



Servicio Geológico

Teledetección:

su utilización en la
cuantificación
y seguimiento
de recursos hidráulicos
aplicados al regadío

**Proceso digital de imágenes
LANDSAT TM de La Mancha Occidental**

Informaciones y Estudios

nº 51

MOPU

septiembre 1990

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo



Servicio Geológico

**Teledetección:
Su utilización en la
cuantificación y
seguimiento de
recursos hidráulicos
aplicados al regadío**

Proceso digital de imágenes
LANDSAT TM de La Mancha
Occidental

**ESTE LIBRO
PERTENECE
A LA COLECCION
PRIVADA DE
SALOMON MONTESINOS**

COLABORAN EN ESTE NUMERO:

SALOMON MONTESINOS ARANDA

Ldo. en Ciencias Geológicas.
Director Técnico de IBERSAT S. A.

REDACCION Y COORDINACION:

Fernando ANGUIITA BARTOLOME

Licenciado en Ciencias de la Información.
Ingeniero Técnico en Construcciones Civiles.

Fernando OCTAVIO DE TOLEDO

Licenciado en Ciencias Geológicas.

María Fernanda SANCHEZ CARRASCO

Licenciada en Filosofía y Letras.

Concha GABALDON MARTIN

Auxiliar Informática del SGOP.

Secretaría General Técnica
Centro Publicaciones del MOPU
NIPO: 151-90-086-1
ISBN: 84-7433-662-7
D.L.: M. 25.740-1990
Imprime: NEOGRAFIS, S. L.
Santiago Estévez, 8
28019 Madrid

PRESENTACION

La nueva Ley de Aguas, que ha entrado en vigor el 1 de enero de 1986, presenta la importante novedad de incorporar las aguas subterráneas al dominio público hidráulico, desapareciendo el derecho a apropiárselas que concedía la ley de 1879 a quien las alumbrase. A lo largo del texto de la Ley y de los Reglamentos que la desarrollan, se establecen los preceptos derivados de esta novedad, lo que supone un nuevo enfoque de la investigación, conservación, control, aprovechamiento y gestión de los acuíferos existentes en nuestro país.

En las últimas décadas la explotación de las aguas del subsuelo ha conocido un incremento espectacular, sobre todo en las regiones más secas. En la actualidad, las aguas subterráneas proporcionan más de la cuarta parte del agua aplicada a la agricultura y con ellas se riegan, más o menos intensamente, cerca de 900.000 ha del territorio peninsular e insular. Sin embargo, ni la cuantificación de las superficies así regadas ni su precisa localización geográfica se conocen bien, entre otras razones por el dinamismo del fenómeno de transformación en regadío que impulsa la iniciativa privada, dinamismo que nace a su vez de la facilidad de obtener caudales interesantes en la vertical de la propia parcela y de la rapidez de la entrada en servicio.

El sector agrícola, que consume el 80% de los recursos hidráulicos aprovechados en nuestro país, es la pieza clave de la planificación hidrológica. Como cualquier proceso de planificación, el hidrológico conlleva el conocimiento y seguimiento de los lugares y el uso del bien que se consume: el agua en este caso. Los métodos clásicos de abordar el problema —encuestas directas, inventarios puntuales, elaboración manual de mapas, etc.— no son operativos porque, no importa la celeridad con que se lleven a cabo, las modificaciones del entorno estudiado siempre se adelantan a sus conclusiones. La correcta administración que se derive de los fines del proceso de planificación precisa, por tanto, de método y herramienta actualizados.

Ahora y en el inmediato futuro, las modernas técnicas de teledetección de imágenes de satélite parecen ser protagonistas del reemplazo de los métodos clásicos del conocimiento del uso del agua en el regadío. Los satélites de recursos naturales como el LANDSAT o el SPOT recogen información rápida y selectiva que permite disponer de imágenes sucesivas (distanciadas 16 días en el LANDSAT). Esto se traduce en una documentación que es abordable sincrónica o diacrónicamente. Además, la radiación captada abarca la región del espectro visible y la del infrarrojo, y esta última permite diferenciar no sólo las superficies de regadío sino los distintos tipos de cultivos. Superficie de cultivo y dotación unitaria quedan así garantizadas para entrar en el cálculo correcto del uso real y actualizado del agua, dato básico de la planificación hidrológica.

El Servicio Geológico de Obras Públicas, de la Dirección General de Obras Hidráulicas, puso en marcha un estudio experimental cuya realización ha durado un par de años. El objetivo general era presentar la nueva tecnología, y la finalidad concreta perseguida fue contribuir al desarrollo de la misma en su aplicación a la administración de los recursos hidráulicos en las distintas cuencas hidrográficas, no sólo en cuanto a utilización de los subterráneos, menos conocidos, sino a la totalidad de los aplicados al regadío y su seguimiento ulterior. El estudio se ocupaba de La Mancha Occidental, región en la que se han puesto en riego por medio de aguas subterráneas unas 130.000 ha, con extracciones del orden de 600 hm³/año, lo que justificó sobradamente su elección como zona piloto.

La presente publicación recoge el trabajo experimental, ampliando sustancialmente la información gráfica y la explicación conceptual de los fundamentos de la teledetección y de las técnicas del tratamiento digital de imágenes. La documentación fotográfica se ha seleccionado con criterio didáctico y acomodándola a la dimensión reducida de la revista. El autor, Salomón Montesinos, Ldo. en Ciencias Geológicas y director técnico de Ibersat, S. A., ha sido el responsable de esta adaptación que juzgamos excelente en todos los aspectos, y cuya publicación hemos promocionado con el convencimiento de prestar un buen servicio a todos los interesados en mejorar los procesos de planificación hidrológica.

Bernardo López-Camacho y Camacho
Subdirector General. Servicio Geológico

INDICE

	Págs.
Indice de figuras	6
Indice de tablas	7
Agradecimientos	9
I. INTRODUCCION	9
I.1. Justificación del estudio	9
I.2. Objetivos y metodología	10
I.3. Estructura de la memoria	11
<hr/> PARTE PRIMERA: INTRODUCCION AL PROCESO DIGITAL DE IMAGENES DE SATELITE <hr/>	
II. CONCEPTO Y FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCION	15
II.1. Definición y concepto	15
II.2. La radiación electromagnética	15
II.3. Interacciones de la energía electromagnética en la atmósfera	18
II.4. Interacciones de la energía electromagnética con la superficie terrestre	21
II.5. Adquisición de datos	23
II.5.1. Sensores ACTIVOS	23
II.5.2. Sensores PASIVOS	24
III. EL SISTEMA LANDSAT	27
III.1. Los satélites de observación de la Tierra	27
III.2. Características de los satélites Landsat	28
III.3. Sensores a bordo de los satélites Landsat	31
III.3.1. Return Beam Vidicom (RBV)	32
III.3.2. Multispectral Scanner (MSS)	33
III.3.3. Thematic Mapper (TM)	34
III.4. Productos y Servicios Landsat	36
IV. TECNICAS DE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES	39
IV.1. Generalidades del proceso digital de imágenes	39
IV.2. Restauración de la imagen	39
IV.2.1. Corrección de la distorsión radiométrica	40
IV.2.2. Corrección de la distorsión geométrica	41
IV.3. Realce de la imagen	46
IV.3.1. Técnicas de realce radiométrico	47
IV.3.2. Técnicas de realce geométrico	50
IV.4. Extracción de la información	52
IV.4.1. Análisis de componentes principales	52
IV.4.2. Operaciones aritméticas	53
IV.4.3. Clasificaciones automáticas	54
<hr/> PARTE SEGUNDA: APLICACION DEL ACUIFERO DE LA LLANURA MANCHEGA <hr/>	
V. MARCO FISICO DEL AREA DE ESTUDIO	59
V.1. Rasgos generales	59
V.2. Características hidrogeológicas	60
V.3. Evolución del acuífero	63
VI. CAMPAÑA DE CAMPO	67
VII. TRATAMIENTO DE LOS DATOS LANDSAT	71
VII.1. Equipo de proceso de imagen: DIPIX ARIES III	71
VII.2. Análisis visual y estadístico	71
VII.3. Registro de las imágenes	76
VII.3.1. Registro imagen-UTM	76
VII.3.2. Registro imagen-imagen	77

VII.4. Estrategia de clasificación	79
VII.4.1. Clasificación de superficies en regadío	80
VII.4.2. Clasificación de cultivos	81
VII.5. Resultados	84
VIII. DISCUSION Y CONCLUSIONES	89
VIII.1. En relación al estudio	89
VIII.2. En relación a la metodología	90
VIII.3. En relación a la técnica	92
Bibliografía	93
Apéndice fotográfico	97

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1.</i> Disposición de las imágenes de satélite en la zona de estudio ...	11
<i>Figura 2.1.</i> Esquema de una onda electromagnética (Lillesand y Kiefer, 1979)	15
<i>Figura 2.2.</i> El espectro electromagnético	17
<i>Figura 2.3.</i> Curvas espectrales de la distribución de la energía irradiada por un <i>cuerpo negro</i> a diferentes temperaturas (Slater, 1980)	17
<i>Figura 2.4.</i> Transmisión de la energía a través de la atmósfera, en función de la longitud de onda (Tomlinson, 1972)	20
<i>Figura 2.5.</i> Características espectrales de las fuentes de energía, de las ventanas atmosféricas y de los sistemas de teledetección (Lillesand y Kiefer, 1979)	21
<i>Figura 2.6.</i> Curvas de reflectancia espectral para vegetación, suelo y agua (Drury, 1987)	22
<i>Figura 2.7.</i> Concepto del SAR (adaptado de Richards, 1986)	23
<i>Figura 2.8.</i> Concepto de campo de visión instantáneo (IFOV) y ángulo de barrido total (adaptado de Richards, 1986)	24
<i>Figura 2.9.</i> Configuración del satélite francés SPOT-1 (CNES, 1983)	25
<i>Figura 2.10.</i> El sensor HRV (CNES, 1983)	26
<i>Figura 3.1.</i> Satélites de órbita polar y satélites geoestacionarios	27
<i>Figura 3.2.</i> Morfología general de la 1ª generación de satélites Landsat (NASA, 1976)	28
<i>Figura 3.3.</i> Proyección Mercator de las órbitas realizadas por la 1ª generación de satélites Landsat en un día (Drury, 1987)	29
<i>Figura 3.4.</i> Modelo orbital de los satélites Landsat 1, 2 y 3 (Drury, 1988)	29
<i>Figura 3.5.</i> Configuración de los satélites Landsat 4 y 5	30
<i>Figura 3.6.</i> Modelo orbital de los satélites Landsat 4 y 5	31
<i>Figura 3.7.</i> Cobertura de las estaciones en tierra para los satélites de la serie Landsat (Drury, 1987)	32
<i>Figura 3.8.</i> El sistema Return Beam Vidicon (Taranik, 1978)	32
<i>Figura 3.9.</i> Diagrama esquemático del sensor MSS (Taranik, 1978)	33
<i>Figura 3.10.</i> Variación de la reflectancia de una banda MSS a lo largo de una línea de la escena (Drury, 1987)	34
<i>Figura 3.11.</i> Esquema de una escena Landsat MSS	34
<i>Figura 3.12.</i> Características del sistema de scanner Thematic Mapper (adaptado de Richards, 1986)	35
<i>Figura 3.13.</i> Disposición de los cuartos de escena en una imagen Landsat TM	37
<i>Figura 3.14.</i> Localización de los centros de escena TM sobre la Península Ibérica	38
<i>Figura 4.1.</i> Disposición de los pixels en un cuarto de escena Landsat TM ...	39
<i>Figura 4.2.</i> Características de transferencia de un detector	40
<i>Figura 4.3.</i> Esquema del efecto de la dispersión atmosférica sobre distintos rangos de longitud de onda (adaptado de Chavez, 1975)	41
<i>Figura 4.4.</i> Distorsiones geométricas de las imágenes Landsat	42
<i>Figura 4.5.</i> Efecto de la rotación de la Tierra en la adquisición de imágenes de satélite	43
<i>Figura 4.6.</i> Concepto de <i>puntos de control</i> en la corrección de una imagen	44
<i>Figura 4.7.</i> Registro de una imagen digital	44
<i>Figura 4.8.</i> Registro según <i>el vecino más próximo</i>	45
<i>Figura 4.9.</i> Registro mediante <i>interpolación bilineal</i>	45
<i>Figura 4.10.</i> Registro mediante <i>convolución cúbica</i>	46
<i>Figura 4.11.</i> Histograma original e histograma acumulativo	46

