

IWMI, Serie Latinoamericana: No. 15

SUPERFICIE AGRÍCOLA ESTIMADA MEDIANTE ANÁLISIS DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN GUANAJUATO, MÉXICO.

Francisco J. Flores-López

y

Christopher A. Scott



Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

INSTITUTO INTERNACIONAL DEL MANEJO DEL AGUA

IWMI, Serie Latinoamericana

1. Ellen Rymshaw. 1998. Análisis del Desempeño de la Irrigación en los Distritos de Riego Bajo Río Bravo y Bajo Río San Juan, Tamaulipas, México.
2. Charlotte du Fraiture y Carlos Garcés-Restrepo. 1998. Evaluación de las Tendencias y los Cambios en el Desempeño de la Irrigación: El Caso del Distrito de Riego de Samacá, Colombia.
3. Alejandro Cruz y Gilbert Levine. 1998. El Uso de Aguas Subterráneas en el Distrito de Riego 017, Región Lagunera, México.
4. Jorge Sotomayor, Wim H. Kloezen, Carlos Garcés-Restrepo y Elena Bastidas. 1999. Manejo del Agua en las Acequias Privadas Garrapatal y el Tambo en la Provincia del Carchi, Ecuador.
5. Marinus G. Bos y Jorge L. Chambouleyron (Editores). 1999. Parámetros de Desempeño de la Agricultura de Riego de Mendoza, Argentina.
6. Gilbert Levine. 1999. Entendiendo el Comportamiento del Riego: La Disponibilidad Relativa del Agua como Variable Explicativa.
7. Carlos Garcés-Restrepo y Julio Guerra-T. 1999. Consideraciones de Impacto Ambiental por Efecto de las Obras de Regadío en el Distrito de Riego Chancay-Lambayeque, Perú.

IWMI, Serie Latinoamericana: No. 15

***SUPERFICIE AGRÍCOLA ESTIMADA MEDIANTE
ANÁLISIS DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN
GUANAJUATO, MÉXICO.***

IWMI, Serie Latinoamericana: No. 15

***SUPERFICIE AGRÍCOLA ESTIMADA MEDIANTE
ANÁLISIS DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN
GUANAJUATO, MÉXICO.***

Francisco J. Flores-López

y

Christopher A. Scott



INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE

Los autores: Francisco J. Flores-López es especialista en Ingeniería de Recursos Hidráulicos, prestando sus servicios en investigación para el Instituto Internacional del Manejo del Agua, en el programa IWMI-México y Christopher A. Scott es hidrólogo, investigador y jefe del programa IWMI-México.

Los autores agradecen a la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Rural del estado de Guanajuato y al personal de los Distritos de Desarrollo Rural en el estado, por su valiosa y definitiva participación. Muy en especial, al Doctor José Antonio Laborde Cancino por su amplia disposición y experiencia puesta en este trabajo. El IWMI agradece el apoyo financiero a este estudio otorgado por la Fundación Ford (Oficina de México), y a los Gobiernos de Alemania (BMZ) y Dinamarca.

Flores-López, Francisco J. y Scott, Christopher A. 2000. Superficie agrícola estimada mediante análisis de imágenes de satélite en Guanajuato, México. IWMI, Serie Latinoamericana No. 15. México, D.F., México: Instituto Internacional del Manejo del Agua.

IWMI, 2000. Todos los derechos reservados.

El Instituto Internacional del Manejo de la Irrigación, es uno de los 16 centros apoyados por el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), fue creado por un acta del Parlamento de Sri Lanka. El Acta está actualmente siendo revisada para que se lea Instituto Internacional del Manejo del Agua (IWMI, por su sigla en inglés).

Los autores asumen toda la responsabilidad por el contenido de esta publicación

PRESENTACIÓN DE LA SERIE

El Instituto Internacional del Manejo del Agua (IWMI, por sus siglas en Inglés) fue establecido en el año de 1984 con sede en Colombo, Sri Lanka.

El IWMI empezó actividades en Latinoamérica cuando en Mayo de 1990 co-patrocinó con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje una sesión especial sobre el Manejo del Agua en Latinoamérica, en el marco del Décimo-cuarto Congreso Internacional de la Comisión.

Posteriormente, en Noviembre de 1991, el Instituto organizó en compañía del Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Hídricas de la Argentina, un Seminario Internacional sobre Sistemas de Riego Manejados por sus Usuarios.

Los dos eventos anteriores abrieron campo al IWMI para buscar establecer un programa regular en Latinoamérica. Fue así como en el año 94 abrió su Programa de México, seguido en el 95 por el Programa Regional Andino con sede en Calí, Colombia. Este último culminó en Septiembre del 97.

El programa del IWMI en México continúa ininterrumpido hasta la fecha y es así como éste da origen a la idea de ésta "IWMI, Serie Latinoamericana" que aquí se presenta.

El Instituto aspira, por medio de esta publicación, dar a conocer más ampliamente en la región, los resultados de los trabajos de investigación ejecutados por nuestros investigadores y/o sus colaboradores.

Aunque la idea inicial es dar cabida únicamente a aquellos trabajos directamente relacionados con el Instituto, no pensamos descartar, en manera alguna, la posibilidad de dar espacio a otras contribuciones consideradas pertinentes a las metas globales del Instituto.

Como puede esperarse, el futuro de la serie dependerá de la aceptación y retroalimentación reciba de parte de la comunidad a la cual esta dirigida: forjadores de políticas relativas al recurso agua, investigadores afines a la problemática del recurso, organizaciones e individuos involucrados, en una u otra forma, en aspectos técnicos, institucionales, económicos y sociales del manejo del agua, particularmente a la región latina pero en general a nivel global.

Para sus comentarios, en español o inglés, puede comunicarse a cualquiera de las dos direcciones que aparecen en el reverso de esta publicación.

Atentamente

Carlos Garcés-Restrepo

Coordinador de la Serie Latinoamericana

ÍNDICE

pág

LISTA DE CUADROS

	pág
Cuadro 1 Infraestructura principal superficial de la cuenca Lerma-Chapala ...	8
Cuadro 2 Características del Satélite Landsat V TM	10
Cuadro 3 Cultivos principales a identificar en campo	12
Cuadro 4 Cultivos y cuerpos principales a identificar en imágenes de satélite .	17
Cuadro 5 Lista definitiva de cultivos y cuerpos principales a identificar en imágenes de satélite	19
Cuadro 6 Resultados de clasificación y superficies reportadas por SDAyR ...	22
Cuadro 7 Resultados de la clasificación por municipios	27
Cuadro 8 Láminas de riego medidas en trigo y alfalfa	35
Cuadro 9 Láminas de riego aplicadas por ciclo agrícola	36
Cuadro 10 Láminas de riego medidas en Unidades de Riego	36
Cuadro 11 Láminas de riego medidas en modulos de riego	37
Cuadro 12 Información sobre láminas de riego	38
Cuadro 13 Estimación de volúmenes utilizados	39

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1 Ubicación del estado de Guanajuato en la República Mexicana	5
Figura 2 Ubicación de las imágenes de satélite en el estado de Guanajuato	11
Figura 3 Respuesta de la vegetación a diferentes longitudes de onda	18
Figura 4 Representación espacial de tipos de cubiertas en el estado de Guanajuato, O-I 98/99	23
Figura 5 Municipio de Irapuato con los diferentes cultivos identificados y tipos de cubiertas, para el ciclo O-I 98/99	26
Figura 6 Representación espacial de cultivos en el ciclo O-I 98/99 por AGEBs Rurales	32
Figura 7 Láminas de riego medidas en trigo	33
Figura 8 Láminas de riego medidas en alfalfa	34

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

AGEB:	Area Geoestadística Básica – México
CNA:	Comisión Nacional del Agua – México
DR 011 ARL:	Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma – México
DR 085 LB:	Distrito de Riego 085 La Begoña – México
GPS:	Sistemas de Geoposicionamiento Global
INEGI:	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática- México
MSNM:	Metros sobre nivel del mar
LAN:	Ley de Aguas Nacionales - México
OI:	Subciclo Agrícola Otoño Invierno
PV:	Subciclo Agrícola Primavera Verano
RH12:	Región Hidrológica Número 12 Lerma Santiago – México
RH26:	Región Hidrológica Número 26 Pánuco - México
SDAyR:	Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato México
TM:	Sensor Thematic Mapper

PRÓLOGO

Igual que en muchos países, las demandas de agua en el sector agrícola en México son bastante elevadas. Además, la agricultura es el único sector consumidor de este recurso que no cuenta con mecanismos adecuados para la medición de los volúmenes extraídos y utilizados. Tan sólo en la cuenca media del Río Lerma, donde se realizó el estudio que se presenta, la extracción del agua del sector agrícola representa aproximadamente el 90% de las extracciones totales. Cabe mencionar que estos volúmenes no necesariamente se utilizan en su totalidad, ya que un porcentaje se pierde en evapotranspiración y otra parte considerable se infiltra en el subsuelo para recargar los acuíferos. Sin embargo, no existen mediciones para comprobar las estimaciones de los volúmenes extraídos.

El presente trabajo introduce nuevas técnicas para la detección de superficies de cultivos que representan la demanda del agua del sector agrícola, en combinación con análisis innovadores de datos medidos en campo del riego aplicado a esos cultivos. La integración de los métodos de sensores remotos y los estudios de campo aplicados muchas veces no se realiza, ya que se trata de dos disciplinas con diferentes enfoques y técnicas.

El IWMI ha impulsado la aplicación de análisis de sensores remotos al manejo de agua en cuencas de diversas partes del mundo. Contando con una trayectoria de varios años de investigación de campo en México, le permite a los autores abrir una brecha en la aplicación de estas técnicas al manejo del agua en el sector agrícola. Además, el trabajo está respaldado con trabajo intensivo de campo por parte de sus colaboradores en la cuenca del río Lerma. Los autores discuten el potencial que tienen estas nuevas técnicas con miras a establecer con mayor precisión las áreas regadas en una zona dada; y apuntan a las ventajas y desventajas de las mismas. Pero ellos llevan el ejercicio más allá de la sola determinación de las áreas al hacer un intento en la estimación de la cantidad (volúmenes) del recurso hídrico aplicado con resultados muy interesantes que no siempre coinciden con los resultados obtenidos en forma tradicional (reportes de campo).

Este trabajo contiene otro resultado importante desde el punto de vista de las metas globales del Instituto como es el fortalecimiento institucional. Este estudio permitió desarrollar una muy buena colaboración con las instancias regionales encargadas o responsables del manejo del recurso agua en la zona de estudio. El IWMI quedó muy satisfecho de este arreglo que obviamente trajo beneficios tanto a la investigación como al desarrollo agrícola en la zona de estudio. Esperamos ver en un futuro cercano más colaboración de este tipo.

En resumen, el presente trabajo complementa bien los otros estudios que han salido en la Serie Latinoamericano del IWMI, en el sentido que es interdisciplinario, aplicado, y sobre todo novedoso. Como siempre le pedimos a nuestros lectores que nos retro-alimenten con sus opiniones y sugerencias, y esperamos que algunos puedan aplicar estas técnicas en sus áreas de influencia.

Carlos Garcés-Restrepo

Representante de IWMI para America Latina

RESUMEN

La cuenca del Lerma - Chapala, se ubica en la parte Centro-Oeste de México, donde se producen varios cultivos importantes, como son granos básicos, forrajes, y hortalizas. El bajío Guanajuatense se ubica en la cuenca Lerma - Chapala, el cual presenta unas condiciones edafológicas, topográficas y climatológicas idóneas para el desarrollo de la agricultura; también presenta una limitada disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas lo cual ha ocasionado una sobreexplotación de los mantos acuíferos.

La Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Rural (SDAyR) del estado de Guanajuato quiso comprobar las superficies de cultivos agrícolas reportadas por el personal de campo. Ante esta situación surgió la necesidad de utilizar otros métodos para estimar las superficies de cultivo, por lo cual el Instituto Internacional del Manejo del Agua (IWMI) y SDAyR desarrollaron un proyecto colaborativo de investigación aplicada, cuyo objetivo general fue delimitar las superficies de los cultivos principales en el estado y estimar los volúmenes de agua utilizados en estas áreas de cultivo, en base a mediciones hechas en campo por personal del IWMI y colaboradores. Se utilizó el método de clasificación supervisada con la función probabilística de máxima verosimilitud para clasificar las imágenes de satélite.

Los principales cultivos identificados del ciclo Otoño-Invierno (Diciembre - Mayo) 1998/99 fueron: alfalfa (96,841 ha), trigo/cebada (103,883 ha), varias hortalizas (48,391 ha) y brócoli/coliflor (25,151 ha), que cubren la mayor parte de las zonas agrícolas del estado. Los mismos cultivos reportados por las estadísticas oficiales fueron: alfalfa (45,665 ha), trigo/cebada (81,900 ha), varias hortalizas (20,760 ha) y brócoli/coliflor (6,596 ha); presentándose una discrepancia en el estado de Guanajuato del 62% en los cultivos del ciclo Otoño-Invierno (sin considerar a los cultivos perennes).

Con láminas de riego medidas en campo, se pudo estimar los volúmenes de agua que están usando los usuarios de riego, tanto de pozos como en gravedad; para el ciclo agrícola Otoño-Invierno 1998/99; las láminas consideradas fueron para el trigo/cebada de 1.35 m, para la alfalfa de 1.48 m, Brócoli 0.53 m y otros cultivos de 0.86 m. Los volúmenes estimados que fueron utilizados en las superficies estimadas de cultivo fueron de $3,670 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

I. INTRODUCCIÓN

Un dato fundamental para la planeación agrícola y económica de cualquier región, estado o país, es la superficie cultivada. De ella depende el cálculo de producción agrícola, los requerimientos de insumos, tales como fertilizantes, pesticidas, maquinaria, mano de obra, etc., como también los estudios mercado-técnicos. El proceso actual de reporte de estas superficies, parte de la recopilación de datos en campo, observaciones secundarias, entrevistas con una sub-muestra de los mismos productores, o métodos indirectos con base en la cantidad de semilla vendida. Todos estos métodos son poco confiables, además de representar un gasto financiero considerable.

