



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**USO DE TÉCNICAS DE LA INFORMACIÓN PARA ESTIMAR PARÁMETROS
ESTRATÉGICOS EN LA OPERACIÓN DE LOS DISTRITOS DE RIEGO**

JOSAFAT CABALLERO LUIS

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: **“Uso de técnicas de la información para estimar parámetros estratégicos en la operación de los distritos de riego”**, realizada por el Alumno: Josafat Caballero Luis, 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

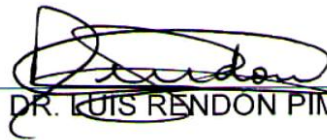
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. HÉCTOR FLORES MAGDALENO

DIRECTOR
DE TESIS:



DR. LUIS RENDÓN PIMENTEL

ASESOR:



DR. AGUSTÍN RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Agosto de 2013

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua, a través de la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola y de la Gerencia de Distritos de Riego por haberme otorgado la confianza que sin descuidar mis labores cotidianas en esta gran institución, fue posible concluir la Maestría Tecnológica en Hidrociencias.

Al Colegio de Postgraduados por su gran compromiso hacia con los educandos y por haber instituido ante la Secretaría de Educación Pública la Maestría Tecnológica en Hidrociencias.

Al Dr. Héctor Flores Magdaleno, por su invaluable apoyo en la orientación, aportaciones y conducción del presente trabajo de tesis.

Al Dr. Luis Rendón Pimentel, por su gran liderazgo en la gestión de los distritos de riego y su visión hacia un manejo sustentable del agua en las áreas de riego, motivación que origina el presente trabajo.

Al Dr. Agustín González Rodríguez y a su equipo de trabajo, por su gran entusiasmo en el asesoramiento, sugerencias y apoyo en la conformación de la presente tesis.

Al Dr. Enrique Mejía Saenz por su entusiasta colaboración, orientación, sugerencias y apoyo en el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Jesús Chávez Morales, por su gran tenacidad y empeño a fin de concluir la Maestría Tecnológica en Hidrociencias.

USO DE TÉCNICAS DE LA INFORMACIÓN PARA ESTIMAR PARÁMETROS ESTRATÉGICOS EN LA OPERACIÓN DE LOS DISTRITOS DE RIEGO

RESUMEN

Mediante el presente trabajo se propone el uso de técnicas de la información para estimar parámetros estratégicos en la operación de los distritos de riego a través del uso de sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota, debido a que la CONAGUA cada vez dispone de poco personal técnico y requiere la toma de decisiones oportunas en la administración del agua disponible. Para esto, se analizaron algunos estudios de casos en donde éstos sistemas ya fueron aplicados en ciertos distritos de riego como el manejo y actualización del padrón de usuarios, el inventario de infraestructura, la caracterización de suelos agrícolas, la estimación de superficie sembrada, de la producción agrícola y de la evapotranspiración. Los avances obtenidos corresponden al desarrollo del Modelos de Sistema de Información Geográfica en 85 Distritos de Riego (DR), la caracterización físico-química de suelos en 5 DR y la determinación de superficie sembradas en 9 DR; a través del cual se han resuelto en parte los problemas presentados y se ha generado las bases para recomendaciones y desarrollos futuros; por lo que la visión hacia una agricultura de precisión en las áreas de los DR es la adecuada, el reto es desarrollar y/o validar las metodologías apropiadas debido a que algunas metodologías revisadas se encuentran en fase de validación, que nos permitan alcanzar un manejo sustentable del agua. Es necesario continuar con el desarrollo y aplicación de estas tecnologías en los DR, particularmente en aquellos donde la baja disponibilidad de agua en las fuentes de abastecimiento ha sido frecuente, por lo que deberá impulsarse dicho desarrollo y la capacitación del personal de la CONAGUA en esta materia, con participación de las instituciones de educación e investigación, y de asociaciones privadas afines.

Palabras clave: Distritos de Riego, Sistema de Información Geográfica, Percepción Remota, Agricultura de Precisión e Índices de Vegetación.

USE OF INFORMATION TECHNIQUES TO ESTIMATE STRATEGIC PARAMETERS IN THE IRRIGATION DISTRICTS OPERATION

ABSTRACT

This study proposes the use of information techniques to estimate strategic parameters in the Irrigation Districts operation through the use of Geographical Information Systems (GIS) and remote sensing techniques. These methodologies will help to solve the actual situation of the National Water Commission where the number of his staff is decreasing and it is necessary to take opportune decisions relative to the available water management. Some case studies were analyzed where these systems have already been applied in some irrigation districts. Studies are related to the management and update of irrigation district (ID) user database, infrastructure inventory, characterization of agricultural soils, estimation of planted acreage, yield estimation and crop evapotranspiration. Progress achieved correspond to the development of Geographic Information System models in 85 ID, physical-chemical characterization of soils in 5 ID and determination of planted surface in 9 ID, development of these studies have solved part of the actual problems and have generated the basis for actual and future recommendations. Future vision is to achieve the precision farming in the ID areas; the challenge is to develop and to validate appropriate methodologies that permit to achieve sustainable water management. It is necessary to continue the development and implementation of these technologies in all the ID, particularly in the IDs where low water availability in the water sources have been frequent, so it is necessary to continue supporting the development of these methodologies and the training of the National Water Commission Staff. To achieve these goals is necessary the participation of educational and research Institutions, and related private associations.

Key Words: Irrigation Districts, Geographic Information System, Remote Sensing, Precision Agriculture and Vegetation Index.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
2.3. Hipótesis	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1. Los distritos de riego.....	5
3.2. Caracterización de suelos agrícolas.....	11
3.3. Los sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota.....	14
3.3.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	14
3.3.2. Técnicas de Percepción Remota (TPR).....	17
3.3.3. La evapotranspiración y su determinación.....	22
3.3.3.1. Métodos de balance de energía y microclimáticos.....	24
3.3.3.2. Evapotranspiración calculada con datos meteorológicos.....	25
3.4. Aplicaciones de los sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota en la agricultura.....	32
4. DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍAS APLICADAS EN ASPECTOS DE LA OPERACIÓN DE LOS DISTRITOS DE RIEGO.....	35
4.1. Actualización de infraestructura hidroagrícola, planos parcelarios-padrón de usuarios.....	35
4.2. Caracterización de suelos agrícolas.....	46
4.3. Determinación de superficies sembradas.....	54
4.4. Identificación y cuantificación de superficies establecidas por cultivo.....	60
4.5. Estimación de la producción agrícola.....	63
4.6. Estimación de la evapotranspiración de cultivos.....	69

5.	RESULTADOS GENERALES Y RECOMENDACIONES	72
5.1.	Actualización de infraestructura hidroagrícola, planos parcelarios-padrón de usuarios.....	72
5.2.	Caracterización de suelos agrícolas.....	74
5.3.	Estimación de superficies sembradas.	75
5.4.	Identificación y cuantificación de superficie establecida por cultivo.....	75
5.5.	Estimación de la evapotranspiración de cultivos.....	75
5.6.	Estimación de la producción agrícola.....	77
6.	CONCLUSIONES GENERALES	78
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	80

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1. Cantidad de distritos de riego, ACU y SRL por organismo de cuenca y entidad federativa.	5
Cuadro 3.2. Superficie sembrada y cosechada, producción, valor de producción y volumen de agua utilizada en distritos de riego, años agrícolas 1996-1997 al 2011-2012.....	9
Cuadro 3.3. Variables principales a considerar en el reconocimiento convencional de suelo. ...	11
Cuadro 3.4. Valores espectrales usada en la teledetección	20
Cuadro 3.5. Características relevantes de algunas imágenes de satelitales disponibles	22
Cuadro 4.1. Longitud de canales calculada del distrito de riego 043.	39
Cuadro 4.2. Longitud de canales por tipo de revestimiento en el distrito de riego 043.	39
Cuadro 4.3. Estructuras de operación en los módulos del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.	40
Cuadro 4.4. Estructuras de cruce en el distrito de riego 043, Estado de Nayarit.....	41
Cuadro 4.5. Estructuras de protección del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.	41
Cuadro 4.6. Red de drenaje del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.	43
Cuadro 4.7. Comparación de longitudes calculadas con SIG y datos oficiales de CONAGUA.	43
Cuadro 4.8. Superficies por módulo del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.	44
Cuadro 4.9. Situación en la que se encuentran los usuarios del Módulo 1 del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.	46
Fuente. ANEI, A.C. 2012.....	54
Cuadro 4.10. Superficie cultivada y volumen entregado en los módulos del distrito de riego 010, Culiacán-Humaya, Sin.	55
Cuadro 4.11. Padrón de cultivos y superficie en el distrito de riego 010 Culiacán-Humaya.	57
Cuadro 4.12. Superficie con y sin cultivo en el mes de marzo de 2012 en el distrito de riego 010 Culiacán-Humaya.....	58
Cuadro 4.13. Superficie establecida de cultivo, en tres fechas distintas en el distrito de riego 010, Culiacán-Humaya, Sin.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Superficie de riego de los distritos de riego por estado	7
Figura 3.2. Mapas temáticos de recursos naturales.....	14
Figura 3.3. Elementos de un SIG	15
Figura 3.4. Espectro electromagnético.....	19
Figura 3.5. Firmas espectrales de diferentes objetos, base de los índices de Vegetación.....	21
Figura 3.6. Imágenes en tres dimensiones que captan los satélites.....	21
Figura 4.1. Ubicación del distrito de riego 043 Estado de Nayarit.	36
Figura 4.2. Imagen Spot mostrando algunas parcelas del distrito de riego 043.....	36
Figura 4.3. Digitalización de canales y parcelas, y mostrando información capturada.	38
Figura 4.4. Ejemplo de canales Laterales del distrito de riego 043.	38
Figura 4.5. Red de canales y ubicación de sus estructuras de operación.	40
Figura 4.6. Estructuras de operación en el distrito de riego 043 Estado de Nayarit.	41
Figura 4.7. Hidrante del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.	42
Figura 4.8. Red de caminos del distrito de Riego 043, Estado de Nayarit.....	42
Figura 4.9. Red de drenaje del distrito de riego 043, Estado de Nayarit	43
Figura 4.10. Situación actualización padrón de usuarios del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.....	45
Figura 4.11. Situación de la actualización del padrón de usuarios en el Módulo 1 del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.	45
Figura 4.12. Ubicación del distrito de riego 030, Valsequillo, Pue.	47
Figura 4.13. Puntos de muestreo en una parte del distrito de riego 030 Valsequillo, Pue.....	48
Figura 4.14. Procedimiento para coleccionar las muestras de suelo.....	48
Figura 4.15. Procedimiento para coleccionar una submuestra de suelo.	49
Figura 4.16. Mosaico de P (Fosforo), en las parcelas del distrito de riego 030, Valsequillo, Puebla.....	51
Figura 4.17. Mosaico de PH en las parcelas del distrito de riego 030, Valsequillo, Pue.....	52
Figura 4.18. Textura del suelo mostrado en un SIG.	52
Figura 4.19. Recomendaciones de fertilización.	53
Figura 4.20. Avance del desarrollo del sistema para el uso del SIG en tabletas y celulares.....	54
Figura 4.21. Mosaico de imágenes RapidEye.....	56
Figura 4.22. Determinación de la reflectancia del suelo.....	57
Figura 4.23. Mosaico de imágenes RapidEye.....	58
Figura 4.24. Obtención de la firma espectral del cultivo.	61

Figura 4.25. Clasificación de cultivos.....	62
Figura 4.26. Índice NDVI para zona del módulo “Valle”.....	63
Figura 4.27. Histograma de rendimiento en el módulo “Valle”.	64
Figura 4.28. Relación entre el <i>NDVI</i> y <i>KC</i>	65
Figura 4.29. Relación entre NDVI y rendimiento de trigo.	67
Figura 4.30. Estaciones Agroclimáticas de Morelos.....	67
Figura 4.31. Regresión de las variables rendimiento y NDVI.	68
Figura 4.32. Comparación de ET estimada con METRIC y la medida con Eddy Covariance.	70
Figura 4.33. Distribución de los volúmenes de agua extraídos en el distrito de riego 038, Río Mayo, Son. Año Agrícola 2007-2008.	71
Figura 5.1. Desarrollo del SIG para los Distritos de Riego.	73

1. INTRODUCCIÓN.

Los distritos de riego fueron construidos por el gobierno federal a partir del año 1926; entonces, el país contaba con 1 millón de hectáreas bajo riego. Estos sistemas, siempre fueron operados, conservados y administrados por el gobierno al que los usuarios pagaban una cuota para ese efecto; sin embargo, frecuentemente requerían de subsidios e inversiones federales directas, en especial, para su rehabilitación.

En la década de los 80's, por los altos costos de oportunidad y la situación económica del país que redujo los subsidios, las obras de los distritos de riego estaban en peligro de inutilizarse. Una alternativa de solución, fue la de entregarlos a los usuarios y así nació el proceso de transferencia de los distritos de riego a los usuarios, en 1989, al crearse la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que tomó a su cargo la responsabilidad de rescatarlos.

A partir de la Ley de Aguas Nacionales de 1992, se convirtió en obligación de los usuarios, operar, conservar y administrar los distritos de riego (Artículo 65), y la CONAGUA supervisar el cumplimiento de las condiciones del título de concesión; así como operar, conservar y administrar obras estratégicas a su cargo.

A la fecha se ha transferido a 458 asociaciones civiles de usuarios (ACU) la infraestructura hidroagrícola a igual número de módulos, que abarcan 3.4 millones de hectáreas; lo que representa el 99 % del total de la superficie de los distritos de riego del país. Algunas ACU se han agrupado en 14 Sociedades de Responsabilidad Limitada (SRL) y se les transfirieron las redes mayores de canales, drenes y caminos que habían quedado, inicialmente, a cargo de la CONAGUA.

Estas ACU y SRL tienen diversas obligaciones entre las más notables está: la formulación de sus planes de riego y programas de conservación anuales; la recepción del agua en bloque y la distribución de la misma entre sus usuarios; la realización de actividades de administración, conservación y modernización de la infraestructura hidroagrícola; la recaudación y el pago de las cuotas legalmente establecidas; el ejercicio presupuestal

consecuente; la presentación de sus estados financieros a sus asambleas generales; la actualización del padrón de usuarios; la entrega de la estadística de producción agrícola, así como la oportuna realización de elecciones de los consejos directivo y de vigilancia, conforme a sus estatutos.

Al transcurrir los años, la CONAGUA, cada vez tiene menos personal técnico en los distritos de riego, debido al retiro voluntario por jubilación y a la falta de contratación para remplazarlos; esta situación fue acentuada a partir del 2003.

Derivado de lo anterior, con el personal técnico existente dificulta atender las responsabilidades que tiene la CONAGUA, tales como la supervisión de las actividades que realizan las organizaciones de usuarios; la falta o limitada asistencia técnica a los usuarios; el manejo de información (superficie sembradas, superficie cosechadas, rendimientos) con cierto grado de incertidumbre; la falta de actualización de la infraestructura, entre otros.

Por otra parte, en el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 se contemplan estrategias como la de “Implementar un manejo sustentable del agua, haciendo posible que todos los mexicanos tengan acceso a ese recurso”, a través de ordenar el uso y aprovechamiento del agua en cuencas y acuíferos afectados por déficit y sobreexplotación, propiciando la sustentabilidad sin limitar el desarrollo, así como rehabilitar y ampliar la infraestructura hidroagrícola. También se ha identificado diversas iniciativas en la Agenda del Agua 2030, enfocados a este propósito, como las que se indican a continuación:

- Iniciativa 4. Involucrar a las asociaciones civiles de usuarios de riego y a los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas en el impulso del ahorro de volúmenes y tecnificación.
- Iniciativa 31. Potenciar los recursos destinados a la modernización y tecnificación de la infraestructura hidroagrícola.
- Iniciativa 35. Desarrollar sistemas regionales de información para reforzar la gestión del agua por cuenca y acuífero.

Es por ello que es impostergable utilizar las técnicas de la información como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de Percepción Remota (TPR), para la planeación de los recursos hídricos, iniciando con el seguimiento de parámetros básicos en la operación de los distritos de riego.

Particularmente en el presente documento se enfocará a direccionar el uso de metodologías ya desarrolladas por la CONAGUA en los distritos de riego, tanto en SIG como de TPR, así como de recomendaciones generales de otras en desarrollo, previa validación de las mismas.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

Proponer metodologías basadas en técnicas de la información para estimar parámetros estratégicos que apoyen en la toma de decisiones hacia una adecuada operación de los distritos de riego en México.

2.2. Objetivos específicos

Revisar y proponer metodologías desarrolladas con el uso de técnicas de la información que permitan:

- ✓ Actualizar la infraestructura hidroagrícola, planos parcelarios-padrón de usuarios.
- ✓ Caracterizar los suelos agrícolas.
- ✓ Estimar superficies sembradas.
- ✓ Identificar cultivos y estimar la superficie establecida.
- ✓ Estimar la producción agrícola.
- ✓ Estimar la evapotranspiración de los cultivos.

2.3. Hipótesis

Con el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de percepción remota (TPR) es posible estimar parámetros estratégicos que apoyen en la toma de decisiones para una adecuada operación de los distritos de riego en México.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Los distritos de riego.

De conformidad a la Ley de Aguas Nacionales, un distrito de riego, es el establecido mediante decreto presidencial, el cual está conformado por una o varias superficies previamente delimitadas y dentro de cuyo perímetro se ubica la zona de riego, el cual cuenta con las obras de infraestructura hidroagrícola, aguas superficiales y del subsuelo, así como con sus vasos de almacenamiento, su zona federal, de protección y demás bienes y obras conexas, pudiendo establecerse también con una o varias unidades de riego.

La transferencia de los distritos de riego a los usuarios organizados.

A la fecha existe 85 distrito de riego, que comprende una superficie de 3.4 millones de hectáreas en beneficio de 474,600 usuarios. Debido al proceso de transferencia de la infraestructura hidroagrícola a los usuarios organizados, que inició en 1989, se han constituidos 458 asociaciones civiles de usuarios (ACU) y 14 sociedades de responsabilidad limitada (SRL), en 84 distritos de riego; quedando parcialmente transferidos los distritos de riego 003, Tula y 100, Alfajayucan, en el estado de Hidalgo; y por transferir el distrito de riego 018, Colonias Yaquis, en Sonora. En el Cuadro 3.1 se especifica por organismo de cuenca y entidad federativa la cantidad de distritos de riego, ACU y SRL constituidas.

Cuadro 3.1. Cantidad de distritos de riego, ACU y SRL por organismo de cuenca y entidad federativa.

Organismo De Cuenca	Entidad Federativa	Distrito de Riego	ACU	SRL
I. Península de Baja California	Baja California	1	22	1
	Baja California Sur	1	1	
	Suma	2	23	1
II. Noroeste	Chihuahua	1	4	
	Sonora	5	62	2
	Suma	6	66	2
III. Pacífico Norte	Durango	1	5	
	Nayarit	1	4	
	Sinaloa	8	50	4
	Suma	10	59	4
IV. Balsas	Guerrero	2	8	
	Michoacán de Ocampo	4	20	

Organismo De Cuenca	Entidad Federativa	Distrito de Riego	ACU	SRL
	Morelos	1	5	
	Puebla	1	6	1
	Tlaxcala	1	5	
Suma		9	44	1
V. Pacífico Sur	Guerrero	3	3	
	Oaxaca	2	13	1
Suma		5	16	1
VI. Río Bravo	Chihuahua	6	23	2
	Coahuila de Zaragoza	3	3	
	Nuevo León	2	8	1
	Tamaulipas	3	24	1
Suma		14	58	4
VII. Cuencas Centrales del Norte	Coahuila de Zaragoza	1	20	
	Zacatecas	1	6	
Suma		2	26	
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	Aguascalientes	1	1	
	Colima	1	8	
	Estado de México	1	3	
	Guanajuato	2	15	1
	Jalisco	3	36	
	Michoacán de Ocampo	5	23	
Suma		13	86	1
IX. Golfo Norte	Hidalgo	2	3	
	Querétaro	1	3	
	San Luis Potosí	1	11	
	Tamaulipas	4	16	
	Veracruz de Ignacio de la Llave	1	6	
Suma		9	39	
X. Golfo Centro	Veracruz de Ignacio de la Llave	2	5	
Suma		2	5	
XI. Frontera Sur	Chiapas	4	8	
Suma		4	8	
XII. Península de Yucatán	Quintana Roo	1	1	
	Yucatán	1	7	
Suma		2	8	
XIII. Valle de México	Estado de México	4	5	
	Hidalgo	3	15	
Suma		7	20	
Total		85	458	14

Fuente: Elaboración propia con datos de la Gerencia de Distrito de Riego, CONAGUA, 2012.