Figura 4.12.	Concepto de expansión lineal del histograma	47
Figura 4.13.	Concepto de <i>piecewise linear stretch</i>	48
Figura 4.14.	Concepto de ecualización lineal del histograma (Richards, 1986)	49
Figura 4.15.	Density slicing	50
Figura 4.16.	Descomposición de la curva de distribución de valores digitales según la longitud de onda	51
Figura 4.17.	Ejemplos de filtros direccionales	51
Figura 4.18.	Concepto de análisis de componentes principales	52
Figura 4.19.	Componentes principales de dos variables con alta correlación	53
Figura 4.20.	Reducción del efecto de topografía por un cociente entre bandas del infrarrojo y del visible	54
Figura 4.21.	Concepto de clasificación automática	55
Figura 4.22.	Clasificador paralelepípedo en dos dimensiones	56
Figura 4.23.	Clasificador de mínima distancia en dos dimensiones	56
Figura 4.24.	Clasificador de máxima probabilidad en dos dimensiones	56
Figura 5.1.	Localización del área de estudio	59
Figura 5.2.	Desviaciones acumuladas de la pluviometría anual respecto a la media en función del tiempo (SGOP, 1988)	60
Figura 5.3.	Cortes geológicos esquemáticos de la Llanura Manchega (Niñero-la et al., 1976)	61
Figura 5.4.	Esquema geológico de la Llanura Manchega (Bustamante, 1988)	61
Figura 5.5.	Esquema del funcionamiento hidráulico del sistema acuífero de la Llanura Manchega	62
Figura 5.6.	Evolución de las superficies regadas en la Llanura Manchega (1984-87) (SGOP, 1988)	64
Figura 5.7.	Evolución de la utilización del agua en la Llanura Manchega (1974-87) (SGOP, 1988)	64
Figura 5.8.	Esquema piezométrico de la Mancha (a) Septiembre 1980. (b) Septiembre 1984	65
Figura 5.9.	Esquema piezométrico de la Mancha (Octubre, 1987) (SGOP, 1988)	66
Figura 6.1.	Localización de los polígonos muestreados en Alcázar de S. Juan	68
Figura 6.2.	Localización de los polígonos muestreados en Arenas de San Juan	68
Figura 6.3.	Localización de los polígonos muestreados en Argamasilla de Alba	69
Figura 6.4.	Localización de los polígonos muestreados en Daimiel	69
Figura 6.5.	Localización de los polígonos muestreados en Manzanares	70
Figura 6.6.	Localización de los polígonos muestreados en Socuéllamos	70
Figura 7.1.	Estructura de un procesador de imagen DIPIX ARIES	71
Figura 7.2.	Histogramas de las bandas de la imagen de abril	72
Figura 7.3.	Histogramas de las bandas de la imagen de julio	73
Figura 7.4.	Histogramas de las bandas de la imagen de agosto	74
Figura 7.5.	Histogramas de las bandas de la imagen de septiembre	75
Figura 7.6.	Histogramas de la banda 3 corregida geoméricamente	78
Figura 7.7.	Histogramas de la banda 4 corregida geoméricamente	78
Figura 7.8.	Histogramas de la banda 5 corregida geoméricamente	79
Figura 7.9.	Histogramas de la banda 7 corregida geoméricamente	79
Figura 7.10.	Creación de un fichero con la clasificación de superficies en regadío de la zona	80
Figura 7.11.	Respuestas espectrales de los cultivos más significativos de la Llanura Manchega	82
Figura 7.12.	Localización de las salidas fotográficas	88

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	El ciclo agrícola de los cultivos más representativos de la Llanura Manchega (MAPA, 1982)	10
Tabla 2.1.	Impacto de los constituyentes atmosféricos sobre las distintas regiones del espectro electromagnético (adaptado de Tomlinson, 1972)	19
Tabla 2.2.	Principales ventanas atmosféricas utilizadas en teledetección ...	20
Tabla 2.3.	Características del sensor HRV del satélite francés SPOT-1	25
Tabla 3.1.	Datos históricos de los satélites Landsat 1, 2 y 3	28
Tabla 3.2.	Parámetros orbitales de los satélites Landsat 1, 2 y 3	30

<i>Tabla 3.3.</i>	Parámetros orbitales de los satélites Landsat 4 y 5	30
<i>Tabla 3.4.</i>	Bandas espectrales del sensor Thematic Mapper y sus principales aplicaciones	35
<i>Tabla 3.5.</i>	Características de los sistemas a bordo de los satélites Landsat	36
<i>Tabla 3.6.</i>	Productos fotográficos Landsat	36
<i>Tabla 3.7.</i>	Productos digitales Landsat	37
<i>Tabla 4.1.</i>	Creación del LUT en la equalización del histograma	49
<i>Tabla 5.1.</i>	Balace hidráulico del acuífero de la Llanura Manchega (a partir de datos del SGOP, 1986 y 1988)	63
<i>Tabla 5.2.</i>	Evolución del consumo de agua subterránea en la Llanura Manchega	65
<i>Tabla 5.3.</i>	Evolución de la superficie piezométrica del acuífero de la Mancha	66
<i>Tabla 6.1.</i>	Términos municipales en los que se ha realizado la 1ª campaña de campo	68
<i>Tabla 6.2.</i>	Número de parcelas muestreadas en Arenas de San Juan	68
<i>Tabla 6.3.</i>	Número de parcelas muestreadas en Argamasilla de Alba	69
<i>Tabla 6.4.</i>	Número de parcelas muestreadas en Daimiel	69
<i>Tabla 6.5.</i>	Número de parcelas muestreadas en Manzanares	70
<i>Tabla 6.6.</i>	Número de parcelas muestreadas en Socuéllamos	70
<i>Tabla 7.1.</i>	Puntos de control utilizados en el registro de la subescena de agosto a coordenadas UTM	76
<i>Tabla 7.2.</i>	Puntos de control utilizados en el registro de la imagen de abril sobre la de agosto	77
<i>Tabla 7.3.</i>	Puntos de control utilizados en el registro de la imagen de septiembre sobre la de agosto	77
<i>Tabla 7.4.</i>	Número de parcelas utilizadas para crear la signatura espectral de los cultivos	81
<i>Tabla 7.5.</i>	Respuesta espectral de la alfalfa	83
<i>Tabla 7.6.</i>	Respuesta espectral del maíz	83
<i>Tabla 7.7.</i>	Respuesta espectral del cereal	83
<i>Tabla 7.8.</i>	Superficie en regadío para las 3 fechas analizadas	84
<i>Tabla 7.9.</i>	Superficie total en regadío por término municipal	85
<i>Tabla 7.10.</i>	Cuadro general de clasificación de superficies en el interior del acuífero	86
<i>Tabla 7.11.</i>	Cuantificación de superficies de cultivos en regadío	86
<i>Tabla 7.12.</i>	Dotaciones de agua para riego en la Llanura Manchega	87
<i>Tabla 7.13.</i>	Consumo de agua (Hm ³) durante el año 1987	87
<i>Tabla 8.1.</i>	Evaluación de la extracción de aguas subterráneas por imágenes Landsat TM y por encuestas	89
<i>Tabla 8.2.</i>	Matriz de confusión para establecer el grado de fiabilidad de la clasificación	91

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de un modo u otro han hecho posible la realización de este trabajo. En especial a **D. Pedro Emilio Martínez Alfaro**, doctor en Geología y profesor titular de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, por su dirección, dedicación y consejo.

A **D. Bernardo López-Camacho** y a **D. Emilio Cabrera**, del Servicio Geológico de Obras Públicas, por su interés y preocupación por los problemas hidrogeológicos de la Mancha y su constancia en la búsqueda de nuevas soluciones.

A la empresa **IBERSAT, S. A.**, y a todas las personas que en ella trabajan, ya que en sus instalaciones y equipos de tratamiento de imagen se ha realizado este estudio. A **Pilar Ruiz Zanón**, ingeniero agrónomo y a **Martin G. Wickett**, BSC electronic MIEE engineer, compañeros en la realización del proyecto y a **Ana Cobos** y **Pablo Traspas**, colaboradores en la elaboración de esta memoria.

I. INTRODUCCION

I.1. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO

Según la vigente Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, los recursos subterráneos existentes en nuestro país son de dominio público: "*Las aguas continentales superficiales, así como las subterráneas renovables, integradas todas ellas en el ciclo hidrológico, constituyen un recurso unitario, subordinado al interés general, que forma parte del dominio público estatal como dominio público hidráulico*" (art. 1.2 de la L.A.). Por ello, los organismos de la Administración con competencias en esta materia deben ejercer el control necesario para asegurar el uso adecuado de estas aguas: "*Corresponde al Estado, en todo caso y en los términos que se establecen en esta Ley, la planificación hidrológica...*" (art. 1.3 de la L.A.).

Esta tarea resulta especialmente urgente en aquellas zonas donde existe sobreexplotación de los acuíferos por llevarse a cabo grandes extracciones con destino a riego: "*Se considerará que un acuífero está sobreexplotado o en riesgo de estarlo cuando se está poniendo en peligro inmediato la subsistencia de los aprovechamientos existentes en el mismo, como consecuencia de venirse realizando extracciones anuales superiores o muy próximas al volumen medio de los recursos anuales renovables...*" (art. 171.2 del R.D.P.H.).

La teledetección, que se define como la capacidad de obtener información de un objeto sin mantener contacto físico con él, mediante el estudio de la energía electromagnética que el propio objeto refleja o emite, puede constituir una herramienta especialmente útil, en la cuantificación de las extracciones de agua subterránea con destino a riego. Por un lado, permite el análisis de superficies cultivadas en grandes extensiones de terreno (miles de Km²) a un **bajo coste por hectárea** y en un **corto período de tiempo**. Por otro lado, resulta una técnica totalmente **objetiva**, alejada de las *suspicias* de las encuestas con las que actualmente se recoge este tipo de información.

La teledetección desde satélite aporta un gran volumen de información, de especial interés en la planificación y gestión de los recursos naturales de un territorio, bien sean agrícolas, forestales, hidrológicos o mineros. La información que esta técnica pone a nuestra disposición es de tres tipos:

a) Información temporal

Los satélites de recursos naturales sobrevuelan la misma zona cada cortos períodos de tiempo (16 días en el caso del satélite Landsat), permitiendo realizar estudios cíclicos de un área cualquiera. Esta característica los hace interesantes en el estudio y seguimiento del estado fenológico de cultivos. En general, esta información temporal nos permite detectar los cambios operados en la superficie terrestre en el transcurso del tiempo.

b) Información espacial

Las imágenes de satélite cubren grandes extensiones de terreno. Una escena Landsat TM abarca alrededor de 35.000 km². Esta característica permite la integración del área de estudio dentro del medio físico al que pertenece.

c) Información espectral

Los sensores utilizados a bordo de los satélites captan la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos, no sólo en la región del visible sino también en la región del infrarrojo, lo que los hace especialmente indicados para la identificación de superficies en regadío y la discriminación de diferentes grupos de cultivos.

El estudio sistemático, ya sea de forma aislada o en combinación con otras técnicas de investigación, de los datos que los satélites de recursos naturales envían a la Tierra, está dando buenos resultados en países tecnológicamente más avanzados como EE.UU., Canadá o Francia.

Con el fin de controlar la utilización de las aguas subterráneas, el Servicio Geológico de Obras Públicas de la Dirección General de Obras Hidráulicas, ha estimado oportuno la puesta a punto de una metodología basada en el tratamiento digital de imágenes de satélite, que permita cuantificar la extracción de aguas subterráneas con destino a riego.

LA: Ley de Aguas.

RDPH: Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

I.2. OBJETIVOS Y METODOLOGIA

El objetivo de este estudio es el desarrollo de una metodología, basada en el tratamiento digital de imágenes Landsat TM, que nos permita evaluar la cantidad de agua subterránea que se extrae para riego.

