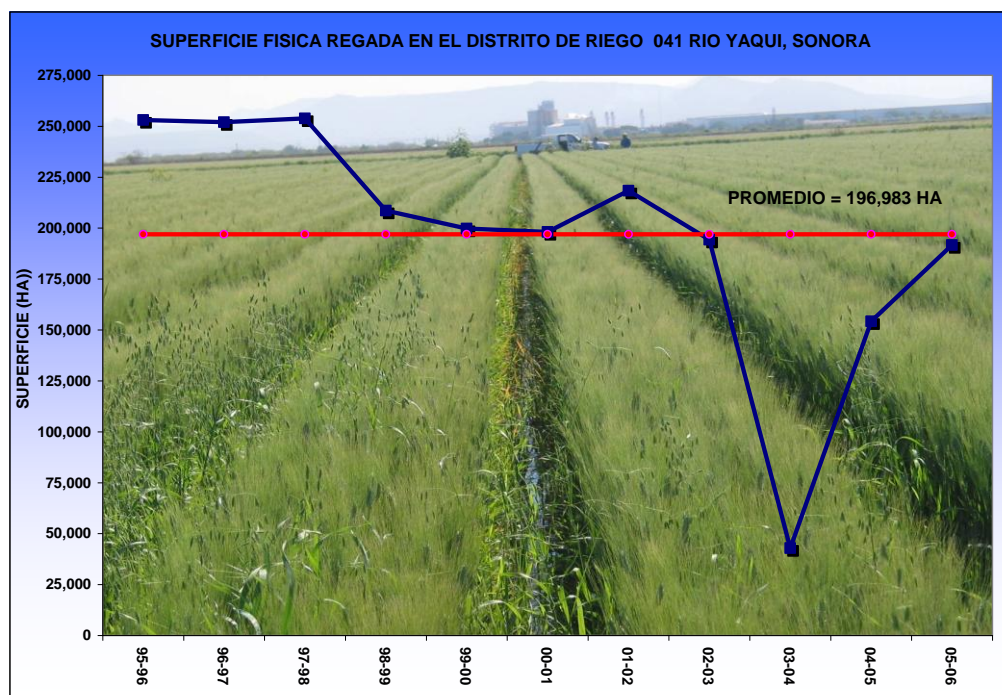


Figura 4.9 Superficie física histórica en el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora en los últimos 10 años

Esto debido principalmente a la ausencia de segundos cultivos, partir del ciclo agrícola 1998-1999, producto de la disponibilidad de agua en las presas.

De acuerdo con estas mismas estadísticas de producción obtenidas de los anexos de distribución de CONAGUA, se han sembrado en el Distrito de Riego, cinco subciclos agrícolas: *ciclo anterior*, *otoño-invierno*, *primavera-verano*, *perennes* y *segundos cultivos*, siendo sin lugar a dudas, el subciclo otoño-invierno como el más importante, con un promedio histórico del 72%, mismo que ha aumentado hasta el 83% en los últimos 11 años, producto de la disminución de los segundos cultivos que tienen un promedio de sólo el 3% de la superficie total, mientras que el subciclo primavera verano tiene el 6%.

Entonces, de acuerdo con las estadísticas oficiales de los últimos diez años del Distrito de Riego, el cultivo más importante es el **Trigo** con el 51% de la superficie total sembrada, seguido del **Maíz SC**, **Maíz O-I** y **Maíz CA** que en total suma el 22%, **Cártamo** con el 7%, **Algodón** con el 6% y **Cultivos Varios** (4%) y el restante con los demás cultivos con el 10%. Es notable la

diferencia que establece que sólo cuatro cultivos representan el 86% de la superficie total del Distrito.

4.6. Operación, Conservación y Administración del distrito de riego 041

En las tres presas de almacenamiento la CONAGUA mide diariamente en la escala gráfica los niveles del agua en el vaso, lo que al compararlo con la curva ó tabla elevaciones-áreas-capacidades respectiva, proporciona el volumen almacenado en cada vaso diariamente. De igual manera en cada presa se lleva el registro horario y diario de los volúmenes, que por la(s) obra(s) de toma se extraen para los usos asignados. También se lleva un registro diarios de las precipitaciones y evaporaciones que se presentan. Con los datos anteriores se realiza el funcionamiento de vaso diario, lo que permite conocer las condiciones de cada almacenamiento en forma diaria, enviando la Jefatura del Distrito de Riego el reporte correspondiente a la Dirección General del Organismo de Cuenca Noroeste.

La S. de R. L. encargada del manejo del agua en la red mayor y de entregar el volumen que le corresponde a cada Módulo, realiza mediciones en diferentes puntos de los canales principales, así como en los correspondientes puntos de control de módulo, PCM. A su vez los representantes de cada uno de los 42 módulos, verifican la medición en la PCM y posteriormente miden el agua en diferentes puntos de los canales laterales y sublaterales, así como en los puntos de entrega a los usuarios (toma parcelaria), a partir de este punto el responsable del manejo del agua es el usuario o regador, ya no existiendo medición del agua.