Se ha aplicado con éxito la estimación de superficies cultivadas usando sensores remotos en diversos países, tales como Estados Unidos, Canadá, Brasil, Argentina y países miembros de la Unión Europea. En México, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) ha realizado varios estudios con resultados alentadores. Cabe mencionar, que todos los análisis de sensores remotos dependen de datos de campo, así que pueden apoyar y facilitar la recopilación de datos en campo, pero no reemplazarla.

Lo mismo aplica en el caso de Guanajuato, uno de los estados mexicanos de mayor importancia en la producción agrícola. Tan solo en el bajo guanajuatense se encuentran 123,654 ha de cultivo intensivo por distritos de riego (CNA, 1992), además de una superficie muy considerable de temporal. Existen dos ciclos agrícolas principales: Otoño – Invierno (O-I, de Diciembre a Mayo) y Primavera – Verano (P-V, de Mayo a Octubre). Sin embargo, la poca confiabilidad de los datos reportados obstaculiza la planeación precisa de la producción agrícola y los factores que puedan limitar a ésta, sobre todo la disponibilidad del agua de riego.

El Instituto Internacional del Manejo del Agua (International Water Management Institute, o IWMI por su sigla en inglés) estableció un proyecto de investigación en Celaya Guanajuato en 1995; con el objetivo de documentar y estudiar la transferencia de los distritos de riego hacia los usuarios. En 1998 se trasladó la oficina a Irapuato Guanajuato, con un enfoque sobre la Cuenca Lerma-Chapala, de la cual el estado de Guanajuato representa la mayor extensión territorial y el mayor usuario del recurso agua. La cuenca Lerma-Chapala tiene una extensión de 55,551 km² en el centro de México y cubre cinco entidades: Estado de México, Querétaro, Guanajuato, Michoacán y Jalisco. La región está sujeta a cambios económicos y sociales muy rápidos. Se caracteriza por un sector agrícola dinámico y un sector industrial creciente, el cual forma parte de un 35% del PIB industrial del país.

Las estimaciones sobre las superficies regadas con aguas superficiales y subterráneas en la cuenca Lerma-Chapala, son poco precisas y variables de acuerdo a estudios disponibles (Mestre, 1997; Consejo Consultivo, 1991) por consiguiente, es la misma situación para el estado de Guanajuato. Por lo anterior, se realizó esta investigación planteándose los siguientes objetivos:

1.1. Objetivos de la Investigación:

1. Estimar las superficies de los cultivos principales en el estado de Guanajuato,

correspondientes al ciclo agrícola Otoño-Invierno 1998/99, mediante el análisis de imágenes de satélite con el método de clasificación supervisada.

2. Estimar los volúmenes de agua aplicados en el riego de las superficies estimadas de los cultivos, ya que durante el ciclo agrícola Otoño - Invierno hay nula producción bajo temporal.
3. Analizar y comparar las superficies reportadas con las estimadas; así como, los volúmenes aplicados en ambos casos.

1.2. Antecedentes

La cuenca de Lerma-Chapala, se ubica en la parte centro-oeste de México, donde se producen varios cultivos importantes, como son granos básicos, hortalizas, forrajes y frutales. Debido a las condiciones de clima y a la limitación en la disponibilidad de aguas superficiales, se ha observado un incremento en el uso de las aguas del subsuelo para riego de cultivos, lo cual ha ocasionado un continuo decremento de los niveles de bombeo y otros efectos negativos en el medio ambiente (Scott y Garcés, 2000). En esta región como en el resto del país, los derechos para el uso y aprovechamiento de las aguas subterráneas, los concede el gobierno federal mediante un título de concesión, para un volumen específico y por un número determinado de años. Sin embargo, en la práctica no se vigila el cumplimiento de los términos de las concesiones, principalmente porque el agua extraída de los pozos no se mide y en general se desconocen los niveles de sobreexplotación a que se ha llegado en la mayoría de los acuíferos. Esta situación se complica por la falta de información temporal y espacial, sobre los usos del agua subterránea para riego.

Con respecto a las aguas superficiales utilizadas, se tienen datos generados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) a través de los Distritos de Riego 011 Alto Río Lerma (DR 011 ARL) y 085 La Begoña (DR 085 LB) en los informes de distribución de aguas, en los cuales, se muestran los volúmenes extraídos de las presas de almacenamiento, las eficiencias de conducción y aplicación, así como, las superficies regadas con dichos volúmenes. Esta información sobre volúmenes se considera confiable, ya que se tiene un control sobre los volúmenes almacenados con distribución aforada. El problema, se localiza al englobar las superficies de riego por aguas subterráneas y superficiales, ya que no se cuenta con información confiable de las superficies regadas de ambas fuentes y los volúmenes utilizados.

El sistema de los ríos Lerma-Santiago, drenan una gran parte de las tierras altas de la parte centro-oeste del país, para descargar en el Océano Pacífico. La gran cuenca se integra con varias subcuencas, de las cuales la más importante es la del río Lerma, el cual descarga sus aguas en el lago de Chapala, y a su vez desagua en el río Santiago. Esta subcuenca del Lerma-Chapala cubre un área de 55,551 km², donde se están observando rápidos cambios económicos y sociales.

Por otra parte, mientras que el escurrimiento anual del río Lerma apenas representa un poco más del uno por ciento del total del país, la población que vive en esta región representa un 10 % del

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

total nacional y el área regada es del orden del 14% del total regado en México. Por esta razón, la región está encarando una creciente escasez de agua, con una disminución de la disponibilidad anual de agua por persona, que en la actualidad es de 950 m³ por año. Desde mediados de la década de los ochenta, los recursos hidráulicos de esta subcuenca se están sobre explotando, lo que implica una continua presión sobre las aguas superficiales y sobre las subterráneas, y esto en parte contribuye a disminuir la cantidad y la calidad del agua que llega al lago de Chapala. Otra consecuencia de la escasez del recurso, es que hay una tendencia a la reasignación del uso de las aguas, con transferencia del uso agrícola al urbano e industrial. En la región Lerma-Chapala se estima que se riegan alrededor de 700,000 ha, por lo que el estudio del uso del agua en el sector agrícola es importante ya que utiliza un 78% del recurso disponible (Mestre, 1997).

En esta región, se ha creado el primer Consejo de Cuenca, tal como lo considera la Ley de Aguas Nacionales (LAN), el cual está sirviendo de modelo para la creación de otros consejos. Una de las primeras recomendaciones del “Consejo”, ha sido vedar nuevos aprovechamientos y reglamentar los existentes a fin de controlar el uso de las aguas superficiales con el fin de garantizar su disponibilidad y calidad para los usuarios con derechos autorizados. Con el panorama planteado podemos decir que, el presente estudio puede ser muy valioso para la toma de decisiones relacionadas con el manejo de agua en la cuenca.

II DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Localización, límites y extensión

El estado de Guanajuato se localiza en la parte central de la República Mexicana, entre los paralelos 19° 55' 08'' y 21° 52' 09'' de latitud norte y los meridianos 99° 39' 06'' y 102° 05' 07'' de longitud oeste; abarca una superficie total de 30,768¹ km², que representa un poco más del 1.5% del territorio nacional, lo que ubica al estado en el lugar número 22 en extensión en el país. Colinda al norte con los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, al este con Querétaro, al oeste con Jalisco y al sur con el estado de Michoacán (Figura 1). En términos de su organización político-administrativa, el estado se encuentra dividido en 46 municipios. La población total estatal, según datos del conteo General de Población y Vivienda 1995 (datos preliminares), es de 4'406,568 habitantes. Guanajuato es uno de los estados más productivos en términos agrícola e industrial del país, ya que destaca entre los primeros lugares dentro de algunos renglones de la economía nacional (INEGI, 1998).

2.2. Marco Fisiográfico General

Tipos de suelo: Existen tres zonas características que influyen sobre el comportamiento de los suelos que componen el estado. Hacia el extremo noreste se ubica la Sierra Madre Oriental, en la cual se puede observar un suelo clasificado como Litosol. La mesa central se localiza en la parte norte de la entidad, en la cual predominan los suelos de tipo Feozem háplico y en la porción sur, se ubica el Eje Neovolcánico, donde se desarrollan comúnmente suelos tipo Vertisol, donde se encuentra la zona de producción agrícola más importante del estado.

Uso del Suelo: Una de las principales actividades económicas en Guanajuato es la agricultura, para lo cual se han destinado aproximadamente 1'150,000 ha bajo riego y temporal; en la región media y sur, se localiza el llamado bajío Guanajuatense. Desde un punto de vista agrícola, esta región es la más importante, debido a que en ella se encuentra la mayor superficie cultivada bajo riego, considerada también, como la de mayor producción a nivel nacional (INEGI, 1998).

2.3. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. Garcia y empleada por la Dirección General de Geografía en la elaboración de las cartas que produce INEGI, se distinguen dos grupos de climas: secos y templados.

El grupo de climas secos se distribuye hacia la porción norte y noreste del estado; dentro de este grupo se distingue el tipo de clima seco, cuya característica principal es que la evaporación excede a la precipitación. Se divide a su vez en dos subtipos: semiseco templado con lluvias en verano, con porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2% y verano cálido; y el semiseco semicálido, con lluvias en verano, precipitación invernal entre 5 y 0.2% e invierno fresco.

¹ INEGI-DGG (Docto. 6233. 233/91). Superficie de la República Mexicana por estados. Inédito

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

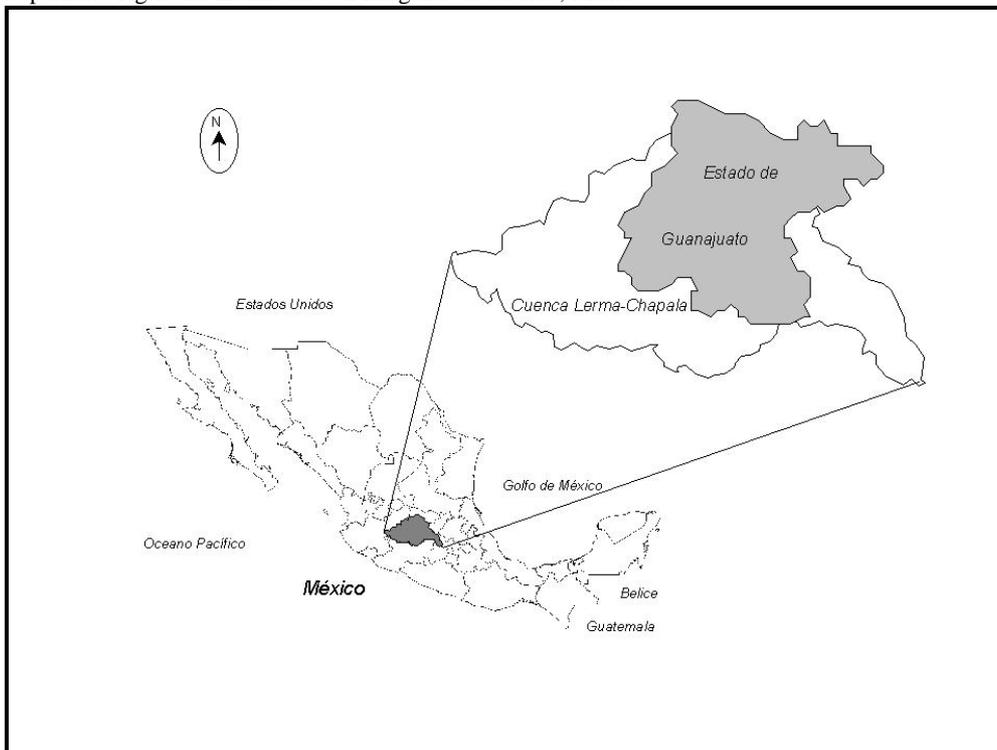


Figura 1. Ubicación del Estado de Guanajuato en la República Mexicana

El grupo de climas templados se presenta en el estado en dos subgrupos: semicálido y templado. El semicálido se caracteriza por presentar una temperatura media anual mayor a los 18° C; por su grado de humedad se han diferenciado en dos tipos: semicálido subhúmedo con lluvias en verano, es el menos húmedo de los semicálidos subhúmedos, con precipitaciones del mes más seco menor a 40 mm, y porcentaje de precipitación invernal mayor de 10.2. Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, es el de humedad media de los semicálidos subhúmedos, con precipitación del mes más seco menor a 40 mm, y porcentaje de precipitación invernal menor a 5. El subgrupo de clima templado presenta una temperatura media anual entre 12° y 18° C, la temperatura del mes más frío oscila entre los -3° y 18° C. De acuerdo a los tipos de clima presentes en el estado, para el ciclo agrícola PV, se tienen las condiciones adecuadas para el desarrollo de los cultivos; para el ciclo agrícola OI, las temperaturas para los meses de invierno llegan a ser desfavorables para algunos cultivos, por lo que en este ciclo, el principal cultivo es el trigo o cebada, el cual es resistente a bajas temperaturas en las etapas fenológicas iniciales.

2.4. Temperatura, Precipitación y Evaporación

En la porción norte de Guanajuato, predomina una temperatura media anual que oscila entre los 14° y 18° C, excepto en el extremo noreste, en donde alcanza hasta los 22° C. En el sur del

estado, la temperatura media anual registrada varía de 18° a 20° C. Temperaturas menores a los 18° C se manifiestan en los extremos sur y sureste del estado.

La precipitación presenta un patrón de distribución bastante regular, ya que en la porción septentrional varía desde 400 hasta 600 mm totales anuales, excepto en el extremo nororiental en donde alcanza los 1000 mm. En el resto de la entidad predomina un rango de precipitación entre 600 mm a 800 mm, con un notable aumento en las partes que constituyen las principales sierras; así como las estribaciones meridionales. La evaporación real media anual predominante en el estado, es de 600 mm, aunque presenta una tendencia a disminuir gradualmente hacia el norte del estado con 500 mm (INEGI, 1998). Como se puede observar, el estado presenta las condiciones climatológicas adecuadas para el desarrollo de la actividad agrícola ya sea bajo riego o en algunas zonas del estado bajo temporal.