Para alcanzar este objetivo se ha planteado la siguiente metodología:

- Identificación de las superficies en regadío.
- Clasificación de los cultivos. Diferenciación de los *grupos de cultivos* más representativos en la zona de estudio.
- Cuantificación de las superficies en regadío.
- Cuantificación de *masas elementales* de cultivos en regadío.
- Establecimiento de las dotaciones de agua para los tipos de cultivo diferenciados.
- Evaluación de las extracciones de agua subterránea.

Para el desarrollo de la metodología se ha escogido como zona piloto el acuífero de la Mancha occidental o Llanura Manchega (unidad hidrogeológica 04,04 en la delineación llevada a cabo por la Dirección General de Obras Hidráulicas del MOPU en colaboración con el Instituto Tecnológico y Geominero de España) donde más del 90% del agua utilizada es de origen subterráneo.

El regadío es el capítulo que consume más agua en la llanura. La cuantificación del mismo es difícil, debido a que el número de cultivos y hectáreas en regadío varía espacial y temporalmente, a causa de las características hidrogeológicas de los acuíferos (Niñerola et al., 1976).

El estudio se centra en la parte del acuífero incluida en la escena 200-033/1 del satélite Landsat 5 TM.

Dado el carácter experimental del estudio, se han escogido cuatro pasadas del satélite (fig. 1.1):

- 14 abril 1987
- 3 julio 1987
- 4 agosto 1987
- 5 septiembre 1987

La elección de estas fechas se ha realizado atendiendo al ciclo agrícola de los cultivos más representativos en la llanura (Tabla 1.1).

TABLA 1.1.
El ciclo agrícola de los cultivos de la Llanura Manchega (MAPA, 1982)

Grupo	Cultivo	Ciclo agrícola
Cereales	Trigo	Noviembre-julio
	Cebada	Noviembre-junio
Industriales	Girasol	Abril/mayo-septiembre/octubre
	Remolacha	Marzo/abril-octubre/noviembre
Hortalizas	Cebolla	Abril/mayo-agosto/septiembre
	Ajos	Diciembre/enero-julio/agosto
	Melón	Abril/mayo-septiembre
Tubérculos	Patata temprana	Marzo-junio
	Patata tardía	Junio/julio-noviembre
Forrajeros	Alfalfa	Marzo/abril/mayo
Maíz	Maíz	Mayo-noviembre
Viñedo	Vid (floración)	Mayo/junio

Existe una clara diferenciación entre cultivos de invierno (cereales) y cultivos de primavera (maíz, industriales...).

Teniendo también en cuenta las características climáticas de la región, que hacen que durante el verano exista la mayor demanda de agua para riego, se han escogido tres fechas correspondientes a los meses de verano. La cuarta imagen pertenece a la primavera, donde se produce el mayor desarrollo vegetativo de los cereales. Este grupo sigue siendo, con diferencia, el cultivo más extendido en la Llanura Manchega.

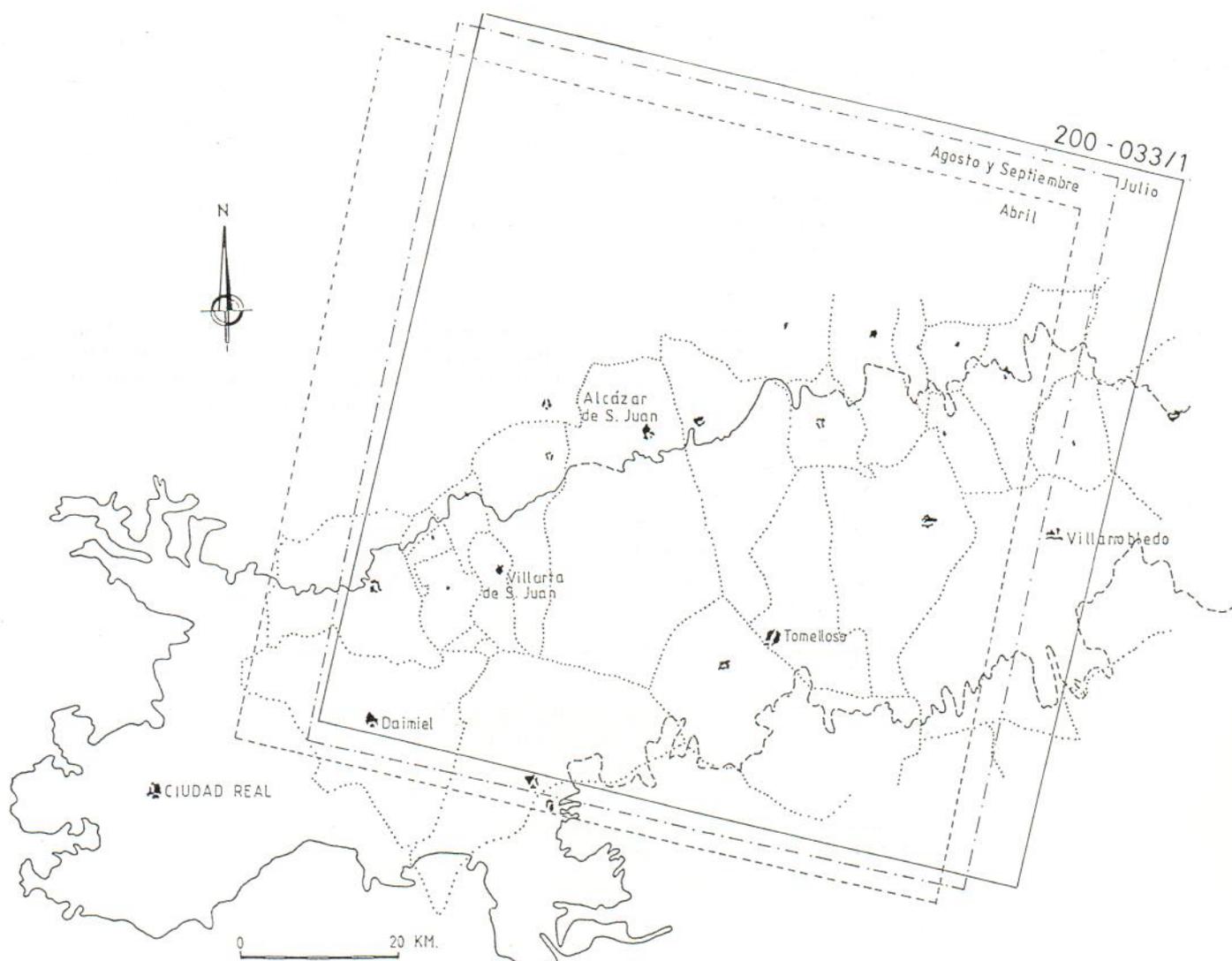


Figura 1.1.—Disposición de las imágenes de satélite en la zona de estudio.

I.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Esta memoria se encuentra estructurada en 2 partes, con un total de 8 capítulos.

La primera parte es una introducción general al proceso digital de imágenes de satélite. En la segunda, se presenta la aplicación de la teledetección al problema concreto del acuífero de la Llanura Manchega, donde se ha desarrollado la metodología para la cuantificación de las extracciones de aguas subterráneas utilizadas para riego.

— Capítulo I. INTRODUCCION.—Se analiza el interés y oportunidad del estudio, así como los objetivos planteados y la metodología utilizada en la elaboración del mismo.

Parte primera: INTRODUCCION AL PROCESO DIGITAL DE IMAGENES DE SATELITE.

— Capítulo II. CONCEPTO Y FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCION. Es una introducción a los principios físicos de la teledetección. Se analizan las interacciones de la energía electromagnética con la atmósfera y con la superficie terrestre, condicionantes decisivos en la utilización de esta técnica desde satélite. Por último, se presentan distintos tipos de sensores utilizados en la adquisición de los datos.

— Capítulo III. EL SISTEMA LANDSAT. Es el programa pionero en el estudio de los

recursos naturales desde el espacio. Este capítulo es una recopilación de la información existente sobre los satélites Landsat: características orbitales, configuración, sensores a bordo..., también se incluye una relación de los productos y servicios más comunes que el programa Landsat ofrece en la actualidad al usuario.

- Capítulo IV. TECNICAS DE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES. Este capítulo es una introducción a las técnicas más comunes de proceso digital de imagen, desde la restauración de las distorsiones producidas en la recogida de la imagen, pasando por el realce de la información digital, hasta las técnicas de extracción de información según los objetivos del estudio.

Parte segunda: APLICACION AL ACUIFERO DE LA LLANURA MANCHEGA.

- Capítulo V. MARCO FISICO DEL AREA DE ESTUDIO. Se presentan las características geográficas, climáticas, geológicas e hidrológicas de la Llanura Manchega, así como la evolución del acuífero en los últimos años. Esta evolución ha condicionado la elección de este área como zona piloto de estudio.
- Capítulo VI. CAMPAÑA DE CAMPO. La importancia que el muestreo de campo tiene en estudios de teledetección, nos ha empujado a incluir este capítulo. En él se recoge el trabajo llevado a cabo en las dos campañas de campo que se realizaron como apoyo al trabajo de gabinete.
- Capítulo VII. TRATAMIENTO DE LOS DATOS LANDSAT. Se recoge el tratamiento digital de las imágenes del acuífero de la Llanura Manchega, así como los resultados analógicos y numéricos obtenidos. Completa el capítulo una somera presentación del equipo de proceso de imagen DIPIX ARIES III, utilizado en el estudio.
- Capítulo VIII. DISCUSION Y CONCLUSIONES. En este capítulo, se analizan comparativamente los resultados obtenidos mediante tratamiento digital de imágenes de satélite y los obtenidos por el método convencional de encuestas. Igualmente se hace balance de las posibilidades que la técnica ofrece en este tipo de estudios.

Completan la memoria las referencias de la bibliografía utilizada y un apéndice fotográfico, donde se recoge el tratamiento digital realizado sobre las imágenes Landsat 5 TM del área de estudio.

PARTE PRIMERA

**INTRODUCCION AL PROCESO
DIGITAL DE IMAGENES DE SATELITE**

II. CONCEPTO Y FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCION

II.1. DEFINICION Y CONCEPTO

La teledetección (*Remote sensing*) es la capacidad de obtener información de un objeto sin mantener contacto físico con él. El término teledetección se restringe a aquellos métodos que emplean la energía electromagnética reflejada o irradiada por los objetos, lo que excluye las investigaciones eléctricas, magnéticas y gravimétricas, que lo que miden son campos de fuerza (Sabins, 1978).

Esta técnica, que permite adquirir información de un objeto a distancia, se basa en que los materiales de la superficie terrestre tienen una respuesta espectral propia, por la que podemos identificarlos. Para ello, es necesario contar con instrumentos capaces de registrar la radiación procedente de la Tierra y de transformarla en una señal susceptible de ser manipulada de forma analógica (productos fotográficos) o de forma digital (cintas magnéticas compatibles con ordenador).

El láser, el radar, los scanners multispectrales y las cámaras fotográficas, son los sensores más utilizados en teledetección, y los aviones y satélites, las plataformas de observación sobre las que se instalan estos sensores para la adquisición de los datos.

En este capítulo vamos a conocer las leyes físicas y los principios básicos en los que se apoya esta técnica:

- a) La radiación electromagnética como fuente de energía.
- b) Cómo se propaga la energía a través de la atmósfera.
- c) Las interacciones de la energía electromagnética con los objetos de la superficie terrestre.
- d) Métodos de recogida de la información:
 - Sensores activos.
 - Sensores pasivos.

II.2. LA RADIACION ELECTROMAGNETICA

La radiación electromagnética es una forma de transferencia de energía en el espacio libre que presenta propiedades de onda y de corpúsculo (Hunt, 1980).

Las propiedades ondulatorias de la radiación electromagnética explican la interacción entre materia y energía a escala macroscópica. Según estas propiedades, la energía electromagnética es aquella que viaja a través del espacio a la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$) en un modelo ondulatorio armónico.

La onda está formada por un campo eléctrico vertical y un campo magnético horizontal, perpendiculares entre sí y transversales a la dirección de propagación (fig. 2.1).