Por otra parte en el caso de los pozos del plan colectivo y red menor, se han operado en total, por parte de CONAGUA antes de la transferencia un promedio de 217 Mm³, contra 273 Mm³ que han operado los usuarios después de 1992, una diferencia de más de 56.5 Mm³ que han operado los usuarios en cuanto a pozos. El balance, sumando los volúmenes antes de la transferencia, se habrían operado más antes de la transferencia en un promedio anual de 663.9 Mm³ aproximadamente. Este valor equivale con la lámina bruta actual del Distrito, a dejar de sembrar un promedio de 65,000 ha anuales, las cuales equivaldrían en su gran mayoría a los segundos cultivos del Distrito. Este valor es importante, porque es en realidad, el promedio de

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales

Para la elaboración del presente trabajo se utilizaron los siguientes materiales.

- Base de datos de las superficies establecidas de maíz y trigo en el ciclo agrícola otoño-invierno 2010-2011, en los Módulos de Riego No. 2 y Bacame, del Distrito de riego 041, Río Yaqui, Sonora
- Sistema de Información geográfica del D.R. 041, Río Yaqui. El sistema incluye las parcelas del distrito de riego, módulos de riego, además de la red de canales y de drenaje.
- Imágenes de satélite Rapid Eye de las fechas 8 y 16 de enero de 2011 y 14 febrero de 2011.

Software utilizado

- Microsoft office 2007
- Excel, hoja de cálculo que se utilizó para realizar el manejo estadístico de la información estadística de superficies y rendimientos.
- Word, procesador de textos utilizado para la edición del documento.
- Idrisi Selva para la obtención de indicador de vegetación
- Erdasimagin 2010, para el tratamiento de las imágenes de satélite

5.2. Equipo

Equipo de cómputo. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó una computadora personal HP, con las siguientes características técnicas:

✓ **Sistema:**

Microsoft Windows 7 32 bits

Profesional

Versión 2009

Service Pack 1

✓ Equipo:

Intel(R) Pentium Dual Core M CPU

4 GB de RAM

5.3. Métodos

- Se obtuvo información de los módulos de riego No.2 y Bacame Canal principal Alto, sobre superficies físicas sembradas y cosechadas, además de los rendimientos por cultivo.
- Se realizó la corrección atmosférica para cada una de las imágenes de satélite con el programa para manejo de imágenes de satélite Erdas Imagine 2010. Para este proceso se obtuvieron constantes en base al ángulo de inclinación solar y la fecha de la toma de las imágenes, Ver Figura 5.1.

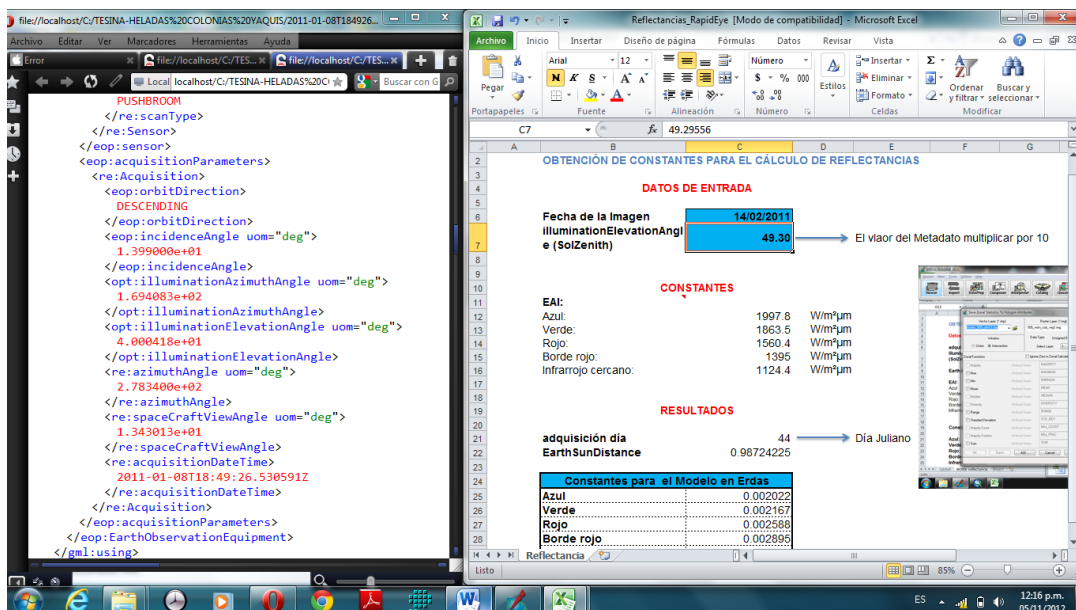


Figura 5.1 Obtención de constantes para cada banda

- Se realizó la corrección de objetos oscuros para cada imagen de satélite con el programa Erdas Imagine 2010. En este proceso se revisó en cada banda, los valores de pixel más bajos para poder acercar su valor a dos, Ver Figura 5.2.