En la figura 3.1. se muestra la distribución de la superficie de los distritos de riego por entidad federativa.



Figura 3.1. Superficie de riego de los distritos de riego por estado

Fuente: Gerencia de Distrito de Riego, CONAGUA, 2012.

A raíz de la transferencia de la infraestructura de los distritos de riego a las ACU y en su caso a las SRL, se convirtió en obligación de los usuarios, operar, conservar y administrar dicha infraestructura. Para ello, las ACU y SRL tiene la responsabilidad de contratar su personal técnico.

Por su parte la CONAGUA, con su personal, le corresponde las mismas obligaciones en la infraestructura no concesionada, como son las presas de almacenamiento y en algunos casos tramos de canales, drenes y caminos principales; entregar el agua en bloque a las organizaciones de usuarios; así como de supervisar las actividades que realizan dichas organizaciones, entre otras.

Del personal de la CONAGUA en los distritos de riego.

De acuerdo con un análisis realizado por la Gerencia de Distritos de Riego (GDR), para determinar el impacto del retiro voluntario promovido en 2003, se identificó que 60 técnicos expertos con plaza de mando medio decidieron concluir su relación laboral con la CONAGUA.

En esa fecha, se determinó la necesidad de contar con al menos 303 plazas de mando medio en los distritos de riego, sin embargo, solamente se contaba con 251 plazas, es decir el 72% de lo requerido, por lo que la GDR inició gestiones para que autoridades de la CONAGUA llegaran a negociar con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) la liberación de las 60 plazas del personal retirado, lográndose la anuencia de contratar 39 de ellas a través del denominado Programa Análogo, que consistió en fusionar plazas de personal de tabulador general que se jubilan para integrar las de mando medio. También se determinó la necesidad de 1,890 plazas de personal de tabulador general, pero que existían 1,014 personal de base que realmente no se requería.

Con información proporcionada por la Gerencia de Personal de la CONAGUA en 2013, existen 255 plazas de mando medio, y 22 plazas por liberar de las 39 acordadas con la SHCP; por lo que se puede concluir que en los distritos de riego es insuficiente el personal para atender las responsabilidades de la institución.

Esta situación continuará acentuándose porque no existe un programa de contratación del personal, aunado a que la antigüedad del personal actualmente laborando oscila entre los 25 y 28 años.

Uso de sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota para estimar superficie sembrada en distritos de riego.

En fechas recientes, por la baja disponibilidad de agua en las fuentes de abastecimiento se ha identificado en varios distritos de riego que los volúmenes de agua autorizado no han sido suficientes para proporcionar el servicio de riego de los cultivos planeados, de manera que las organizaciones de usuarios solicitan autorización de volúmenes adicionales para concluir el riego de los cultivos, y en algunos casos para lograr dichas autorizaciones han intervenido gobernadores de las entidades correspondientes.

De acuerdo con estudios realizados por el Colegio de Postgraduados y la Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación, A. C., en los distritos de riego 017, Región

Lagunera, Durango-Coahuila, y 038, Río Mayo, Sonora, respectivamente, utilizando Sistemas de Información Geográfica y Técnica de Percepción Remota, determinaron que la situación anterior, obedece a que los usuarios establecen mayores superficies a lo planeado, y generalmente en cultivos de mayor demanda de agua, cifras que no se reportaron de manera oficial por parte del personal técnico de las asociaciones civiles de usuarios y en su caso de la sociedad de responsabilidad limitada.

Las estadísticas agrícolas de los distritos de riego.

En lo referente a las estadísticas de producción agrícola, la CONAGUA, a partir del año agrícola 1996-1997 ha publicado de manera sistemática la superficie sembrada y cosechada, producción y valor de la producción, así como de los volúmenes de agua utilizados. En el cuadro 3.2 se presenta la información a nivel anual.

Cuadro 3.2. Superficie sembrada y cosechada, producción, valor de producción y volumen de agua utilizada en distritos de riego, años agrícolas 1996-1997 al 2011-2012.

Año agrícola	Superficie Sembrada (ha)	Superficie Cosechada (ha)	Producción (toneladas)	Valor de Producción (millones \$)	Volumen bruto (hm ³)
1996-1997	3,061,411	2,962,604	35,878,319	35,306	32,668
1997-1998	2,878,755	2,773,863	34,832,640	39,167	29,685
1998-1999	2,707,975	2,630,791	32,513,920	35,402	24,795
1999-2000	2,661,878	2,604,049	37,601,290	41,923	27,466
2000-2001	2,664,562	2,597,623	37,869,206	39,567	24,807
2001-2002	2,698,707	2,602,420	36,952,430	43,058	26,161
2002-2003	2,652,255	2,598,765	38,286,267	43,939	24,329
2003-2004	2,611,276	2,528,979	39,870,572	50,679	23,702
2004-2005	2,791,901	2,749,761	41,782,340	52,800	28,577
2005-2006	2,783,468	2,757,488	42,966,080	55,936	30,401
2006-2007	2,840,078	2,814,917	44,399,370	86,270	29,160
2007-2008	2,889,202	2,863,931	45,413,386	80,504	31,052
2008-2009	2,959,441	2,949,967	44,291,566	82,441	32,219
2009-2010	2,014,714	2,887,641	43,371,670	84,996	28,034
2010-2011	3,418,434	2,859,890	42,450,160	96,320	34,776
2011-2012	2,795,908	2,763,809	47,677.350	112,803	25,676
Promedio	2,734,102	2,746,656			27,915

Fuente: Elaboración propia con datos de la Gerencia de Distrito de Riego, CONAGUA, 2013.

Si bien se ha generado las estadísticas de producción agrícola con el apoyo del personal técnico de las asociaciones civiles de usuarios, el rendimiento de los cultivos se obtiene generalmente tomando como referencia de los buenos productores. Sin embargo, por la variabilidad de los suelos, así como el paquete tecnológico utilizado, el rendimiento de los cultivos tiene una variabilidad espacial, misma que puede estimarse con las técnicas de percepción remota, con metodologías en proceso de validación.

Por lo que a mediano plazo deberá ser un quehacer cotidiano del personal de la CONAGUA en los distritos de riego, apoyarse de técnicas de la información (SIG y TPR), para ello se requerirá de la formación de capital humano mediante la capacitación correspondiente, la adquisición de equipo necesario y de imágenes de satélite, según corresponda.

3.2. Caracterización de suelos agrícolas.

La caracterización analítica de los suelos, a partir de muestreos, se lleva a cabo en laboratorio para determinar las variables necesarias en la clasificación y evaluación posterior. En el cuadro 3.3. se muestra una relación de variables analíticas, principalmente físicas y químicas, consideradas en los reconocimientos convencionales de suelo. Los tipos y metodologías de análisis a realizar en cada caso dependen también de la finalidad del reconocimiento (USDA, 1972; Van Reeuwijk, 2006; Gregorich y Carter, 2007). Con toda la información de campo y laboratorio ya disponible se puede proceder a la clasificación natural o taxonómica de los suelos representados por cada perfil.

Existen múltiples tratados donde se detallan las distintas etapas a seguir el reconocimiento de suelos, sin embargo el Soil Survey Manual (USDA, 1951) con sus diversas revisiones sigue siendo el más ampliamente utilizado. Para las determinaciones analíticas de laboratorio en los reconocimientos de suelos, también las normas del USDA (1972) y del ISRIC (Van Reeuwijk, 2006) son frecuentemente empleadas.

Una forma simplificada y abstracta de mostrar los tipos de suelos caracterizados es a través de un mapa. El grado de simplificación y abstracción depende de la escala de estudio, por lo que los errores e incertidumbres son componentes propios de cada mapa.

Toda esta información puede ser incluida dentro un sistema de información geográfica, y por el cual se pueden generar distintas relaciones y planos que nos permitan visualizar las zonas de estudio.

Cuadro 3.3. Variables principales a considerar en el reconocimiento convencional de suelo.

Atributo		
<i>Variables de lugar</i>	<i>Variables Físicas</i>	<i>Variables Químicas</i>
Tipo de suelo	Color.	
Clasificación Taxonómica.	Textura.	Materia Orgánica
Localización	Estructura.	Reacción.
Altitud.	Consistencia.	Contenido de Carbonatos.
Material Original.	Densidad Aparente.	Salinidad.
Fisiografía.	Porosidad.	Saturación en Sodio
Pendiente.	Infiltración.	Macro - nutrientes

Atributo		
<i>Variables de lugar</i>	<i>Variables Físicas</i>	<i>Variables Químicas</i>
Pedregosidad.	Conductividad Hidráulica.	Elementos Tóxicos.
Erosión	Compactación	
Drenaje.	Retención de agua.	
Estado de Humedad.		

Fuente: Adaptación de USDA (1951).

Propiedades y características físicas de los suelos.

La granulometría de los suelos se clasifica según el tamaño de sus partículas minerales y se denomina textura del suelo. Cada término textural incluye la composición cuantitativa de arena, limo y arcilla. La escala granulométrica de Atterberg es aceptada por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo.

El análisis granulométrico permite interpretar la génesis y propiedades de los suelos, puesto que las rocas dan una determinada clase textural la cual es más evidente cuanto más joven sea el suelo porque hereda la textura del material original. El clima condiciona la textura según su agresividad y por ello en zonas áridas son frecuentes las gruesas y finas en climas húmedos y templados. El relieve condiciona el transporte de las partículas. El tiempo tiende a dar una mayor alteración y favorece el aumento de la fracción arcilla.

La relación entre la cantidad de arcilla del material original y la de cada uno de los horizontes de un suelo refleja el grado de evolución de un suelo, donde la mayoría de las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas son función de la granulometría, como es el caso de la estructura, consistencia, aireación, permeabilidad, retención de agua, lixiviación, capacidad de cambio, reserva de nutrientes, entre otras.

La porosidad representa el porcentaje total de huecos que están entre el material sólido de los suelos, del cual depende el flujo de las fases líquida y gaseosa, e influyen sobre la actividad biológica. Esta característica se cuantifica de manera indirecta en las medidas de pH y de densidad aparente.

El suelo por ser un cuerpo poroso tiene dos densidades: real y aparente. En el primer caso, es la referencia de sus partículas sólidas y el segundo se incluye en la medición el volumen de poros. La densidad aparente considera la porosidad total del suelo, en la cual se valora la compactación y facilidad del flujo de agua y aire contenidos en él.

El conocer las características físicas de los suelos, como son la capacidad de campo, el porcentaje de marchitamiento permanente, el peso específico aparente y la profundidad de la zona radical de los cultivos nos permite estimar el cuándo y el cuánto regar (Palacios, 2011).

La experiencia práctica y la investigación han mostrado la importancia de manejar adecuadamente entre el balance de agua y el aire del espacio poroso, para proveer tanto las necesidades de agua de las plantas como la aireación en el sistema radicular. Este importante balance tiene implicaciones en el grado de crecimiento de las plantas e inclusive el desarrollo de enfermedades, entre otros.

Propiedades y características químicas de los suelos

Las propiedades y características químicas de los suelos están divididas en dos grupos: a) las que influyen sobre el ambiente químico edáfico y que pudiesen alterar el desarrollo de las plantas de interés comercial, así como con la eficiencia de uso de los fertilizantes; y b) las que tienen que ver con la disponibilidad de los nutrientes para los cultivos agrícolas.

Las plantas son autótrofas, por lo que sintetizan sus alimentos mediante la fotosíntesis y de elementos químicos contenidos en la atmósfera (C, O y H) y del suelo. De estos últimos, se dividen en macronutrientes primarios (N, P y K), macronutrientes secundarios (Ca, Mg y S) y micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn, B, Cl y Mo). Cuando el suelo no es capaz de proveer los nutrientes que demanda la planta, es necesario adicionarlos a través de insumos (orgánicos o inorgánicos), pero el abuso de los fertilizantes en lugar de incrementar el rendimiento del cultivo ocasiona pérdidas económicas y llega a causar efectos nocivos al ambiente.

3.3. Los sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota.

3.3.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), es un sistema de programas, computadoras, datos y personas para manipular, analizar y presentar información ligada a una localización espacial determinada. Por lo que un SIG:

- Es un sistema de información compuesto de hardware, software, datos y procedimientos.
- Trabaja con una base de datos que posee información espacial.
- Cuenta con funciones especializadas de captura, almacenamiento, transformación, modelamiento, análisis y presentación de datos espaciales, para la resolución de problemas de naturaleza geográfica.



Figura 3.2. Mapas temáticos de recursos naturales

Fuente: Manual de ArcView 3.2. 2010.

La mayor utilidad de un SIG es que son sistemas con una herramienta imprescindible para el estudio y cuantificación de los recursos naturales en general y para la caracterización del medio físico en particular, por lo que han llegado a ser tan necesarios como los procesadores de texto y las hojas electrónicas.

Elementos de un SIG

Un SIG se compone básicamente de cinco elementos que son: Equipo (Hardware), Programas (Software), Base de Datos, Recurso Humano y Métodos o Procedimientos de operación del sistema. En la Figura 3.3 se muestra gráficamente:

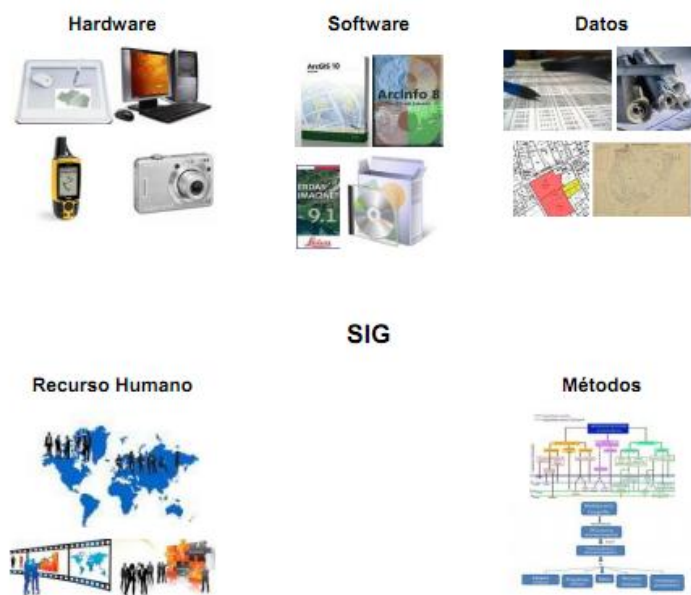


Figura 3.3. Elementos de un SIG

Fuente: Manual de ArcView 3.2. 2010.

Equipos (Hardware): Se refiere a la estructura de cómputo sobre la cual opera el SIG. Son los elementos tangibles en el cual opera el SIG: CPU, Monitor, Teclado, Tablero digitalizador, Impresora o Plotter, Scanner, entre otros.

Programas (Software): Son las herramientas lógicas que almacenan y procesan la información geográfica. Una de las características de estos programas es su desarrollo, el cual permite un manejo óptimo y a la vez sencillo para el usuario final, gracias a su interfaz grafica.

- Sistema Operativo.
- Programas de Aplicación.
- Herramientas para la entrada y manipulación de la información geográfica.

- Un sistema de manejador de base de datos.
- Herramientas que permitan búsquedas geográficas, análisis y visualización.
- Interface gráfica para el usuario para acceder fácilmente a las herramientas.

Base de Datos: Una base de datos geográfica espacial es una base de datos con extensiones que dan soporte de objetos geográficos permitiendo el almacenamiento, ordenamiento, consulta y manipulación de información geográfica y datos espaciales. Si bien algunas de estas bases de datos geográficas están implementadas para permitir también el uso de funciones de geoprocésamiento, el principal beneficio de estas se centra en las capacidades que ofrecen para el almacenamiento de datos especialmente georreferenciados. Algunas de estas capacidades incluyen un fácil acceso a este tipo de información mediante el uso de estándares de acceso a bases de datos como los controladores ODBC, la capacidad de unir o vincular fácilmente tablas de datos o la posibilidad de generar una indexación y agrupación de datos espaciales.

Recurso humano: La tecnología de los SIG está limitada si no se cuenta con el personal que opera, desarrolla y administra el sistema; y que establece planes para aplicarlo en problemas del mundo real. Cuando se define un SIG se tiende a limitar a equipos y programas como el sistema completo, relegando tal vez el elemento más primordial: El talento humano que hace funcionar eficazmente todo el sistema.

Métodos o Procedimientos: Un SIG operará acorde con un plan bien diseñado y con unas reglas claras del procedimiento, que son los modelos y las prácticas operativas características de cada organización.

Funciones de un SIG

Dentro de las funciones básicas de un SIG están las siguientes:

- Captura de la información.- Ésta se logra mediante procesos de digitalización, procesamiento de imágenes de satélite, fotografías, videos, procesos aerofotogramétricos, entre otros.

- Procesamiento de un SIG.- Hace referencia a la parte del análisis que se puede realizar con los datos gráficos y no gráficos, se puede especificar la función de vecindad de objetos sobre un área determinada, del mismo modo, se puede especificar la función de coincidencia, que se refiere a la superposición de objetos dispuestos sobre un mapa.
- Determinar qué características tiene un lugar geográfico dado. Por ejemplo, consultar el avalúo y las líneas de construcción de las propiedades ubicadas en una determinada zona geográfica.
- Determinar la ubicación geográfica de los lugares que cumplen ciertas condiciones
- Determinar qué ha cambiado en el tiempo.
- Determinar la ruta entre dos lugares geográficos que cumpla con ciertas características (más corta, más rápida, de mayor valor, etc.).
- Distinguir y comparar la distribución de fenómenos y entender los procesos que dan cuenta de su distribución.
- Modelar fenómenos posibles. Por ejemplo, determinar las áreas geográficas afectadas por un revaluó con ciertas características.

3.3.2. Técnicas de Percepción Remota (TPR).

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

Este tipo de tecnología puede usarse para el monitoreo de características biofísicas importantes y actividades humanas sobre la tierra. Algunas aplicaciones importantes del análisis mediante sensores remotos son:

- Estimaciones y monitoreo ambiental (crecimiento urbano, desechos peligrosos, etc.).
- Detección y monitoreo de cambios globales (destrucción de la capa de ozono, deforestación, calentamiento global, etc.).

- Agricultura (condición de los cultivos, predicción de rendimientos, erosión de suelos, etc.).
- Explotación de recursos no renovables (minerales, petróleo, gas natural, etc.).
- Recursos naturales renovables (suelos, bosques, océanos, etc.).
- Meteorología (Dinámica atmosférica, predicción del tiempo).
- Generación de mapas (topografía, uso del suelo, Ingeniería Civil, etc.).

Los datos obtenidos a partir de los sensores remotos son extensivos y exhaustivos, ya que permiten obtener información muy detallada de grandes áreas. Por lo mismo, estas técnicas son muy importantes en aquellas disciplinas relacionadas con la generación de inventarios, manejo de los recursos naturales y sistemas de producción agropecuarios.

El objetivo principal del análisis mediante sensores remotos, es identificar los materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella ocurren a través de la respuesta espectral de los mismos.

La identificación de objetos terrestres, es un problema de clasificación de los píxeles de una imagen, implica su segmentación mediante la adjudicación de etiquetas o clases a los píxeles de la misma. En este proceso existe una pérdida de información, ya que se pasa de un número elevado de combinaciones espectrales que están presentes en una imagen, a un número reducido de ciertas clases temáticas.

La utilidad de los algoritmos de clasificación son diferentes y variados, ya que permiten realizar procesos de cartografía temática como pueden ser: suelos, vegetación, etc.; la estimación de superficies ocupadas por diferentes usos o cultivos; determinación de superficies inundadas o urbanizadas; etc.

Puntos básicos de la percepción remota

La percepción remota implica la medición de la energía que es reflejada o emitida por objetos, sin entrar en contacto con ellos. Esta energía electromagnética, viaja por el espacio

como ondas electromagnéticas. Las ondas se diferencian por su longitud, que es la distancia entre dos crestas sucesivas de una onda.

El espectro electromagnético consiste en todas las longitudes de onda de la energía electromagnética (Figura 3.4). 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. Estos distintos tipos de energía electromagnética son categorizados por su posición, o longitudes 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 100 m.

Usualmente solo una pequeña porción, o banda, de todo el espectro es de interés en la percepción remota. Debido a que la luz del sol es la fuente más común de energía usada en la percepción remota, las longitudes de onda predominantes en la luz solar son las más importantes. Para las aplicaciones agronómicas, la porción de interés es la que va desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR). La mayor parte de la luz solar está en estas bandas y tiene longitudes de onda entre 0.2 y 0.7 micrómetros.