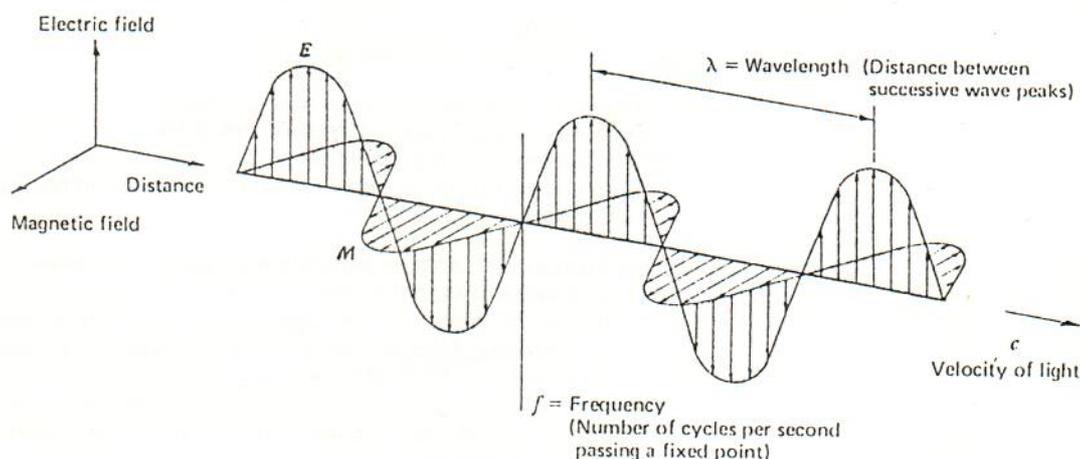


Figura 2.1.—Esquema de una onda electromagnética. Sus componentes son una onda eléctrica sinusoidal (E) y una onda magnética (M). (Lillesant y Kiefer, 1979).

Los parámetros que caracterizan a una onda electromagnética son la *longitud de onda* (λ) y la *frecuencia* (f). La primera, se define como la distancia desde una posición en un ciclo a la misma posición en el ciclo siguiente. La unidad más utilizada es la micra (10^{-6} m). La frecuencia es el número de ciclos que pasan por un punto fijo en la unidad de tiempo, normalmente un segundo. Su unidad es el hertzio y equivale a un ciclo por segundo.

Estos dos parámetros se encuentran relacionados por la ecuación:

$$c = f \cdot \lambda \quad (1)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

donde, c es la velocidad de la luz y vale $3 \cdot 10^8$ m s^{-1}

f es la frecuencia

λ es la longitud de onda

Lo que nos indica esta ecuación es que la longitud de onda varía inversamente con la frecuencia. Es decir, a mayor longitud de onda, menor frecuencia.

Mientras la teoría ondulatoria explica las interacciones entre materia y energía a escala macroscópica, la teoría cuántica lo hace a escala microscópica. Esta última, sugiere que la radiación electromagnética está formada por unidades discretas llamadas *cuantos o fotones*. La energía de un fotón viene dada por la relación siguiente:

$$E = h \cdot f \quad (3)$$

donde, E es la energía del fotón expresada en julios.

h es la constante de Planck que vale $6,626 \cdot 10^{-34}$ j.s.

f es la frecuencia.

El modelo cuántico y el modelo ondulatorio de la radiación electromagnética, se pueden relacionar sustituyendo en la ecuación (3) el valor de la frecuencia, por el conseguido en la ecuación (2).

Así:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (4)$$

Esta relación expresa que a mayor energía del fotón, mayor frecuencia y longitudes de onda más cortas. Esto es muy importante en teledetección porque la radiación emitida en longitudes de onda largas, es más difícil de captar que aquella radiación que se emite en longitud de onda corta. El bajo contenido de energía en la radiación de longitud de onda larga, obliga a los sistemas que operan en estas regiones del espectro, a recoger información de amplias áreas de superficie para captar la suficiente señal como para ser detectada por los sensores que se utilizan.

La energía electromagnética se clasifica según su longitud de onda dentro del llamado *espectro electromagnético* (fig. 2.2).

En teledetección, las regiones más utilizadas son: la región del visible que se extiende entre $0,4 \mu\text{m}$ y $0,7 \mu\text{m}$, la región del infrarrojo reflejado, entre $0,7 \mu\text{m}$ y $3 \mu\text{m}$, el infrarrojo térmico, que presenta dos bandas, una entre $3 \mu\text{m}$ y $5 \mu\text{m}$, y la otra entre 8 y $14 \mu\text{m}$ y, por último, la región de microondas, que recoge las longitudes de onda más largas, desde $0,3$ a 300 cm.

El ojo humano tan sólo es sensible a la región del visible. Los sensores multispectrales utilizados en teledetección desde satélite, no sólo captan en la región del visible, sino que también lo hacen en la región del infrarrojo reflejado e incluso en el caso del sensor *Thematic Mapper* del satélite Landsat 5, existe una banda espectral en el infrarrojo térmico ($10,4$ - $12,5 \mu\text{m}$). Además, los sensores multispectrales no captan el visible como una región única, sino que lo hacen en las bandas que lo componen: azul ($0,45$ - $0,5 \mu\text{m}$), verde ($0,5$ - $0,6 \mu\text{m}$) y rojo ($0,6$ - $0,7 \mu\text{m}$), permitiendo mayor discriminación que la visión humana.

Se ha observado que todos los cuerpos con una temperatura superior al cero absoluto (0°K ó -273°C) emiten radiación electromagnética en un amplio rango de longitudes

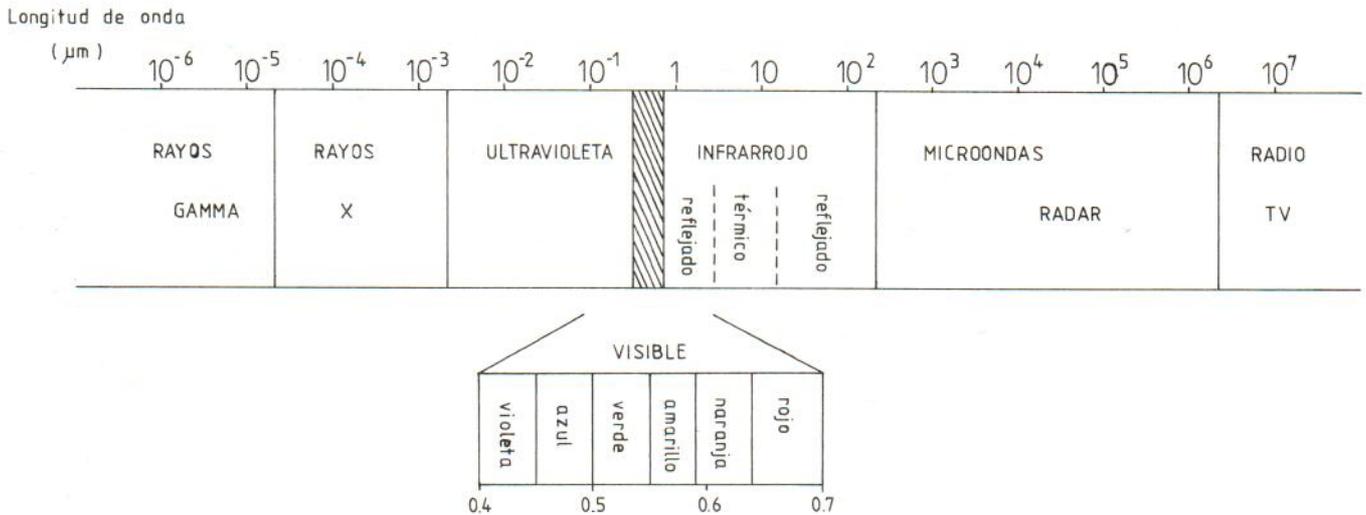


Figura 2.2.—El espectro electromagnético.

de onda. A medida que la temperatura absoluta de un cuerpo cambia, la longitud de onda dominante (λ_m) se desplaza según la relación siguiente:

$$\lambda_m = \alpha \cdot T^{-1}$$

donde λ_m es la longitud de onda dominante.

α es la constante que vale $2898 \mu\text{m} \text{ } ^\circ\text{K}$.

T es la temperatura expresada en $^\circ\text{K}$.

Esta relación se conoce como *Ley de Desplazamiento de Wien* y gráficamente queda representada en la figura 2.3.

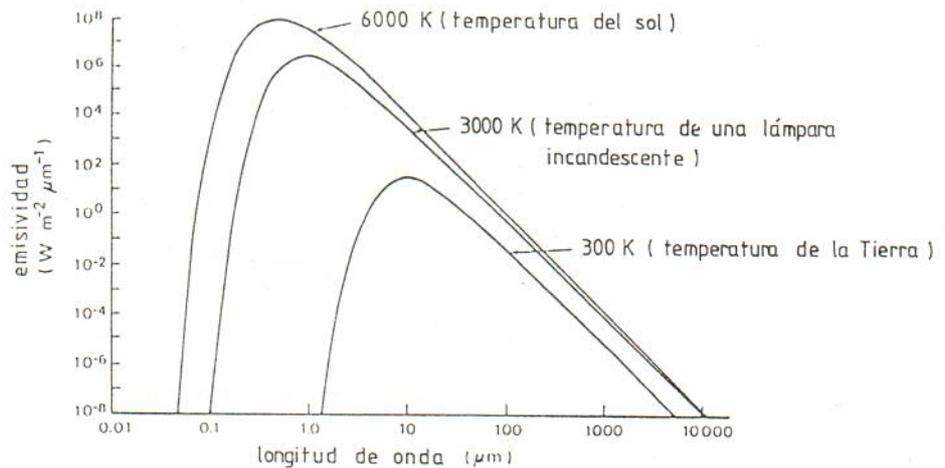


Figura 2.3.—Curvas espectrales de la distribución de la energía irradiada por un *cuerpo negro* a diferentes temperaturas (Slater, 1980).

Según esta ley, al aumentar la temperatura se produce un desplazamiento de la longitud de onda hacia regiones más cortas.

Estas curvas se han experimentado para un *cuerpo negro (blackbody)* que es un cuerpo hipotético que absorbe toda la radiación que incide sobre él y la vuelve a emitir totalmente. Lo vamos a considerar como un emisor perfecto.

El Sol se comporta como un cuerpo negro a una temperatura de $6.000 \text{ } ^\circ\text{K}$ e irradia gran

cantidad de energía en todas las longitudes de onda, desde el ultravioleta hasta más allá del infrarrojo (fig. 2.3). Presenta un máximo de energía para una longitud de onda en torno a $0,5 \mu\text{m}$ que corresponde a la luz verde. Esto explica que, durante el día, el máximo de energía incidente y reflejada por la superficie terrestre se presente en la región del visible.

Por otro lado, la Tierra presenta una temperatura media superficial de unos $290 \text{ }^\circ\text{K}$ ($17 \text{ }^\circ\text{C}$) e irradia energía en un amplio rango dentro de la región del infrarrojo (fig. 2.3). El máximo de energía se alcanza para longitudes de onda en torno a $9,7 \mu\text{m}$, que corresponde al infrarrojo térmico. Este nivel de energía es muy bajo si lo comparamos con la energía solar reflejada, pero es dominante durante la noche y aunque no puede ser captado por sistemas fotográficos, sí lo es por los sensores multispectrales utilizados en teledetección.

Cuando un objeto de la Tierra se convierte en una fuente de radiación que puede ser captada por un sensor, la energía irradiada por el objeto es función de su temperatura. La cantidad total de energía emitida (W) por un cuerpo negro viene dada por la Ley de Stefan-Boltzman:

$$W = \sigma \cdot T^4$$

donde, W es la energía radiada por segundo y por unidad de superficie.

σ es la constante de Stefan-Boltzman: $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$

T es la temperatura en $^\circ\text{K}$.

En definitiva, lo que nos dice esta ley es que la energía emitida por un objeto aumenta rápidamente con ligeros incrementos de la temperatura.

II.3. INTERACCION DE LA ENERGIA ELECTROMAGNETICA CON LA ATMOSFERA

Como hemos visto en el apartado anterior, la fuente de radiación electromagnética más importante en teledetección es el Sol, con una longitud de onda dominante de $0,5 \mu\text{m}$, correspondiente a la luz verde del visible. Esta radiación corresponde a la energía solar reflejada y es la que nos permite ver las características del terreno. Otra fuente importante de radiación es la temperatura de la Tierra, con una longitud de onda dominante de $9,7 \mu\text{m}$, que corresponde al infrarrojo térmico. Esta radiación representa la energía emitida desde la superficie terrestre.