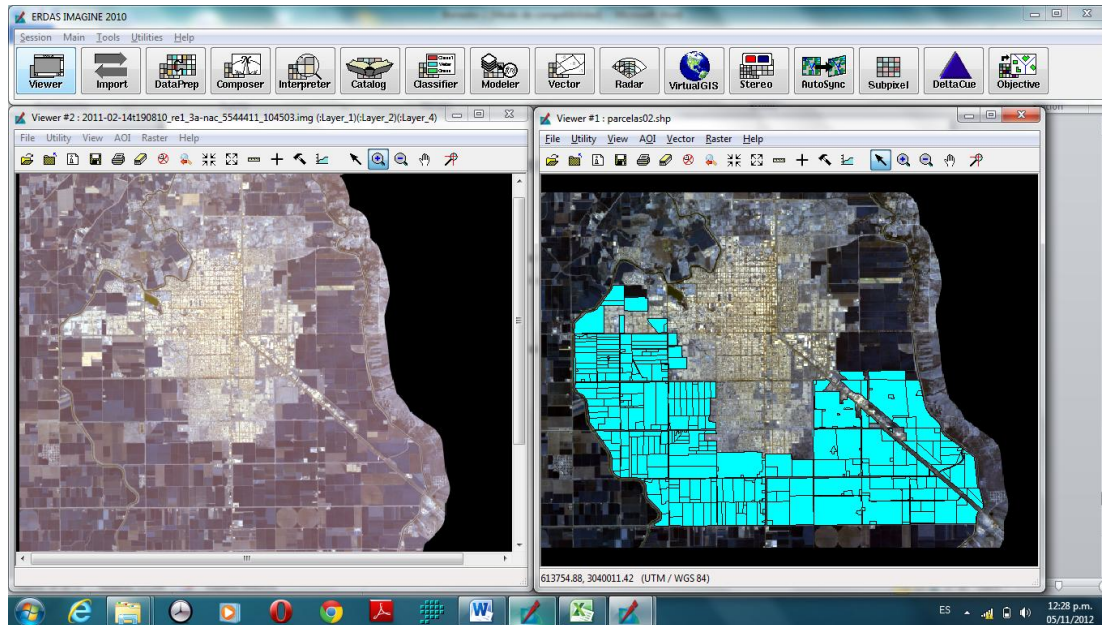


Figura 5.2 Corrección de objetos oscuros

- Se obtuvo el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) con el programa Idrisi Taiga. Ver Figura 5.3.

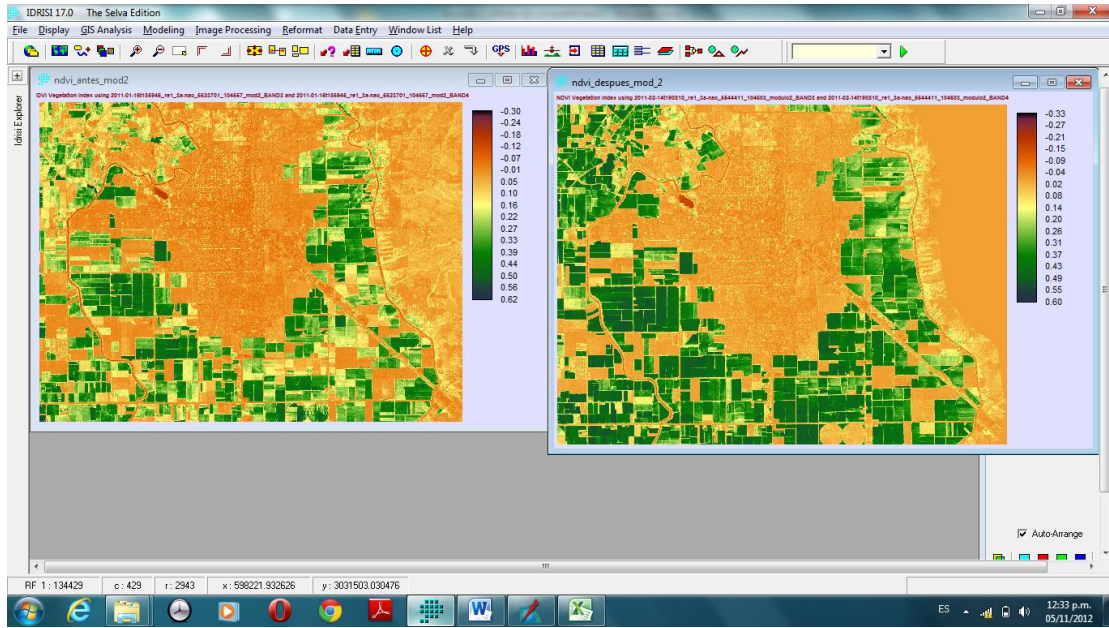


Figura 5.3 Índice de vegetación de diferencias normalizadas

Para estimar la probabilidad de ocurrencia de temperaturas de una helada Richard L Snyder, utiliza una hoja de Excel, la fórmula que utiliza asocia las temperaturas mínimas diarias, la desviación estándar y por otra parte calcula la probabilidad de que ocurra un evento en 100 años.