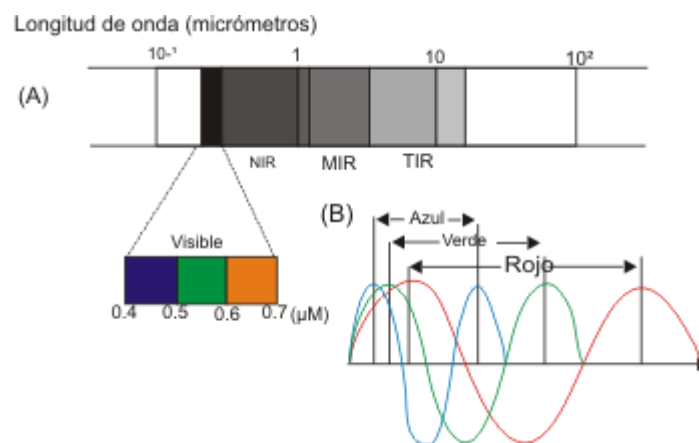


Figura 3.4. Espectro electromagnético

Fuente: Palacios, 2007.

La luz visible, la porción del espectro que puede ser detectada por el ojo humano, se encuentra entre el UV y el IR. La banda del visible se extiende de 0.4 a 0.7 micrómetros (Azul 0.4-0.5 μm , Verde 0.5-0.6 μm y Rojo de 0.6-0.7 μm). El Infrarrojo Cercano queda comprendido de: 0.7-1.3 μm ; el Infrarrojo Medio: 1.3-8.0 μm ; el Infrarrojo Lejano o Térmico: 8.0-14 μm

Justo contiguo a la región del rojo se encuentra la banda del infrarrojo cercano (NIR, por sus iniciales en inglés). No existe una distinción clara entre el NIR y el IR. Esta región del infrarrojo cercano, aunque es indetectable por el ojo humano, puede ser detectada por sensores artificiales y es muy importante en la percepción remota.

Las regiones espectrales de más uso en la teledetección (Cuadro 3.4), son las que se encuentran entre la zona visible, hasta la de microondas. Estas regiones son de interés debido a que son ventanas atmosféricas relativamente transparente.

Cuadro 3.4. Valores espectrales usada en la teledetección

Nombre	Longitud de onda	Fuente de radiación	Propiedades superficiales de interés
Visible (V)	0.4-0.7 μm	Solar	Reflectancia
Infrarrojo cercano (NIR)	0.7-1.1 μm	Solar	Reflectancia
Infrarrojo onda corta (SWIR)	1.1-1.35 μm 1.4-1.8 μm 2-2.25 μm	Solar	Reflectancia
Infrarrojo onda media (NWIR)	3.4 μm 4.5-5 μm	Solar-Térmico	Reflectancia y temperatura
Infrarrojo Térmico (TIR)	8-9.5 μm 10-14 μm	Térmico	Temperatura
Microonda Radar	1 mm-1 m	Térmico(pasivo) Artificial(activo)	Temperatura(pasivo) artificial(activo)

Fuente: Palacios, 2007.

Las firmas espectrales

La resolución espacial obtenida por la mayoría de los satélites, es baja para poder identificar los objetos según su forma o detalles espaciales. Por esta razón, suele utilizarse la medición de la reflectancia espectral. A estos valores se les denomina “*Firma espectral del objeto*”. En la figura 3.5 se muestra firmas espectrales de objetos.

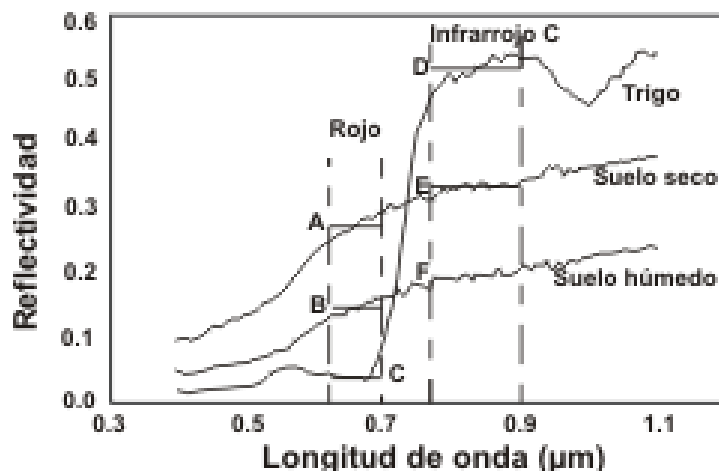


Figura 3.5. Firmas espectrales de diferentes objetos, base de los índices de Vegetación.

Fuente: Palacios, 2007

Los sensores ópticos de los satélites

Los sensores ópticos de los satélites, captan una imagen en forma casi instantánea para cada píxel, en tres dimensiones, x , y , λ (Figura 3.6) en el orden de los microsegundos para el sensor por barrido (whiskbroom) o de milisegundos para el sensor por empuje (pushbroom).

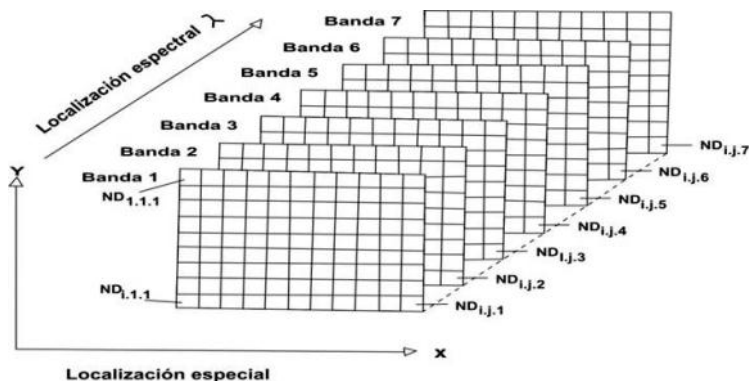


Figura 3.6. Imágenes en tres dimensiones que captan los satélites.

Fuente: Palacios, 2007.

Características de la exploración temporal

Uno de los aspectos más importantes de la información que es recabada por los satélites, es su temporalidad. Esta varía de acuerdo al tipo de satélite, su ruta de exploración y su

ubicación espacial. Los satélites como el LANDSAT y SPOT, tienen órbitas polares que están sincronizadas con el movimiento del sol, mientras que otros satélites como el GOES, están en órbitas geoestacionarias y pueden tomar imágenes con alta resolución temporal. En el cuadro 3.5. algunas características relevantes de algunos satélites.

Cuadro 3.5. Características relevantes de algunas imágenes de satelitales disponibles

Sistema	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Escala Max. Aprox.	Año de Inicio
WorldView 2	0.5 / 1.8 m	8 bandas	1:2,500	2009
WorldView 1	0.5 m	1 banda	1:2,500	2007
QuickBird	0.6 / 2.4 m	4 bandas	1:3,500	2002
SPOT 5	2.5 / 5 / 10 m	4 bandas	1:10,000	2002
RapidEye (5 satélites)	5 m	5 bandas	1:15,000	2008
TerraSar X (Radar)	1 - 16 m	Banda X, pol. HH, VV, HV, VH	1:6,000	2007
RadarSar 2 (Radar)	3 - 100 m	Banda C, pol. HH, VV, HV, VH	1:15,000	2008
Landsat 5 *	30 / 120 m	6 + 1 bandas	1:75,000	1984
Landsat 7	15/30m/60	1 + 6 + 1 bandas		1999
ASTER **	15 / 30 / 90 m	4 + 6 + 5 bandas	1:50,000	1999
Landsat 8	15 / 30 / 100 m	8 + 2 bandas	1:50,000	2013

Fuente: www.visiongeo.com/Page/ImagenesSatelitales.aspx

3.3.3. La evapotranspiración y su determinación.

La evapotranspiración (ET), es la combinación de dos procesos por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (Allen et al, 2006).

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante. Para que ocurra la evaporación, esto es, al cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía, proveniente principalmente de la radiación solar directa, y en menor grado, la temperatura ambiente del aire. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante.

La radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación; y si la superficie evaporante es la superficie del suelo, los factores que afectan son: el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo, la cantidad de agua disponibles en la superficie, capacidad de retención de la humedad, entre otros.

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de sus estomas. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento.

Para la determinación de la transpiración debe considerarse: la radiación; la temperatura del aire; la humedad atmosférica; la velocidad del viento; el contenido de agua del suelo; la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces; la salinidad del suelo y del agua de riego; el tipo, variedad y etapa de desarrollo del cultivo; el medio donde se produce; las prácticas de cultivo; entre otros.

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente. La evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo, y la disponibilidad del agua en el perfil del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el follaje del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal.

La forma de determinar la ET, puede ser por métodos directos e indirectos. Para determinarla en forma directa, se realiza experimentalmente para ello se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance de agua del

suelo en lisímetros. A pesar de que su determinación en forma experimental no es apropiada para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de ET obtenidas con otros métodos indirectos.

A continuación se enuncian algunos métodos para la determinación de la evapotranspiración:

- a) Método de balance de energía y microclimáticos.
- b) Método de transferencia de masa.
- c) Balance de agua en el suelo.
- d) Lisímetros.
- e) Calculado con datos meteorológicos.
- f) Estimación con el tanque de evaporación.

Por considerar relevante se describen los métodos de balance de energía y microclimáticos y del cálculo mediante datos meteorológicos.

3.3.3.1. Métodos de balance de energía y microclimáticos.

La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía; esto es, *la energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo.*

La ecuación para una superficie de evaporación se puede escribir como:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (3.1)$$

Dónde:

R_n = es la radiación neta;

H=es el calor sensible;

G= es el flujo de calor del suelo, y

λET = es el flujo de calor latente.

Esta ecuación solamente considera flujos verticales y se ignora la tasa neta de energía que se transfiere horizontalmente por advección. Por lo tanto se aplica solamente a superficies grandes y extensas de vegetación homogénea. La ecuación está restringida a cuatro componentes: R_n , λET , H y G. No se considera otros términos de energía, tal como el calor almacenado y liberado de la planta, o la energía utilizada en actividades metabólicas, porque sólo utilizan una pequeña fracción de la radiación solar diaria y pueden ser considerados despreciables cuando se comparan con los otros cuatro componentes.

El flujo de calor latente (λET) representa la fracción de la evapotranspiración que puede ser derivada de la ecuación del balance de energía si todos los otros componentes son conocidos. La radiación neta (R_n) y el flujo de calor del suelo (G) pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos. Por el contrario la medición del calor sensible (H) es compleja y sus valores no pueden obtenerse fácilmente. La determinación de H incluye mediciones precisas de los gradientes de temperatura por encima de la superficie.

3.3.3.2. Evapotranspiración calculada con datos meteorológicos.

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo, la Evapotranspiración (ET) se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Como resultado de una consulta de expertos lleva a cabo en mayo de 1990, el método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o). La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (K_c) que relacionan la ET_c con la ET_o . La ET de superficies cultivadas bajo condiciones no estándar se ajusta mediante un coeficiente de estrés hídrico (K_s) o modificando el coeficiente de cultivo.

Es de señalar que, en 1948, Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método conocido como combinado fue desarrollado posteriormente por muchos investigadores y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia. Aunque el proceso del intercambio en la vegetación es demasiado complejo para ser descrito completamente por los dos factores de resistencia mencionados, con esta estimación se obtienen buenas correlaciones entre los valores medidos y calculados de evapotranspiración, especialmente en el caso de una superficie de pasto uniforme (referencia).

La ecuación combinada de Penman-Monteith es:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (3.2)$$

Dónde:

λET = Evapotranspiración (mm día⁻¹).

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹).

G = Flujo del calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹).

ρ_a = densidad media del aire a presión constante.

c_p = calor específico del aire.

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación (kPa °C⁻¹).

γ = Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

r_s, r_a = Resistencias superficial (total) y aerodinámica.

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = Presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor (kPa)

Ahora bien, la ecuación de FAO Penman-Monteith, fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0.23, y que representa a

la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado.

Y dicha ecuación puede ser derivada de la ecuación original de Penman-Monteith y las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3.3)$$

Dónde:

ET_0 =Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

R_n =Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹).

R_a =Radiación extraterrestre (mm día⁻¹).

G = Flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹).

T= Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).

u_2 =Velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹).

e_s =Presión de vapor de saturación (kPa).

e_a =Presión real de vapor (kPa).

$e_s - e_a$ =Déficit de presión de vapor (kPa).

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)

γ = Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Y para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o ser convertidos a 2 m de altura, sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua.

Allen et al, 2006, señala que, no se puede esperar que ninguna ecuación formulada para el cálculo de la evapotranspiración y basada en datos climáticos, determine la evapotranspiración perfectamente, bajo diferentes situaciones climáticas específicas. Esto debido principalmente a la simplificación en la formulación y los errores en la recopilación de los datos climáticos. Es probable que instrumentos de precisión, bajo condiciones

ambientales y biológicas completamente controladas, demuestren que la ecuación de FAO Penman-Monteith se desvía ocasionalmente de mediciones reales de la ETo del pasto.

En caso de que se realicen comparaciones de la ecuación FAO Penman-Monteith con mediciones directas de ETo, es importante que la ecuación completa de Penman-Monteith y las fórmulas asociadas para el cálculo de r_a y r_s se consideren de tal manera que se tomen en cuenta las variaciones en ET debidas a cambios en la altura del pasto evaluado.

Estimación de la evapotranspiración con sensores remotos.

La mayor disponibilidad y mejor calidad de información extraíble desde los sensores remotos satelitales, ha permitido incrementar la precisión en las estimaciones de Evapotranspiración a gran escala, enfocado a cuantificar los diferentes requerimientos de agua por ejemplo en cuencas de tipo agrícola-forestal.

Existen principalmente dos enfoques en la estimación de la evapotranspiración utilizando los sensores remotos:

1. Basado en la *relación respuesta espectral - índices de vegetación - coeficiente de cultivo*, unido a la estimación de evapotranspiración de referencia (ET_0) utilizando datos de estaciones meteorológicas.
2. Basado en el *balance de energía en superficie*, en que ET (o λET) es obtenida como balance residual. La condición de contorno básica en estos modelos la establece la temperatura de la superficie, tomando además en consideración variables meteorológicas y otros datos derivados de las imágenes satelitales referente a características de la vegetación

Aproximaciones basadas en los índices de espectrales de vegetación.

Los modelos que relacionan ET e índices de vegetación se basan en el hecho que ambos parámetros se ven afectados por elementos meteorológicos como la temperatura, radiación solar y déficit de presión de vapor. Existen diversos métodos que consideran un índice espectral para la estimación de ET, donde investigaciones desarrolladas por Nemani and Running (1989), Hope y McDowell (1992), y Moran et al (1994), entre otras, confirman la correlación negativa existente entre índices de vegetación (IV) y temperatura superficial (TS).

La ventaja de utilizar índices de vegetación es que eluden la necesidad de resolver explícitamente el balance de energía en una superficie, estimando por ejemplo los índices de estrés hídrico (CWSI) (Jackson et al., 1981) y el índice de déficit de agua (WDI) (Moran et al., 1994). Este último índice se refiere también al cociente entre ET real y ET potencial (ET_R/ET_P), con lo que se evidencia la estrecha relación entre ET y el estrés hídrico vegetal.

Estimación de la evapotranspiración con balance de energía.

Bastiaanssen et al., 1998, desarrollo el algoritmo denominado Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) y Allen, et al, 2007 y la Universidad de Idaho, EU, implementaron el Mapping Evapotranspiration at High Resolution (METRIC), donde ambos utilizan imágenes digitales de los satélites Landsat o de otros satélites que registran la radiación térmica de infrarrojos, además de la radiación visible e infrarrojo cercano.

La Evapotranspiración (ET) se calcula pixel por pixel respecto de la imagen instantánea que se dispone. El proceso consiste en un balance energético completo de cada píxel, donde ET se predice a partir de la cantidad residual de la energía restante del balance de energía clásica:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (3.4)$$

Donde:

λET = Flujo de calor latente (Wm^{-2}). Se convierte en ET, expresado como una profundidad de agua por hora, dividiendo por el calor latente de vaporización;

R_n = Flujo de la radiación neta en la superficie (Wm^{-2});

G = Flujo de calor del suelo (Wm^{-2});

H = Flujo de calor sensible del aire (Wm^{-2});

La ventaja de ET por balance energético es que se obtiene la ET Real en vez de la ET Potencial que está típicamente representada por coeficientes de cultivo (K_c). La ET Real puede ser menor que el potencial debido a los efectos de la escasez de agua, uniformidad de riego, la salinidad del suelo y del agua empleada, la densidad de la vegetación y las enfermedades en los cultivos. Una ventaja adicional de esta metodología, es que no necesariamente se requiere identificar los cultivos establecidos.

METRIC calcula la ET a través de una serie de cálculos que estiman la radiación neta en la superficie, el flujo del calor del suelo y el flujo del calor sensible del aire; de manera que el valor residual entre la Radiación Neta en la superficie del suelo (R_n) menos el flujo del calor del suelo (G) y del flujo de calor sensible del aire (H), representa la energía consumida por la evaporación, es decir, la energía que se utiliza para convertir el agua líquida en vapor de agua.

Es de señalar que el uso de esta metodología se requiere al menos imágenes de resolución de al menos 30 metros, así como datos climatológicos horarios.

Además, debido a que los satélites orbitan alrededor de 700 km sobre la superficie, la precisión de la estimación de la ET no es perfecta, porque se ven afectados de la aerodinámica en la superficie que son invisibles para el satélite, por lo que se hacen hipótesis acerca de la caracterización de los píxeles aerodinámicas específicas, entre ellas la rugosidad aerodinámica y cerca de los gradientes de temperatura superficial del aire.

El Flujo de la Radiación Neta (R_n) representa la energía radiante real disponible en la superficie, y se calcula restando todos los flujos radiantes entrantes y salientes, expresada en la siguiente ecuación:

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (3.5)$$

Donde:

$R_{S\downarrow}$ = Radiación de onda corta entrante (Wm⁻²);

α = albedo de la superficie (adimensional);

$R_{L\downarrow}$ = Radiación de onda larga entrante (Wm⁻²);

$R_{L\uparrow}$ = Radiación emitida de onda larga saliente (Wm⁻²);

ϵ_0 = Emisividad térmica de la superficie (adimensional). La $(1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow}$ representa la fracción de la radiación de onda larga entrante que es reflejada desde la superficie.

De la ecuación anterior, la cantidad de radiación de onda corta ($R_{S\downarrow}$) que queda disponible en la superficie está en función del albedo (α).

El Flujo de calor del suelo (G) es la tasa de almacenamiento de calor en el suelo y la vegetación. Bastiaansse (1995) desarrollo una ecuación empírica, que representa valores cercanos al medio día:

$$\frac{G}{R_n} = T_s(0.0038 + 0.007\alpha)(1 - 0.98 NDVI^4) \quad (3.6)$$

Donde:

T_s = es la temperatura de la superficie (° C).

α = es el albedo de la superficie.

NDVI= es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

De manera que G se calcula multiplicando el valor de R_n calculada y el resultado de la parte derecha de la ecuación anterior.

El Flujo de Calor Sensible (H), es la tasa de pérdida de calor al aire por convección y conducción, debido a una diferencia de temperatura. Se calcula utilizando la siguiente ecuación unidimensional aerodinámica, basado en gradiente de temperatura para el transporte de calor:

$$H = (\rho \times c_p \times dT) / r_{ah} \quad (3.7)$$

Donde:

ρ = es la densidad del aire (kg/m³)

C_p = es el calor específico del aire (1004 J/kg/K)

dT = es la diferencia de temperatura ($T_1 - T_2$) en °K entre las dos alturas (Z_1 y Z_2).

r_{ah} = es la resistencia aerodinámica al transporte de calor (s/m).

3.4. Aplicaciones de los sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota en la agricultura.

Los recientes avances en agricultura de precisión y en la cartografía de la cubierta terrestre pueden hacer posible el monitoreo y la estimación precisa del estado del cultivo en una región determinada a escala predio, debido al bajo costo adquisición de imágenes, su cobertura espacial y la posibilidad de generar los índices de sus bandas espectrales (Zhang y Anderson, 2005).

Ante esta situación, las técnicas de Percepción Remota (TPR) en especial los sistemas LANDSAT, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Sistemas de Geoposicionamiento (GPS) son herramientas útiles en la identificación y monitoreo de grandes áreas agrícolas, estimación de la producción y detección de estrés hídrico; a través del análisis de la distribución espacial, el mapeo de las diversas zonas productivas, direccionamiento del muestreo y observación en campo, promoviendo una mayor evaluación del potencial productivo de las áreas sembradas dentro de la agricultura de precisión o de sitio específico, basada en la variabilidad espacial del suelo y parámetros de campo de los cultivos (Ueno et al., 2005; Soria, 2004; Rudorff, 1990; Epiphanyo, 1996).