2.5. Geomorfología

En el estado se presentan tres zonas con características morfológicas y fisiográficas propias. La provincia de la sierra madre oriental se encuentra ubicada en la porción nororiental y ocupa una pequeña área denominada Carso Huasteco, cuya altitud oscila entre los 2000 y 2460 m, en donde destaca una morfología de sierras y cañones escarpados, constituidas en su mayoría, por rocas sedimentarias que fueron plegadas por procesos endógenos durante el cretácico, dando como resultado estructuras anticlinales y sinclinales, en las cuales ocurren recumbencias y cabalgaduras.

El área que ocupa la mesa del centro comprende a las subprovincias Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes, sierras y llanuras del norte de Guanajuato y las discontinuidades: sierra Cuatralba y sierra de Guanajuato. Es una zona de gran variedad morfológica, ya que existen tanto llanuras como sistemas montañosos y pequeñas elevaciones aisladas, con alturas que oscilan entre 2000 y 2960 msnm; los materiales que constituyen son diversos y de origen distinto, pudiéndose identificar grandes extensiones de relleno aluvial y secuencias litológicas representadas por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, sedimentarias y metamórficas.

La porción sur corresponde al Eje Neovolcánico, ocupada en su mayor parte por la subprovincia del Bajío Guanajuatense y pequeñas áreas que pertenecen a la subprovincias Sierras y Bajíos Michoacanos, Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo y Altos de Jalisco. La región se caracteriza por un típico paisaje volcánico, donde coexisten mesetas formadas por coladas de lava, aparatos volcánicos y valles intermontanos, cuya altitud oscila entre 2000 y 3280 m. En esta zona se encuentran las zonas planas del estado, donde los suelos son profundos y fértiles, y por consiguiente es donde se desarrolla la mejor agricultura del estado, bajo riego y temporal.

2.6. Hidrología superficial y subterránea

El territorio del estado de Guanajuato pertenece a dos Regiones Hidrológicas; la Región Hidrológica Lerma-Santiago (RH12), cuyas aguas fluyen hacia el Océano Pacífico, la cual comprende cerca del 83.6% del territorio estatal y contribuye con más del 90% del volumen total de agua –escurrimiento superficial y recarga de acuíferos- y la Región Hidrológica del

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

Pánuco (RH26), cuyas aguas llegan al Golfo de México con un mínimo aprovechamiento dentro del estado. La infraestructura hidráulica comprende cerca de 1500 almacenamientos de agua superficial; los de mayores dimensiones en el estado son la presa Solís, con 1217 millones de m³ de capacidad, y la presa Ignacio Allende con capacidad de 251 millones de m³, localizadas en la cuenca del río Lerma. En la cuenca del Pánuco sólo se presentan obras de menores dimensiones, tales como bordos y represas. En el Cuadro 1 se presentan los almacenamientos principales que hay en la cuenca Lerma-Chapala.

Por otra parte, debido a sus características geológicas, el estado de Guanajuato posee condiciones propicias para la conformación de acuíferos, los cuales, debido a la demanda de abastecimiento de agua para la agricultura y el abastecimiento público urbano, son explotados más allá de su capacidad sustentable, dándose en casi todos ellos un déficit creciente en el equilibrio de extracción-recarga natural². Los abatimientos promedio son de 2 metros, llegando hasta 5 metros anuales en algunas zonas. Según la CNA, en Guanajuato hay alrededor de 16,500 pozos, que representan aproximadamente un 12% del total nacional. Se estima que el 84% del agua extraída se utiliza en actividades agrícolas, cerca de 11% en uso urbano y 5% en la industria y otros usos. Son extraídos 2818 millones de m³ anuales, contra una recarga estimada de 1979 millones de m³, lo que arroja un déficit anual de 839 millones de m³. Este desequilibrio se refleja en el abatimiento constante y acelerado de los niveles piezométricos (Guerrero, 1999).

En cuanto a las aguas superficiales, la CNA ha estimado una generación de escurrimiento superficial de 1364 millones de m³ anuales en Guanajuato, contra una extracción de 1557, lo que genera un déficit anual de 193 millones de m³. Cabe señalar que en este balance no se consideran los retornos como agua residual de los 4375 millones de m³ que son extraídos anualmente en el estado de fuentes superficiales o subterráneas; de éstos, más de 650 millones de m³ son utilizados en industrias o zonas urbanas, por lo que mínimamente retornan a los cuerpos de agua superficiales cerca de 400 millones de m³, cuyo aprovechamiento está parcialmente controlado y se fundamenta en derechos de distinta naturaleza.

Cuadro 1. Infraestructura principal superficial de la cuenca Lerma-Chapala

Estado	Nombre de la Presa	Capacidad (Mm ³)			Uso
		Conservación	Muerta	Útil	
México	José A. Alzate	35.3	2.6	32.7	A
	I. Ramírez	20.5	1.7	18.8	A
	Tepetitlán	70.1	2.0	68.1	A
	F.T. Fabela	7.5	1.2	6.3	A
Guanajuato	Solis	800.0	15.6	784.4	M
	San Juan de Llanos	8.5	0.5	8.0	A
	Los Reyes	4.8	0.3	4.5	A
	Peñuelitas	24.0	0.7	23.3	A
	Ignacio Allende	149.0	26.2	122.8	A
	Neutla	4.6	0.4	4.2	A
	La Purísima	110.0	22.5	87.5	A

² De 20 zonas acuíferas en las que la CNA divide al estado para fines administrativos, dos se consideran no explotadas y una en equilibrio; en el resto ocurre un desequilibrio importante, aproximadamente de 3 unidades de “salidas” por cada 2 de “entradas”, en promedio.

	El Palote	9.0	1.0	8.0	AP
	Mariano Abasolo	21.5	1.0	20.5	M
	La Golondrina	6.0	0.6	5.4	A
	Jesús María	16.6	1.4	15.2	A
	A. Obregón	12.2	0.3	11.9	A
	El Cubo	13.5	0.7	12.8	A
	El Barrial	50.0	1.5	48.5	M
	L. de Yuriria	188.0	22.0	166.0	A
	La Soledad	4.2	1.7	2.5	
Michoacán	Antonio Rodríguez	6.5	1.0	5.5	C
	Gonzalo	9.0	0.5	8.5	A
	Arco	5.3	0.1	5.2	A
	Tres Mezquites	11.3	1.5	9.8	A
	Cofradía	8.0	0.7	7.3	A
	Los Alazanes	4.8	0.4	4.4	A
	Barraje de Ibarra	19.3	2.0	17.3	A
	Copándaro	6.2	0.5	5.7	A
	Tercer Mundo	18.5	1.5	17.0	A
	L. del Fresno	13.7	0.5	13.2	A
	Aristeo Mercado	16.1	3.0	13.1	A
	Melchor Ocampo	198.0	15.0	183.0	A
	Tepuxtepec	425.0	0.0	425.0	GE
	Jaripo	9.7	0.5	9.2	A
	Urepetiro	11.0	2.0	9.0	A
Guaracha	42.8	2.0	40.8	A	
Querétaro	El Batán	6.0	1.0	5.0	A
	San Pedro Huimilpan	5.0	0.5	4.5	A
	Ceja de Bravo	5.0	0.5	4.5	A
	Sta. Catarina	8.0	1.0	7.0	A

Cuadro 1. Continuación

Estado	Nombre de la Presa	Capacidad (Mm ³)			Uso
		Conservación	Muerta	Útil	
Jalisco	El Volantín	18.4	6.0	12.4	A
	Las Arcinas	5.7	0.8	4.9	A
	La Huaracha	5.0	0.3	4.7	A
	Garabatos	12.0	1.0	11.0	A
	El Tule	30.3	1.1	29.2	A
	La Pólvara	51.8	3.0	48.8	A
	Lago de Chapala	8125.0	550.0	7575.0	M(A,AP)
	El Cuarenta	30.0	1.0	29.0	A
	Sta. Rosa	290.0	0.0	290.0	GE
	La Red	14.3	0.8	13.5	A

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

	El Salto	6.0	0.4	5.7	AP
	Calderón	80.0	2.0	78.0	AP

Fuente: CNA, Seguridad de presas, censo nacional de presas, 1996

A = Agropecuario

GE = Generación de energía

AP = Agua potable

M = Múltiple

La agricultura es la actividad que mayor cantidad de agua requiere, la que induce cambios importantes tanto en aguas superficiales como subterráneas, y la que en mayor medida recibe el impacto económico de la sobreexplotación. El suministro público-urbano es cada vez más difícil de satisfacer. El acelerado crecimiento demográfico y el uso poco eficiente del agua en los sistemas municipales de suministro están obligados a extraer el preciado líquido en mayor profundidad, a cambio de la reserva de los almacenamientos subterráneos o de transporte de zonas más alejadas.

La parte del estado ubicada en la Región Hidrológica Lerma-Chapala, casi toda el agua superficial y subterránea está siendo aprovechada, por lo que se ha decretado un estado de veda que no permite la apertura de nuevas áreas de cultivo. El estado de Guanajuato está sujeto a un acuerdo de coordinación con los estados vecinos en la cuenca Lerma-Chapala, el cual limita su posibilidad de almacenar aguas superficiales (Guerrero, 1999).

III DESARROLLO

Los materiales utilizados fueron los siguientes: Imágenes de satélite Landsat TM que cubren todo el estado de Guanajuato, equipos de geoposicionamiento global (GPS), hardware o equipo de cómputo apto para analizar imágenes de satélite (con capacidad y velocidad de procesamiento de información), software para analizar y procesar las imágenes de satélite y recurso humano para el levantamiento de información en campo o sitios de entrenamiento y los análisis posteriores.

3.1. Imágenes Landsat

Las imágenes de satélite utilizadas en esta investigación, fueron tomadas por el satélite Landsat V, con el sensor TM (Thematic Mapper); las características principales del satélite, así como el sensor, se presentan resumidas en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características del Satélite Landsat TM

Satélite	Sensor	Número de Banda	Rango Espectral	Resolución Espacial	Ancho de cobertura	Repetición de Ciclo
Landsat	TM	1	0.45 – 0.52 μm	30 m	185 km.	16 días
		2	0.52 – 0.60 μm	30 m	185 km.	
		3	0.63 – 0.69 μm	30 m	185 km.	
		4	0.76 – 0.90 μm	30 m	185 km.	
		5	1.55 – 1.75 μm	30 m	185 km.	
		7	2.08 – 2.35 μm	30 m	185 km.	
		6	10.4 – 12.5 μm	120 m	185 km.	

Fuente: Bastiaanssen, 1998. Pp. 83.

Las imágenes de satélite que cubren la totalidad del estado de Guanajuato son las siguientes: escena 28 en renglón 45 y 46 para el lado Poniente del estado y con fecha de exposición del 25 de Marzo de 1999; escena 27 en renglón 45 y 46 para el lado Oriente del estado con fechas de exposición del 5 y 21 de Mayo de 1999 respectivamente a cada renglón. Las cuatro imágenes se ubican en la región 14 de la proyección y cuadrícula Universal Transversa de Mercator. Lo ideal para el trabajo, hubiera sido que las cuatro imágenes fueran de la misma fecha de exposición, sólo que para las imágenes 27/45 y 27/46 sólo se pudieron conseguir para las fechas señaladas, ya que, para otras fechas la calidad de las imágenes no era la requerida. En la Figura 2 se observa el área que cubre cada imagen del satélite en el estado de Guanajuato; cada imagen tiene un ancho de 185 km por 170 km y se destaca que el estado queda ubicado en el centro de la unión de las cuatro imágenes.

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

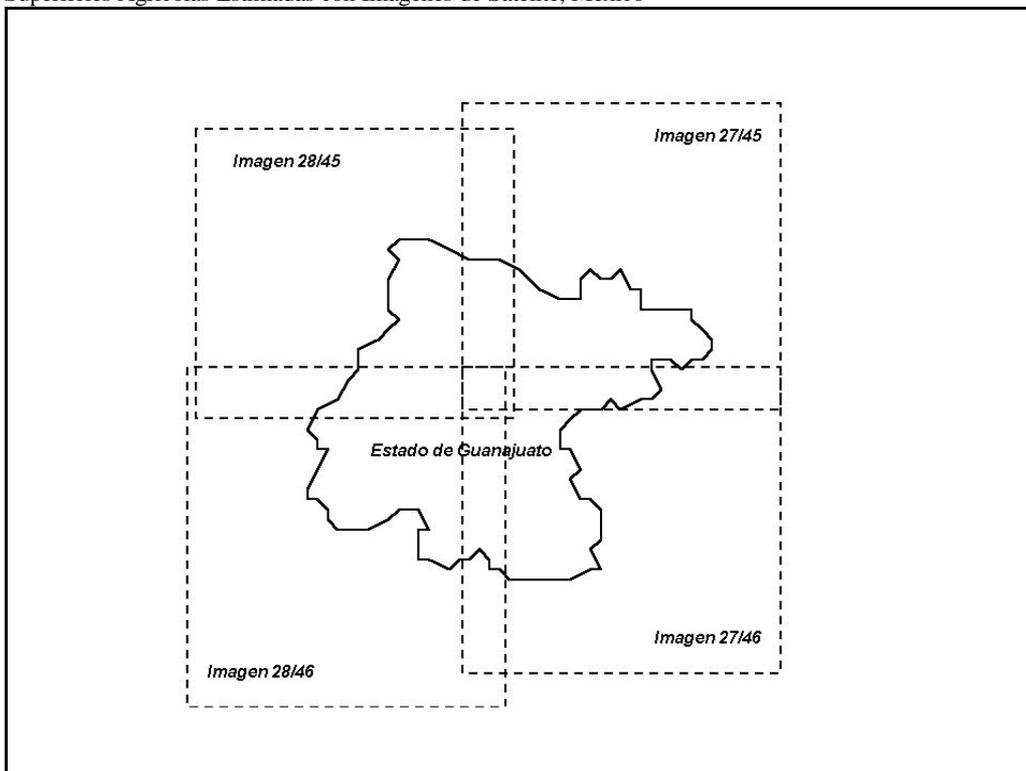


Figura 2. Ubicación de las imágenes de satélite en el estado de Guanajuato

3.2. Levantamiento de parcelas en campo o sitios de entrenamiento con GPS

Como primera etapa del trabajo de campo, se definieron los cultivos principales que se tienen en Guanajuato para el ciclo agrícola Otoño Invierno 1998/99, con base en el conocimiento del personal de los Distritos de Desarrollo Rural (DDR) que hay en el estado. Los cultivos principales que se identificaron en esta primera etapa son los siguientes, ver Cuadro 3.