La fórmula que se utiliza para estimar la helada es la siguiente:

$$P(T_n < T) = 100 \left\{ 1 - \exp \left[-\exp \left(\frac{d - \beta_d}{\alpha_d} \right) \right] \right\} \quad (5.1)$$

Donde:

d= día del año

$$\alpha_d = \sigma_d / 1,283y$$

$$\beta_d = \mu_d + 0.45 \alpha_d^{-1}$$

6. RESULTADOS ESPERADOS.

A continuación se muestra los resultados obtenidos del presente trabajo

En el presente trabajo se muestra la metodología que se utilizó para generar los índices de NDVI, utilizando imágenes de satélite y comparar con los cambios sufridos en el vigor y la vegetación con los efectos agrometeorológicos, estos nos permitirán estimar el grado de afectación de la superficie sembrada y con esto nos permita tomar acciones inmediatas como la aplicación de volúmenes adicionales, resiembra de cultivos de baja y demanda y con rentabilidad y que permitirán disminuir el impacto en la economía el Distrito de Riego.

En el módulo de riego 02 del Canal principal Alto cuenta con 8,089 hectáreas de superficie física, se calculo los NDVI antes y después de la helada y se observan en el Cuadro 6.1.

Para el modulo de riego Bacame se observa que con respecto a la superficie sembrada de trigo hay una pequeña disminución en el rendimiento de 600 kilogramos por hectárea debido a la etapa en la que se encontraba dicho cultivo.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el análisis de las imágenes correspondientes al día 16 de enero de 2011.

Cuadro 6.1.Rangos de NDVI antes de la Helada Modulo No. 2 (16 de enero de 2011)

NDVI	Superficie
0 a 0.19	3,644.60
Mayor a 0.20	4,445.13
Total	8,089.73

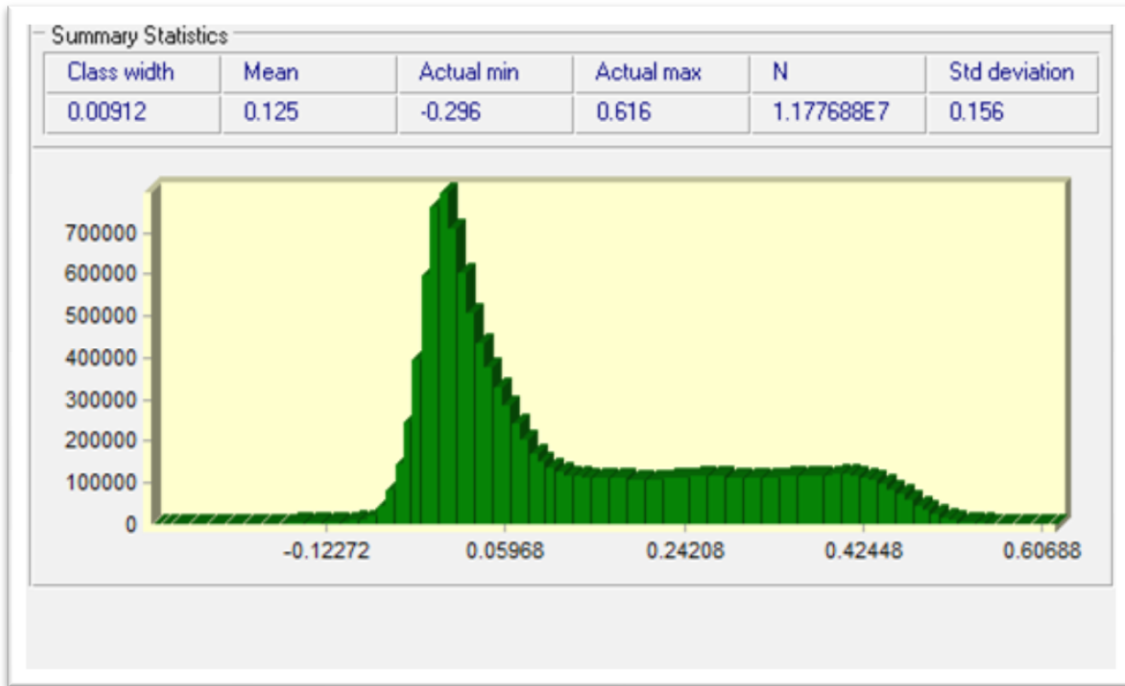


Figura 6.1 Histograma de NDVI (16 de enero 2011)