En este sentido, los SIG brindan la posibilidad de vincular espacialmente distintas fuentes de información, y a partir del análisis de las imágenes generadas por sensores remotos, es

posible obtener información de las características de las coberturas vegetales, entre ellas, el cálculo de índices de vegetación a partir de los valores de reflectividad (Hatfield, 2008).

Por lo tanto, la percepción remota presenta una visión sinóptica de las zonas agrícolas y posibilita un seguimiento temporal de las fases de desarrollo en grandes áreas agrícolas con un gran potencial para su uso en el cultivo (Simões Dos Santos, 2003; 2005).

Utilización de los índices de vegetación para estimar rendimiento

Almeida et al. (2006), demostró el uso de índices de vegetación, análisis de componentes principales y datos históricos de producción para la estimación de productividad. El método requirió la transformación de datos espectrales (DN) de imágenes Landsat ETM+ (30 m) y ASTER (15 m) en valores de producción. Los resultados reportaron errores de 5.65 por ciento y 2.67 por ciento para Landsat ETM+ y ASTER respectivamente, al utilizar en las transformaciones datos históricos de un año. Los errores fueron aún menores al incorporar datos históricos de dos años para la transformación de los valores espectrales, 0.90 por ciento para Landsat ETM+ y 0.89 por ciento para ASTER.

Por su parte, Lucas (2007) y Fortes (2003), mencionaron que el NDVI es un método sensible que normaliza los efectos de la topografía y puede ser utilizado para diagnosticar parámetros biofísicos con un alto grado de correlación y confiabilidad como indicador del área foliar, biomasa, cobertura vegetal del suelo, actividad fotosintética, productividad y modelado de la fenología. Ji-hua y Bingfang (2008), Machado (2007), Frasson (2007), Krishna Rao (2002) y Simões Dos Santos (2005), concluyeron que es una medida cuantitativa del vigor (variaciones de biomasa) del cultivo, lo cual denota la estimación de la biomasa total y el estatus de salud de la plantación y se relaciona directamente al rendimiento de campo.

En Colombia, Murillo et al. (2010) utilizó información del producto MOD13 (EVI) derivada del sensor MODIS (250 m), para evaluar la relación entre los datos acumulados del índice con datos de producción en el Valle del Cauca. Los resultados presentaron un

coeficiente de determinación r^2 de 0.83 a partir de los datos acumulados de EVI. En adición, el estudio evaluó la capacidad de utilizar datos acumulados del índice de vegetación en meses previos a la cosecha (predicción de producción), con el fin de permitir a los productores realizar las medidas correctivas necesarias en el manejo agronómico para elevar la producción.

Otro estudio realizado por Schmidt et al. (2000) usando imágenes de baja resolución del sensor AVHRR (1.1 km), demostró que la resolución espacial de las imágenes tiene gran influencia sobre los resultados en las estimaciones de producción. Al utilizar el NDVI para estimar producción, los resultados explicaron solamente un 46 por ciento de variabilidad de los datos reales de producción. Ambos estudios recomiendan que la utilización de técnicas para la estimación de parámetros biofísicos del cultivo a partir de los sensores remotos, como por ejemplo el índice de área foliar, puedan mejorar los resultados de estimación de la producción de caña de azúcar.

Otro estudio relacionado con la estimación de productividad y biomasa a partir de información derivada de sensores remotos, lo llevó a cabo Simões et al. (2005). Utilizando espectrometría en campo, simuló bandas equivalentes del Landsat ETM+, demostrando la alta correlación que existe entre producción y biomasa con el NDVI y el RVI, alcanzando un valor de r^2 de 0.88. Integrando estos índices de vegetación a variables agronómicas, como índice de área foliar y número de tallos por metro, el autor desarrolló modelos de regresión múltiple para estimar producción y biomasa. Los modelos llegaron a explicar más del 95 por ciento de la variabilidad, al ser comparados con datos reales de producción y biomasa.

Así mismo, Pontes et al. (2005), demostraron que existe muy buena correlación entre el índice NDVI y la productividad del cultivo de caña de azúcar; es decir, el índice NDVI tiene el potencial para indicar la diferenciación productiva presente en el cultivo de caña de azúcar.

4. DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍAS APLICADAS EN ASPECTOS DE LA OPERACIÓN DE LOS DISTRITOS DE RIEGO.

Debido a que el presente trabajo tiene como objetivo proponer el uso de técnicas de la información que debe utilizarse por parte del personal técnico de los distritos de riego, para la estimación de parámetros estratégico en la operación de los distritos de riego con el apoyo de los Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de Percepción Remota, a continuación se describen los estudios de caso que a la fecha se han realizado, o en su caso, las tendencias que se recomiendan para ello, el cual será motivo de generación de la metodología o en su caso la validación correspondiente.

4.1. Actualización de infraestructura hidroagrícola, planos parcelarios-padrón de usuarios.

Como estudio de caso se describirá la metodología aplicada para desarrollar un modelo de Sistema de Información Geográfica en el distrito de riego 043 Estado de Nayarit; en 2010, por parte del Colegio de Postgraduados por encomienda de la CONAGUA.

El distrito de riego 043 Estado de Nayarit, se ubica en las regiones administrativas Pacífico Norte y Lerma-Santiago-Pacífico, tomando parte de las regiones hidrológicas No.11 Presidio – San Pedro, No.12 Lerma – Santiago, No.13 Huicicila, y No.14 Río Ameca. En la figura 4.1 se muestra de manera gráfica la ubicación del distrito de riego, localizado entre los meridianos 103°50' y 105°10' de Longitud Oeste y los paralelos 20°55' y 21°55' de Latitud Norte. Su altitud fluctúa entre 13 a 980 m.s.n.m. Debido al proceso de transferencia de la infraestructura a los usuarios organizados, se conformaron 4 asociaciones civiles de usuarios.

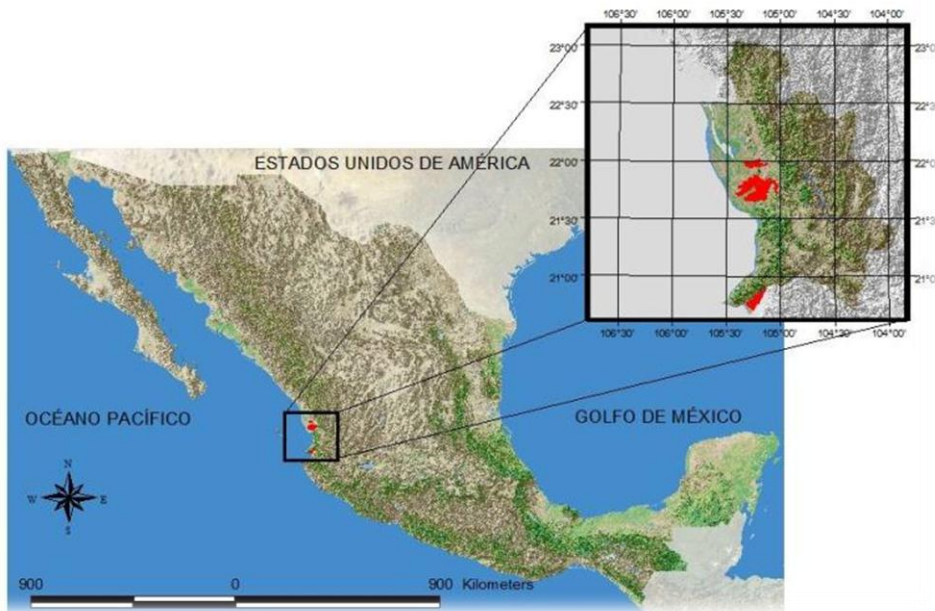


Figura 4.1. Ubicación del distrito de riego 043 Estado de Nayarit.

Fuente: Gerencia de Distritos de Riego, CONAGUA, 2010.

La metodología aplicada fue la siguiente:

- Adquisición de imágenes del Satélite SPOT (figura 4.2), pancromáticas con resolución de 2.5 m, escala 1:20,000, similar a las ortofotos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Estas imágenes se procesan e integran en un mosaico para ser manejadas en el programa denominado ArcView versión 3.2 o superior. A partir de esta plataforma se integró la información analizada.



Figura 4.2. Imagen Spot mostrando algunas parcelas del distrito de riego 043.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de la Gerencia de Distrito de Riego.

- Revisión de la información oficial del padrón de usuarios de los Módulos del distrito de riego 043 Estado de Nayarit, basado en la superficie, ubicación de las parcelas y nombre del usuario.
- Recorridos de campo y trabajo de gabinete, a fin de identificar las parcelas y usuarios que no están actualizados, mediante la revisión del padrón de usuarios con el apoyo del personal técnico de los Módulos y Distrito de Riego, el cual se registró en planos.
- Identificación de parcelas urbanizadas y determinación de superficie que abarcan dichas parcelas.
- Georreferenciación del parcelamiento, basando en los planos catastrales proporcionados por la Jefatura del Distrito de Riego, y del mosaico fotogramétrico, ubicando toda la información de interés: poblados, ríos, red de canales, drenes, caminos y carreteras, red de tuberías, cuerpos de agua, etc.
- Como resultado de lo anterior, se obtienen diversas capas de información georreferenciada de: parcelamiento, red de drenaje, red de canales, red de caminos, las estructuras, entre otros, así como distintas características geométricas (longitud y superficie) de todo el distrito, a los cuales se les puede asignar una serie de datos que nos interesen manejar, siempre teniendo un dato en común con el cual podemos agrupar (nombre, número etc.). En la figura 4.3 se muestra la digitalización de canales y parcelas.

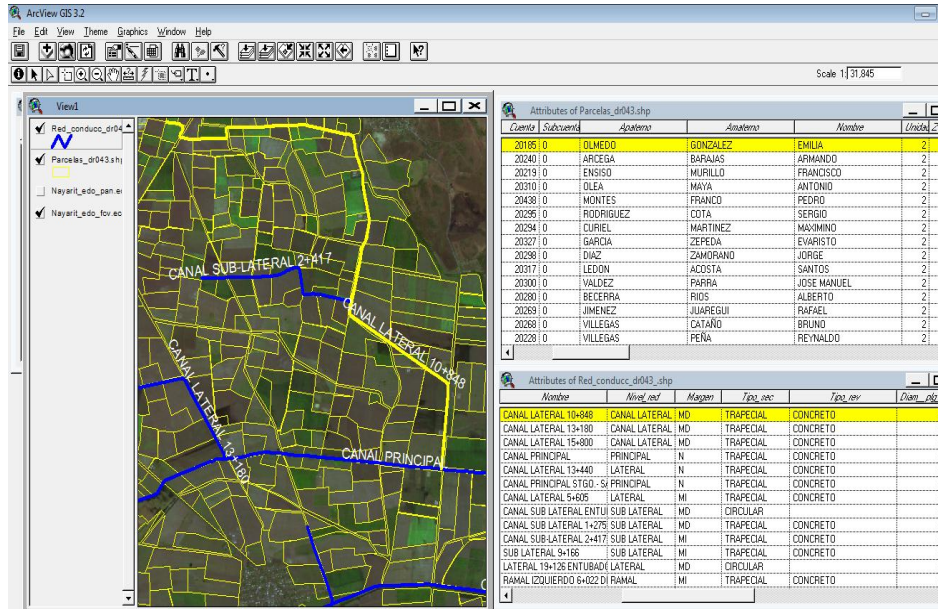


Figura 4.3. Digitalización de canales y parcelas, y mostrando información capturada.

Fuente: Elaboración propia con información del SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Dentro de la metodología, el Colegio de Postgraduados definió la estructura mínima de las bases de datos para registrar las características de los diversos elementos que se desean georreferenciar, los cuales pueden estar ligados entre sí, como por ejemplo el número de cuenta; todo esto dentro del software de ArcView 3.2.

Haciendo uso de este software es posible manejar y obtener distinta información relevante tales como superficie de parcelas, longitud de canales, drenes, caminos, situación de actualización de usuarios, etc. la cual mostraremos para el caso distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Red de distribución (red menor de canales).



Figura 4.4. Ejemplo de canales Laterales del distrito de riego 043.

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Haciendo uso del Modelo de SIG desarrollada, se determinó que el distrito de riego cuenta con una red de canales de 688.399 km, de los cuales 165.526 km (24%) son principales, 287.978 km (41.8%) corresponden a laterales, 187.489 km (27.2%) a Sublaterales, 37.26 km (5.4%) a Ramales y 9.99 (1.5 %) a Subramales. En el Cuadro 4.1 se muestra a nivel de módulo de riego.

Cuadro 4.1. Longitud de canales calculada del distrito de riego 043.

Módulo	Longitud Calculada SIG (km)					Total
	Principal	Lateral	Sublateral	Ramal	Subramal	
1	52.6	81.4	16.6	0.0	0.0	150.6
2	48.6	97.3	97.4	36.5	10.0	289.8
3	35.0	79.7	59.2	0.8	0.0	174.7
4	29.2	29.5	14.3	0.0	0.0	73.0
Total	165.4	287.9	187.5	37.3	1.0	688.1

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Del total de la red de distribución, 682.272 km están revestidos (99 %) y 6.13 km, (1%) se encuentran entubados. En el cuadro 4.2 se muestra por tipo de canal.

Cuadro 4.2. Longitud de canales por tipo de revestimiento en el distrito de riego 043.

Canal	Longitud Calculada SIG (km)		
	Concreto	PVC	Total
Principal	165.5	0.0	165.5
Lateral	281.8	6.1	287.9
Sublateral	187.5	0.0	187.5
Ramal	37.4	0.0	37.4
Subramal	10.0	0.0	10.0
Total	682.2	6.1	688.3

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

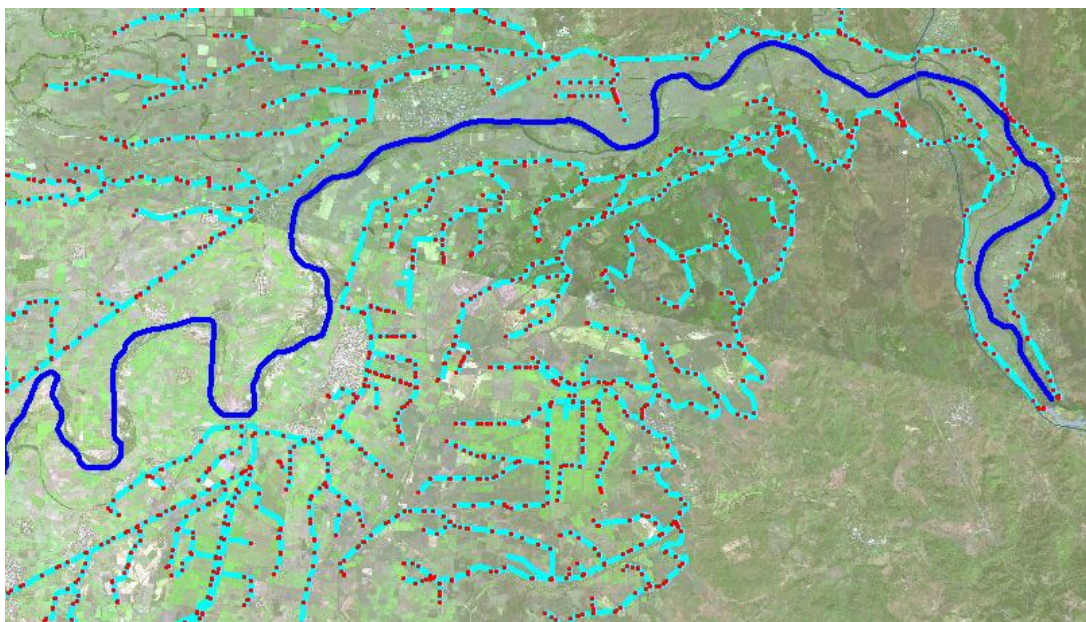


Figura 4.5. Red de canales y ubicación de sus estructuras de operación.

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Estructuras de Control y medición

La cantidad de estructuras existentes en el Distrito de Riego, calculadas a partir del Modelo de Sistema de Información Geográfica resultó de 3,823, de las cuales 2,723 corresponden a estructuras de operación (cuadro 4.3 y figura 4.6), 730 estructuras de cruce (cuadro 4.4), y 370 estructuras de protección (cuadro 4.5).

Cuadro 4.3. Estructuras de operación en los módulos del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Operado Por:	Estructuras de Operación (Piezas)					Total	
	Estaciones de Aforo	Represas		Tomas Directas	Tomas Granjas		Cajas Repartidoras
	1*	1*	2*	1*	1*		1*
Módulo 01	1	226	5	100	340	42	714
Módulo 02	1	395	0	50	709	2	1,157
Módulo 03	3	202	0	75	345	0	625
Módulo 04	5	98	0	24	100	0	227
Total	10	921	5	249	1,494	44	2,723

1* Estructuras en red de distribución. 2* Estructuras en red de drenaje

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.



Figura 4.6. Estructuras de operación en el distrito de riego 043 Estado de Nayarit.
Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Cuadro 4.4. Estructuras de cruce en el distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Operado Por:	Estructuras de Cruce (Piezas)									Total
	Alcantarillas (Piezas)		Sifones (Piezas)		Puentes Vehiculares (Piezas)		Puentes Peatonales (Piezas)		Puentes Canal (Piezas)	
	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	
Módulo 01	50	2	25	3	142	5	14	0	6	247
Módulo 02	54	0	33	0	162	4	13	1	0	267
Módulo 03	4	0	12	0	158	0	5	0	0	179
Módulo 04	21	0	2	0	13	0	1	0	0	37
Total	129	2	72	3	475	9	33	1	6	730

1* Estructuras en red de distribución. 2* Estructuras en red de drenaje

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Cuadro 4.5. Estructuras de protección del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Operado por:	Estructuras de Protección (Piezas)						Total	
	Caídas (Piezas)	Desfogues (Piezas)		Entradas de Agua (Piezas)		Rápidas (Piezas)		Pasos Inferiores (Piezas)
	1*	1*	2*	1*	2*	1*		1*
Módulo 01	95	15	1	6	2	5	1	125
Módulo 02	121	26	0	22	0	2	1	172
Módulo 03	8	26	0	19	0	0	4	57
Módulo 04	6	7	0	2	0	0	1	16
Total	230	74	1	49	2	7	7	370

1* Estructuras en red de distribución. 2* Estructuras en red de drenaje

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Para conocer las diversas estructuras utilizando en SIG y en su caso el seguimiento de éstas, se tomaron fotografías durante los recorridos de campo. En la figura 4.7 se muestra un ejemplo estructura de operación (hidrante).

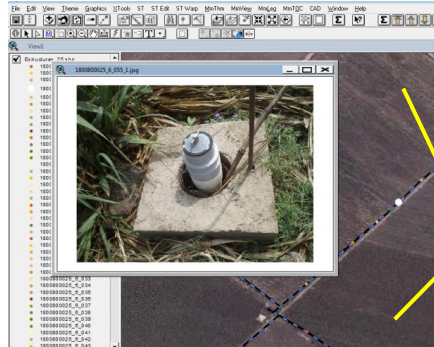


Figura 4.7. Hidrante del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Red de caminos.



Figura 4.8. Red de caminos del distrito de Riego 043, Estado de Nayarit.

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

En relación a la Red de Caminos de operación, calculada a partir del Modelo de Sistema de Información Geográfica se determinó una longitud de 715.63 km, de estos 669.75 km están revestidos con grava y 45.880 km en tierra.

Red de drenaje.



Figura 4.9. Red de drenaje del distrito de riego 043, Estado de Nayarit

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

De igual forma, en la red de drenaje, se determinó una longitud total de 402.72 km. En el cuadro 4.6 se especifica a nivel de módulo.

Cuadro 4.6. Red de drenaje del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Módulo	Longitud Calculada (km)
01	57.2
02	141.1
03	131.5
04	72.9
Total	402.7

Fuente: Elaboración propia con datos del Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

De manera general, a continuación se hace una comparación de las cifras oficiales del inventario de infraestructura del distrito de riego y las calculadas con el SIG del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Cuadro 4.7. Comparación de longitudes calculadas con SIG y datos oficiales de CONAGUA.

Concepto	Calculada SIG	Oficial	Diferencias
Red de canales (km)	688.4	577.6	110.7
Red de drenaje (km)	402.7	385.8	16.9
Red de caminos (km)	715.6	565.2	150.4
Estructuras (número)	3,823	2,447	1,376

Fuente: Elaboración propia con datos del Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Como puede observarse, se requiere una validación por el personal del distrito de riego a fin de identificar la infraestructura concesionada, y de aquellas que ha sido construido por los usuarios en la modalidad de inversión 50% federal y 50% de los usuarios.