Cuadro 3. Cultivos principales a identificar en campo

Clave	Cultivo	Clave	Cultivo	Clave	Cultivo
01	Trigo	10	Ajo	19	Fresa
02	Cebada	11	Cebolla	20	Otras Hortalizas
03	Lenteja	12	Brócoli	21	Otros Cultivos
04	Comino	13	Coliflor	22	Vegetación Natural Predominan Encinos
05	Frijol	14	Papa	23	Vegetación Natural Predominan Pinos
06	Frijol-Maíz	15	Tomate	24	Vegetación Natural Predominan Mezquites
07	Maíz-Frijol	16	Jitomate	25	Vegetación Natural Predominan Pastizales
08	Maíz	17	Chile	26	Vegetación Natural Típica de la Región
09	Alfalfa	18	Lechuga		

Una vez que se tuvieron los cultivos identificados, se capacitó al personal de los Distritos de Desarrollo Rural en el uso de los GPS, ya que ellos realizaron el levantamiento en campo de las parcelas o sitios de entrenamiento en base a los cultivos definidos anteriormente. La selección del personal de los DDR se realizó bajo la consideración de que ellos cuentan con una amplia experiencia en campo y conocimiento de sus distritos, por lo que se les solicitó su apoyo en la realización de esta etapa del trabajo. La capacitación consistió como ya se mencionó anteriormente, en el uso de los GPS, siendo el objetivo principal, obtener la ubicación de un punto dentro de cada parcela en coordenadas Latitud-Longitud o UTM, además de los datos adicionales que cada lote levantado o sitio de entrenamiento debería llevar consigo, para una mejor identificación. Los equipos de GPS utilizados fueron Garmin y Trimble Scoutmaster de SDAyR. La información adicional que fue recabada es la siguiente:

1. **Fecha.** La fecha del levantamiento. Con cuatro dígitos: **día:** 01, 02, ... hasta 31; **mes:** 01, 02, ... hasta 12.
2. **Clave de Punto.** Seis dígitos en el siguiente orden: DDR: 1 ... al 5; Municipio (código de INEGI) del 01 ... al 46; Número progresivo personalizado del técnico del 001 ... al 999.
3. **Latitud Norte o UTM en Y.** Grados, minutos y segundos o unidades UTM.
4. **Longitud Oeste o UTM en X.** Grados, minutos y segundos o unidades UTM.
5. **Etapa fenológica.** Se aplica a todos los cultivos.

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

Clave	Desarrollo con relación a la cosecha
1	Cosechado; pata del cultivo en campo
2	En cosecha o a menos de 2 semanas de la cosecha
3	Faltan de 3 a 7 semanas para la cosecha
4	A mas de 8 semanas para la cosecha

6. **Humedad en el terreno.** Se aplica a todos los sitios.

0: Información no disponible	1: Seco	2: Regándose o terreno muy húmedo
------------------------------	---------	-----------------------------------

7. **Cobertura del Cultivo.** Se refiere al por ciento cubierto en vista aérea del total de la superficie.

Clave	Descripción
0	Barbechado, rastreado o surcado (sin sembrar)
1	Del 1 al 25% del terreno cubierto por el cultivo
2	Del 26 al 50% del terreno cubierto por el cultivo
3	Del 51 al 75% del terreno cubierto por el cultivo
4	Del 76 al 100% del terreno cubierto por el cultivo

8. **Hectáreas estimadas del cultivo.** Se refiere a la superficie estimada del sitio de entrenamiento.

Clave	Descripción
1	De 4 a 6 hectáreas
2	De 6 a 10 hectáreas
3	De 11 a 20 hectáreas
4	De 21 a 50 hectáreas
5	De 51 a 100 hectáreas
6	Más de 100 hectáreas

9. **Color del cultivo**

Clave	Descripción
0	Normal
1	Anormal; por daño de helada
2	Anormal; por daño de sequía
3	Anormal; por daño de plagas
4	Anormal; por daño de enfermedades
5	Anormal; por deficiencias nutricionales
6	Anormal; por otras causas

10. **Apariencia general del cultivo.**

Clave	Descripción
1	Muy bueno
2	Bueno
3	Regular
4	Malo
5	Muy malo

3.3. **Procesamiento de Imágenes de Satélite**

Los procesamientos que se llevaron a cabo en las imágenes de satélite fueron de tipo digital, corresponden a reales y transformaciones que facilitan el análisis visual para la discriminación de las diferentes clases, así como, para la ubicación en la escena de los diferentes campos de entrenamiento que fueron utilizados en la clasificación supervisada de las imágenes. Estos procesamientos son los siguientes, los cuales se describen brevemente.

3.3.1. **Obtención de Imágenes Compuestas**

Las imágenes compuestas, se generan de la información multiespectral disponible a partir de las seis bandas de las imágenes de satélite (bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7; se omite la banda 6 por ser la banda térmica y que para nuestros fines no es necesaria). La composición utilizada fue la de falso color, que se obtiene a partir de los tres colores primarios que son azul, verde y rojo (bandas 4, 3 y 2 respectivamente), sobre las bandas correspondientes al infrarrojo cercano, rojo y verde. Esta composición facilitó la identificación visual de diferentes tipos de cubierta vegetal y sobre todo la mejor ubicación y delimitación de los sitios de entrenamiento o parcelas levantadas en campo.

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

Otra composición que también fue utilizada es la llamada color verdadero, que resulta de aplicar los colores rojo, verde y azul sobre las bandas correspondientes al rojo, verde y azul que para el caso de las imágenes utilizadas corresponden a las bandas 3, 2 y 1 respectivamente.

3.3.2. Ajuste de contraste

El ajuste del contraste tiende a adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad de visualización del monitor; ya que cada sensor codifica la radiancia recibida en un número determinado de niveles digitales, de acuerdo a las características de su diseño. Este rango digital puede no corresponder con el número de niveles de visualización que facilita el monitor, por lo que resulta necesario ajustar ambos parámetros. El resultado es una imagen de salida diseñada para acentuar el contraste entre los diferentes usos de suelo y vegetación, por lo cual, las áreas de tono claro aparecen más claras y las áreas de tono oscuro aparecen más oscuras. El realce del contraste se realizó a través del método de expansión lineal con saturación de puntos a un nivel de 2.5 y 5%; estos porcentajes son saturados al primero y último nivel de visualización, para obtener un mayor rango de niveles disponibles.

3.3.3. Rectificación de Imágenes

La rectificación de las imágenes se realizó para ajustar los desplazamientos que se tenían en las imágenes originales, para esto, se seleccionó la imagen 28/45 como base, en la cual se identificaron algunos puntos de control y a los cuales se les obtuvo sus coordenadas en campo con GPS. Posteriormente, se determinó la diferencia de las coordenadas obtenidas en campo, respecto a las coordenadas que tenían esos mismos puntos en la imagen original en los ejes coordenados X y Y; se obtuvo la media para todos los puntos y este valor fue el desplazamiento que se corrigió en las cuatro imágenes con la finalidad de que todas tuvieran el mismo desplazamiento y así poderse unir. El valor del desplazamiento fue el siguiente:

$$\begin{aligned} X &= -353.2 \text{ UTM} \\ Y &= +479.0 \text{ UTM} \end{aligned}$$

Posteriormente, al unir las imágenes para tener en su totalidad al estado de Guanajuato, se corrigieron las 27/45 y 27/46 para que estas quedaran exactamente unidas. La imagen 27/45 se corrigió en X: +303 UTM y en Y: +268 UTM. La imagen 27/46 se corrigió en X: +376 UTM y en Y: +348 UTM. Por último, una vez unidas las cuatro imágenes de satélite, se desplazaron en el eje X: +375 UTM para ajustarlas al mapa oficial del estado proporcionado por SDAyR.

3.4. Digitalización de Sitios de Entrenamiento

La digitalización de sitios de entrenamiento, consiste en ubicar el sitio de entrenamiento que previamente se identificó en campo, sobre la imagen y seleccionar dicha área sobre los píxeles que identifican al sitio o parcela mediante un polígono; a este polígono se le define una clase o identificador que va a corresponder al cultivo que hay en campo, y que se ubica en dicha área; esta operación se realiza con el fin de indicar a la computadora el reconocimiento de las distintas clases que serán incluidas dentro de la clasificación de la imagen.

Los datos que se obtuvieron de los sitios de entrenamiento sumaron en total, cerca de 1500 parcelas levantadas en campo para todos los cultivos definidos en el estado. El siguiente paso fue la digitalización o identificación de los sitios de entrenamiento en las imágenes de satélite; en un inicio se comenzó por digitalizar todos los sitios levantados en campo, pero se pudo observar que, para los lotes menores a 10 ha, la identificación de dichas superficies era muy insegura, además de que se dificultaba por su tamaño; en cambio para aquellos lotes mayores de 10 ha, la identificación y digitalización era muy confiable, por lo que se optó por descartar los sitios menores a 10 ha. Con esta medida, se redujeron los sitios de entrenamiento a un poco menos de la mitad de los 1500 parcelas levantadas; ya que un gran número de estas fueron con una superficie menor a 10 ha.

Con la reducción de los sitios de entrenamiento, se procedió a evaluar los cultivos identificados como principales (Cuadro 3), y determinar con que cultivos se continuaba el trabajo, ya que se pudo observar que para algunos cultivos no se contaba con suficientes sitios de entrenamiento que proporcionaran un número confiable de polígonos para identificar al cultivo respectivo. A partir de esto se generó una nueva relación de los cultivos principales a considerar, la cual se presenta en el Cuadro 4; además, a dicha relación se le han adicionado otros cuerpos de interés a identificar en las imágenes como son las zonas urbanas, cuerpos de agua, etc.

3.5. Obtención de Firmas Espectrales o Huellas Digitales.

El principio fundamental en el cual se basa el trabajo, es el de los sensores remotos, el cual indica que a través del espacio se pueden conocer las características de los objetos y rasgos de la superficie terrestre, mediante el estudio de la radiación reflejada y/o emitida por estos objetos y rasgos. Mediante el uso de instrumentos de teledetección, la brillantez del objeto es captada por el sensor en un rango de reflectancia. El comportamiento de la reflectancia de un objeto constituye un modelo de respuesta espectral. Las propiedades específicas de cada material generan una distribución específica de la reflectancia de energía, generando un patrón único tan exclusivo como la huella digital o firma espectral (Melesio-Nolasco, 1991; citado por Soria *et al* 1998).

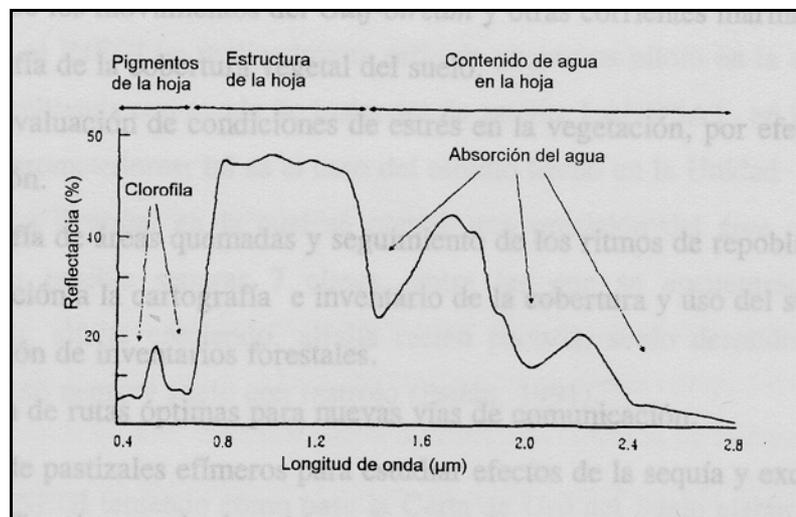
Cuadro 4. Cultivos y cuerpos principales a identificar en imágenes de satélite

Clave	Cultivo	Clave	Cultivo	Clave	Cultivo
01	Trigo	10	Papa	19	Vegetación Natural Predominan Pinos
02	Cebada	11	Tomate	20	Cuerpos de Agua
03	Lenteja	12	Jitomate	21	Zona Urbana
04	Frijol	13	Chile	22	Monte

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

05	Maíz	14	Lechuga	23	Suelo Desnudo
06	Alfalfa	15	Fresa	24	Fondo de Lago sin agua
07	Ajo	16	Otras Hortalizas	25	Nubes
08	Cebolla	17	Otros Cultivos	26	Sombra de Nubes
09	Brócoli	18	Vegetación Natural Predominan Encinos		

En mediciones de laboratorio, se ha obtenido algunas curvas de reflectancia espectral para las principales cubiertas terrestres. Algunas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento más selectivo. La vegetación presenta un comportamiento muy variable, con bajos valores de reflectancia en el espectro visible y más elevado en el infrarrojo cercano. De acuerdo a Chuvieco (1990) la caracterización espectral de las masas vegetales depende en primera instancia, de la propia reflectividad de la hoja, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad como se puede observar en la Figura 3. Además es preciso tomar en cuenta las características morfológicas de la planta: altura, perfil, grado de cobertura del suelo, etc., que provocan una notable modificación de su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores serían los derivados de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, geometría de la planta, etc.



Fuente: Chuvieco, 1990.

Figura 3. Respuesta de la vegetación a diferentes longitudes de onda

3.6. Clasificación Supervisada

Ya que el método supervisado parte del conocimiento que se tiene de la zona de estudio o por trabajos de campo a realizar; se optó para este trabajo, utilizar este método. Se contó con la colaboración del personal de los Distritos de Desarrollo Rural, los cuales conocen sus zonas de trabajo y además podían desarrollar muy bien el trabajo de campo requerido. Una vez que se tuvieron las firmas espectrales se procedió a realizar la clasificación de la imagen con este método.