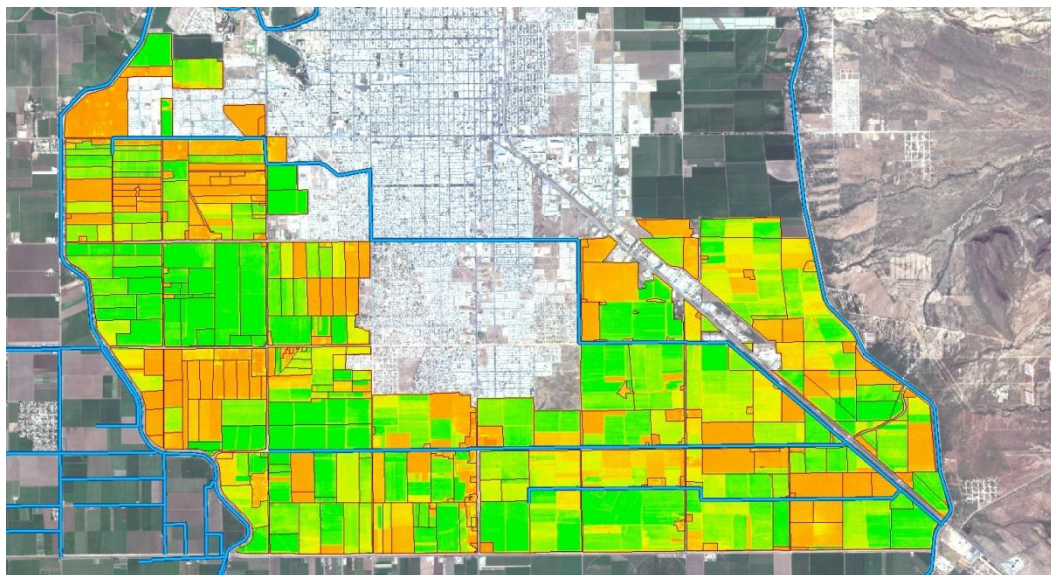


Figura 6.2 NDVI Cobertura vegetal 16 de enero de 2011

A continuación se presentan los resultados de NDVI obtenidos para la fecha 14 de febrero de 2011.

Cuadro 6.2. Rangos de NDVI después de la Helada Modulo No. 2 (14 de febrero de 2011)

NDVI	Superficie
0 a 0.19	2,137.80
Mayor a 0.20	5,951.93
Total	8,089.73

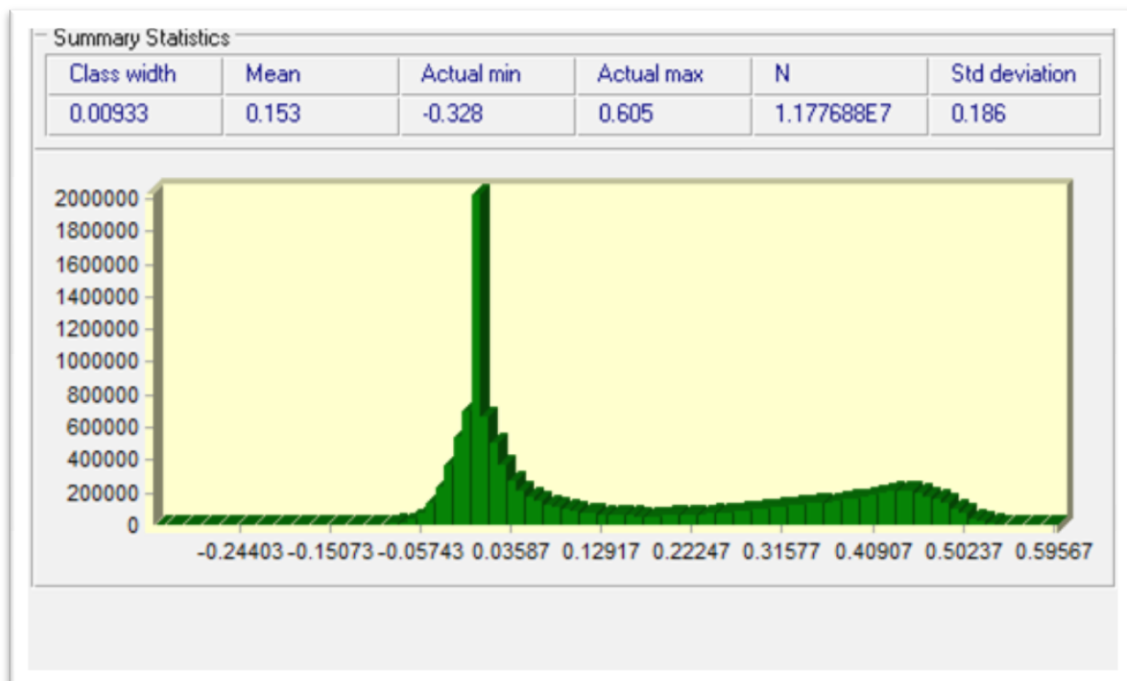


Figura 6.3 Histograma de NDVI (14 de febrero de 2011)