Superficies

La superficie registrada en el Sistema de Padrón de Usuarios (SIPAD 3) es de 53,708.1 ha físicas de las cuales 53,455.4 ha corresponden a superficie de riego.

La superficie total calculada con el Modelo de SIG fue de 49,806.8 ha; sin embargo, esta superficie incluye los llamados “Casos Especiales”, que son aquellas parcelas que no poseen número de cuenta en el SIPAD (y en algunos casos tampoco nombre de usuario actual), pero que han sido incluidas por considerarse que forman parte del Distrito de Riego, están conformadas por 267 usuarios y una superficie SIG de 987.5 ha. Por lo que la superficie, fuera de esta situación es de 48,819.3 ha en beneficio de 11,164 usuarios.

En el cuadro 4.8 se presenta la superficie física, regable y calculada con el SIG por Módulo.

Cuadro 4.8. Superficies por módulo del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Módulo	Usuarios	Superficie física (ha)	Superficie. de riego (ha)	Superficie calculada SIG (ha)
1	2,380	10,158.1	9,963.1	9,411.7
2	4,260	23,721.1	23,701.9	20,581.1
3	2,595	11,742.1	11,710.1	11,330.6
4	1,929	8,086.8	8,080.3	7,495.9
Subtotal	11,164	53,708.1	53,455.4	48,819.3
Casos Especiales	267	-	-	987.5
Subtotal	267	-	-	987.5
Total	11,431	53,708.1	53,455.4	49,806.8

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

A continuación se mostrará el resultado de la situación de la actualización del padrón usuarios de del distrito de riego, a partir del Modelo de Información Geográfica.

La figura 4.10 muestra el nivel de actualización del padrón de usuarios del distrito de riego 043.

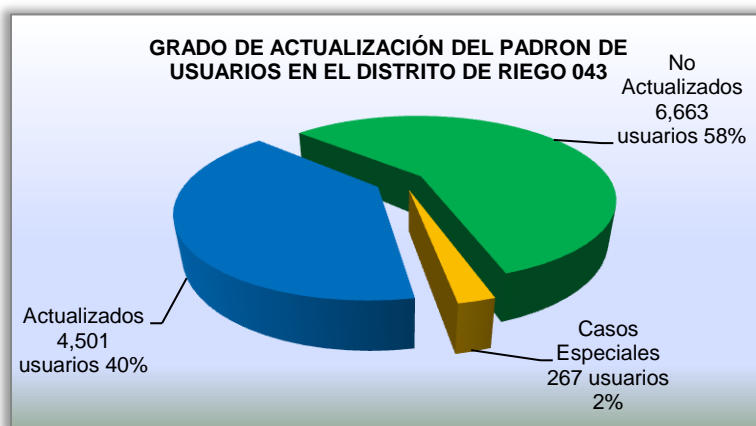


Figura 4.10. Situación actualización padrón de usuarios del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

Para el caso particular del Módulo 1, se ubicaron y digitalizaron en el Sistema de Información Geográfica un total de 2,380 usuarios, de los cuales 662 usuarios se encuentran actualizados y los 1,718 restantes no lo están, esto corresponde al 28 % y 72 %, respectivamente, ver Figura 4.11.

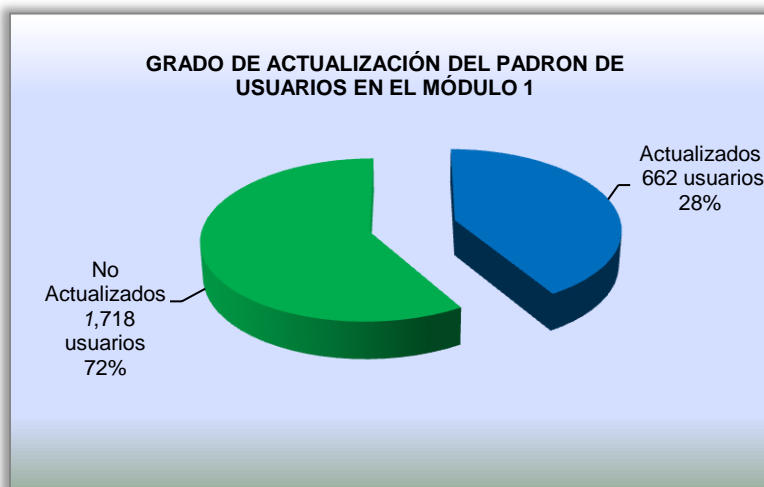


Figura 4.11. Situación de la actualización del padrón de usuarios en el Módulo 1 del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

En el cuadro siguiente se muestra de manera específica las razones por el cual se consideran actualizados y no actualizados, así como el número de usuarios y la superficie correspondiente.

Cuadro 4.9. Situación en la que se encuentran los usuarios del Módulo 1 del distrito de riego 043, Estado de Nayarit.

Situación	No. de Usuarios	Superficie SIG (ha)
Actualizado	662	2,378.7
No Actualizado/Cambio de Uso de Suelo	299	1,334.1
No Actualizado/Cambio de Usuario	666	2,423.5
No Actualizado/Cambio de Usuario/Crear Subcuenta	102	286.8
No Actualizado/Cambio de Usuario/Verificar Superficie	260	1,264.9
No Actualizado/Corregir Nombre	15	47.5
No Actualizado/Crear Subcuenta	17	86.4
No Actualizado/Crear Subcuenta/Verificar Superficie	1	4.7
No Actualizado/Verificar Cuenta	1	1.6
No Actualizado/Verificar Superficie	226	1,080.4
No Actualizado/Verificar Superficie/Corregir Nombre	1	3.6
No Actualizado/Verificar Usuario	130	499.3
Total	2,380	9,411.5

Fuente: Informe de actividades, SIG distrito de riego 043, CONAGUA, 2010.

4.2. Caracterización de suelos agrícolas.

Estudio de Caso: Distrito de riego 030, Valsequillo, Pue.

A continuación se indica la metodología utilizada para caracterizar el suelo en las parcelas del distrito de riego 030, Valsequillo, Pue., usando la metodología propuesta por el Colegio de Postgraduados. En la figura 4.12 se muestra la ubicación del distrito de riego.

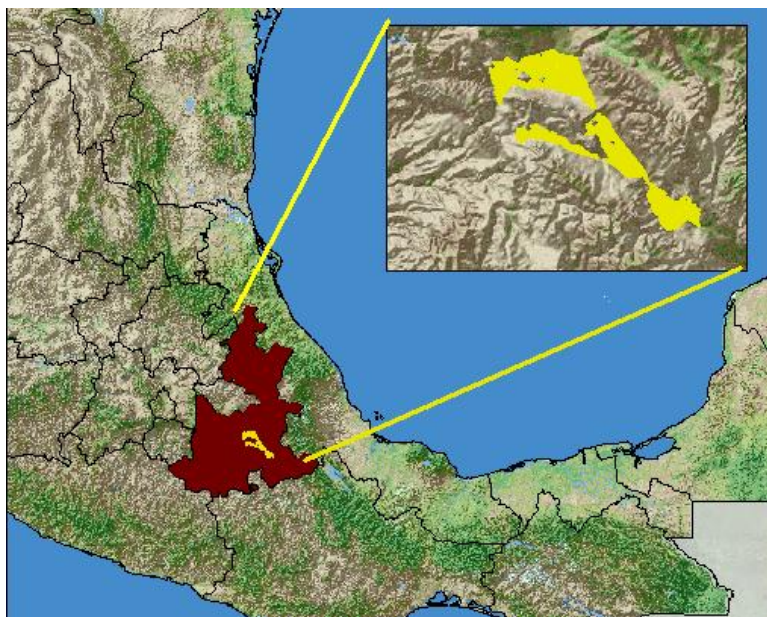


Figura 4.12. Ubicación del distrito de riego 030, Valsequillo, Pue.

Colecta de las muestras.

Se colectaron un total de 1,283 muestras (figura 4.13) de suelo en los módulos del distrito de riego 030, las cuales fueron tomadas a una profundidad de 0-30 cm. Cada muestra de suelo correspondió a parcelas agrícolas y para ello, se recorrió el terreno colectando cinco submuestras cada 10 hectáreas, colocando el suelo en la misma bolsa para formar una muestra compuesta.

El procedimiento para colectar las muestras de suelo se esquematiza en la figura 4.14. Se empleó una pala recta limpia y libre de cualquier tipo de sustancia que pudiese contaminar la muestra. Se raspó la superficie del terreno para quitar material vegetal, piedras o terrones. Se hizo un hoyo de tal manera que se aseguró introducir la pala al suelo perpendicularmente a la superficie del terreno para colectar la muestra. Se tomó una cara del hoyo y se colocó en una bolsa de plástico lo suficientemente grande para que cupiera el suelo de manera holgada.

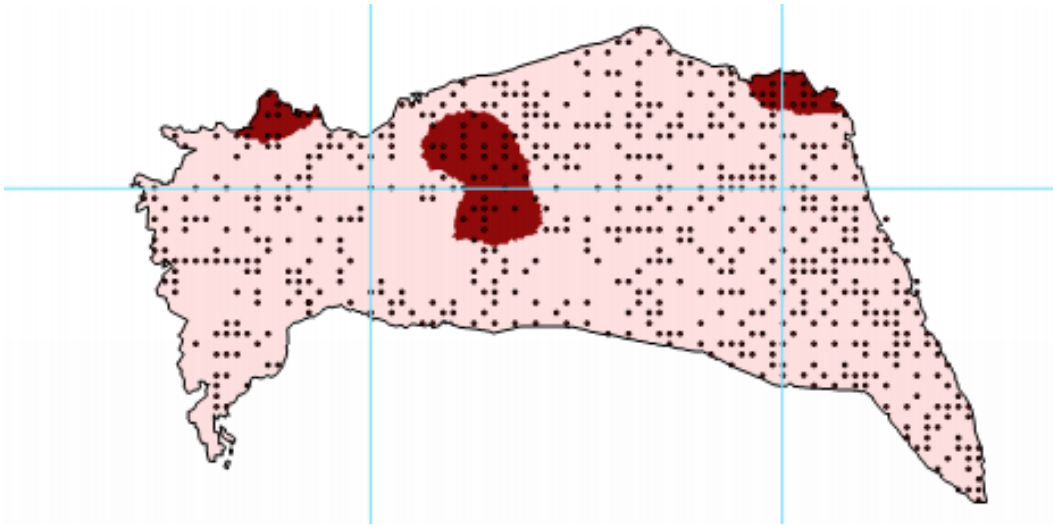


Figura 4.13. Puntos de muestreo en una parte del distrito de riego 030 Valsequillo, Pue.
 Fuente: Elaboración propia con datos del Modelo Edáfico del distrito de riego 030, Valsequillo, Pue.



Figura 4.14. Procedimiento para colectar las muestras de suelo.

Fuente: Informe de actividades del Modelo Edáfico del distrito de riego 030, Valsequillo, Pue. CONAGUA, 2010.

Cada submuestra colectada consistió únicamente de la parte central del suelo sacada con la pala, desechando los laterales (figura 4.15). Este procedimiento se repitió cinco veces hasta abarcar las 10 hectáreas de parcelas agrícolas por muestra de suelo, donde la cantidad de muestra compuesta colectada equivalió aproximadamente a 1.5 kg de suelo, la cual se

identificó plenamente, escribiendo en la bolsa su código correspondiente con un marcador de tinta indeleble y además, se colocó en el interior de la bolsa una etiqueta con la misma clave, registrando esta misma información en la libreta de campo.

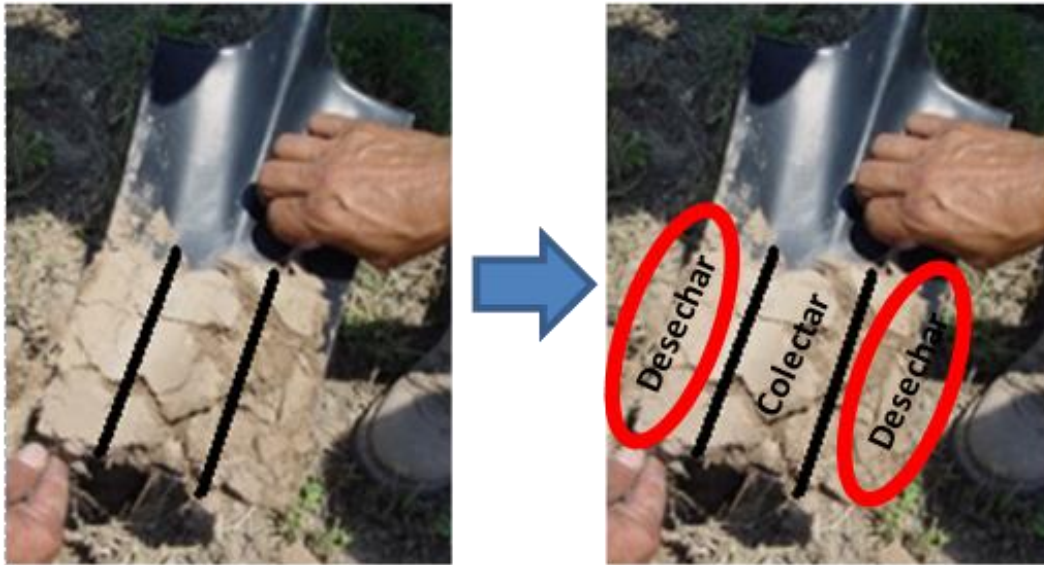


Figura 4.15. Procedimiento para coleccionar una submuestra de suelo.

Fuente: Informe de actividades de la Gerencia del distrito de riego 030, Valsequillo, Puebla. CONAGUA, 2010.

Las muestras de suelo coleccionadas se distribuyeron de forma razonablemente homogénea, de tal manera de asegurar abarcar toda el área de cada cuadrante, con un espaciamiento lo más equidistante posible entre cada sitio de muestreo (considerando exclusivamente parcelas con actividad agrícola). En cada sitio de muestreo de todos los módulos se tomó la siguiente información, la cual se integró al Sistema de Información Geográfica:

- a) Coordinadas geográficas (latitud, longitud y altitud).
- b) Si visualmente se apreciaban sales sobre la superficie del terreno o por lo contrario, que aparentemente no hubiese manchones de esta naturaleza.
- c) Tipo de cultivo presente al momento del terreno o si está en descanso.

En cada punto se tomaron cinco fotografías con cámara digital en la parte central de la parcela, una por cada punto cardinal (norte, sur, este y oeste), así como la del hoyo y la submuestra coleccionada en la zona central. Se aseguró de identificar de manera clara y fácil la

posición de cada fotografía, así como su correspondencia con la muestra compuesta colectada.

Se evitó coleccionar muestras en los siguientes casos: a) siembras recientes (mes o mes y medio a la fecha del muestreo); b) donde haya sido muy evidente la presencia de agroquímicos o fertilizantes aplicados al suelo en días previos a la fecha del muestreo; c) que la condición del sitio haya sido totalmente distinta a lo que se aprecia en la parcela (por ejemplo al lado de un galpón, corrales, viviendas, caminos, excretas de animales, entre otros aspectos).

Análisis de las muestras en el laboratorio

Se procedió de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 en la que se establecen las especificaciones para estudios, muestreo y análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Las determinaciones analíticas para evaluar la fertilidad edáfica se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del Colegio de Postgraduados y se incluyeron las siguientes:

AS-01 Preparación de la muestra.

AS-08 Nitrógeno inorgánico.

AS-09 Determinación de la textura del suelo.

AS-10 Fósforo extraíble en suelos alcalinos.

AS-13 Cationes intercambiables (calcio, magnesio, sodio y potasio) en suelos calcáreos.

AS-15 Determinación del contenido de boro.

Para la evaluación de la salinidad de los suelos se emplearon los siguientes procedimientos del laboratorio, los cuales están indicados en la NOM-021-RECNAT-2000:

AS-01 Preparación de la muestra.

AS-02 Determinación de pH medido en el extracto de saturación.

AS-16 Obtención del extracto de saturación.

AS-17 Determinación del porcentaje de saturación.

AS-18 Medición de la conductividad eléctrica.

AS-19 Determinación de cationes solubles (calcio, magnesio, sodio y potasio) en el extracto de saturación.

AS-20 Determinación de aniones solubles (carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) en el extracto de saturación.

AS-21 Determinación del porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Una vez teniendo los análisis se generaron planos para facilitar su visualización en el área de estudio; en este caso la figura siguiente muestra un mosaico del nivel de Fosforo que existe en las parcelas del distrito de riego 030.

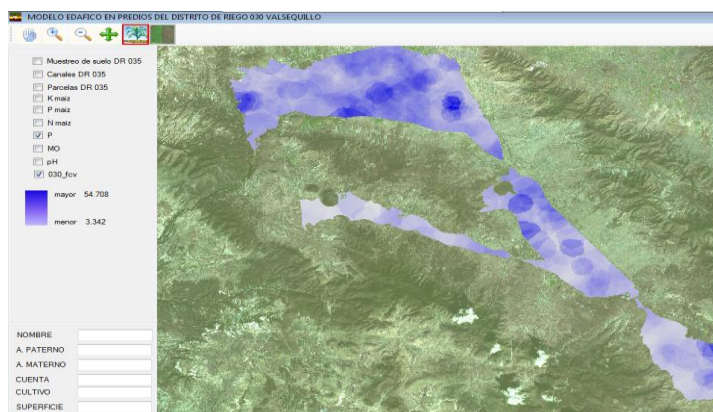


Figura 4.16. Mosaico de P (Fosforo), en las parcelas del distrito de riego 030, Valsequillo, Puebla.

Fuente: Modelo Edáfico del distrito de riego 030, Valsequillo, Puebla.

En la Figura 4.17 se muestra de manera gráfica los valores de PH en las parcelas del distrito de riego 030, Valsequillo, Pue.

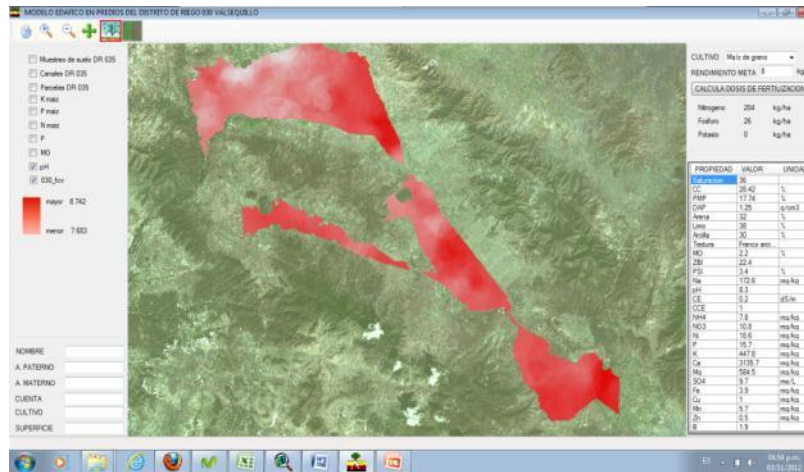


Figura 4.17. Mosaico de PH en las parcelas del distrito de riego 030, Valsequillo, Pue.

Fuente: Modelo Edáfico del distrito de riego 030, Valsequillo, Pue.

Conforme lo antes señalado, el SIG siempre será una herramienta que nos permite manejar, categorizar, analizar, etc. una gran cantidad de información, generar planos e información visual de manera que facilita el entendimiento e interpretación de los resultados. La figura 4.18 muestra información de textura de suelos en un SIG.

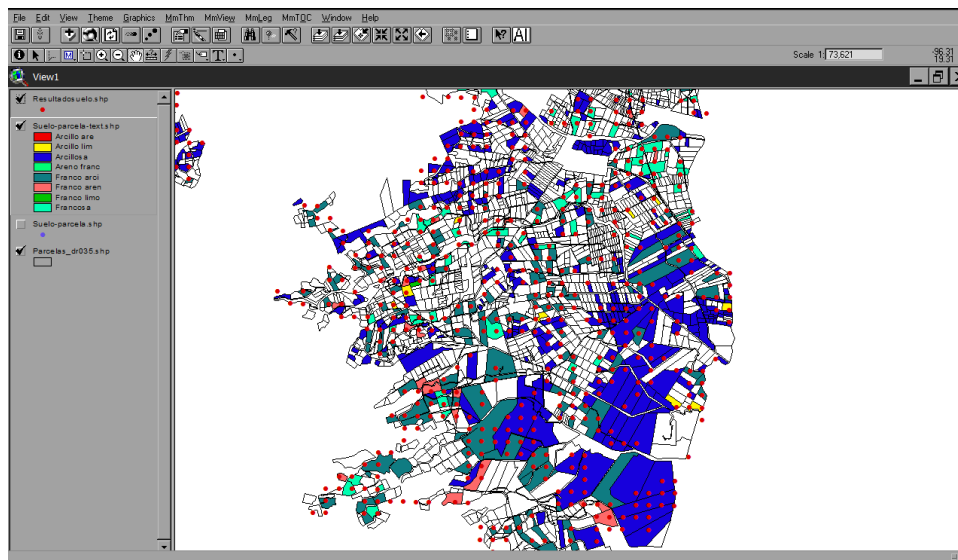


Figura 4.18. Textura del suelo mostrado en un SIG.