En su viaje a través de la atmósfera, la energía electromagnética interacciona con las moléculas gaseosas y partículas en suspensión (aerosoles). Básicamente, los fenómenos que se producen y afectan a la radiación son dos: la *dispersión (scattering)* y la *absorción*.

La *dispersión* se produce cuando la radiación es reflejada o refractada por las partículas de la atmósfera (Swain y Davis, 1978).

La dispersión no atenúa la radiación, sino que produce cambios en su dirección e intensidad, cambios que dependen de la longitud de onda. Este fenómeno es mayor cuanto menor es la longitud de onda.

Desde un punto de vista teórico, la dispersión puede dividirse en tres clases, dependiendo de la relación existente entre la longitud de onda de la radiación y el tamaño de las partículas de la atmósfera.

Así tenemos:

a) *Dispersión de Rayleigh*

Tiene lugar cuando la longitud de onda de la radiación incidente es mucho mayor que el tamaño de las partículas de la atmósfera. Su intensidad es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Este efecto explica el cielo azul en un día claro, debido a que las longitudes de onda más cortas (azul) se dispersan mucho más que las longitudes de onda más largas (rojas).

b) *Dispersión de Mie*

Aparece cuando el diámetro de la partícula y la longitud de onda de la radiación son similares. En teledetección, la dispersión de Mie se manifiesta en un deterioro general de las imágenes del espectro óptico, debido a la presencia de vapor de agua y polvo atmosférico.

c) *Dispersión no selectiva*

Ocurre cuando el tamaño de las partículas es mucho mayor que la longitud de onda de la radiación. Un efecto de este tipo de dispersión son las nubes blancas, debidas a que todas las longitudes de onda del visible son dispersadas en igual cantidad.

Estos efectos son atenuados mediante un sistema de filtros en el sensor que recoge la información, con la consiguiente mejora en la calidad de la imagen.

En la tabla 2.1 se puede ver cómo afectan a la radiación los distintos constituyentes atmosféricos según su tamaño.

La *absorción* es la retención de la energía radiante por un cuerpo o una sustancia (Lo, 1986).

En la atmósfera, la radiación electromagnética es absorbida por moléculas gaseosas, principalmente vapor de agua, CO₂, O₂ y ozono. El resultado es que la energía se atenúa o se pierde.

TABLA 2.1.
Impacto de los constituyentes atmosféricos sobre las distintas regiones del espectro electromagnético (adaptado de Tomlinson, 1972)

CONSTITUYENTES ATMOSFERICOS	VISIBLE			IRL	MICROONDAS			
	UV	IRP						
	μm	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5
Humos	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Polución y Neblina	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Polvo Atmosférico	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Nubes y Niebla	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Ceniza	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Neblina y Niebla	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Llovizna	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Cristales de Hielo	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Gotas de Lluvia	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Cristales de Nieve	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Granizo	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

UV	Ultravioleta	-----	Límite de atenuación
IRP	Infrarrojo próximo	-----	Atenuación por alta
IRL	Infrarrojo lejano	-----	concentración de partículas

La absorción no es un fenómeno indiscriminado, sino que se restringe a la radiación de determinadas longitudes de onda. Por ejemplo, la capa de Ozono de la atmósfera absorbe completamente la radiación de longitudes de onda menores de 0,3 μm , que corresponde a la región del ultravioleta. Si esto no ocurriera la vida sobre la Tierra no

sería posible, porque la exposición prolongada a este tipo de radiación destruye los tejidos vivos.

Existen rangos de longitudes de onda en los cuales la atmósfera es muy transmisiva y no se producen fenómenos de absorción, son las denominadas *ventanas atmosféricas* (fig. 2.4).

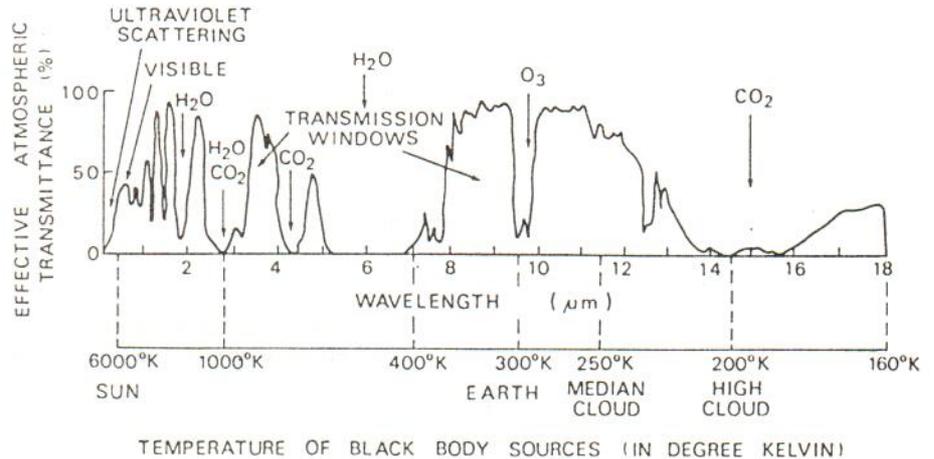


Figura 2.4.—Transmisión de la energía a través de la atmósfera en función de la longitud de onda. Las zonas donde existe una elevada transmisión se denominan *ventanas atmosféricas* (Tomlinson, 1972).

La adquisición de datos en teledetección se restringe a las ventanas atmosféricas, donde las condiciones de transmisión de la radiación electromagnética procedente de la Tierra son óptimas.

En la tabla 2.2 podemos ver las principales ventanas atmosféricas y el tipo de sensor que capta información en esa zona.

TABLA 2.2.
Principales ventanas atmosféricas utilizadas en teledetección

Bandas (μm)	Sensores
0,3-1,35	Cámaras fotográficas y scanners multispectrales
1,5-1,8	Scanners multispectrales
2,0-2,4	Scanners multispectrales
2,9-4,2	Scanners multispectrales y scanner térmico
8,0-14	Scanners multispectrales y scanner térmico
> 1 mm.	Radar y sistemas pasivos de microondas

Los efectos combinados de la dispersión y la absorción pueden ser expresados mediante un *coeficiente de atenuación* que es el factor por el que la radiación que atraviesa un medio es reducida, al recorrer una distancia de una longitud de onda (Lo, 1986).

Es importante hacer notar que existe una interrelación entre las fuentes de energía (el Sol y la superficie de la Tierra, principalmente) las ventanas atmosféricas y la sensibilidad de los sensores que vamos a utilizar para captar y registrar la energía (fig. 2.5).

La adecuación de los sensores utilizados en teledetección se ha hecho buscando una energía suficiente, como para poder ser registrada, que coincida con una zona de elevada transmisión (ventana atmosférica).

El ojo humano como un sensor más, se ha adaptado a un rango de longitud de onda que coincide con una ventana atmosférica y con un máximo de energía procedente del Sol.

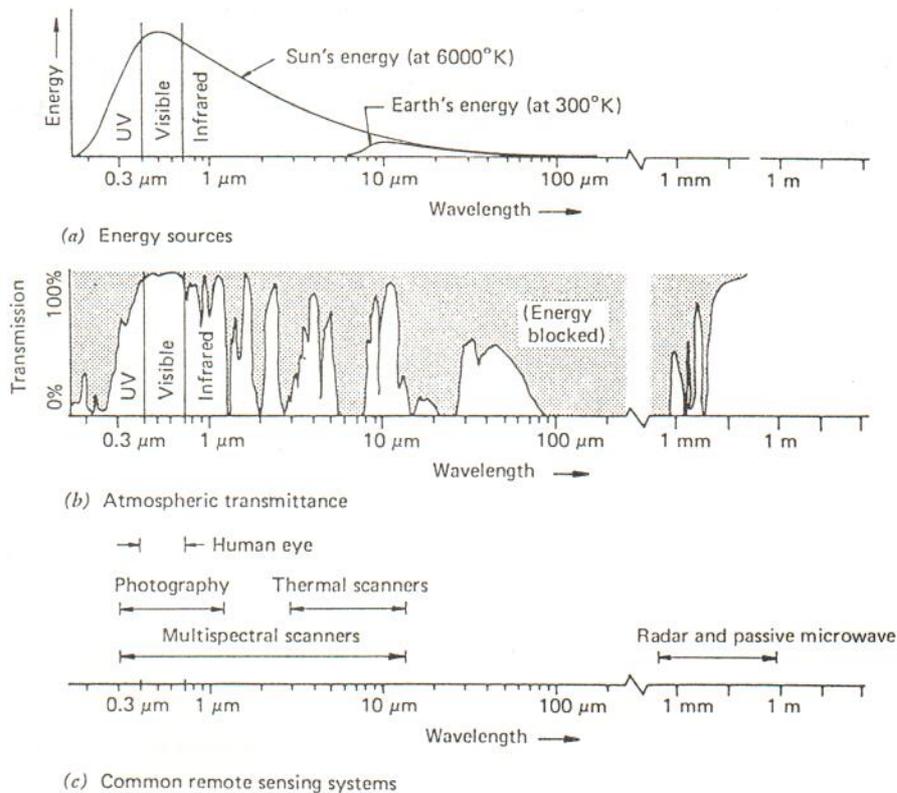


Figura 2.5.—Características espectrales de las fuentes de energía, de las ventanas atmosféricas y de los sistemas de teledetección (Lillesand y Kiefer, 1979).

II.4. INTERACCIÓN DE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA CON LA SUPERFICIE TERRESTRE

Cuando la energía electromagnética llega a la Tierra interacciona con los materiales de la superficie. Parte de la energía es reflejada y el resto es absorbida o transmitida, dependiendo de las propiedades de los materiales y de la longitud de onda de la radiación (Colwell et al., 1963).

Parte de la radiación absorbida por los materiales es liberada en forma de calor, es la denominada *energía emitida*. Esta, junto con la energía geotérmica de la Tierra, supone una importante fuente de radiación electromagnética utilizable en teledetección. Sin embargo, la que tiene mayor interés es la energía reflejada por los objetos.

La reflexión de la energía depende de la relación entre la rugosidad de la superficie del objeto y la longitud de onda de la radiación. Cuando la superficie presenta una rugosidad menor que la longitud de onda de la radiación incidente, el objeto se comporta como un reflector especular y toda la energía es reflejada en una sola dirección. Por el contrario, cuando la rugosidad es mayor que la longitud de onda, la reflexión se produce en todas las direcciones y estamos ante la reflexión difusa. En la naturaleza, la mayoría de los objetos presentan propiedades intermedias entre estos dos tipos extremos.

El coeficiente de reflexión que normalmente se utiliza es el *albedo*, que expresa el porcentaje de energía reflejada por unidad de superficie.

El parámetro que mide las características de los objetos ante la reflexión, es la *reflectancia espectral* (R_λ) que se mide como una función de la longitud de onda. Numéricamente viene dada por la siguiente expresión:

$$R_\lambda = \frac{E_r(\lambda)}{E_i(\lambda)} \cdot 100$$

donde

R_λ es la reflectancia espectral.

$E_r(\lambda)$ es la energía de longitud de onda λ reflejada por un objeto.

$E_i(\lambda)$ es la energía de longitud de onda λ que incide sobre el objeto.

Gráficamente, un objeto queda caracterizado por su *curva de reflectancia espectral*, en la que se representa la reflectancia del objeto en función de la longitud de onda.

En la figura 2.6 podemos ver las curvas de reflectancia espectral de los tres cuerpos básicos que podemos encontrar en la superficie terrestre.