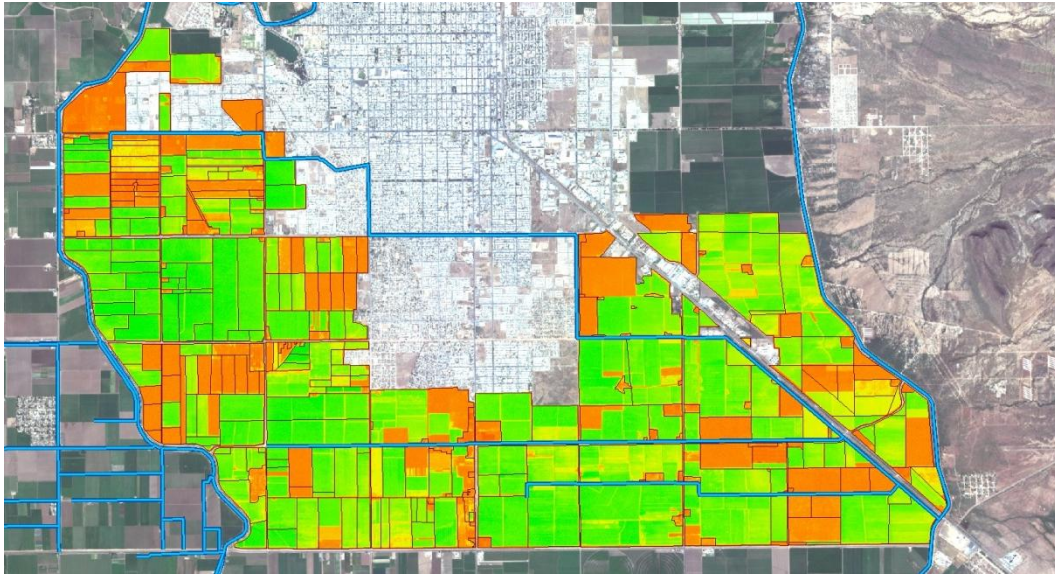


Figura 6.4 NDVI Cobertura vegetal 14 de febrero de 2011

Cuadro 6.3. Rango de Diferencias de NDVI de parcelas afectadas por la helada

Rangos de diferencia NDVI (Después - Antes)	Superficie
0.003 - 0.015	138.90
0.016 - 0.038	99.90
0.039 - 0.079	251.05
0.080 - 0.134	81.20
0.135 - 0.219	130.34
Total afectada	701.38
<i>Sin afectación</i>	<i>7,388.36</i>

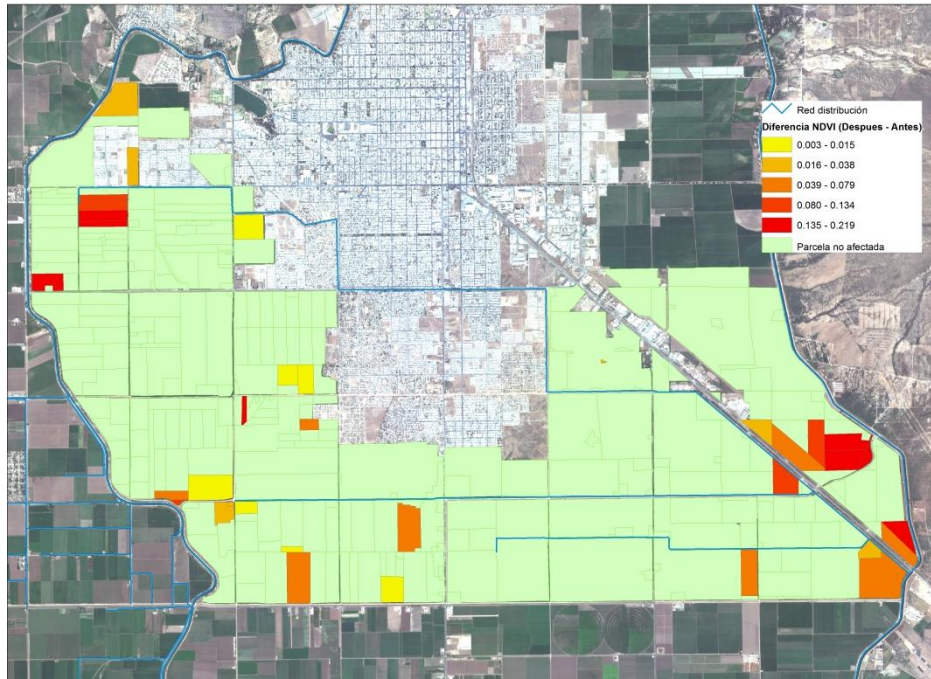


Figura 6.5 Parcelas afectadas por la helada

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El uso de imágenes satelitales y los sistemas de información geográfica (SIG) permiten cuantificar las superficies afectadas por el fenómeno de heladas.

700 hectáreas fueron desbastadas en el modulo de riego 02 del Canal principal Alto por la helada presentada en el mes de Febrero de 2011.

La probabilidad de que ocurra una helada de esta magnitud en la región de estudio, es de una vezen cada 100 años.

Recomendaciones:

Continuar trabajando con la metodología propuesta en este estudio, incluyendo además el uso de información de campo que nos permita calibrar dicha metodología.

Con la realización del presente trabajo, se hace imperante seguir monitoreando las temperaturas mínimas en todas las estaciones climatológicas del distrito de riego, para determinar la probabilidad de ocurrencia de heladas, con el fin de tener herramientas que nos permitan alertar a los productores de la región.

Es necesario seguir afinando y proponiendo nuevas metodologías que nos permitan detectar las áreas afectadas por heladas, como por ejemplo la clasificación supervisada de la información de las imágenes satelitales, así como la inclusión de información de campo para validar los resultados obtenidos.

Por otra parte construir un mapa con todas las estaciones climatológicas para determinar los flujos de viento, los patrones de la presencia de bajas temperaturas y con esto, determinar las áreas más vulnerables que impactan el distrito de riego.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

Aparicio Mijares, Francisco J. 1992. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa, Grupo Noriega Editores, México.

Comisión Estatal del Agua.2004. Modernización de los distritos de riego en el estado de sonora. Gobierno del estado de sonora.

StarJ., Estes J. 1990. *Sistemas de Información Geográfica: una Introducción*. Traducción libre del inglés por Herrera y H., B. E. e Ibarra Ochoa, M. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias forestales. Chapingo, México.