Fuente: Elaboración propia con datos del Modelo Edáfico del distrito de riego 030, Valsequillo, Puebla.

Estos análisis permitieron conocer las características físicas del suelo incluyendo el contenido de nutrientes. Con esta información posibilita recomendar la cantidad de

fertilizantes necesarios para un cultivo y un rendimiento esperado, bajo el considerando de que los demás factores asociados al rendimiento sean los adecuados (riego, labores culturales, clima, variedad, etc).

La siguiente figura muestra un SIG, generado por la ANEI, A.C. alimentado con la información tanto de infraestructura de riego como de suelo, teniendo la posibilidad de hacer una recomendación nutritiva desde gabinete.



Figura 4.19. Recomendaciones de fertilización.

Fuente: ANEI, A.C. con datos del Modelo Edáfico del distrito de riego 030, Valsequillo, Puebla.

En este contexto, la ANEI, A.C. está desarrollando un software para que mediante tabletas y teléfonos celulares, los usuarios puedan recibir recomendaciones de la dosis de fertilizantes a aplicar en sus parcelas para mejorar el rendimiento de los cultivos.

En la Figura 4.20 se muestra avances en el desarrollo de esta tecnología, y enfocado a que a futuro se pueda informar a los productores las necesidades de agua de los cultivos, el comportamiento del índice vegetación asociada a su rendimiento.

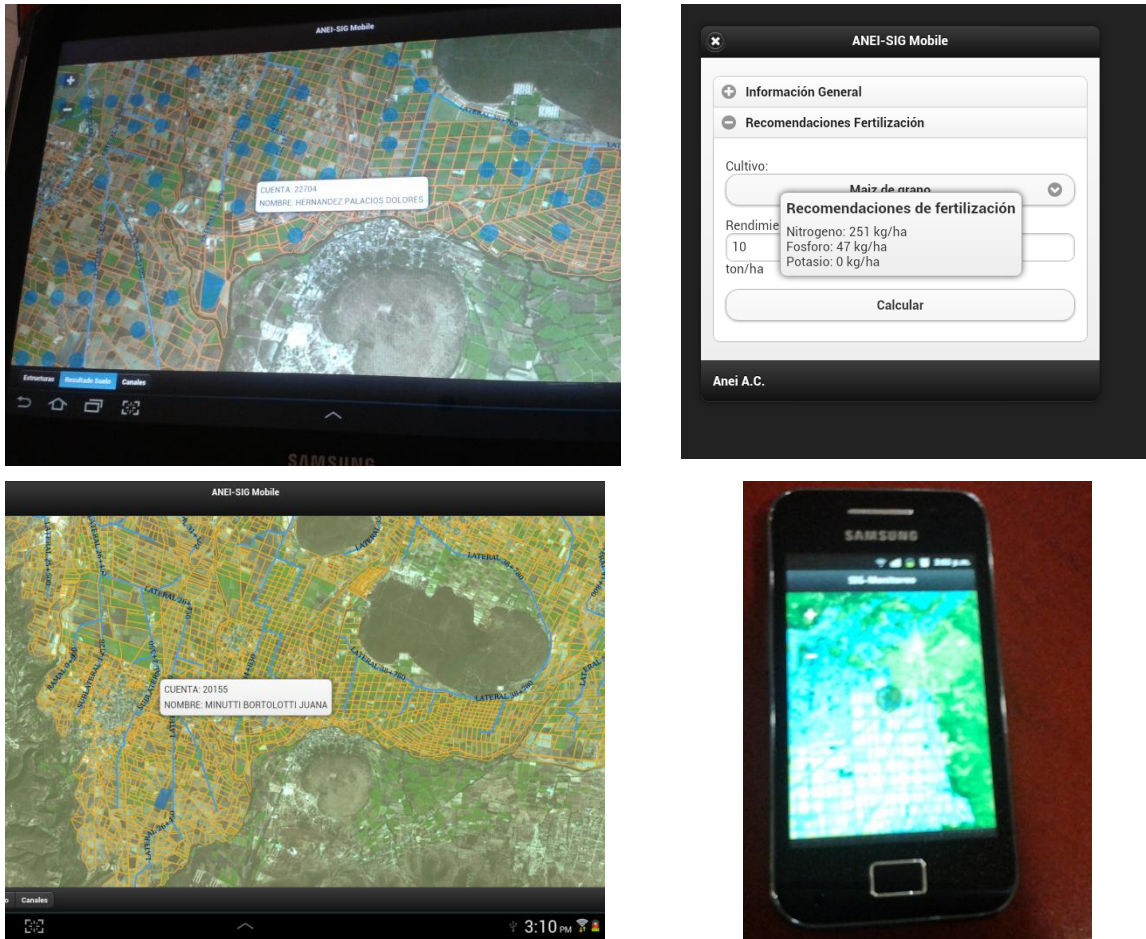


Figura 4.20. Avance del desarrollo del sistema para el uso del SIG en tabletas y celulares.
Fuente. ANEI, A.C. 2012

4.3. Determinación de superficies sembradas.

Caso: Distrito de riego 010 Culiacán-Humaya, Sinaloa.

De octubre 2011 a abril de 2012, la CONAGUA por conducto del Organismo de Cuenca Pacífico Norte encomendó a la Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación, A. C. (ANEI A.C.), la Evaluación de la Operación en el Ciclo Otoño-Invierno 2011-2012 en 7 distritos de riego del Estado de Sinaloa, y la integración del resultado en un Modelo de SIG, debido a la limitada disponibilidad de agua en las fuentes de abastecimiento, por lo que fue necesario entre otros aspectos, estimar la superficie de cultivos establecidos en los distritos

de riego, con el apoyo de sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de percepción remota (TPR).

Para identificar el mosaico de cultivos fue necesario apoyarse en los reportes proporcionados por el personal técnico de los Módulos de Riego y con visitas en campo para verificar la información. Producto de dichos recorridos de campo, se generaron una serie de planos que fueron utilizados como apoyo para el uso adecuado del agua disponible. Con los datos obtenidos para dicho mosaico y los volúmenes de agua entregados, al analizarlos se tiene que se sembraron 198,931.76 ha en el distrito de riego 010, Culiacán-Humaya, Sinaloa. En el Cuadro 4.10 se muestra la superficie sembrada y el volumen entregado a cada Módulo.

Cuadro 4.10. Superficie cultivada y volumen entregado en los módulos del distrito de riego 010, Culiacán-Humaya, Sin.

Módulo	Superficie sembrada (ha)	Volumen entregado (miles m ³)
AUPA I-1 La Palma	9,119.67	16,994.02
AUPA I-2 Bachimeto	14,834.79	15,872.54
AUPA I-3 Otameto	20,372.87	33,675.26
AUPA II-1 Panac 7	26,485.03	No Disponible
AUPA II-2 Produagra	12,145.90	No Disponible
AUPA II-3 El Grande	26,298.34	99,525.02
AUPA IV-1 Culiacancito	13,126.02	49,026.82
AUPA IV-2 El Tamarindo	12,101.67	24,611.90
AUPA IV-3 La Guamuchilera	7,424.92	42,196.03
AUPA IV-4 Caimanero	15,867.25	37,037.09
AUPA V-1 Chinitos	19,978.57	62,340.19
AUPA V-2 La Angostura	21,176.73	63,114.34
TOTAL	198,931.76	444,393.21

Fuente: ANEI A.C.

La ANEI adquirió, procesó y analizó imágenes de satelitales RapidEye con una resolución de pixel de 5x5 metros para cuantificar la superficie cultivada a nivel de productor para cada uno de los Módulos de Riego de los Distritos de Riego 010, 063, 074, 075, 076, 108 y 109. Estas coberturas satelitales fueron para el mes de noviembre de 2011, diciembre de 2011, febrero de 2012 y marzo de 2012. Con estas coberturas se tuvo un seguimiento

preciso de las superficies establecidas con los diferentes cultivos conforme el procedimiento siguiente:

- ✓ Importar imágenes necesarias para cada uno de los distritos de riego a fin de elaborar el mosaico.
- ✓ Calcular la reflectancia de las imágenes obteniendo su factor de corrección por fecha.
- ✓ Eliminar de las imágenes valores de reflectancia referentes a objetos oscuros.
- ✓ Integrar un mosaico con las imágenes de cada distrito de riego (Figura 4.21).
- ✓ Obtener valores de reflectancia asociados al suelo desnudo para establecer la línea del suelo.

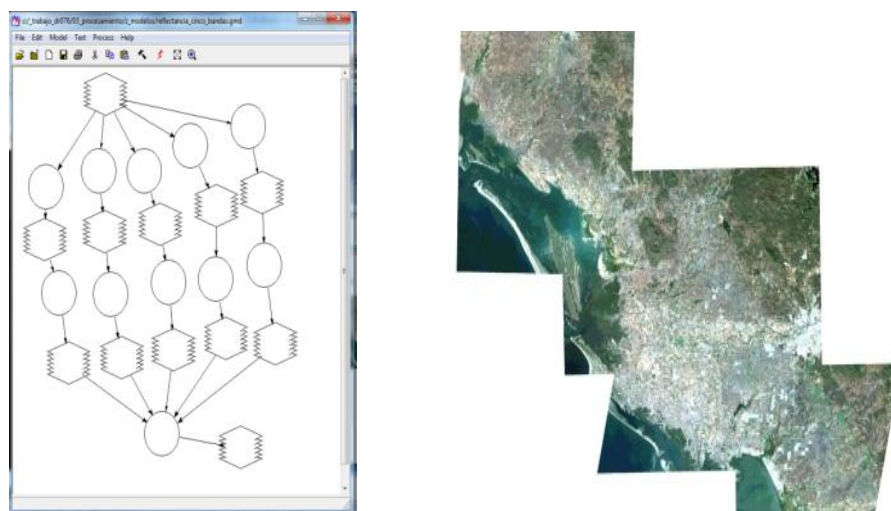


Figura 4.21. Mosaico de imágenes RapidEye.

Fuente: ANEI A.C.

- ✓ Posteriormente, se hizo el cálculo de la cobertura vegetal usando el Índice de Diferencias Ponderadas (WDVI) con un factor de 2.3;
- ✓ Se eliminaron valores menores al 5%, indicando no vegetación y se calculó el número de píxeles con vegetación por parcela obteniendo el área cultivada en hectáreas.

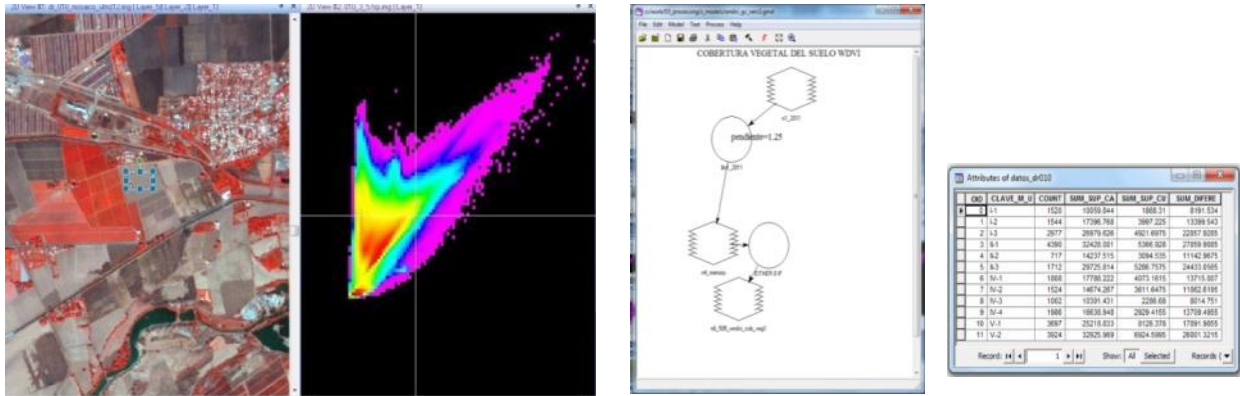


Figura 4.22. Determinación de la reflectancia del suelo.

Fuente: ANEI A.C.

En el cuadro 4.11, se muestra las superficies y porcentajes de los cultivos sembrados en el distrito de riego 010, Culiacán-Humaya, obtenidos.

Cuadro 4.11. Padrón de cultivos y superficie en el distrito de riego 010 Culiacán-Humaya.

Cultivo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Alfalfa	103.33	0.05
Algodón	403.84	0.2
Calabaza	1,621.45	0.82
Caña de Azúcar	4,089.04	2.06
Cártamo	8,168.99	4.11
Chile	3,006.87	1.51
Frijol	14,726.62	7.4
Frutales	1,349.63	0.68
Garbanzo	27,474.82	13.81
Girasol	89.82	0.05

Cultivo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Hortalizas	3,945.69	1.98
Maíz	104,797.93	52.68
Pastos	975.55	0.49
Pepino	1,652.93	0.83
Sandia	272.18	0.14
Sorgo	18,513.48	9.31
Tomate	6,231.48	3.13
Trigo	1,480.27	0.74
Varios	27.84	0.01
TOTAL	198,931.76	100.00

Fuente: Informe de evaluación de la operación Otoño-Invierno 2011-2012, en 7 distritos de riego de Sinaloa, 2012.

Con la adquisición de las imágenes de satélite tipo RapidEye para los meses de noviembre de 2011 a abril de 2012 y su procesamiento mediante el *Software Erdas Image 2010* se obtuvo la superficie de cultivos en pie para esos meses en el distrito de riego 010 Culiacán-Humaya, Sinaloa.

Mosaico de cobertura vegetal del distrito de riego 010 Culiacán-Humaya



Figura 4.23. Mosaico de imágenes RapidEye.

Fuente: ANEI A.C.

En lo que se refiere a la superficie que se encontraba en pie para el mes de marzo de 2012, se generó el cuadro 4.13, en donde se tiene una superficie de 248,375.24 ha en el distrito de riego 010 Culiacán-Humaya y de ésta únicamente 195,536.32 ha se encuentran cultivadas que representa el 78.73%.

También se observa que el Módulo de Riego con mayor superficie establecida fue el AUPA I-1 La Palma con 9,598.79 ha que representa el 95.42% de su superficie registrada, seguido del Módulo AUPA I-2 Bachimeto con 14,947.54 ha lo cual corresponde al 85.92% de su superficie.

Cuadro 4.12. Superficie con y sin cultivo en el mes de marzo de 2012 en el distrito de riego 010 Culiacán-Humaya.

Módulo	Superficie (ha)	Superficie Con Cobertura Vegetal (ha)	Superficie Sin Cobertura Vegetal (ha)	Superficie Con Cobertura Vegetal (%)	Superficie Sin Cobertura Vegetal (%)
AUPA I-1 La Palma	10,059.84	9,598.79	461.06	95.42	4.58
AUPA I-2 Bachimeto	17,396.77	14,947.54	2,449.23	85.92	14.08
AUPA I-3 Otameto	26,979.63	22,877.10	4,102.53	84.79	15.21

Módulo	Superficie (ha)	Superficie Con Cobertura Vegetal (ha)	Superficie Sin Cobertura Vegetal (ha)	Superficie Con Cobertura Vegetal (%)	Superficie Sin Cobertura Vegetal (%)
AUPA II-1 Panac 7	32,428.00	27,055.21	5,372.79	83.43	16.57
AUPA II-2 Produagra	14,237.52	10,793.89	3,443.63	75.81	24.19
AUPA II-3 El Grande	29,725.81	24,276.02	5,449.80	81.67	18.33
AUPA IV-1 Culiacancito	17,788.22	15,004.79	2,783.43	84.35	15.65
AUPA IV-2 El Tamarindo	14,674.27	12,099.86	2,574.40	82.46	17.54
AUPA IV-3 La Guamuchilera	10,301.43	8,735.85	1,565.59	84.8	15.2
AUPA IV-4 Caimanero	16,638.95	12,371.71	4,267.24	74.35	25.65
AUPA V-1 Chinitos	25,218.83	16,324.64	8,894.19	64.73	35.27
AUPA V-2 La Angostura	32,925.97	21,450.93	11,475.03	65.15	34.85
TOTAL	248,375.24	195,536.33	52,838.92	-	-

Fuente: Informe de Evaluación de la Operación Otoño-Invierno 2011-2012, en 7 distritos de riego de Sinaloa, 2012.

Con las imágenes correspondientes a los meses anteriormente mencionados, se realizó el análisis de la superficie con y sin cultivo, lo que permitió llevar un seguimiento de las hectáreas cultivadas. En el cuadro 4.13 se muestra la cantidad de superficie establecida con cultivos en tres diferentes fechas.

Cuadro 4.13. Superficie establecida de cultivo, en tres fechas distintas en el distrito de riego 010, Culiacán-Humaya, Sin.

Módulo	Superficie (ha)	Nov-11	Dic-11	Mar-12
I-1	10,059.80	3,082.40	3,900.90	9,598.79
I-2	17,396.80	6,659.60	6,473.60	14,947.54
I-3	26,979.60	8,428.10	10,804.70	22,877.10
II-1	32,428.00	8,553.60	15,141.50	27,055.21
II-2	14,237.50	4,670.70	6,681.40	10,793.89
II-3	29,725.80	7,932.90	11,356.40	24,276.02
IV-1	17,788.20	6,308.20	8,173.80	15,004.79

Módulo	Superficie (ha)	Nov-11	Dic-11	Mar-12
IV-2	14,674.30	5,530.60	7,088.00	12,099.86
IV-3	10,301.40	3,543.80	4,998.20	8,735.85
IV-4	16,638.90	4,655.50	8,132.10	12,371.71
V-1	25,218.80	12,026.50	15,865.00	16,324.64
V-2	32,926.00	11,241.20	15,572.10	21,450.93
Total	248,375.20	82,633.10	114,187.50	195,536.32

Fuente: Informe de Evaluación de la Operación Otoño-Invierno 2011-2012, en 7 distritos de riego de Sinaloa, 2012.

Adicionalmente, se realizaron muestreos en campo de parcelas entre los meses de febrero y marzo con la finalidad de identificar los cultivos cosechados y aquellos que se encontraban en pie. Con los datos obtenidos en campo se pretende crear una metodología que sea de utilidad para operativos similares en un futuro, ya que con ellos y en base a reflectancia captada en imágenes satelitales, se pueda proyectar para identificar los cultivos, es decir, áreas que se encuentren sembradas con maíz, frijol o sorgo, por mencionar algunos ejemplos, desde la adquisición de las mismas.

4.4. Identificación y cuantificación de superficies establecidas por cultivo.

A diferencia de la Clasificación no Supervisada, donde el uso de la tierra se estima por agrupamiento de píxeles alrededor de las frecuencias mayores (capítulo 4.3), en la clasificación supervisada se definen firmas espectrales en áreas o sitios conocidos, que se denominan “Campos de Entrenamiento”. La figura 4.24 muestra la obtención de la firma espectral del cultivo.

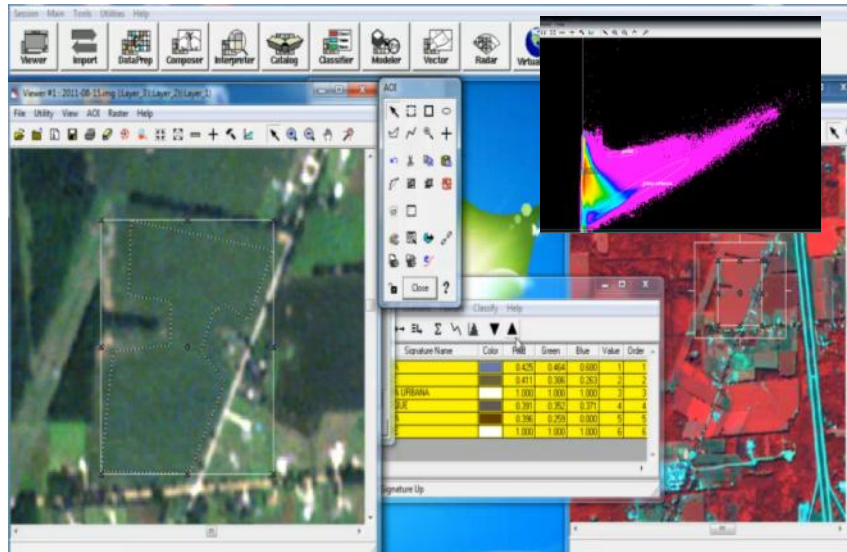


Figura 4.24. Obtención de la firma espectral del cultivo.