Dicho método de una manera resumida consiste en, obtener la firma espectral de las diferentes clases de cubierta vegetal a identificar, a partir de los sitios de entrenamiento levantados en campo para las seis bandas de la imagen de satélite; esto con el fin de “entrenar” a la computadora en el reconocimiento de las diferentes firmas espectrales a identificar. En otras palabras, a partir de los sitios de entrenamiento la computadora calcula los niveles de reflectancia en cada banda de la imagen para conocer el valor de la firma espectral de cada clase seleccionada, y para posteriormente, asignar a el resto de los pixeles de la imagen a una de esas clases en función de su firma espectral. Finalizada la selección de los sitios de entrenamiento, la computadora calcula las estadísticas elementales de cada clase o firma espectral como: media, rango, desviación, matriz de varianza-covarianza, etc. a partir de todos los pixeles de los sitios de entrenamiento.

La asignación al resto de los pixeles de la imagen, se realizó con el método de máxima verosimilitud, en donde a cada pixel se le asigna a cada clase con la que posee mayor probabilidad de pertenecer. Este método ha sido desarrollado para proveer una alta precisión en la clasificación. Asumiendo que los datos se distribuyen normalmente, la probabilidad que un pixel sea miembro de una clase dada, se calcula en base a Conese y Maselli, 1992; citados por Scott, 1996.

$$P = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{|C|} e^{-\frac{1}{2}(X-M)^T C^{-1} (X-M)}$$

Donde:

- P = Probabilidad para un pixel
- n = Número de bandas
- C = Varianza-covarianza de la matriz de clase
- M = Media de clase
- X = Pixel

Los primeros resultados obtenidos de la clasificación indicaron cierto margen de error, el cual no era aceptable, en el sentido de que el modelo asignaba superficies cultivadas a áreas en las cuales no hay cultivos, además de, clasificar superficies muy grandes para ciertos cultivos en los cuales no existen esas superficies. Esto se debió fundamentalmente a que, el modelo estaba confundiendo algunas firmas espectrales de cultivos que son muy parecidos en relación a la firma que los caracteriza, ante esto, se decidió por unir los cultivos, cuya firma es muy parecida. Para otras clases sucedió lo contrario, se generó otra nueva clase para el mismo cultivo, sólo que, es para la etapa fenológica en desarrollo vegetativo, en la cual, la cobertura del cultivo es

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

muy baja y el modelo confunde a estas firmas con las de monte o suelo desnudo por lo que se optó por las nuevas firmas espectrales. Esta nueva clase fue para el cultivo de la alfalfa, en el cual se tuvo una clase de alfalfa desarrollada, que viene siendo la alfalfa normal con un 90 a 100% de cobertura y otra alfalfa en desarrollo, que comprende a las alfalfas cegadas y con una cobertura menor al 90%. Al final como se muestra en el Cuadro 5, se suman ambas clases y se presentan como una sola clase, correspondiente al cultivo de alfalfa. Por lo tanto, una tercera lista y definitiva de cultivos a identificar es la siguiente (ver Cuadro 5), como un proceso iterativo de afinar los resultados.

Cuadro 5. Lista definitiva de cultivos y cuerpos principales a identificar en imágenes de satélite

Clave	Cultivo	Clave	Cultivo	Clave	Cultivo
01	Trigo/Cebada	08	Lechuga	15	Zona Urbana
02	Lenteja	09	Fresa	16	Monte
03	Frijol	10	Varías Hortalizas	17	Suelo Desnudo
04	Alfalfa	11	Maíz/Sorgo PV	18	Nubes
05	Cebolla/Ajo	12	Vegetación Natural Predominan Encinos	19	Sombra de Nubes
06	Brócoli/Coliflor	13	Vegetación Natural Predominan Pinos		
07	Chile	14	Cuerpos de Agua		

3.7. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en Inglés, Normalized Difference Vegetation Index) es el resultado de un cociente que implica efectuar una división pixel a pixel entre los valores de reflectancia de dos bandas (banda infrarrojo cercano y roja) de una misma imagen. Esto es con el fin de mejorar la discriminación entre suelo y vegetación, cuando se tienen áreas con poca cobertura vegetal y se tienen problemas en la asignación de las clases a los píxeles. El NDVI está acotado entre -1 y +1, con un umbral crítico en torno a 0.2 para cubiertas vegetales. La obtención del NDVI es mediante el siguiente cociente:

$$NDVI = \frac{TM \text{ Banda } 4 - TM \text{ Banda } 3}{TM \text{ Banda } 4 + TM \text{ Banda } 3}$$

Las primeras estimaciones que se obtuvieron, resultaron con superficies bastantes grandes para aquellos cultivos en los cuales la cobertura no era completa, por lo que, se tuvo que hacer uso de este índice en la clasificación de las imágenes. El criterio seguido fue el siguiente: para aquellos sitios de entrenamiento con valores de NDVI menores a 0.05, se considero que dichas áreas son suelos desnudos y se les asignó a esta clase.

3.8. Aplicación de filtros

Cabe destacar que, posterior a la obtención del NDVI y una vez que se obtuvieron las clasificaciones de las imágenes, fue necesario aplicar un filtro a dichas imágenes en el análisis

digital para aislar componentes de interés. En este caso, el filtro aplicado sobre las imágenes pretende suavizar o reforzar los contrastes espaciales presentes en los niveles digitales que la componen; en otras palabras, el objetivo es “ limpiar ” las imágenes de aquellos píxeles que indicaban un cultivo diferente dentro de todo un lote uniforme. El filtro aplicado fue el denominado mediano para una matriz de 3*3 píxeles. Lo que hizo este filtro fue tomar matrices de píxeles de 3*3 y obtener el valor mediano de dicha matriz, asignando este valor mediano al píxel en el centro de la matriz. Propiamente este fue el último paso del análisis que se hizo a las imágenes, antes de obtener los resultados que más adelante se presentan.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como ya se mencionó anteriormente, se utilizó el método de máxima verosimilitud. La clasificación de las imágenes de satélite se realizó con probabilidades obtenidas en clasificaciones previas y con la condición de que todos los píxeles de las imágenes sean clasificados. Es conveniente señalar que en esta tipo de clasificación, se corre el riesgo de que si los sitios de entrenamiento, no han sido seleccionados adecuadamente, o existen clases espectrales que no fueron incluidas, se sobrestimen las superficies, ya que todos los píxeles serán asignados a una clase aunque la probabilidad de que pertenezcan a ella sea muy baja.

Con la finalidad de tener una mejor comprensión de los resultados obtenidos, y que estos resultados se puedan manipular de acuerdo a las necesidades, estos se presentan en dos niveles de análisis. El primero corresponde a nivel estatal, o sea, se presenta los resultados obtenidos para todo el estado de Guanajuato; y el segundo nivel corresponde a los municipios, los cuales suman en total 46 municipios que integran el estado. Cabe señalar que, el estudio también abarcó un nivel de análisis más fino, que corresponde a los AGEBs Rurales. Un AGEB Rural se define como una Área Geoestadística Básica en el medio rural y es definida por INEGI para facilitar el manejo de la información geográfica y estadística del país a un nivel muy fino; estos datos fueron generados y pueden ser solicitados a la referencia de esta publicación.

4.1. Superficies estimadas en el estado

La representación espacial de las superficies estimadas para el estado de Guanajuato, se puede observar en la Figura 4. En dicha figura se muestra al estado y la ubicación dentro de este, de los diferentes cultivos identificados y tipos de cubierta de interés. En el Cuadro 6 se presentan las superficies totales estimadas en el estado de Guanajuato para los diferentes cultivos identificados y otros tipos de cobertura de interés; así como, las correspondientes superficies reportadas por SDAyR.

Como se puede observar en el Cuadro 6, la superficie total estimada de cultivos para el ciclo Otoño-Invierno es de 197,900 ha, además de 102,698 ha de cultivos perennes, dando un total de 303,404 ha de cultivos agrícolas presentes en el ciclo Otoño-Invierno 1998/99. Por otro lado, las superficies reportadas por SDAyR para el mismo ciclo agrícola son de 122,062 ha (sin considerar a los perennes); lo que arroja una diferencia de 75,838 ha (equivalente al 62%) de más en las superficies estimadas en la clasificación. Para los cultivos perennes, se tienen reportadas 1,664 ha para el cultivo de la fresa; lo que da una diferencia entre lo estimado y reportado de 4,193 ha; y para el cultivo de alfalfa, se reportan 45,665 ha dando una diferencia de 51,176 ha estimadas de más ; estas diferencias se discuten posteriormente.

Cuadro 6 Resultados de clasificación y superficies reportadas por SDAyR

Tipo de Cubierta	Area Estimada (ha)	Area Reportada Por SDAyR (ha)
Trigo / Cebada	103,883	81,900
Lenteja	501	1,356
Frijol	12,222	4,331
Alfalfa	96,841	45,665
Cebolla / Ajo	2,563	5,533
Brócoli / Coliflor	25,151	6,596
Chile	4,598	631
Lechuga	490	955
Fresa	5,857	1,664
Varías Hortalizas	48,492	20,760
Maíz / Sorgo PV	2,806	1,025
Encinos	95,407	
Pinos	13,580	
Cuerpos de Agua	14,577	
Zona Urbana	73,267	
Monte	8,624	
Suelo Desnudo	2,452,725	
Nubes	43,361	
Sombra de Nubes	29,600	
Total	3,034,546	
Total de Cultivos OI	197,900	122,062
Total de Perennes	102,698	47,329
Total de Cultivos Agrícolas	303,404	170,416

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

Estado de Guanajuato, Cultivos OI 98-99

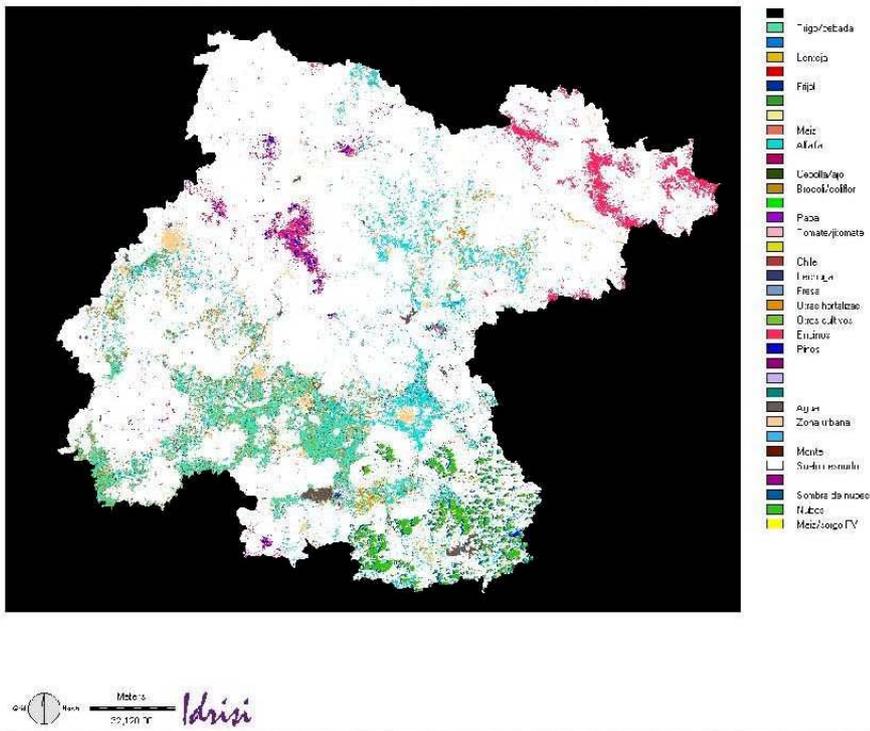


Figura 4 Representación espacial de tipos de cobertura en el estado de Guanajuato, O-I 98/9

Analizando las superficies de los principales cultivos (granos, hortalizas y perennes) para este ciclo se tiene que, en lo que respecta a granos, el cultivo principal es el Trigo/Cebada (en los resultados de la clasificación se agrupa al Trigo con la Cebada, ya que las firmas espectrales de ambos cultivos son muy parecidas, y es casi imposible diferenciar uno del otro, por lo que, se hablará de Trigo/Cebada), la superficie estimada es de 103,883 ha; comparando la superficie estimada con la reportada por SDAyR, se tiene que se identificaron alrededor de 21,983 ha (27%) de más sembradas en todo el estado para este cultivo. Cabe destacar que este cultivo es el de mayor superficie estimada en todo el estado, para este ciclo agrícola. Con respecto a hortalizas, aquí se tienen grandes diferencias en las hectáreas estimadas con relación a las reportadas; la clasificación estima un total de 81,294 ha de hortalizas, siendo varias hortalizas, la superficie mayormente estimada con 48,492 ha. En cambio SDAyR reporta un total de 31,885 ha de hortalizas y lo que corresponde a varias hortalizas reportan 20,760 ha; lo que da una diferencia en el total con respecto a lo estimado en 49,409 ha (155% de más respecto a lo reportado) y en varias hortalizas en 27,732 ha (133% de más respecto a lo reportado). Es conveniente mencionar que en varias hortalizas se están agrupando todos los cultivos restantes que no se identificaron en base a firmas espectrales, por lo que, la diversidad de estos puede ser muy amplia y para algún cultivo en específico que no se encuentre en la lista del Cuadro 5 este, esta comprendido en varias hortalizas. Cabe destacar en los perennes al cultivo de la Alfalfa; en todo el estado se identificaron 96,841 ha. Dicha superficie cubre el 32% de la superficie estimada en el estado y es el segundo cultivo en superficie sembrada, después del trigo/cebada.

Con respecto al cultivo de la alfalfa, es conveniente mencionar que en la etapa de clasificación se obtuvieron dos firmas espectrales para este cultivo, esto debido a problemas que se tuvieron en la clasificación, ya que se tenían reflectancias diferentes para el mismo cultivo, variando esta de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo. Se obtuvo una firma para alfalfa en desarrollo y con una cobertura de 75 a 100%, esta firma corresponde al cultivo completamente verde y en desarrollo tal cual se conoce y en el cual no se tienen problemas para su identificación. La otra firma espectral para la alfalfa, fue para aquellos lotes de este cultivo que habían sido segados y la cobertura del cultivo era muy baja. Para esto se aplicó un filtro de NDVI, y se consideró que para valores mayores de 0.2 de NDVI era alfalfa, sólo que esta se encontraba segada o tenía poco tiempo de segada al momento de la toma de la imagen.