Núñez de Santiago, L. J., Mejía Sáenz, E., Palacios Vélez, E., Pedraza Oropeza, F. J. A., Torres Benítez, E., Santos Hernández, A. L., Rodríguez González, A., Vásquez Soto, D. y Salgado Tránsito, J. A. 2009. *Manual práctico de ArcView GIS 3.2*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. pp 314.

Labrador García, M., Évora Brondo J. A.,Arbelo Pérez, M. 2012. *Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio*. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.

ANEXOS

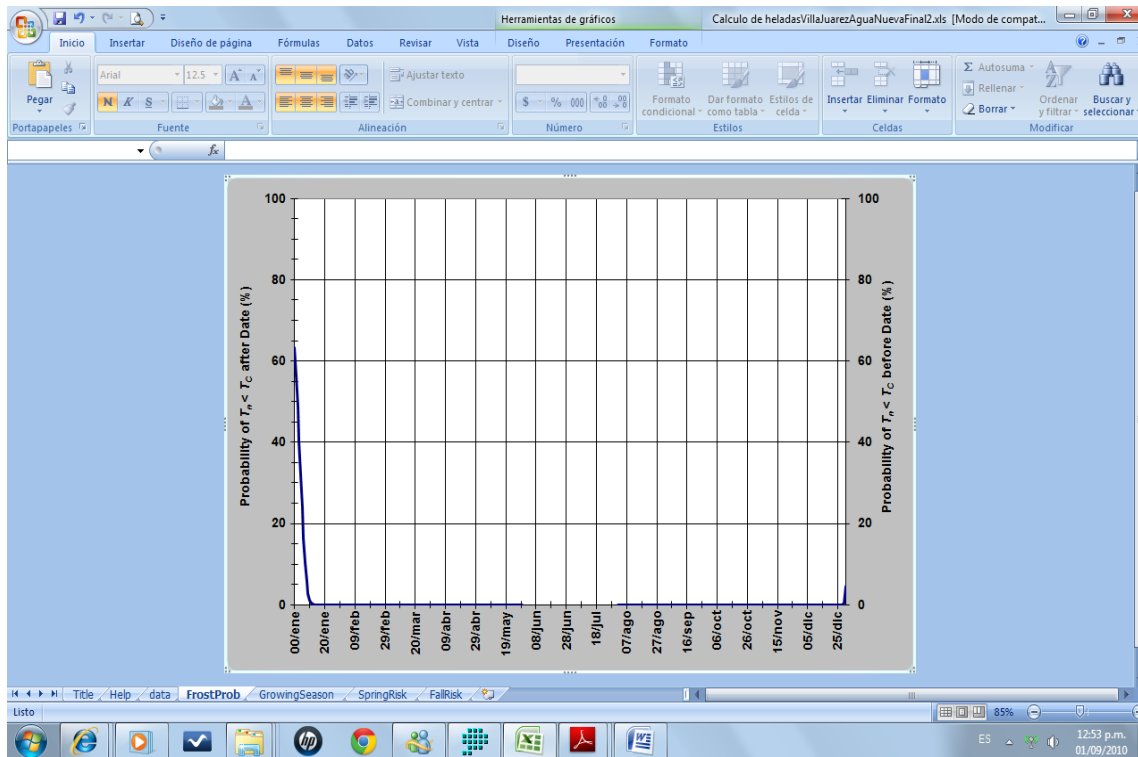
Temperaturas mínimas de la estación climatológica el batevito.

Critical Temperature
-2.0

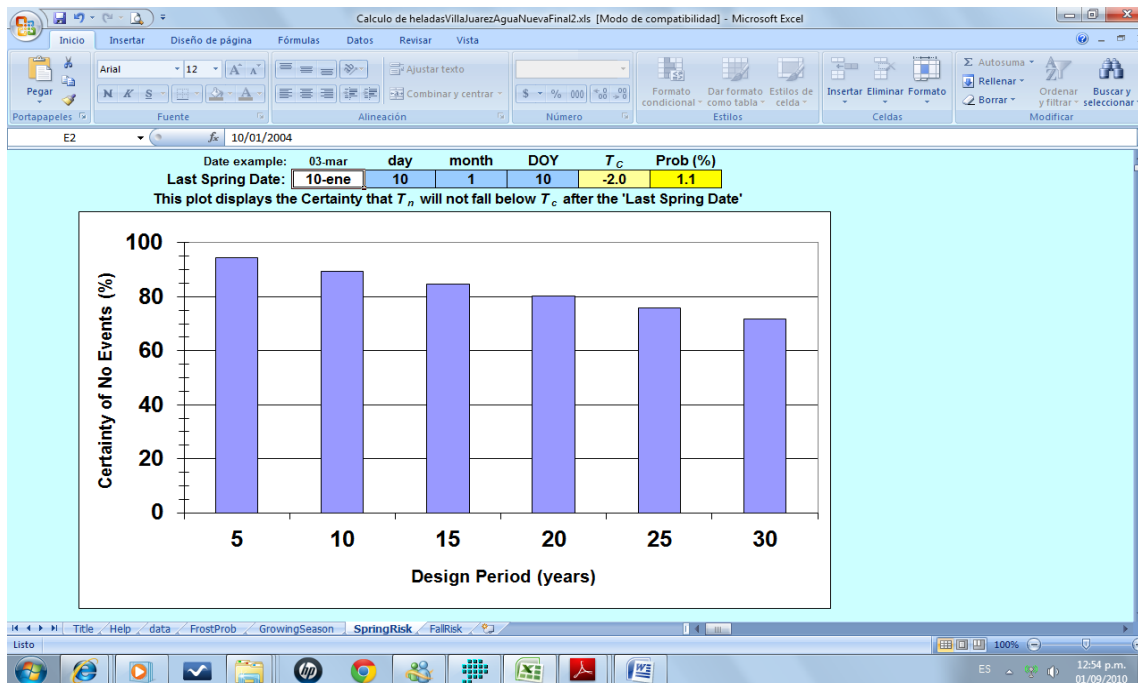
Enter the year number in the light-gray highlighted row. Enter the minimum recorded temperature in the column the correct year corresponding to the date in column A. Leave blank or input an * for missing data.