Fuente: ANEI, A. C.

En estos sitios de uso del suelo conocido, se definen las firmas espectrales acorde a sus características de Reflectancia y el agrupamiento de los píxeles con fines de clasificación, se lleva a cabo alrededor de estas firmas conocidas.

El procedimiento para lograr la clasificación supervisada se inicia por detectar los sitios que servirán como campos de entrenamiento, cuyas características se conocen y se ubican en una imagen, que servirá de base para la clasificación. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Localizar los sitios donde se conocen las características del cubrimiento del suelo y que pueden ser fácilmente identificados en la imagen que servirá de base para la clasificación.
- Digitalizar los polígonos alrededor de estos sitios, asignándole un número de identificación (ID), acorde al tipo de cubrimiento.
- Analizar los píxeles dentro de cada sitio, para crear las firmas espectrales de acuerdo a su cubrimiento.
- Clasificar toda la imagen mediante la comparación de todos los píxeles de dicha imagen, uno a uno, con cada una de las firmas conocidas. La denominada clasificación “dura” (Hard classifiers), consiste en asignar cada píxel analizado, a

una cobertura similar a las de las firmas de los “campos de entrenamiento”. También puede utilizarse la clasificación “suave” (Soft classifiers), la cual consiste en evaluar el grado de similitud de la Reflectancia de cada píxel, con las clases consideradas en los “campos de entrenamiento”, pero también incluyendo clases desconocidas o no especificadas. En este caso la decisión sobre la similitud de las reflectancias para llevar a cabo la clasificación, se logra mediante un análisis estadístico. Como hay varias técnicas estadísticas para hacer la clasificación, en cada caso se le da un nombre específico a dicha técnica como un “Clasificador”.

La figura 4.25 muestra la clasificación de cultivos con valores asignados en base firmas espectrales.

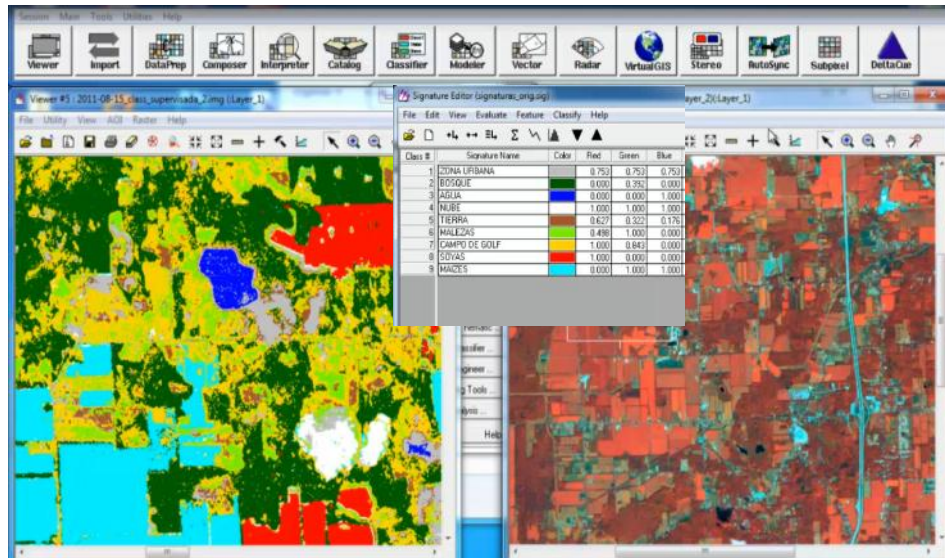


Figura 4.25. Clasificación de cultivos.

Fuente: ANEI, A. C.

Cabe mencionar que para este tipo de seguimiento se necesita abordar todo el ciclo vegetativo del cultivo, ya que las firmas espectrales irán cambiando conforme al desarrollo del ciclo vegetativo.

Para este tipo de metodología aún no se ha validado, sin embargo se recomienda el uso de imágenes satelitales como son las Spot ya que cuenta con una alta resolución (2.5 m) y la frecuencia de toma es cada 6 días.

4.5. Estimación de la producción agrícola.

En México, P. Ruíz (2001), también encontró una relación lineal, muy parecida a la del trigo en la India por Sakthivadivel (1999), entre el NDVI y el rendimiento de la cebada, en el distrito de riego 011, Alto Río Lerma, Guanajuato.

La función encontrada entre el rendimiento y el índice NDVI, medido durante la etapa reproductiva fue:

$$R = 11.4815 \times \text{NDVI} - 0.8817, \text{ con } R^2 = 0.88 \quad (4.1)$$

Luego, puede calcularse el NDVI en el módulo de riego “Valle”, mediante las bandas “verde”, “roja” e “Infrarroja cercana”, lo que se muestra en la figura 4.26.

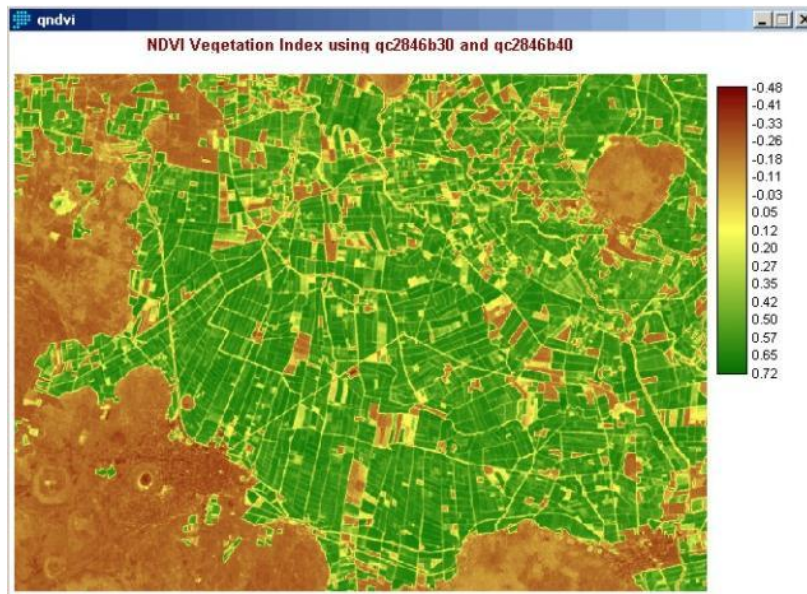


Figura 4.26. Índice NDVI para zona del módulo “Valle”.

Fuente: P. Ruíz, 2001.

Bajo el supuesto de que todo el módulo está cultivado con cebada, lo cual hasta cierto punto es una realidad, puede estimarse el rendimiento utilizando el software IDRISI.

Con los resultados, es posible calcular un histograma de los rendimientos calculados, el que se muestra en la figura 4.27, donde se observa que la mayor frecuencia del rendimiento es cerca de 6 ton/ha. El valor medio del rendimiento en el módulo es de 4.94 ton/ha; sin embargo, debe señalarse que los valores muy bajos de rendimiento (menos de 2 ton/ha), no son del cultivo de la cebada, sino parcelas no cultivadas con vegetación baja.

Rendimiento cebada Valle, Gto

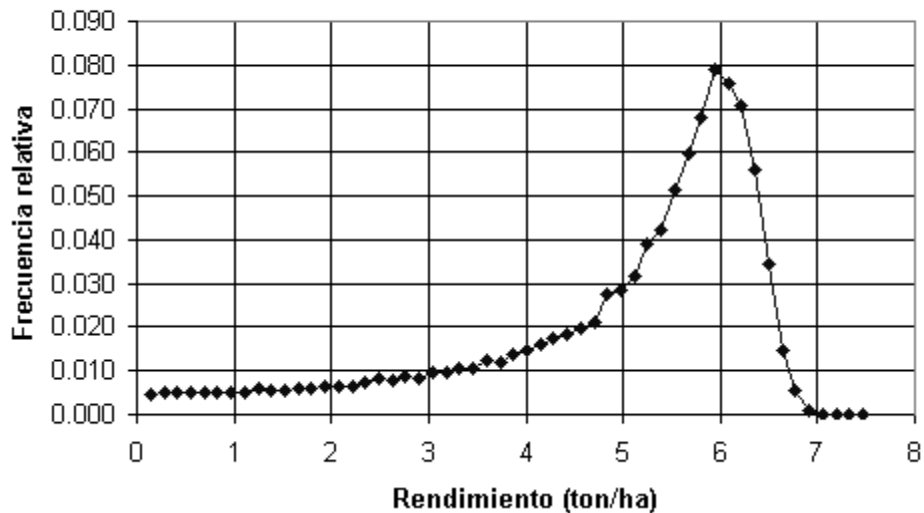


Figura 4.27. Histograma de rendimiento en el módulo “Valle”.

Fuente: Palacios *et al*, 2011.

Durante los años 2006 a 2009, se estableció en el estado de Sonora, el Proyecto de Gestión del Agua Asistida por Satélite, Multiescala y Participativa en la Agricultura de Regadío (PLEIADeS) para el Sorgo, con el objetivo, entre varios otros, de apoyar a los productores de los distritos de riego 051 Costa de Hermosillo y en el 038 Rio Mayo, tomando en cuenta que el trigo es uno de los principales cultivos producidos en este estado, para ello se llevaron a cabo mediciones en varias parcelas de productores cooperantes para evaluar y ajustar funciones que permitan el monitoreo de los cultivos y, en su caso, relacionar índices de vegetación con indicadores de su crecimiento y productividad.

El principal material utilizado han sido imágenes de los satélites Landsat 5 y 7, las que fueron procesadas con software comercial, como son el *IDRISI*® de Clark Labs (2006) y el

ERDAS® de Leica Geosystems (2008); también se utilizaron datos de la Red Agroclimática de Sonora (Agrosón).

Se calculó la evapotranspiración de los cultivos, acorde con lo propuesto por el instructivo de la FAO 56 (Allen et al., 2006), incluyendo la estimación del K_c en función del NDVI, según lo propuesto por Calera y González (2007), cuya fórmula para su estimación, válida principalmente para cultivos anuales, es:

$$K_c = 1.15 * NDVI + 0.17 \quad (4.2)$$

Para la Costa de Hermosillo, los resultados de las mediciones efectuadas en las parcelas donde se sembró el trigo el 31 de diciembre de 2008, se tienen los valores promedio del NDVI en cada imagen de satélite, también se tienen los valores calculados para el factor de cobertura (F_c) y el valor de K_c , coeficiente de cultivo, para el cálculo de la evapotranspiración, según las funciones propuestas por D'Urso y Calera (2005) para cada fecha correspondiente a las imágenes de los Landsat.

La evapotranspiración de referencia se obtuvo de una estación meteorológica automática que estima esta variable con la fórmula de Penman-Monteith; el NDVI se obtuvo de las imágenes de los satélites Landsat, de manera que es posible calcular $K_c = ET_c/ET_r$. Los resultados se muestran en la figura 4.28.

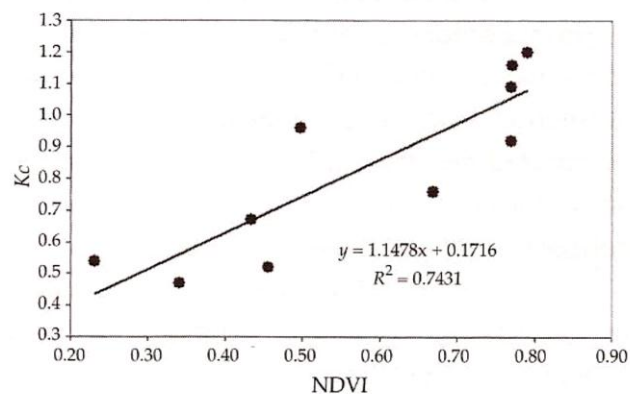


Figura 4.28. Relación entre el NDVI y K_c

Fuente: Palacios *et al.*, 2011.

Obsérvese que la función obtenida de $Kc = 1.1478*NDVI + 0.1716$ es prácticamente igual a la propuesta por Calera y González (2007).

En el distrito de riego 038, Rio Mayo se estudiaron 15 parcelas sembradas de trigo en el Módulo 15, con información tomada de los productores cooperantes, así como del personal de operación del distrito de riego, utilizando las mismas técnicas descritas para el 051, Costa de Hermosillo.

En cada una de estas parcelas se calcularon los valores promedio del NDVI como indicador de productividad y también del MSI (*Moisture Stress Index*), utilizando la metodología anteriormente descrita,

El valor de *ETr* diario se obtuvo de la estación meteorológica automática establecida en el campo del INIFAP que se encuentra cerca del modulo 15, cuya información también puede obtenerse en Línea de www.agroson.org.mx.

Se han obtenido relaciones entre los valores de los índices NDVI y MSI y los rendimientos reportados en las parcelas, observándose una aceptable correlación entre estas variables. La función obtenida entre el NDVI y el rendimiento es similar a la obtenida por Sakthivadivel *et al.* (1999) en el distrito de riego Bhakra de un millón de hectáreas en la India, que para ese caso fue:

$$R = 10.99 \text{ NDVI} - 3.75 \text{ con } R^2 = 0.86 \quad (4.3)$$

Y la ecuación obtenida fue:

$$R = 18.271 \text{ NDVI} - 4.536 \text{ con } R^2 = 0.82 \quad (4.3)$$

En la figura 4.29 se muestran estas relaciones, donde se observa un valor mayor para el parámetro de la variable independiente, debido a que tenemos mejores rendimientos en el trigo.

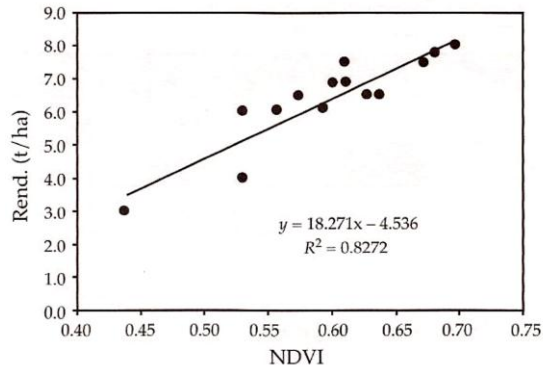


Figura 4.29. Relación entre NDVI y rendimiento de trigo.

Fuente: Palacios *et al*, 2011.

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

Para el monitoreo de datos meteorológicos, se utilizaron estaciones automáticas que tiene la red de estaciones agroclimáticas de Morelos, disponible en la Web en la siguiente dirección: www.clima.inifap.gob.mx.



Figura 4.30. Estaciones Agroclimáticas de Morelos.

Fuente: Zenteno, 2011.

Utilizando los datos de los valores calculados de ETc, NDVI y MSI, se calcularon las correlaciones entre los valores promedio de NDVI, con el rendimiento obtenido en cada parcela de control (figura 4.31).

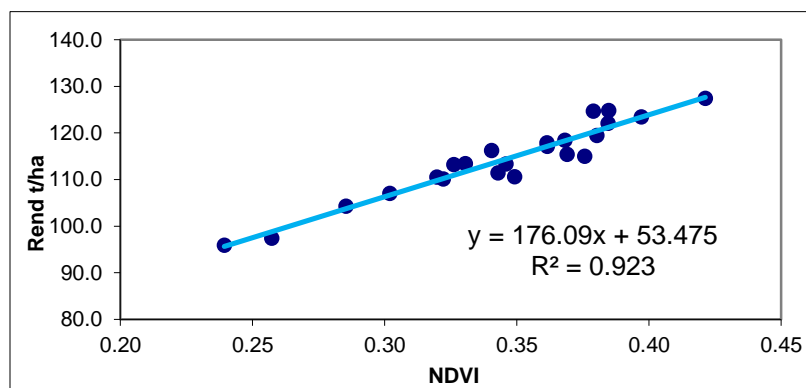


Figura 4.31. Regresión de las variables rendimiento y NDVI.

Fuente: Zenteno, 2011.

La función obtenida que se muestra en la figura, ha sido $REND = 176.09 NDVI + 53.475$ con un coeficiente de determinación de 0.923 y error estándar de 2.29. En este sentido, Simões et al. (2005) y Murillo et al. (2010) demostraron la alta correlación que existe entre productividad y biomasa con el NDVI, alcanzando un valor de r^2 de 0.88 y 0.83, respectivamente.

Se ha logrado una estimación del rendimiento de caña de azúcar a partir de una función lineal que requiere como dato de entrada valores de NDVI, índice de estrés de humedad (MSI) y de evapotranspiración del cultivo (ETc). Se ha observado una relación directa entre el rendimiento de caña de azúcar y los mencionados índices (estimados a partir de imágenes Landsat 7 ETM+). Las variaciones de los índices reproducen adecuadamente los cambios en el rendimiento de caña de azúcar.

4.6. Estimación de la evapotranspiración de cultivos.

Caso de estudio en el distrito de riego 041, Río Yaqui, Son.

En agricultura uno de los elementos indispensables para promover el uso eficiente del agua, consiste en estimar con precisión la Evapotranspiración (ET). Sin embargo la principal limitante de las técnicas tradicionales para estimar la ET, es que están basadas en el coeficiente de cultivo (K_c), lo que representa una gran desventaja cuando se requieren estimaciones precisas en áreas agrícolas extensas como distritos de riego o incluso a nivel de cuenca.

Para estimar la ET, Carlos Castañeda Ibáñez procesó con el algoritmo de METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration), 8 imágenes de los sensores TM y ETM+ de los satélites LANDSAT 5 y 7 respectivamente, de las fechas siguientes: 15-Ene-2008, 08 y 24-Feb-2008, 11 y 27-Mar-2008, 12 y 28-Abr-2008, y 14-May-2008.

La validación de la precisión del funcionamiento del algoritmo METRIC se realizó mediante mediciones de flujos turbulentos con torres de covarianza turbulenta (EC) llevadas a cabo durante la campaña de mediciones realizadas en el área de estudio en el año 2008 como parte del Proyecto PLEIADes, para una parcela del cultivo de Trigo sembrada el 31 de diciembre del 2007 (Palacios *et al.*, 2011)

En METRIC la ET es calculada a partir de imágenes de satélite y datos climáticos usando el balance de energía de la superficie. Las imágenes de satélites proveen información solamente al momento en que pasa el satélite, por lo cual METRIC calcula un valor de ET instantánea al momento de la toma de la imagen. La ET es calculada para cada uno de los píxeles de la imagen como un residuo de la ecuación del balance de energía y donde la energía utilizada para el proceso de evaporación se estima de la siguiente manera:

$$\lambda E = R_n - G - H \dots \dots \dots (\text{Ec. 3.1 del Apartado 3.3.4})$$

Dónde:

- Rn= es la radiación neta;
- H=es el calor sensible;
- G= es el flujo de calor del suelo, y
- λET = es el flujo de calor latente.

Los datos obtenidos de satélites representan una alternativa viable para realizar estimaciones precisas de la ET a alta resolución espacial y temporal. Una de las alternativas planteadas es utilizar del Modelo METRIC el cual, es un algoritmo desarrollado por la Universidad de Idaho que estima la ET como un residuo del balance de energía a partir de imágenes de satélite; entre otras tiene la ventaja de prescindir de una clasificación de cultivos y conocer la etapa de desarrollo en la que se encuentra.

Los resultados mostraron (figura 4.32) que las diferencias entre la ET estimada a partir de METRIC y la medida con EC muestran un alto grado de aceptación ya que para las 8 imágenes se obtuvo un error cuadrático medio (RMSE) de 0.76 mm y un error medio absoluto (MAE) de 0.65 mm/ día.

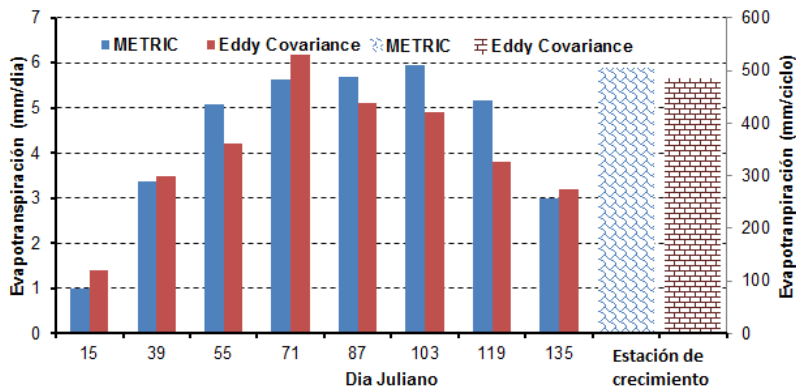


Figura 4.32. Comparación de ET estimada con METRIC y la medida con Eddy Covariance.