Al final de la clasificación se sumaron ambas superficies de dichas firmas espectrales y el resultado es el que se presenta en este documento. Dadas las diferencias considerables que hay entre las superficies estimadas y reportadas, surge la necesidad de actualizar los sitios de entrenamiento para los principales cultivos, con el fin de corroborar o verificar dichos resultados obtenidos. Esta sugerencia se enfoca en el cultivo de la alfalfa principalmente, debido a su alto consumo de agua que tiene y como se muestra más adelante. Consideramos que, con la actualización de los sitios de entrenamiento para el cultivo de la alfalfa, los resultados que se obtengan serían completamente confiables.

4.2. Superficies estimadas a nivel de municipios

En la figura 5 se presenta el corte hecho para el municipio de Irapuato; en esta se pueden

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

observar los diferentes cultivos identificados, así como, los demás tipos de cobertura identificados; esta figura es un ejemplo de lo que se obtuvo para cada municipio del estado. En relación a las superficies estimadas por municipio, en el Cuadro 7 se reportan los resultados de la clasificación, así como, las áreas reportadas por SDAyR para la gran mayoría de los municipios del estado.

Cabe hacer mención que los resultados obtenidos en los municipios, se han considerado algunos de estos como más confiables, y son los municipios que se ubican dentro de las imágenes de satélite 28/45 y 28/46; ya que estas imágenes corresponden a la fecha de toma del 25 de Marzo, en la cual, se identifican con mayor confiabilidad las firmas espectrales de los cultivos, comparado con las imágenes 27/45 y 27/46 (estas imágenes corresponden a una fecha de toma más tardía, incluso la 27/46 presenta un porcentaje de nubosidad considerable) en las cuales, para las fechas de toma de estas, algunos cultivos principalmente el Trigo, ya había sido trillado y no se identifica como tal en la imagen. Los municipios considerados con mayor confiabilidad son los siguientes: Abasolo, Cuernavaca, Dolores Hidalgo, Guanajuato, Huanimaro, Irapuato, León, Manuel Doblado, Ocampo, Penjamo, Pueblo Nuevo, Purísima del Rincón, Romita, Salamanca, San Diego de la Unión, Silao y Valle de Santiago.

Como se puede observar en el Cuadro 7, las superficies agrícolas reportadas por SDAyR solamente cubren el 62% de las superficies agrícolas estimadas en las imágenes de satélite para el ciclo Otoño-Invierno, esto sin considerar a los cultivos perennes. El 58% de las superficies agrícolas estimadas se localizan en los siguientes municipios: Abasolo, Celaya, Cortazar, Irapuato, León, Penjamo, Salamanca, Salvatierra y Valle de Santiago. En dichos municipios se encuentran concentradas más o menos 175,000 ha, siendo los cultivos principales el Trigo/Cebada, Alfalfa y Varías Hortalizas; de estos cultivos en dichos municipios se localiza el 76% del Trigo/Cebada, el 40% de la Alfalfa y el 48% de Varías Hortalizas.

Es conveniente mencionar a los municipios que se localizan en la imagen 27/46, tales como Celaya, Acambaro, Apaseo El Alto, Apaseo El Grande, Jerecuaro, Salvatierra, etc. en los cuales se estiman unas superficies de Trigo/Cebada muy pequeñas, en comparación con las superficies que se siembran en estos municipios; la observación de dichos resultados está en que, dicha imagen de satélite que cubre estos municipios es con fecha del 21 de Mayo y para esta fecha, el cultivo del Trigo/Cebada ya lo habían trillado, por lo que en la clasificación se reportan superficies pequeñas.

Los municipios anteriormente mencionados (Abasolo, Celaya, Cortazar, Irapuato, León, Penjamo, Salamanca, Salvatierra, Valle de Santiago, Celaya, Acambaro, Jerecuaro, Salvatierra) se ubican dentro del D R 011 ARL, DR 085 LB y la zona de explotación más grande de los acuíferos en el estado, siendo esta la explicación del porqué se localiza las mayores superficies de cultivo en el estado

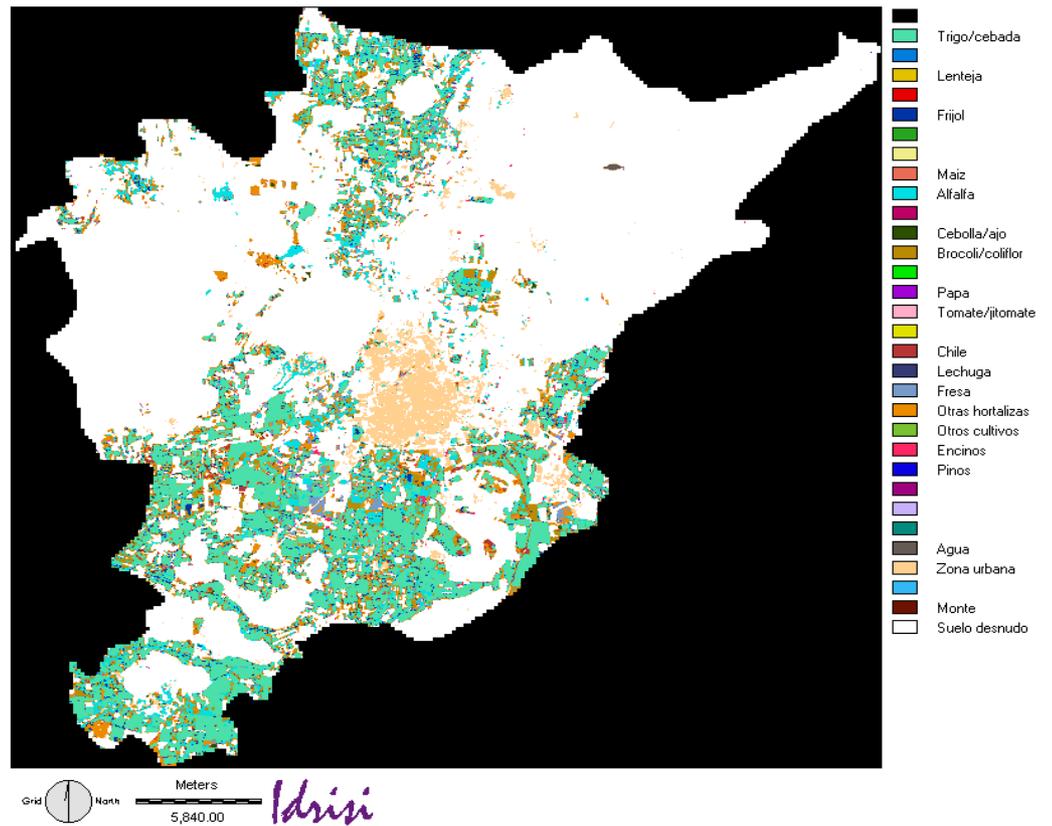


Figura 5. Municipio de Irapuato con los diferentes cultivos identificados y tipos de cubierta, para el ciclo O-I 98/99

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

Cuadro 7 Resultados de la Clasificación por Municipios

Municipio (adm)	Trigo Cebada (ha)	Lenteja (ha)	Frijol (ha)	Alfalfa (ha)	Cebolla Ajo (ha)	Brócoli Coliflor (ha)	Chile (ha)	Lechu ga (ha)	Fresa (ha)	Varías Hortalizas (ha)	Maíz Sorgo PV (ha)
Abasolo*	10,055		966	4,467	266	2,481	428	16	294	2,451	
Acambaro	12		32	3,554		15				1,022	442
Allende	44		197	6,199	5	98	207		19	2,085	48
Apaseo El Alto	75	209	260	1,103		8				386	41
Apaseo El Grande	153		502	3,932		40				1,160	169
Atarjea				40						81	
Celaya	265		1,257	11,579		78				1,515	355
Comonfort	66		414	2,484		13			3	160	12
Coroneo	1		4	481						7	1
Cortazar	4,136		278	1,052	46	607	193	15	227	1,485	6
Cueramaro*	2,465		275	1,340	130	458	58	3	186	712	
Doctor Mora				1,276		10	24			712	
Dolores Hidalgo*	11		15	5,669	25	273	90	3	126	1,583	
Guanajuato*	23		11	272	6	61	1	2	70	233	
Huanimaro*	3,211		228	490	46	403	100	4	70	470	
Irapuato*	9,783		1,039	3,682	255	2,064	445	21	876	3,656	
Jaral del Progreso	5,984		386	681	22	740	109	18	220	999	
Jerecuaro	16	292	33	2,589		3				94	39
León*	709		258	4,751	219	1,972	73	9	335	1,378	
Manuel Doblado*	2,247		308	2,441	153	1,158	28	8	88	622	
Moroleón	3			3					7	7	
Ocampo*				80	2	1			16	19	
Penjamo*	18,226		1,822	4,820	254	5,203	366	18	336	2,461	

*: Municipios considerados con una mayor confiabilidad en las superficies estimadas.

Cuadro 7 Continuación

Municipio (adm)	Encinos (ha)	Pinos (ha)	Cuerpos de Agua (ha)	Zona Urbana (ha)	Monte (ha)	Suelo Desnudo (ha)	Nubes (ha)	Sombras de Nubes (ha)	Total Agrícola Estimada (ha)
Abasolo*	179	5	59	1,447		36,278			21,4
Acambaro		54	2,757	5,855	85	53,903	10,923	6,656	5,0
Allende	1,604	245	1,339	3,229	961	139,977	12	129	8,9
Apaseo El Alto		47	127	1,882	258	29,657	2,718	1,764	2,0
Apaseo El Grande		95	232	690	299	36,897	3	110	5,9
Atarjea	13,506		3	365	1,030	24,160			1
Celaya	15	207	4	3,758	229	33,399	20	201	15,0
Comonfort	79	112	39	530	454	43,537	27	185	3,1
Coroneo	1	157	76	1,331	12	9,876	1,499	1,294	4
Cortazar	187	95	8	1,503	14	23,482	1,926	1,048	8,0
Cueramaro*	264	48	4	961		21,981			5,6
Doctor Mora	81		8	347	9	22,530			2,0
Dolores Hidalgo*	1,785	254	198	2,088	4	158,430			7,7
Guanajuato*	12,630	4,978	403	871		81,265			6
Huanimaro*	52	1	14	195		7,554			5,0
Irapuato*	402	14	29	3,057		54,854			21,8
Jaral del Progreso	119	35		403		8,222			9,1
Jerecuaro	2	523	1,766	8,927	353	47,110	16,330	10,784	3,0
León*	2,596	1,074	415	7,715		99,775			9,7
Manuel Doblado*	372	38	266	743		72,149			7,0
Moroleon	684	291	41	464		14,910			
Ocampo*	1,054	804	280	427		106,667			1
Penjamo*	1,214	245	239	1,631		116,796			33,5

*: Municipios considerados con una mayor confiabilidad en las superficies estimadas.

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

Cuadro 7 Continuación

Municipio (adm)	Trigo Cebada (ha)	Lentej a (ha)	Frijol (ha)	Alfalfa (ha)	Cebolla Ajo (ha)	Brócoli Coliflor (ha)	Chile (ha)	Lechuga (ha)	Fresa (ha)	Varías Hortaliz as (ha)	Maíz Sorgo PV (ha)
Pueblo Nuevo*	2,565		133	354	18	240	64	5	32	255	
P. del Rincón*	486		93	1,417	61	851	46	81	141	494	
Romita*	476		95	1,212	155	795	37	3	370	1,313	
Salamanca*	18,024		1,309	2,269	269	2,214	1,247	38	384	3,596	
Salvatierra	944		380	4,185	34	249	50	3	217	4,704	1,518
S.D de la Unión*	6		1	785	3	20	7		23	85	
San Felipe*	85		24	3,560	32	192	4	2	279	252	
S Fco. Del Rincón*	524		115	2,506	140	1,329	31	10	148	737	
S J. Iturbide				2,624		25	101			1,368	
S L. de la Paz				4,525		83	164			2,630	
Sta. Catarina				40						116	
Juventino Rosas	449		215	843	86	571	115	2	122	991	3
Santiago Maravatio	22		8	130	1	7	2		8	314	68
Silao*	181		101	2,571	83	516	18	3	501	1,352	
Tarandacuao				381						1	6
Tarimoro	12		146	2,444		28				1,480	98
Tierra Blanca				52						77	
Uriangato	26		7	141	4	65	2	1	37	101	
Valle de Santiago*	16,537		802	1,781	104	1,533	379	31	326	2,266	
Victoria				390						386	
Villangran	2,597		267	995	85	580	134	8	97	1,094	1
Xichú				194						237	
Yuriria	3,466		242	459	56	167	76	186	304	1,347	

*: Municipios considerados con una mayor confiabilidad en las superficies estimadas.

Cuadro 7 Continuación

Municipio (adm)	Encinos (ha)	Pinos (ha)	Cuerpos de Agua (ha)	Zona Urbana (ha)	Monte (ha)	Suelo Desnudo (ha)	Nubes (ha)	Sombras de Nubes (ha)	Total Agrícola Estimado (ha)	Total Reportado SDAyR (ha)
Pueblo Nuevo*	20	1		112		1,424			3,666	674
P. del Rincón*	168	13	235	643		25,598			3,670	2,649
Romita*	168	4	2	525		40,595			4,456	2,614
Salamanca*	296	24	7	2,602		45,064			29,350	14,278
Salvatierra	197	222	26	2,939	253	36,370	4,803	2,954	12,284	5,393
S.D de la Unión*	491	285	241	452	1	98,149			930	218
San Felipe*	5,996	2,908	909	1,857		262,446			4,430	1,329
S Fco. Del Rincón*	88	2	35	1,414		34,445			5,540	2,502
S J. Iturbide	2,414	2	59	1,199	288	47,828			4,118	1,220
S L. de la Paz	11,867		32	2,904	662	172,064			7,402	1,799
Sta. Catarina	989			205	33	17,023			156	
Juventino Rosas	127	15	5	566	16	37,804		4	3,397	3,058
Santiago Maravatio	16	4	42	788		7,363	1,441	977	560	600
Silao*	554	38	30	826		46,606			5,326	2,053
Tarandacuao			289	983	2	7,620	1,118	1,239	388	124
Tarimoro		42	42	1,449	142	20,793	2,527	2,189	4,208	1,198
Tierra Blanca	3,270		2	269	312	38,008			129	
Uriangato	48	5	4	502		9,447			384	143
Valle de Santiago*	287	45	92	1,824		53,289			23,759	11,017
Victoria	9,656		71	851	569	90,743			776	
Villangran	83	2	2	690		5,933	4	8	5,858	5,999
Xichú	20,768		5	664	2,528	58,338			431	
Yuriria	1,080	645	4,350	586		52,364	11	61	6,303	3,860

*: Municipios considerados con una mayor confiabilidad en las superficies estimadas

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

4.3. Superficies estimadas en AGEBs Rurales

Los resultados obtenidos como se mencionó anteriormente, se pueden solicitar a la referencia de esta publicación. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de la distribución espacial de los cultivos y tipos de cubierta identificados por AGEBs; se presenta un ejemplo del AGEB Rural 017001-0 del municipio de Irapuato.