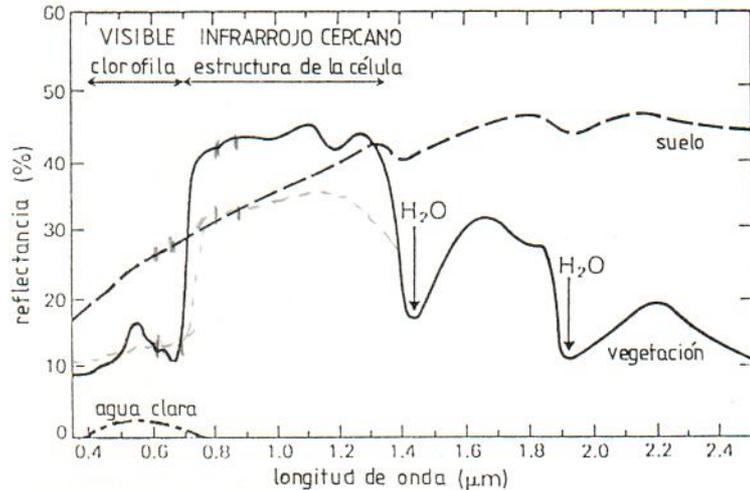


Figura 2.6.—Curvas de reflectancia espectral para vegetación, suelo y agua (Drury, 1987).

Analizando la curva de reflectancia de la vegetación, vemos que en la región del visible existen dos bandas de absorción en torno a $0,45 \mu\text{m}$ y $0,65 \mu\text{m}$. Estas bandas de absorción son debidas a la demanda de energía por parte de la clorofila para realizar la fotosíntesis. Esta absorción de la energía en el azul y rojo de la región del visible y la mayor reflectancia en el verde, es la causa por la que las hojas sanas de las plantas las vemos de color verde.

En la región del infrarrojo encontramos que, entre $0,7$ y $1,3 \mu\text{m}$, la reflectancia es muy alta (próxima al 50%). El valor de reflectancia en esta región del espectro viene condicionado por la estructura interna de la hoja. Debido a esta propiedad es posible diferenciar distintos tipos de plantas atendiendo a la configuración de sus hojas.

Por encima de $1,3 \mu\text{m}$ hasta $2,5 \mu\text{m}$ el contenido en agua de la hoja determina la reflectancia de la planta. A mayor contenido de agua en la hoja, menor valor de reflectancia.

La curva de reflectancia del suelo nos muestra como ésta aumenta directamente con la longitud de onda. Los factores que influyen en la reflectancia de un suelo son muchos: contenido en humedad, textura, estructura, rugosidad, contenido en hierro y presencia de materia orgánica. Por lo tanto, las propiedades de reflectancia de un suelo son válidas dentro de unas condiciones determinadas (Lillesand y Kiefer, 1979).

La curva de reflectancia espectral del agua indica una total absorción de la energía en la región del infrarrojo. Esta propiedad es muy interesante en teledetección, ya que permite inventariar fácilmente cuerpos de agua, aunque éstos sean poco profundos o tengan mucho material en suspensión.

En la región del visible, la reflectancia del agua depende de la cantidad de materiales en suspensión. En esta región del espectro, el agua clara posee una menor reflectancia que el agua cargada en sedimentos.

En agua clara es posible estimar la profundidad estudiando la intensidad de la radiación visible, especialmente la luz azul, reflejada por el fondo. Sin embargo, para profundidades superiores a 40 metros toda la radiación visible es absorbida y los cuerpos de agua aparecen oscuros (Drury, 1987).

II.5. ADQUISICION DE DATOS

A lo largo de este capítulo hemos estudiado la naturaleza de la energía electromagnética, cómo se propaga ésta a través de la atmósfera y cómo interacciona con los materiales de la superficie terrestre. El resultado de estos fenómenos es una señal de energía lanzada al espacio con información sobre los objetos de la biosfera.

La recogida de la información se realiza mediante sensores. Un sensor se puede definir como un sistema cuya entrada es radiación electromagnética y su salida un conjunto de datos digitales que constituyen la representación numérica de una imagen. De esta definición quedarían excluidos los sensores fotográficos, que detectan las variaciones de energía mediante el uso de reactivos químicos en una película sensible a la luz. Estos últimos son muy simples y baratos y además nos procuran una definición espacial muy buena, pero no nos permiten realizar un tratamiento digital de la imagen tomada.

En teledetección, los sensores se clasifican en activos y pasivos. Los *sensores activos* son aquellos que iluminan el blanco con una radiación y recogen la energía reflejada por él. Por el contrario, los *sensores pasivos* recogen la energía electromagnética reflejada o emitida por el blanco, cuando éste es iluminado por una fuente externa (generalmente el Sol).

II.5.1. Sensores ACTIVOS

El más utilizado en teledetección es el RADAR (*Radio Detection and Ranging*). Cuando la plataforma de observación es un avión, recibe el nombre de SLAR (*Side Looking Airborne Radar*). Consiste en un pulso de energía eléctrica emitida en la frecuencia de microondas y cuya reflexión en el terreno es recogida de nuevo por una antena situada en el propio avión.

Estas imágenes se caracterizan por presentar a lo largo de su eje una franja en blanco que corresponde a la vertical del avión. Esto es debido a que los ángulos de incidencia (entre el haz incidente y la perpendicular al terreno) no pueden hacerse muy pequeños porque el receptor no podría resolver los tiempos de llegada del eco.

El problema de este sistema radica en la relación entre el diámetro de apertura y la resolución espacial, lo que impide su utilización en plataformas espaciales, debido a que para conseguir una resolución espacial aceptable serían necesarias antenas de tamaño muy grande.

Para poder resolver este problema se ha desarrollado el radar de apertura sintética, también llamado SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Se denomina así, porque el propio vehículo de observación sintetiza con su movimiento una antena de dimensiones muy superiores a las reales, lo que se traduce en mejores resoluciones espaciales para una misma apertura (fig. 2.7).

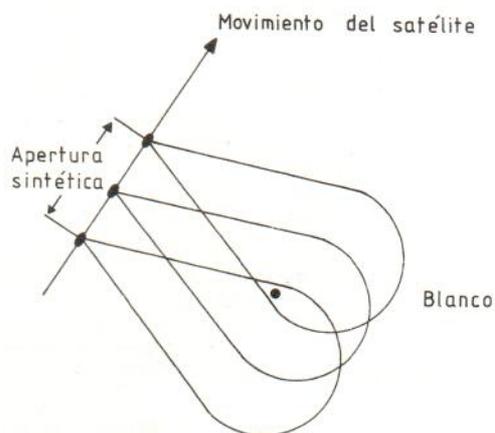


Figura 2.7.—Concepto del SAR. Se utiliza el movimiento de la plataforma de observación para sintetizar una antena de mayores dimensiones. Así, un mismo punto en el terreno es iluminado para toda la apertura sintética (adaptado de Richards, 1986).

Todos los radares empleados actualmente a bordo de satélite son de apertura sintética, llegando a aportar resoluciones espaciales inferiores a 20 mts.

Las imágenes de radar presentan el aspecto de terrenos soleados, ya que el propio radar hace las veces de sol. La textura de la imagen va a depender de las características geométricas del terreno.

Cuando la rugosidad es inferior a la longitud de onda utilizada el eco es escaso, por esto las carreteras y láminas de agua se ven negras. Por el contrario, los edificios producen reflexiones muy intensas.

Para una mayor información de este tipo de sistemas de recogida de información, consultar Tomiyasu (1978), Cumming y Bennet (1979), Elachi (1981), Elachi et al. (1982), Ulaby et al. (1982).

II.5.2. Sensores PASIVOS

Se denominan sensores pasivos a aquéllos que se limitan a recoger la energía reflejada o emitida por los objetos.

Dentro de este tipo de sensores se pueden diferenciar tres grupos:

- a) Sensores electroópticos de barrido mecánico (MSS, TM).
- b) Sensores electroópticos de barrido electrónico (HRV).
- c) Sensores de microondas.

Los sensores MSS (*MultiSpectral Scanner*) y TM (*Thematic Mapper*) son los representantes típicos de los sensores electroópticos de barrido mecánico. Aunque más adelante profundizaremos en el conocimiento de estos dos sensores incluidos en la serie de satélites LANDSAT, vamos a adelantar que se basan en un espejo giratorio, que oscila perpendicularmente a la trayectoria de vuelo y que capta la radiación electromagnética dirigiéndola a una serie de detectores sólidos, donde se separa en distintas bandas espectrales.

La resolución espacial de este tipo de scanners depende de parámetros geométricos como el campo de visión instantáneo o el ángulo de barrido total.

El *campo de visión instantáneo* o IFOV (*Instantaneous Field Of View*) es el ángulo a través del cual un detector es sensible a la radiación (fig. 2.8). Cuanto más pequeño es este parámetro mejor resolución espacial obtenemos pero, por contra, aumenta el número de datos, así como la relación ruido/señal.

El *ángulo de barrido total* o FOV (*Field of View*) es el desplazamiento angular del espejo a lo largo del cual se barre el terreno (fig. 2.8). Está limitado por la distorsión panorámica tolerable.

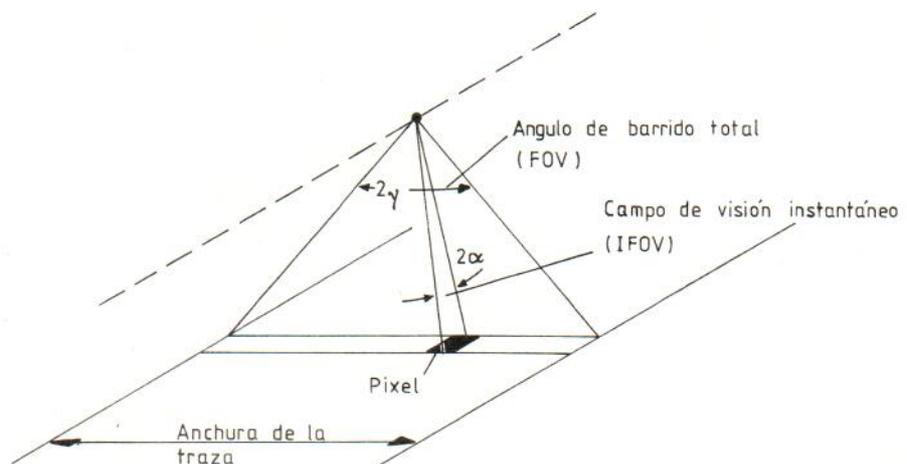


Figura 2.8.—Concepto de campo de visión instantáneo (IFOV) y ángulo de barrido total (FOV) (adaptado de Richards, 1986).

El sensor HRV (*High Resolution Visible*), a bordo del satélite francés SPOT, es el ejemplo de un sensor electroóptico de barrido electrónico. Los detectores son dispositivos a transferencia de carga o CCD (*Charge Coupled Device*). Varios miles de elementos sensibles integrados sobre barras monobloques, permiten recibir la totalidad de una línea de una vista perpendicular a la traza del satélite sin necesitar un dispositivo de barrido mecánico.

Esta particular forma de captar la información permite una gran mejora en la resolución espacial. Sin embargo, esta tecnología de dispositivos a transferencia de carga no puede ser aplicada en el rango del infrarrojo medio.

El HRV tiene dos modos de funcionamiento:

- 1) Modo pancromático (en blanco y negro): correspondiente a una observación sobre una amplia banda espectral.
- 2) Modo multiespectral (en color): correspondiente a una observación sobre tres bandas espectrales.

TABLA 2.3.
Características del sensor HRV a bordo del satélite SPOT

Características	Modo multiespectral	Modo pancromático
Bandas espectrales	0,5-0,59 μm 0,61-0,68 μm 0,79-0,89 μm	0,51-0,73 μm
Campo (IFOV)	4,13°	4,13°
Tamaño de pixel en mira vertical	20 \times 20 m	10 \times 10 m
Número de pixel por línea	3.000	6.000
Codificación del pixel	3 \times 8 bit	6 bits (DPCM)
Cantidad de información	25 Mb/seg.	25 Mb/seg.

DPCM es un modo de compresión de los datos que permite conservar 256 niveles de gris.

La tabla 2.3 sintetiza las características del sensor HRV instalado a bordo del satélite francés SPOT-1 (fig. 2.9).