Leap Year	DATE	DOY	YR_1	YR_2	YR_3	YR_4	YR_5	YR_6	YR_7	YR_8	YR_9	YR_10	YR_11	YR_12	YR_13	YR_14	YR_15	YR_16	YR_17
1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990			
01.ene	1	11	6	*	9.5	8.5	9.5	2.5	7.5	10.5	13	10	7.5	9	8.5	4	10	8.5	
02.ene	2	9	5	*	11.5	9.5	13	1	11.5	9	10	7.5	5.5	10	8	4.5	10	8	
03.ene	3	10	4	*	7.5	8	8	2	4	8.5	9	7	7.5	10	8.5	7	10.5	6.5	
04.ene	4	10	5	*	5.5	10.5	6	1.5	3.5	11	11	9	6.5	12.5	5	7	12	5	
05.ene	5	10	9	*	7.5	10.5	7.5	2	3	12.5	8	10.5	6	14	8	7.5	15	5	
06.ene	6	8	8	*	7	12.5	7.5	3	5	10	11	10.5	8	16	5	9.5	14	6.5	
07.ene	7	10	9	*	6.5	14	6.5	3.5	5	12	7	8	7.5	16.5	6.5	8	12.5	7	
08.ene	8	11	10	*	5.5	11	7.5	4.5	6	10	9	7.5	5.5	13	8	9	10	8	
09.ene	9	9	6	*	7	12	13	6	4.5	7	9	8.5	7.5	13	8.5	11	10.5	8.5	
10.ene	10	8	8	*	4	13	14.5	3.5	6.5	7	11	7.5	10.5	13.5	9.5	10	10	8.5	
11.ene	11	8	7	*	6	10	7	4	6	8	9.5	8	10	17	7.5	8.5	9	9	
12.ene	12	10	10	*	6.5	7.5	7	4.5	5.5	9	7	7.5	10	17.5	8	12	8	10.5	
13.ene	13	11	9	*	6	8.5	8.5	5	4.5	9.5	10	8	12	16	10	8.5	8.5	11	
14.ene	14	12	6	*	5	10	9.5	2.5	5	8	10.5	7.5	11.5	11.5	5	14	11	11.5	
15.ene	15	12	9	*	3	12	9	4	7.5	6	11.5	8.5	11.5	12	7	14.5	10	7.5	
16.ene	16	13	8	*	5	11.5	7.5	4.5	7.5	8	15	11	10	14	6	14	8	6.5	
17.ene	17	12.5	7	*	6	11	8	5.5	7.5	7	13	14	5	15.5	7	12	8.5	6.5	
18.ene	18	10	7	*	9	11.5	8.5	5	8	8.5	13	12.5	9.5	14	7	9.5	10	6	
19.ene	19	10	8	*	8.5	11.5	8.5	6	11	14	9	9	5.5	10	10.5	7	8		
20.ene	20	9	10	*	8	9	10	7.5	13	15	10	7.5	8.5	10	13	9	7.5	8.5	
21.ene	21	11	7	*	8.5	4.5	9	5.5	13.5	14.5	8	8	7.5	10	11	4	6.5	8.5	
22.ene	22	10	6	*	6.5	6.5	9.5	4.5	9.5	14.5	8.5	9	5	10.5	7	9	6	9.5	
23.ene	23	9	9.5	*	6.6	4.5	4	2.5	11.5	13	9	8	9	8	6	9.5	5	11.5	
24.ene	24	9	8	*	6.5	7	3.5	4	10.5	10.5	9	9	9	8	5.5	10	5	15	
25.ene	25	10	7	*	8	6	3	6	7	11	4	8.5	10	9.5	6	9.5	5.5	15	

Anexo A. Temperaturas mínimas de 40 años



Anexo B. Probabilidad de presencia del evento por cada 100 años



Anexo C. Grafica de la probabilidad de presencia del evento por cada 100 años

Anexo D. Plano NDVI cobertura vegetal antes de la helada. Modulo No.2

Anexo E. Plano NDVI cobertura vegetal después de la helada. Modulo No.2

Anexo F. Plano parcelas afectas por las heladas. Modulo No. 2.