También cabe hacer mención que al igual que en la relación de municipios, hay AGEBs Rurales en los se tiene una mayor confiabilidad, los AGEBs con mayor confiabilidad son aquellos que se ubican dentro de los siguientes municipios: Abasolo, Cuernavaca, Dolores Hidalgo, Guanajuato, Huanimaro, Irapuato, León, Manuel Doblado, Ocampo, Penjamo, Pueblo Nuevo, Purisima del Rincón, Romita, Salamanca, San Diego de la Unión, Silao y Valle de Santiago. En este nivel de análisis, solamente se presentan las superficies estimadas de los principales cultivos, ya que no se tienen reportadas las superficies sembradas; así mismo, tampoco se estiman los volúmenes de agua utilizados por cada AGEB Rural.

4.4. Volúmenes estimados de consumo de agua

Para la estimación de los volúmenes utilizados en las superficies agrícolas estimadas en el estado, se hará uso de las láminas reportadas por Bolaños, 1999 (dicho trabajo fue realizado paralelamente a la investigación aquí reportada, así como los medios y recursos fueron aportados por el IWMI). Así tenemos que, midió un total de 46 láminas de riego aplicadas en diferentes cultivos en 7 unidades de riego, ubicadas en la zona suroeste del estado de Guanajuato, en ciclo agrícola OI 1998/99. Las unidades de riego son sistemas de producción mediante agricultura de riego, cuyas fuentes de abastecimiento de agua pueden ser superficiales, del subsuelo y/o mixtas. La unidad puede construirse por productores rurales asociados, para proporcionar el servicio de riego, cuya infraestructura hidroagrícola, puede haberse construido con fondos del gobierno federal, gobiernos estatales, ayuntamientos, organismos y empresas del sector público, ejidos, comunidades y/o particulares (CNA, 1998). Las unidades de riego se diferencian básicamente de los distritos de riego en que estos últimos son de mucho mayor tamaño.

Para tener una idea de las láminas medidas, en las Figuras 7 y 8 se presentan los resultados de los cultivos de trigo/cebada y alfalfa. En la gráfica correspondiente al cultivo del trigo se observa que dos de las láminas medidas son muy altas respecto a los demás datos, por lo que se optó por eliminarlas. Los datos utilizados en el cálculo de las láminas medias para el trigo y alfalfa, así como sus principales indicadores estadísticos se muestran en el Cuadro 8. Como se puede observar en el Cuadro 8 existe una gran variabilidad en las láminas de riego medidas en trigo, esto se debe fundamentalmente a que las condiciones de las zonas de riego donde se realizó el muestro de campo son muy variables.

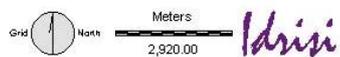
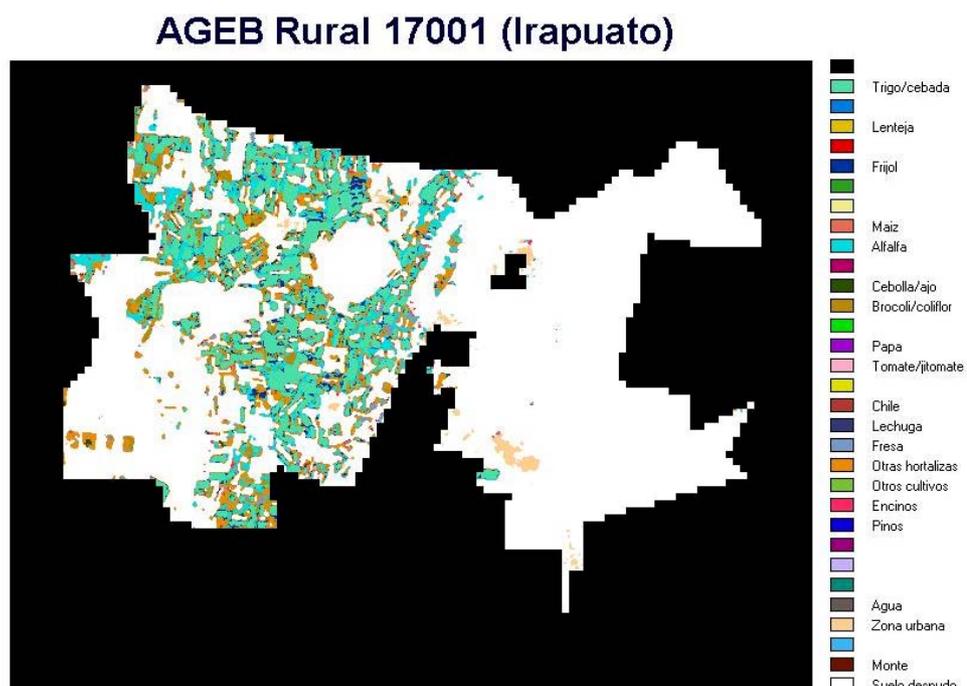
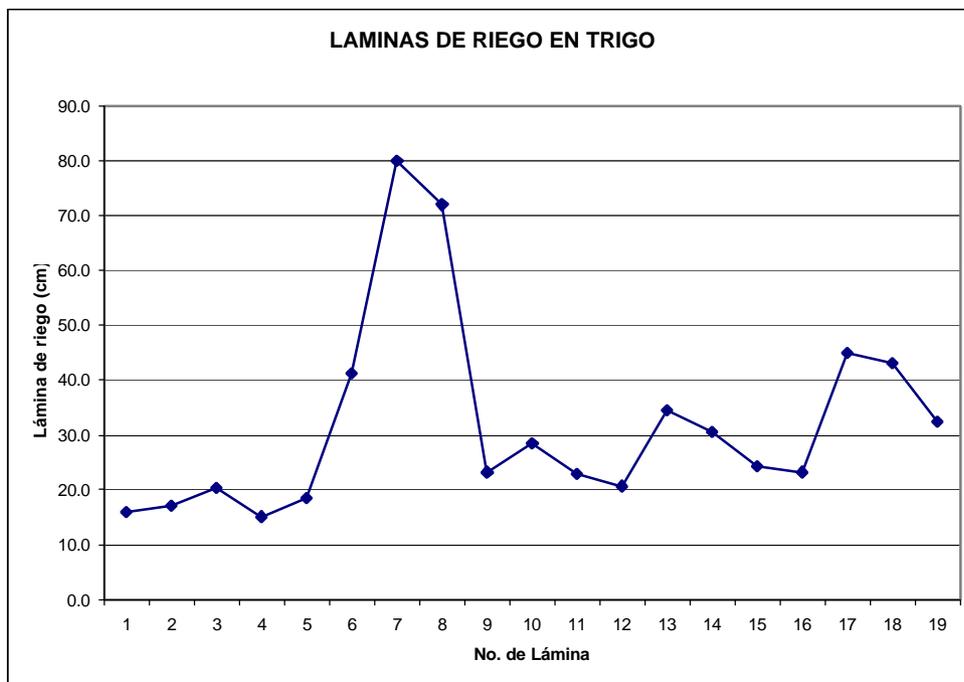
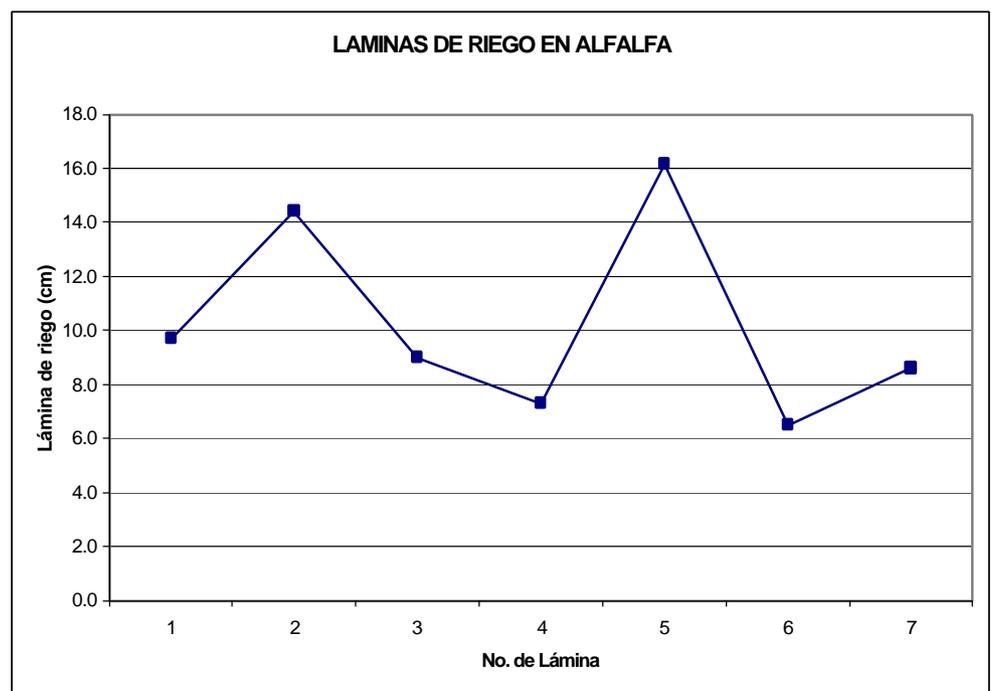


Figura 6. Representación espacial de cultivos en el ciclo O-I 98/99 por AGEBS Rurales



Fuente: Bolaños, 1999. Pp. 71

Figura 7. Láminas de riego medidas en Trigo



Fuente: Bolaños, 1999. Pp. 71

Figura 8. Láminas de riego medidas en Alfalfa

Cuadro 8. Láminas de riego medidas en trigo y alfalfa

No. de Lámina	Trigo (cm)	Alfalfa (cm)
1	16.0	9.7
2	17.0	14.4
3	20.3	9.0
4	15.1	7.3
5	18.6	16.1
6	41.3	6.5
7	23.3	8.6
8	28.5	
9	23.0	
10	20.7	
11	34.5	
12	30.6	
13	24.3	
14	23.3	
15	45.0	
16	43.2	
17	32.4	
Promedio	24.2	9.1
Desv. Std.	11.6	0.8
C.V. (%)	48.0	9.0

Fuente: Bolaños, 1999. Pp. 72

Las láminas de riego aplicadas por ciclo agrícola que estimó Bolaños, 1999 son las que se observan en el Cuadro 9. En dicho cuadro, se presentan las láminas medias aplicadas por riego para algunos cultivos en los cuales realizó mediciones en campo para esos cultivos al momento de regarse. En otros estudios realizados por personal del IWMI, se han obtenido láminas aplicadas para el cultivo del trigo/cebada como se muestra en el Cuadro 10 y 11. En el Cuadro 10 se presentan las láminas medidas en diferentes Unidades de Riego del estado de Guanajuato, estas unidades corresponden a fuentes de gravedad y bombeos de pozos profundos. En el Cuadro 11 se muestran las láminas aplicadas en dos módulos de riego del DR 011 ARL, los módulos son el de Irapuato y La Purísima; en estos módulos se riega con agua proveniente de presas de almacenamiento y de pozos profundos. Cabe destacar que las láminas medidas en este estudio, son muy similares a las que fueron medidas en la investigación realizada por Kloezen y Garcés-Restrepo (1998).

Cuadro 9. Láminas de riego aplicadas por ciclo agrícola

Cultivo	Lámina promedio Aplicada por riego	Número de Riegos	Lámina aplicada por ciclo agrícola
(adm)	(cm)	(adm)	(cm)
Trigo	24.2	4	97
Alfalfa	9.1	12	110
Garbanzo	20.8	1	21
Fresa	4.0	36	145
Tomate	15.8	5	79
Jitomate	10.5	5	53
Cebolla	7.4	6	45
Brócoli	10.1	4	40
Esparrágo	27.7	3	83
Maíz	10.4	7	73
Ejote	11.6	4	46
Frijol	12.6	3	38

Fuente: Bolaños, 1999. Pp. 73

Cuadro 10. Láminas de riego medidas en Unidades de Riego

Unidad de Riego	Lámina Aplicada Por Riego	No. de Riegos	Lámina Aplicada Total
(adm)	(cm)	(adm)	(cm)
La Gavila	25.1	4	100.4
	17.8	4	71.2
	30.7	4	122.8
	31.5	4	126.0
	21.5	4	86.0
	37.5	4	150.0
Hnos. Valdivia	28.1	4	112.4
Trojes de Paul	23.2	4	92.8
	21.7	4	86.8
Media	26.3		105.4
Desviación Std.	6.1		24.6
Coef. de Variación	0.23		0.23

Fuente: Silva, 2000.

Cuadro 11. Láminas de riego medidas en Modulos de Riego

Modulo de Riego (adm)	Lámina Aplicada por Riego (cm)	No. de Riegos (adm)	Lámina Aplicada Total (cm)
Irapuato	31.1	4	124.4
	29.0	4	116.0
	22.5	4	90.0
	25.4	4	101.6
	16.9	4	67.6
	24.0	4	96.0
Purísima	39.0	4	156.0
	43.0	4	172.0
	37.6	4	150.4
	19.0	4	76.0
	17.6	4	70.4
	16.6	4	66.4
	23.8	4	95.2
	27.3	4	109.2
	26.5	4	106.0
	20.2	4	80.8
	24.2	4	96.8
	25.0	4	100.0
	27.4	4	109.6
	24.8	4	99.2
26.3	4	105.2	
Media	25.1		100.2
Desviación Std.	2.2		9.0
Coef. de Variación	0.09		0.09

Fuente: Flores, 1999.