Una característica interesante del HRV es un espejo plano colocado a la entrada del instrumento y orientable por telemando, que permite desplazar el eje de mira en un plano perpendicular a la órbita. Este desplazamiento es posible en un ángulo de $\pm 27^\circ$

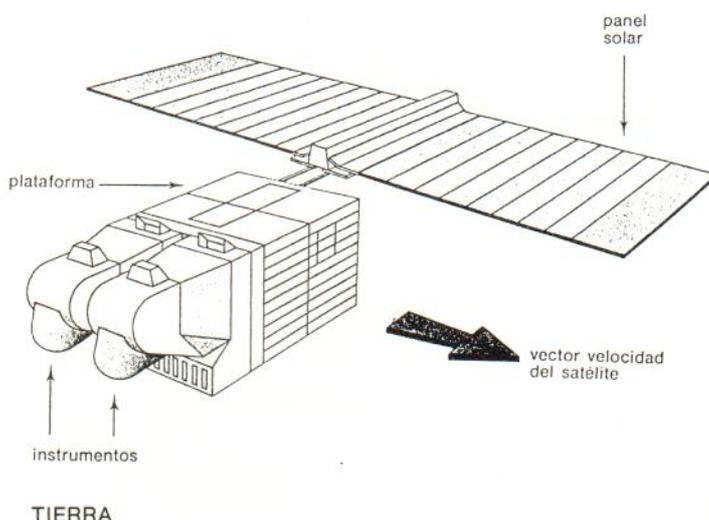


Figura 2.9.—Configuración del satélite SPOT-1 (CNES, 1983).

alrededor de la posición vertical en 45 pasos de $0,6^\circ$. Permite observar puntos situados en el interior de una zona de 475 Km a cada lado de la traza del satélite, lo que posibilita pares estereoscópicos (fig. 2.10).

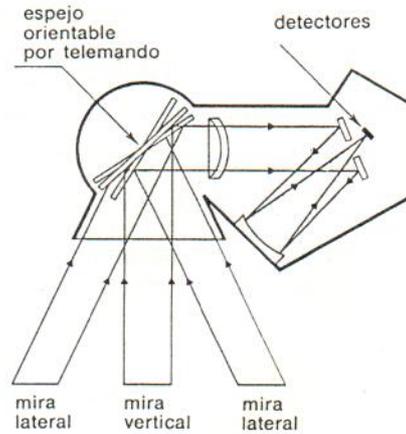


Figura 2.10.—El sensor HRV (*High Resolution Visible*). Los detectores son del tipo CCD (dispositivos a transferencia de carga) (CNES, 1983).

Por último, un tercer tipo de sensores pasivos son los sensores de microondas. Actúan en un rango de frecuencia que oscila entre 20 y 60 Ghz. Su mayor problema reside en que para captar la señal necesaria hay que tomar un campo de visión instantáneo grande, lo que produce una pobre resolución espacial.

III. EL SISTEMA LANDSAT

III.1. LOS SATELITES DE OBSERVACION DE LA TIERRA

Los satélites artificiales son la mejor plataforma de observación sobre la que instalar los sensores que captan la energía electromagnética reflejada o emitida por la Tierra.

En función de sus características orbitales, estos satélites se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- 1) *Satélites geoestacionarios.*
- 2) *Satélites de órbita polar.*
- 3) *Satélites de órbita general.*

Los **satélites geoestacionarios**, también llamados geosincrónicos, son aquéllos que aparecen como inmóviles sobre un punto fijo de la superficie terrestre. Esto es debido a que el satélite está situado a una altura orbital tal, que su período orbital (tiempo que un satélite tarda en completar una órbita alrededor de un planeta) es igual a la velocidad de rotación de la Tierra. Esta altura orbital está en torno a los 35.800 Km ó lo que es lo mismo, 5,6 veces el radio terrestre (aproximadamente 6.370 Km). Por esta razón, las órbitas geosincrónicas son ecuatoriales o cuasiecuatoriales (fig. 3.1). Ejemplos de satélites geoestacionarios son los satélites meteorológicos norteamericanos, ATS (*Applications Technology Satellites*) y GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*), o el europeo METEOSAT. Se caracterizan por su baja resolución espacial y por la alta repetitividad de sus observaciones (varias veces al día).

Los **satélites de órbita polar** son también llamados heliosincrónicos, debido a que la relación angular entre el Sol y el plano orbital del satélite se mantiene constante (Widger, 1966; Petrie, 1970). Esto se traduce en que el satélite pasa por un mismo punto de la superficie terrestre a la misma hora solar.

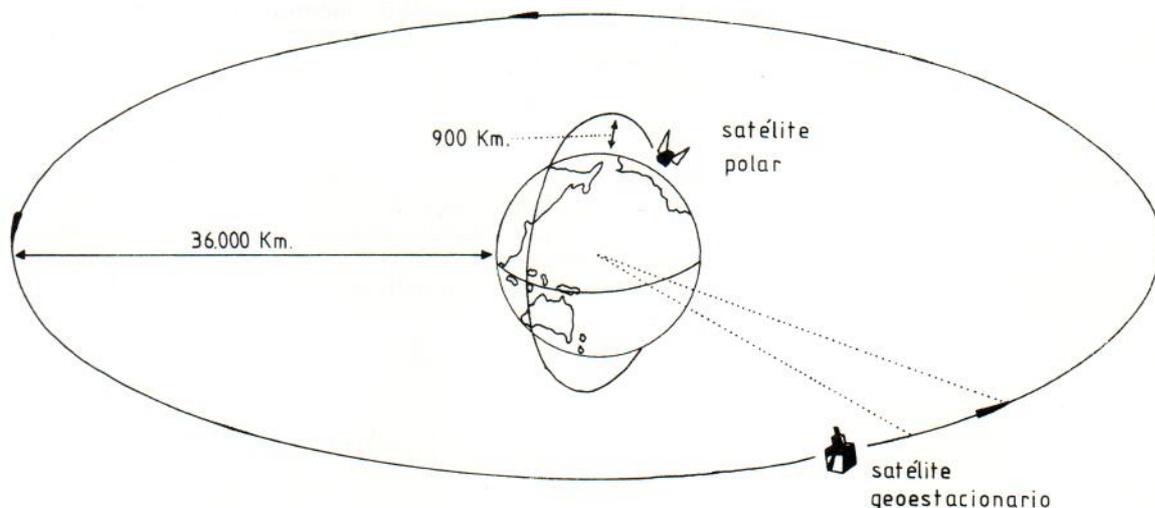


Figura 3.1.—Satélites de órbita polar y satélites geoestacionarios.

Al contrario de los satélites geoestacionarios, los de órbita polar no permanecen sobre un mismo punto de la superficie terrestre, sino que describen órbitas circulares o ligeramente excéntricas, con una dirección N-S (fig. 3.1), mientras la Tierra gira en sentido W-E bajo ellos. La inclinación orbital limita la zona terrestre que puede ser captada por el satélite. Así, un satélite que tenga una inclinación de 50° tan sólo puede sobrevolar una zona comprendida entre 50° de latitud Norte y 50° de latitud Sur. El Landsat 5, con una inclinación orbital de 98° , sobrevuela una zona comprendida entre 82° N y 82° S. Tan sólo un satélite cuya inclinación orbital fuese de 90° podría sobrevolar la totalidad de la superficie del planeta (Verger, 1982).

Los satélites de órbita polar se encuentran a una altura orbital inferior a 1.000 Km sobre la superficie de la Tierra y su período orbital es muy corto (inferior a 2 horas). Ejemplos de este tipo de satélites son los americanos de la serie Landsat, creados para el estudio de los recursos naturales de la Tierra, el HCMM (*Heat Capacity Mapping*

II.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SATELITES LANDSAT

Mision) dedicado a la investigación térmica de alta resolución y el satélite francés de recursos naturales, SPOT.

Por último, los **satélites de órbita general** son aquellos que no presentan órbitas geosincrónicas, ni heliosincrónicas. Un claro ejemplo, es el Seasat 1, lanzado por los EE.UU. en junio de 1978 para estudiar los fondos oceánicos. Este satélite presenta una órbita casi circular, con un ángulo de inclinación de 108° a una altura de 800 Km.

El sistema Landsat es el resultado del programa desarrollado por la NASA (*National Aeronautical and Space Administration*) a principios de los años 70, para el estudio de los recursos naturales de la Tierra. El 23 de julio de 1972 era lanzado un primer satélite con el nombre de ERTS 1 (*Earth Resource Technology Satellite*), más tarde renombrado como Landsat 1 para diferenciarlo del Seasat 1 destinado al estudio de los fondos oceánicos.

Hasta el momento, han sido cinco los satélites Landsat lanzados al espacio. En la tabla 3.1 podemos ver los datos históricos de cada uno de ellos, así como el instrumental que llevaban a bordo.

TABLA 3.1.
Datos históricos de los satélites Landsat

Satélite	Instrumental	Lanzamiento	Fuera de servicio
Landsat 1	RBV* MSS	23 julio 1972	6 enero 1978
Landsat 2	RBV* MSS	22 enero 1975	27 julio 1983
Landsat 3	RBV ^p MSS ^r	5 marzo 1978	5 septiembre 1983
Landsat 4	MSS TM	16 julio 1982	—
Landsat 5	MSS TM	1 marzo 1984	—

*: RBV multiespectral
 p: RBV pancromático
 r: MSS con banda térmica

Los tres primeros, tanto por el instrumental que incorporaban, como por sus características orbitales, constituyen la primera generación de satélites Landsat. Se caracterizaban por una morfología en forma de mariposa debida a sus paneles solares (fig. 3.2). Sus dimensiones eran: 3 m de altura por 1,5 m de diámetro, que llegaba a ser de 4 m cuando se extendían dichos paneles.

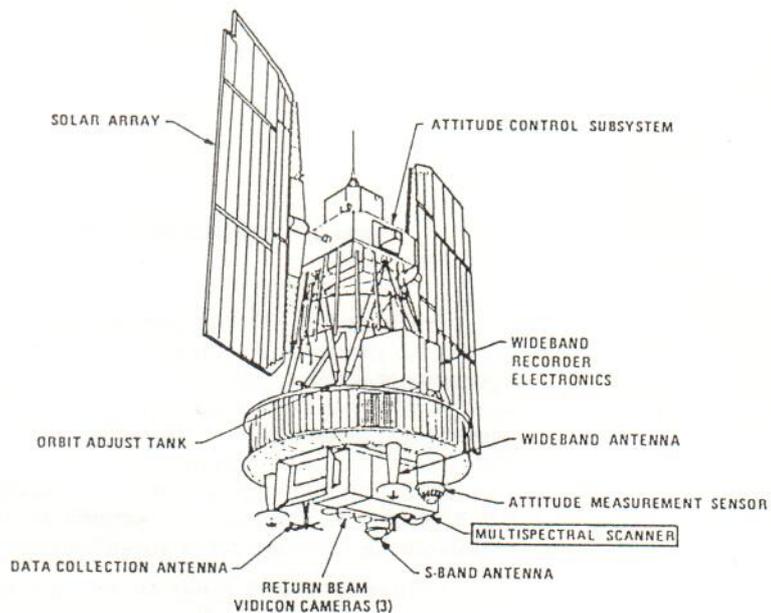


Figura 3.2.—Morfología general de la 1.ª generación de satélites Landsat. La configuración corresponde a los satélites Landsat 1 y 2 con tres cámaras RBV (NASA, 1976).

Esta primera generación de satélites Landsat tenían una órbita polar y sincrónica con el Sol, con un ángulo de inclinación de $99,1^\circ$, lo que produce una cobertura de la superficie terrestre entre 81° N y 81° S. La hora a la que el satélite cruza el ecuador con dirección N-S es aproximadamente las 9,30 a.m. hora local. La altitud orbital tiene un valor nominal de 920 Km (570 millas), pero puede variar entre 880 Km y 940 Km. El período orbital es de 103,3 minutos, lo que permite realizar 14 órbitas diarias, volviendo a sobrevolar la misma porción de terreno cada 18 días (fig. 3.3). Esta frecuencia permite que un punto de la superficie terrestre sea registrado unas 20 veces al año. En la tabla 3.2 se pueden ver las características orbitales de los Landsat 1, 2 y 3.

En la figura 3.3, vemos cómo, sobre una proyección Mercator, las órbitas Landsat describen curvas sinusoidales. Esto es debido a que las órbitas son sincrónicas con el Sol y se encuentran inclinadas en relación al ecuador. El satélite solamente registra la superficie en órbitas descendentes (N-S), ya que las órbitas ascendentes se realizan en la *cara nocturna* de la Tierra.