Fuente: Castañeda, 2012.

Caso de estudio: distrito de riego 038, Río Mayo, Son.

Se encuentra en proceso de aplicación la metodología de METRIC por Josafat Caballero Luis, de la Gerencia de Distritos de Riego, en el Distrito de Riego 038, Río Mayo, Son., para el periodo de Noviembre 2007 a Abril de 2008, a fin de conocer la ET de los cultivos, bajo las siguientes consideraciones:

- En 2008, en parcelas del distrito de riego 041 Río Yaqui, Son., y bajo el proyecto proyecto PLEIADeS con el uso de Eddy Covariance se determinó la ET del cultivo de trigo.
- En el año agrícola 2007-2008, de las 90,224 ha sembradas, 65,425 ha (72%) fueron de trigo.
- Entre los meses de octubre-2007 a mayo 2008 se utilizó el 99.5% de los volúmenes extraídos de las fuentes de abastecimiento, misma que se muestra en la figura 4.33.

Una vez conociendo la ET de los cultivos, se estimará la eficiencia global de uso del agua en el distrito de riego para dicho año agrícola, ya que se conoce la eficiencia de conducción, desde la presa de almacenamiento hasta la toma granja.

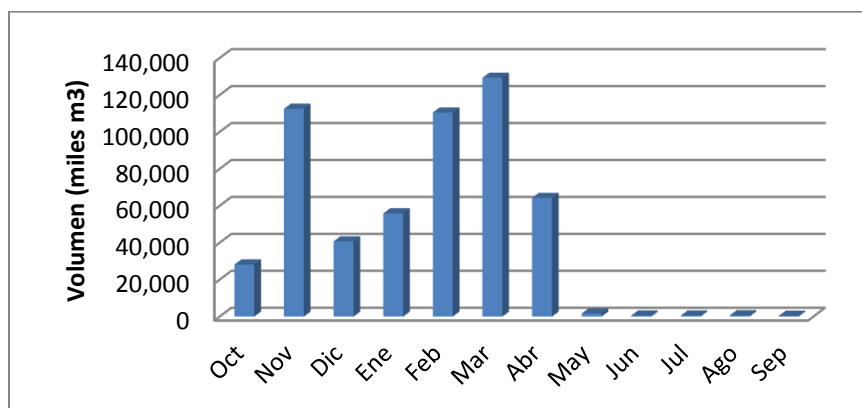


Figura 4.33. Distribución de los volúmenes de agua extraídos en el distrito de riego 038, Río Mayo, Son. Año Agrícola 2007-2008.

Fuente: Gerencia de Distrito de Riego. CONAGUA, 2010.

5. RESULTADOS GENERALES Y RECOMENDACIONES

A continuación se enuncian los resultados obtenidos del presente trabajo.

5.1. Actualización de infraestructura hidroagrícola, planos parcelarios-padrón de usuarios.

En el presente trabajo se mostró la metodología utilizada para generar el Modelo de Sistema de Información Geográfica del distrito de riego 043, Estado de Nayarit, bajo la plataforma de ArcView.

Con dicho modelo fue posible georreferenciar el parcelamiento de los 4 módulos y se tipificó el grado de actualización del padrón de usuarios, así mismo de la infraestructura hidroagrícola existente (canales, drenes, caminos) y sus estructuras; e inclusive se vinculó la imagen de las estructuras tomadas en los recorridos de campo.

En lo correspondiente al padrón de usuarios se identificaron aquellas parcelas que requerían de la actualización, debido a que el usuario registrado no corresponde al usuario actual, y se identificaron aquellas parcelas urbanizadas, que por el cambio de uso ya que no debieran formar parte del padrón.

Al realizar una comparación de las cifras oficiales del distrito de riego 043, Estado de Nayarit y las generadas con el modelo, se aprecian diferencias importantes, tanto en superficie del parcelamiento como de las longitudes de la infraestructura hidroagrícola y la cantidad de estructuras, por lo que es necesario la revisión y validación del personal del distrito de riego para que en su caso rectificar las cifras oficiales.

Esta misma metodología ya fue aplicada en los 85 Distritos de Riego, en el periodo 2006 a 2011, por parte de la Comisión Nacional del Agua, con el Colegio de Postgraduados.

De manera gráfica se muestra la evolución de la superficie y cantidad de distritos en las que fueron desarrollados los modelos de Sistemas de Información Geográfica, del 2006-2011.

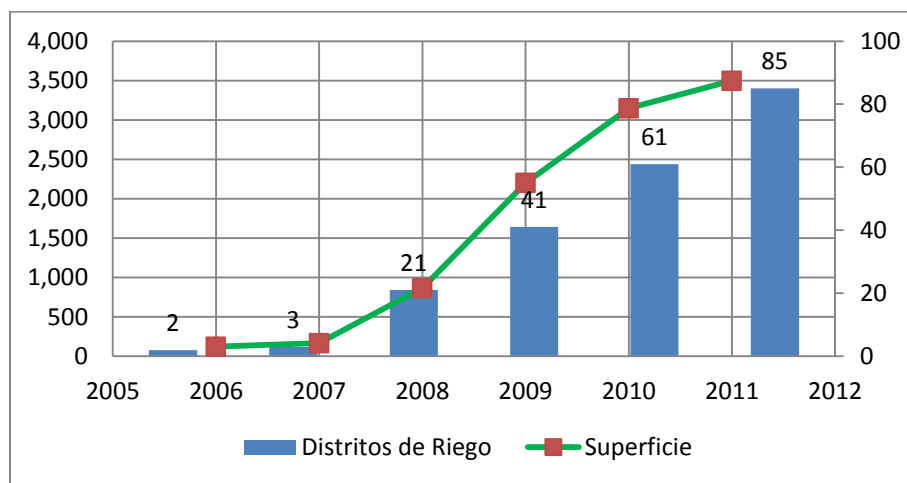


Figura 5.1. Desarrollo del SIG para los Distritos de Riego.

Fuente: Gerencia de Distritos de Riego, CONAGUA, 2012.

Es de señalar que el proceso de vinculación del SIPAD 3 (Sistema Padrón de Usuarios Versión 3), cuya información es a través de una base de datos (Dbase), con el Sistema de Información Geográfica es nula, por lo que el personal de operación del Distrito de Riego, para el proceso de actualización requiere utilizar ambos sistemas.

Se recomienda a corto plazo que:

- El personal técnico de los distritos de riego involucrados en la Operación y Conservación revise la información contenida en los Modelos de Sistemas de Información Geográfica, y se rectifique en su caso las cifras oficiales tanto de superficie y longitudes de la infraestructura hidroagrícola existente.
- Complementar el Modelo de Sistemas de Información Geográfica a fin desarrollar un modulo para facilitar la actualización del padrón de usuarios, con lo cual reemplazará el uso del SIPAD 3.
- Revisar la normatividad aplicable a la actualización del padrón de usuarios, en particular a la numeración de las cuentas y subcuentas, para uniformizar su uso acorde a la vinculación con los sistemas de información geográfica.

5.2. Caracterización de suelos agrícolas.

Con miras hacia la agricultura de precisión, entendida a orientar a los productores de las necesidades hídricas de sus cultivos, así como de los nutrientes para obtener los mejores rendimientos de sus cultivos, es necesario conocer las propiedades física y química de los suelos de las parcelas agrícolas, de los distritos de riego.

En este sentido, los resultados obtenidos con la metodología aplicada en los trabajos desarrollados en el distrito de riego 030, Valsequillo, Pue., durante 2010, por el Colegio de Postgraduados, permitió conocer la textura, densidad aparente, capacidad de campo (CC), Punto de Marchitamiento Permanente (PMP), Punto de Saturación (PS); así como los contenidos de Nitrógeno (N), Fosforo (P) y Potasio (K), Ph y Conductividad Eléctrica.

Con esta información y haciendo uso del Sistema de Información Geográfica, se puede otorga una recomendación de la dosis de fertilización de los cultivos (maíz, arroz, frijol, alfalfa, pasto), en función del rendimiento potencial deseado.

Estudios similares se realizaron en los distritos de riego 019, Tehuantepec, Oax., 034, Estado de Zacatecas, 035, La Antigua, Ver., 082, Río Blanco, Ver.

Con una visión hacia la agricultura de precisión, se recomienda que la CONAGUA deberá continuar caracterizando los suelos de los distritos de riego; y que en los distritos de riego ya estudiados, el personal técnico de la CONAGUA deberá iniciar el desarrollo de metodologías, enfocadas al pronóstico de riego a nivel parcela, para hacer uso de la información determinada: capacidades de campo (CC), punto de marchitamiento permanente (PMP) y punto de saturación (PS).

5.3. Estimación de superficies sembradas.

Del estudio realizado “Evaluación de la Operación en el Ciclo Otoño-Invierno 2011-2012, de los Distritos de Riego, 010, 063, 074 , 075, 076, 108 y 109 y la integración de resultados en un modelo de Sistema de Información Geográfica” por la Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación, A.C. por encomienda del CONAGUA a través del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, mediante técnicas de percepción remota, con imágenes de satélite tipo RapidEye, es posible determinar la superficie de cultivos establecidos, basado en el principio de la reflectancia y procesamiento con el Software Erdas.

En los distritos de riego donde se tenga baja disponibilidad de agua en un año agrícola, se recomienda la aplicación de esta metodología para que se tomen decisiones oportunas y evitar en lo posible autorizar volúmenes de agua adicionales que conduzcan a disponer de poca agua al inicio del siguiente año agrícola.

5.4. Identificación y cuantificación de superficie establecida por cultivo.

Existen estudios encaminados a identificar los cultivos establecidos con técnicas de percepción remota, basado en las firmas espectrales, sin embargo, se encuentra en la fase de calibración debido a los resultados obtenidos.

Se recomienda iniciar la validación de esta metodología en los distritos de riego, con el apoyo del personal técnico de las asociaciones civiles de usuarios, en razón a que se requiere conocer a nivel parcela las fechas de siembra y cultivo establecido.

5.5. Estimación de la evapotranspiración de cultivos.

En la agricultura, conocer la evapotranspiración de los cultivos ha sido uno de los grandes retos; tradicionalmente, la Evapotranspiración del Cultivo ha sido estimada en función de la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_r) y los coeficientes de cultivo (K_c), donde este último está en función del tipo de cultivo y su etapa de crecimiento. Hoy en día con el desarrollo de metodologías de sistemas de información geográfica y técnicas

percepción remota, ha permitido incrementar la precisión en las estimaciones de la Evapotranspiración a gran escala, para cuantificar los requerimientos de agua de los cultivos agrícolas; particularmente porque trata de tomar en cuenta la variabilidad de la ET en el espacio y tiempo.

En este contexto existen dos tendencias, la primera de ellas, se basa en la *relación respuesta espectral - índices de vegetación - coeficiente de cultivo*, vinculado con la estimación de evapotranspiración de referencia (ET_0) utilizando imágenes de satélite y datos de estaciones meteorológicas; y la segunda, bajo el principio de conservación de energía, a través del *balance de energía en superficie, en que ET (o λET)* es obtenida como residuo de dicho balance, utilizando imágenes de satélite que cuentan con la banda térmica y datos de estaciones meteorológicas.

Con el propósito de utilizar de manera generalizada en los Distritos de Riego algunas de estas metodologías, se recomienda continuar validándola en las áreas agrícolas de los distritos de riego. Para ello, entre la información básica que se requiere disponer son las siguientes:

- ✓ Una imagen de satélite por mes, sin nubosidad (Spot/RapidEye o Landsat según la metodología);
- ✓ Información meteorológica horaria que incluya entre otros parámetros, la humedad relativa,

Finalmente, es necesario que las instituciones de educación y/o investigación en colaboración con la CONAGUA contemplen la adquisición de un equipo que mida de manera directa la evapotranspiración, tal como el Eddy Covariance, para validar las metodologías disponibles, así también la adquisición de una estación meteorológica que mida y registre los datos climáticos en la zona de interés.

Entre los beneficios se encuentra la de estimar la eficiencia total del uso del agua en los distritos de riego durante un año agrícola, ya que conocemos los volúmenes de agua extraídos de la fuente de abastecimiento.

5.6. Estimación de la producción agrícola.

Basado en los estudios realizados con sistemas de información geográfica y técnicas de percepción remota en los distritos de riego 011, Alto Río Lerma, Gto.; 038, Río Mayo, Son.; 051, Costa de Hermosillo, Son., y en el Ingenio Emiliano Zapata, Morelos, se determinó que el Índice de Normalización de Vegetación tiene relación lineal con el rendimiento de los cultivos de cebada, trigo y caña de azúcar.

Sin embargo, las ecuaciones obtenidas no son de aplicación general para los mismos cultivos en otras áreas agrícolas, de manera que es necesario realizar estudios específicos para cada cultivo predominante en cada distrito de riego y con ello, determinar la producción agrícola de manera más precisa.

Lo anterior, también permitirá evaluar el desarrollo de los cultivos y en su caso ayudar a los productores a tomar las medidas conducentes que permitan adecuar el manejo de sus cultivos; lo anterior, basado en una agricultura de precisión.

6. CONCLUSIONES GENERALES

En la actualidad la aplicación y uso de los sistemas de información geográfica junto con las técnicas de percepción remota, han tenido un gran desarrollo a un costo accesible, para su uso en la agricultura.

Debido a la poca disponibilidad de personal técnico de la CONAGUA en los distritos de riego y ante la responsabilidad de administrar el recurso hídrico disponible, es apremiante utilizar estas técnicas de la información en el quehacer cotidiano de los distritos de riego. Particularmente será de mayor prioridad en los distritos de riego en donde con frecuencia existe baja disponibilidad de agua en las fuentes de abastecimiento. Para lograr este propósito, la CONAGUA debe continuar impulsando la formación de capital humano para adquirir los conocimientos a fin de generar los trabajos o en su caso interpretar los resultados de trabajos que se generen.

El avance en el ámbito de los distritos de riego ha sido relevante:

- ✓ En los 85 distritos de riego, del 2006 al 2011 se desarrollaron Modelos de Sistemas de Información Geográfica con la georreferenciación de: parcelas, canales, drenes, caminos, fuentes de abastecimiento, estructuras, entre otros, así como la información alfanumérica del padrón de usuarios, y en 11¹ de ellos la digitalización de la documentación soporte-legal de los usuarios. Para validar la información generada y en su caso actualizarla se requiere la participación decidida del personal técnico de los distritos de riego.
- ✓ Con una visión hacia la agricultura de precisión a fin de obtener los mejores rendimientos, se ha iniciado la caracterización físico-químico de los suelos agrícolas en 5² distritos de riego, plasmándose en modelos edáficos; de manera que es posible recomendar dosis de fertilización a nivel parcela; y a mediano plazo con las características físicas de los suelos se podrá vincular con la información climática a fin de pronosticar la demanda del riego de los cultivos a nivel parcelario.

¹ En tres distritos de riego totalmente (004, 034 y 063) y 8 en forma parcial (010, 011, 013, 035, 074, 075, 082 y 085)

² En los distritos de riego: 019, 030, 034, 035 y 082.

- ✓ Con el uso de técnicas de percepción remota, ya es posible determinar la superficie establecida de cultivos en los distritos de riego. Esta metodología fue ya aplicada en 7 distritos de riego del Estado de Sinaloa, uno del estado de Sonora (038 Río Mayo) y en la Región Lagunera, Dgo.-Coah. (017).
- ✓ Y se encuentra en fase de generación y en su caso validación metodologías enfocadas a la estimación de la evapotranspiración de los cultivos, la identificación y cuantificación de superficies a nivel cultivo, así como de la estimación de la producción agrícola.

Es de señalar que con la aplicación de las metodologías desarrolladas hasta la fecha han permitido resolver en parte los problemas presentados en los Distritos de Riego.

La visión hacia una agricultura de precisión en las áreas de los distritos de riego es la adecuada, el reto es desarrollar y/o validar las metodologías apropiadas, de manera que será importante la participación de las instituciones de educación e investigación, y de asociaciones privadas con la participación de la Comisión Nacional del Agua.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Almeida T.I.R., C.R. de Souza Filho y R. Rossetto. 2006. 'ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast'. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 19, pp. 4057-4069.
- Carlos F. Quintana S. Estimación de evapotranspiración utilizando datos de sensores remotos satelitales.
- Castañeda Ibáñez, Carlos. 2012. Estimación de la Evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos.
- Comisión Nacional del Agua. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.
- Diego de la Rosa, 2008. Evaluación Agro-ecológica de Suelos para un desarrollo rural sostenible.
- Enrique Mejía Saenz, et al. 2010. Manual práctico de ArcView GIS 3.2.
- Enrique Palacios Vélez y Julio E. Palacios Sánchez, 2007. Introducción a los sensores remotos y a los sistemas de información geográfica.
- Enrique Palacios Vélez, Adolfo Excebio García, 2011. La Operación de los Sistemas de Riego con apoyo de las técnicas de la información.
- Enrique Palacios Vélez, Julio E. Palacios Sánchez y Luis A. Palacios Sánchez, 2011. Agricultura de Riego Asistida con Satélites.
- Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. Años agrícolas 1996-1997 al 2011-2012. Gerencia de Distritos de Riego. Comisión Nacional del Agua.
- Hatfield J. L. 2008. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. *Agronomy Journal*, vol. 100, pp. 117-131.

Informe de Actividades de los trabajos desarrollados por la Comisión Nacional del Agua en los Distritos de Riego 010, Culiacán-Humaya, Sin.; 030 Valsequillo, Puebla.; 038 Río Mayo, Son., y 043 Estado de Nayarit.

Ji-hua, M. and W. Bing-fang. 2008. Study on the crop condition monitoring methods with remote sensing. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/10_WG-VIII-10/05.pdf (Consultado el 11 de marzo de 2010).

Krishna Rao P. V. 2002. Remote sensing: A technology for assessment of sugarcane crop acreage and yield. *Sugartech*, vol. 4, pp. 97-101.

Marisol Reyes, Isabel Marín, Fernando Paz, Jaime Garatuza, Martín Bolaños. Estimación de la evapotranspiración de los cultivos, utilizando sensores remotos, como estrategia para incrementar la productividad del agua.

Murillo P.J., C.A. Osorio, J.A. Carbonell y A.E. Palma. 2010. Monitoring sugarcane crops in the Cauca river valley (Colombia), using MODIS satellite images. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technology*, vol. 27, pp. 1-5.

Ormeño, V. Santiago. 2006. Teledetección Fundamental. Departamento de ingeniería topográfica y cartografía. Universidad Politécnica de Madrid.

Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56, 2007

Richard G. Allen, Masahiro Tasumi, Ricardo Trezza. Application Manual for Landsat Satellite Imagery. METRIC -Mapping Evapotranspiration at High Resolution-, 2007

Sakthivadivel R.S., Thiruvengadachari S., Amerasinghe U., Bastiaansse W.G.M. y Molden D. 1999. Performance evaluation of the Bhakra Irrigation System, India, using remote sensing and GIS techniques. Research Report 28. International Water Management Institute. Sri Lanka.

- Schmidt E.J., G. Narciso, P. Frost y C.J. Gers. 2000. 'Application of remote sensing technology in the South African sugar industry: a review of recent research findings'. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association, vol. 74, pp. 192-201.
- Simões M., J. Rocha y R.A. Lamparelli. 2005. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. Scientia Agricola (Piracicaba, Brazil), vol. 62, no. 3, pp. 199-207.
- Simões M.D.S., J.V. Rocha y R.A. Lamparelli. 2003. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas zafras por meio de radiometria de campo. En: Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, INPE, pp.2367-2374.
- Ueno M., Y. Kawamitsu y K. Maeda. 2005. Combined applications of NIR, RS, and GIS for sustainable sugarcane production. Sugarcane international, vol. 23, pp. 8-11.
- USGS. 2008. U.S. Geological Survey. Página de internet del USGS: <http://edcdaac.usgs.gov/>.
- Zenteno C. Guillermo. 2012. Aplicación de tecnologías de percepción remota en la estimación de rendimientos en caña de azúcar. Colegio de Postgraduados.
- Zhang P. y B. Anderson. 2005. Potential monitoring of crop production using a satellite-based Climate-Variability Impact Index. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 132, pp. 344-358.