La eficiencia de conducción considerada es del 74.29% de acuerdo a Bolaños, (1999), y corresponde a la media obtenida en 21 aforos realizados en cinco unidades de riego para determinar la eficiencia de conducción. Scott *et al*, (1999) en un trabajo similar considera una eficiencia de conducción del 80% con aforos realizados en campo para las zonas de riego que se ubican en la cuenca Lerma-Chapala. Considerando que únicamente se tiene un número significativo de aforos para los cultivos de alfalfa y brócoli, se determinó usar las láminas

obtenidas en los trabajos realizados por Bolaños, (1999) para estos cultivos en específico; se agrupa en otros cultivos a los restantes cultivos que no muestran en estos, a excepción del trigo/cebada que es tomada de la información reportada por Flores (1999) del Cuadro 11; como se puede observar en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Información sobre láminas de riego

Cultivo	Lámina Neta	Eficiencia	Lámina Total	Volumen Aplicado
(adm)	(m)	(%)	(m)	(1000 m³/ha)
Trigo ³	1.00	74.3	1.35	13.5
Alfalfa	1.10	74.3	1.48	14.8
Brócoli	0.40	74.3	0.53	5.3
Otros	0.64	74.3	0.86	8.6

Fuente: Bolaños, 1999. Pp. 76

En base a los volúmenes aplicados del Cuadro 12, en el Cuadro 13 se presentan los volúmenes de agua que se utilizaron, de acuerdo a las superficies agrícolas estimadas en este trabajo, así como, los volúmenes utilizados resultantes de acuerdo a las superficies reportadas por SDAYR.

Como se puede observar en el Cuadro 13, resulta un volumen utilizado de agua en el estado de Guanajuato de 3,670 millones de m³ para las casi 303,000 ha estimadas. Comparando estas cifras con las reportadas por SDAYR, se tiene que para las 123,000 ha reportadas sin considerar a los perennes, se tiene un consumo de aproximadamente 1,397 millones de m³. Por otro lado Scott *et al*, 1999; estimó para el ciclo agrícola Otoño-Invierno de 1997/98 en los municipios del estado de Guanajuato que se ubican en la cuenca Lerma-Chapala, una superficie regada de 208,000 ha con un consumo de volumen estimado de agua de 2,862 millones de m³. Cabe mencionar que estas superficies estimadas fueron regadas con aguas subterráneas, ya que para este ciclo agrícola, los distritos de riego del estado no operaron.

Comparando las 303,000 ha estimadas para el estado con un volumen utilizado de 3,672 millones de metros cúbicos, con las 170,500 ha reportadas por SDAYR y con un volumen estimado de 2,138 millones de metros cúbicos, se determina un 72% de volumen estimado de más en relación a lo reportado por SDAYR. Un volumen muy importante se está estimando en el cultivo de la alfalfa, en el cual, hay una diferencia de 757 millones de metros cúbicos de agua estimada en relación a la superficie estimada y reportada para la alfalfa.

³ Lámina tomada de Flores, 1999. (Cuadro 11).

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

Cuadro 13 Estimación de volúmenes utilizados

Cultivo	Area Estimada de Riego	Area Reportada De Riego, SDAYR	Volumen Aplicado por Hectárea	Volumen Aplicado en Area Estimada	Porcentaje del Volumen Total Estimado	Volumen Aplicado en Area Reportada	Porcentaje del Volumen Total Reportado
(adm)	(ha)	(ha)	(1000 m³/ha)	(1000 m³)	(%)	(1000 m³)	(%)
Trigo/Cebada	103,883	81,900	13.5	1,402,420	38.2	1,105,650	51.7
Lenteja	501	1,356	8.6	4,309	0.1	11,662	0.5
Frijol	12,222	4,331	8.6	105,109	2.9	37,247	1.7
Alfalfa	96,841	45,665	14.8	1,433,247	39.0	675,842	31.6
Cebolla/Ajo	2,563	5,533	8.6	22,042	0.6	47,584	2.2
Brócoli/Coliflor	25,151	6,596	5.3	133,300	3.6	34,959	1.6
Chile	4,598	631	8.6	39,543	1.1	5,427	0.3
Lechuga	490	955	8.6	4,214	0.1	8,213	0.4
Fresa	5,857	1,664	14.8	86,684	2.4	24,627	1.2
Varías Hortalizas	48,492	20,760	8.6	417,031	11.4	178,536	8.4
Maíz/Sorgo PV	2,806	1,025	8.6	24,132	0.6	8,815	0.4
Total	303,404	170,416		3,672,031	100.0	2,138,562	100.0

V CONCLUSIONES

Con base en las técnicas y los resultados anteriormente descritos, son sobresalientes las siguientes conclusiones.

Los principales cultivos identificados en el ciclo Otoño-Invierno 1998/99 para el estado de Guanajuato fueron: Trigo/Cebada con una superficie de 103,883 ha; Alfalfa con 96,841 ha y Varias Hortalizas con una superficie estimada de 48,492 ha. El total estimado de cultivos en el estado es de 303,404 ha, con 197,900 ha para cultivos del ciclo Otoño-Invierno, 102,698 ha de cultivos perennes y 2,806 ha de Maíz/Sorgo del ciclo PV.

Las superficies reportadas por SDAyR para el ciclo agrícola Otoño-Invierno son de 122,062 ha sembradas; lo que arroja una diferencia de 75,838 ha (equivalente al 62%) de más, en las superficies estimadas en la clasificación, sin considerar a los cultivos perennes. Para el caso de los perennes, se tienen reportadas 47,329 ha, dando una diferencia de 55,369 ha, en donde la alfalfa ocupa el 92%. Bajo este último dato, surge la necesidad de actualizar los sitios de entrenamiento para poder verificar estos resultados, dadas las diferencias considerables que hay entre las superficies estimadas y reportadas. Como ya se ha mencionado, parte de esta diferencia se atribuye a la respuesta espectral variable de las diferentes etapas fenológicas de alfalfa y al grado de cobertura de la misma. Esta sugerencia se enfoca en el cultivo de la alfalfa principalmente, debido a su alto consumo de agua como se demostró que tiene.

De acuerdo a las superficies estimadas de cultivo y con láminas medias aplicadas, se estima un volumen utilizado de agua en todo el estado de alrededor de 3,672 millones de metros cúbicos en el ciclo Otoño-Invierno. El mayor volumen aplicado se utiliza en el cultivo de la alfalfa con 1,430 millones de metros cúbicos y el trigo/cebada con 1,400 millones de metros cúbicos.

El 58% de las superficies agrícolas estimadas se localizan en los siguientes municipios: Abasolo, Celaya, Cortazar, Irapuato, León, Penjamo, Salamanca, Salvatierra y Valle de Santiago. En dichos municipios se encuentran concentradas alrededor de 175,000 ha, siendo los cultivos principales el Trigo/Cebada, Alfalfa y Varias Hortalizas; de estos cultivos en dichos municipios se localiza el 76% del Trigo/Cebada, el 40% de la Alfalfa y el 48% de Varias Hortalizas.

Se considera que hay diferencias significativas entre las superficies reportadas y estimadas; principalmente para el cultivo de la alfalfa y varias hortalizas; dichas diferencias se pueden deber a las diferentes fechas de toma de las imágenes de satélite, las cuales tienen una diferencia en fechas de un poco más de dos meses. Se considera que es más confiable los datos obtenidos en este trabajo, que las superficies reportadas.

Considerando las fechas de toma de las imágenes de satélite y la metodología empleada, se puede asegurar que hay un mayor grado de confiabilidad en las imágenes 28/45 y 28/46 de las superficies estimadas para los cultivos perennes; así como, para los municipios y Agebs Rurales que se ubican en estas.

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

Los Sistemas de Información Geográficos son una importante herramienta para realizar estudios a nivel macro, la confiabilidad de los resultados obtenidos esta en función de la calidad y cantidad de datos recabados en campo, así como, su retroalimentación.

F. Flores L. y C. A. Scott

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

VI BIBLIOGRAFIA

- Bastiaanssen, W. G. M. 1998. Remote Sensing in Water Resources Management: The State of the Art. Colombo Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Bolaños G., M. A. 1999. Estimación de los volúmenes de agua usados en zonas de riego mediante el uso de sensores remotos. Tesis de Maestría. Especialidad de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos Estado de México. México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 1992. Características de los Distritos de Riego, año agrícola 1990. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 1998. Unidades de riego organizadas, resumen nacional. Comisión Nacional del Agua. Montecillo, México. México.
- Consejo Consultivo de Evaluación y Seguimiento del Programa de Ordenación y Saneamiento de la Cuenca Lerma-Chapala. 1991. Acuerdo de Coordinación de Aguas Superficiales. Colección Lerma-Chapala. Vol. 1, No. 5. Marzo 1991.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp. Madrid España.
- Flores L., Francisco. J. 1999. Balance de aguas en dos módulos de riego del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma. Instituto Internacional del Manejo del Agua. Irapuato, Gto. México. Inédito.
- Guerrero R., V. 1999. Hacia una gestión integral, descentralizada y participativa del agua: experiencia y propuesta del Estado de Guanajuato. Seminario sobre enfoques innovadores para el manejo del agua. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. 29-30 de Octubre de 1999. D.F. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1998. Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato. INEGI. Aguascalientes, México.
- Kloezen, W. H. y Garcés-Restrepo, C. 1998. Equidad y Distribución de aguas en el contexto de la transferencia del manejo de riego: el caso del Distrito de Riego Alto Río Lerma, México. En: *Buscando la Equidad. Concepciones sobre justicia y equidad en el riego campesino*. Rutgerd Boelens and Gloria Dácila (eds.) Assen, Holanda: Van Gorcum Publishers.
- Mestre R., J. Eduardo. 1997. Integrated Approach to River Basin Management: Lerma-Chapala Case Study. Water International. Vol. 22. No. 3. Pp 140-152, September 1997.
- Scott, A. C., Walter, M. F., Dibelier, B. J., and Frankenberger, J. R. 1996. Hydrologic Land Use Classification With Thematic and Spatial Inputs. American Water Resources Association. New York U.S.A.

- Scott, A. C. Palacios V., E. y Bolaños G., M. A. 1999. Estimación del área regada con aguas subterráneas en la cuenca del Lerma-Chapala, Mexico. Simposio Internacional sobre manejo integral del agua para uso agrícola. Gómez Palacio Durango, 16-17 Junio.
- Scott, C.A. and C. Garcés R., forthcoming, "Conjunctive Management of Surface Water and Groundwater in the Middle Rfo Lerma Basin, Mexico," in Asit K. Biswas and Cecilia Tortajada (eds.) Integrated River Basin Management. Oxford University Press.
- Silva O., Paula. G. 2000. Estudio Sobre unidades de riego en Guanajuato México. Instituto Internacional del Manejo del Agua. Irapuato Gto. México. Inédito.
- Soria, R. J., Ortiz S., C.A., Islas G., F. y Volke H. V. 1998. Sensores Remotos Principios y Aplicaciones en la Evaluación de Recursos Naturales, Experiencias en México. CONACYT. Chapingo, México.

Superficies Agrícolas Estimadas con Imágenes de Satélite, México

8. Gabriela Monsalvo Velásquez. 1999. Sostenibilidad Institucional de las Asociaciones de Riego en México.
9. Francisco J. Flores-López y Christopher A. Scott. 1999. Simulación de Alternativas del Manejo del Agua en la Cuenca del Río San Juan, México.
10. Manuel Fortis-Hernandez y Rhodante Ahlers. 1999. Naturaleza y Extensión del Mercado de Aguas en el Distrito de Riego 017 de la Comarca Lagunera, México.
11. Gilbert Levine y Carlos Garcés-Restrepo. 1999. El Desempeño de los Sistemas de Riego y sus Implicaciones para la Agricultura Mexicana.
12. Charlotte du Fraiture, Jorge Rubiano y Claudia Alvarez. 1999. Uso Real y Potencial del Agua en la Cuenca del Río Cabuyal, Colombia.
13. Wim H. Kloezen. 2000. Viabilidad de los arreglos institucionales para el riego después de la Transferencia del Manejo en el Distritos de Riego Alto Río Lerma, México.
14. Stephanie Buechler y Emma Zapata Martelo. 2000. Género y Manejo del Agua en Comunidades Rurales de México. México.

IWMI, Serie Latinoamericana

8. Gabriela Monsalvo Velásquez. 1999. Sostenibilidad Institucional de las Asociaciones de Riego en México.
9. Francisco J. Flores-López y Christopher A. Scott. 1999. Simulación de Alternativas del Manejo del Agua en la Cuenca del Río San Juan, México.
10. Manuel Fortis-Hernandez y Rhodante Ahlers. 1999. Naturaleza y Extensión del Mercado de Aguas en el Distrito de Riego 017 de la Comarca Lagunera, México.
11. Gilbert Levine y Carlos Garcés-Restrepo. 1999. El desempeño de los Sistemas de Riego y sus Implicaciones para la Agricultura Mexicana, México
12. Charllotte du fraiture, Jorge Rubiano y Claudia Alvarez. 1999. Uso Real y Potencial del Agua en la Cuenca del Río Cabuyal, Colombia.
13. Wim H. Kloezen. 2000. Viabilidad de los arreglos institucionales para el riego después de la Transferncia del Manejo en el Distritos de Riego Alto Río Lerma, México.
14. Stephanie Buechler y Emma Zapata Martelo (Editoras). 2000. Género y Manejo del Agua en Comunidades Rurales de México.
15. Francisco J. Flores y Christopher A. Scott 2000. Superficie Agrícola Estimada Mediante Análisis de Imágenes de Satélite en Guanajuato, México.

INSTITUTO INTERNACIONAL DEL MANEJO DEL AGUA

Programa de México

c/o CIMMYT, Lisboa 27 Col.Juarez

A Postal 6-641. CP 06600. México D.F., México

Tel: (52) 5804-2004 Fax: (52) 5804-2004

E-mail : riolerma@intercon.net.mx



**INFORME DE
MÉXICO**

INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE

PO Box 2075, Colombo, Sri Lanka

Tel (94-1) 867404. FAX (94-1)866854 .

E-mail IWMI@cgiar.org

Internet Home Page <http://www.cgiar.org/iimi>