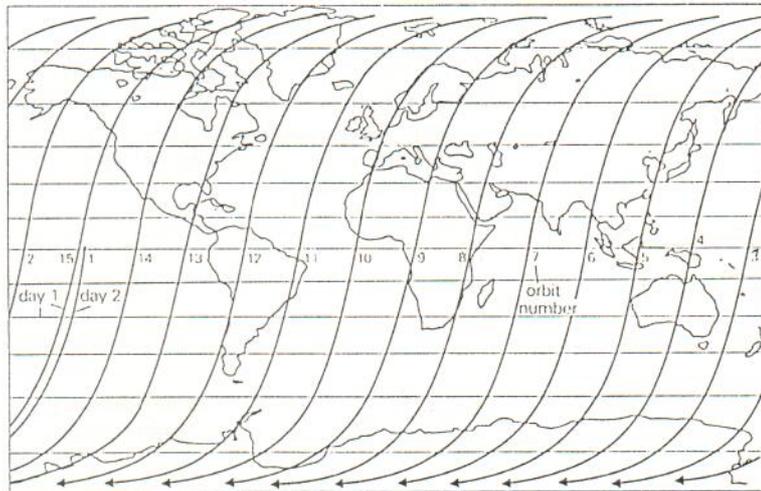


Figura 3.3.—Proyección Mercator de las órbitas realizadas por la 1ª generación de satélites Landsat en un día (Drury, 1987).

La figura 3.4 muestra el modelo orbital de esta primera generación de satélites Landsat. Para una latitud de 40° N, en un día dado (M), las órbitas sucesivas (N+1, N)

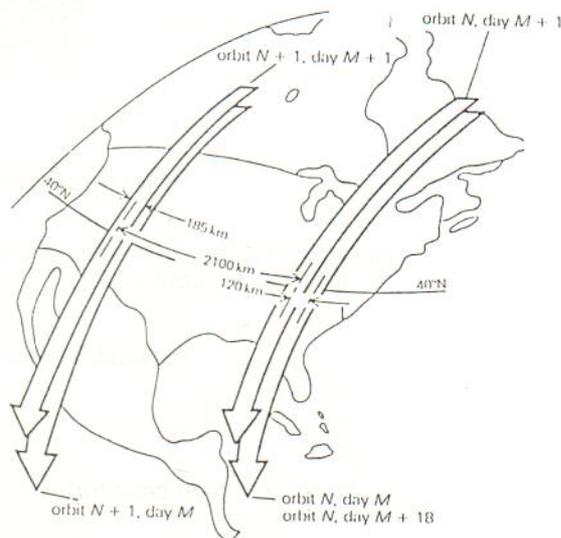


Figura 3.4.—Modelo orbital de los satélites Landsat 1, 2 y 3 (Drury, 1987).

se encuentran separadas 2.100 Km hacia el oeste. La misma órbita (N) en días sucesivos (M, M+1) se ha desplazado 120 Km hacia poniente.

El área cubierta por cada imagen corresponde a un paralelogramo de 185 Km de largo, con un solape longitudinal, a lo largo de la traza del satélite, en torno al 10% en el ecuador y al 85% para latitudes alrededor de 80°. En nuestra latitud el solape lateral de las imágenes Landsat está próximo al 35% (Taranik, 1978).

TABLA 3.2.
Parámetros orbitales de los satélites Landsat 1, 2 y 3

Tipo	Polar, heliosincrónica
Período	103,3 minutos
Altitud	920 Km
Tiempo (cruzando el ecuador)	9:30 a.m. hora local
Angulo de inclinación	99,1°
Ciclo	14 órbitas por día durante 18 días (251 revoluciones)

La nueva generación de satélites Landsat viene representada por los Landsat 4 y 5. En la figura 3.5 podemos ver la nueva configuración de estas plataformas espaciales. Con la antena y los paneles solares desplegados sus dimensiones son 4 m de largo por 2 m de ancho y 3,7 m de alto. El peso total de la plataforma espacial es de 1.941 Kg (James et al., 1984).

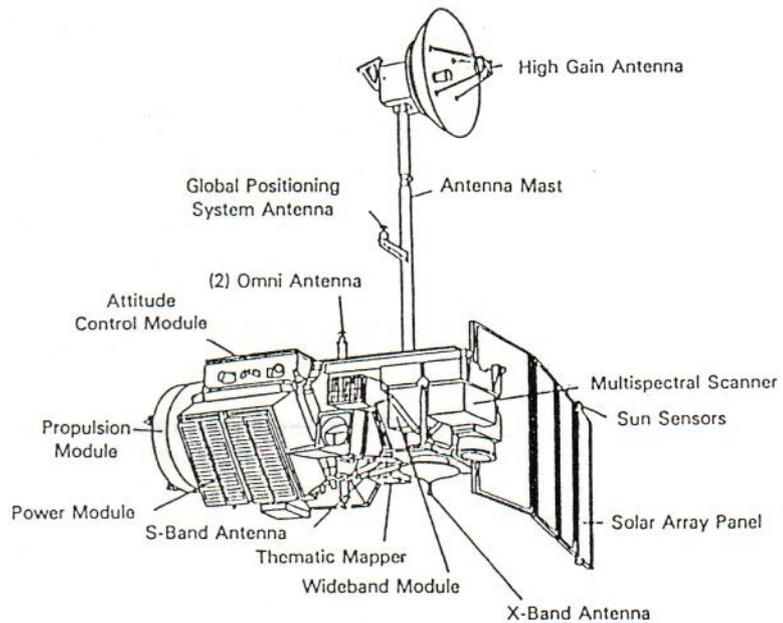


Figura 3.5.—Configuración de los satélites Landsat 4 y 5.

Las características orbitales de esta segunda generación Landsat podemos verlas resumidas en la tabla 3.3.

TABLA 3.3.
Parámetros orbitales de los satélites Landsat 4 y 5

Tipo	Polar, heliosincrónica
Período	98,9 minutos
Altitud	706 Km
Tiempo (cruzando el ecuador)	9:45 a.m. hora local
Angulo de inclinación	98,2°
Ciclo	14,56 órbitas por día durante 16 días (233 revoluciones)

Siguen teniendo una órbita polar y sincrónica con el Sol, con un ángulo de inclinación de $98,2^\circ$. Se encuentran a una altitud nominal de 706 Km (438 millas). Esta órbita tan baja permite completar el ciclo en 16 días a 14,56 órbitas por día. Es decir, cada ciclo se completa con 233 revoluciones.

A diferencia del modelo orbital de la 1ª generación en el que las órbitas eran adyacentes en días sucesivos (fig. 3.4), para los Landsat 4 y 5 existe un desplazamiento hacia el oeste equivalente a 7 centros de escena (fig. 3.6).

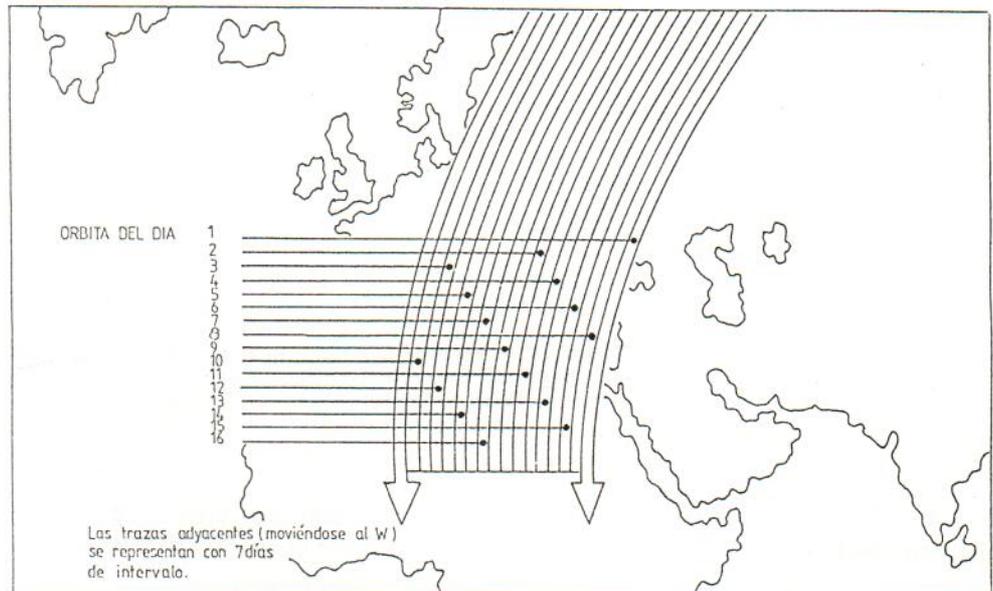


Figura 3.6.—Modelo orbital de los satélites Landsat 4 y 5.

El solape lateral de las escenas varía con la latitud geográfica de la zona, siendo del 7,3% en el ecuador. A la altura del paralelo 40 el solape es del 29%, es decir, unos 50 Km.

Mientras los satélites Landsat 1, 2 y 3 contenían a bordo un sistema de cintas magnéticas de alta densidad para almacenar los datos cuando se encontraban fuera del campo de recepción de las estaciones de tierra (fig. 3.7), los satélites Landsat 4 y 5 mantienen una transmisión directa con estas estaciones, o bien lo hacen a través de dos satélites de comunicaciones geosincrónicos denominados TDRS (*Tracking and Data Relay Satellite*).

III.3. SENSORES A BORDO DE LOS SATELITES LANDSAT

A lo largo de su historia, los satélites de la serie Landsat han llevado instalados tres tipos diferentes de sensores:

- a) RBV (*Return Beam Vidicon*).
- b) MSS (*Multispectral Scanner*).
- c) TM (*Thematic Mapper*).

En la tabla 3.1 podemos ver el satélite de la serie en el que han sido instalados cada uno de ellos.

A continuación vamos a analizar las características más sobresalientes de estos tres tipos de sensores. Para un conocimiento más exhaustivo de sus consideraciones mecánicas, diseño o estrategia de trabajo, consultar Silva (1978), USGS (1979), Freden y Gordon (1983).

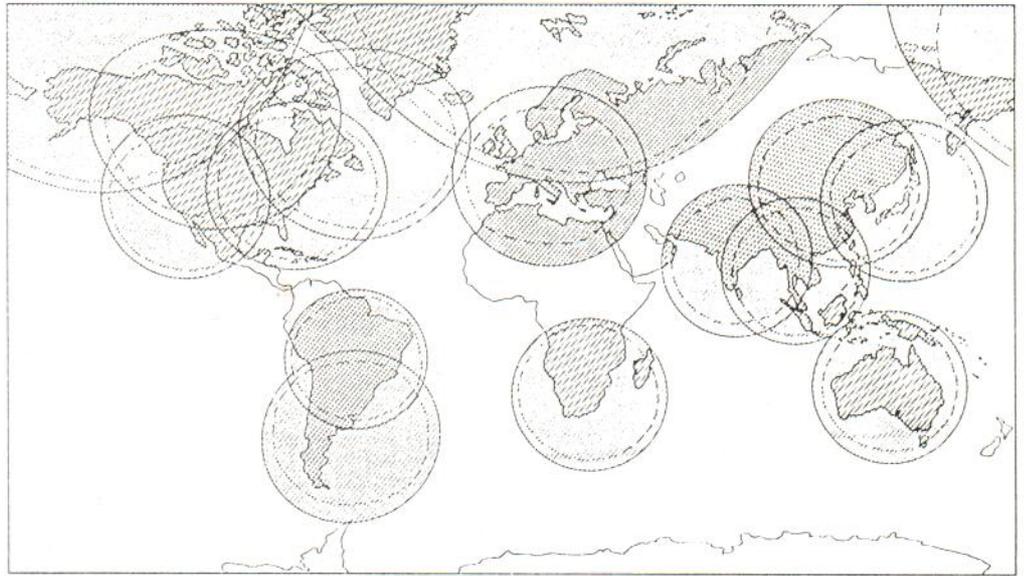


Figura 3.7.—Estaciones terrestres receptoras de datos Landsat. Las áreas sombreadas del mapa indican dónde los datos Landsat pueden recibirse directamente a partir de estaciones receptoras terrestres. Representan las zonas donde los satélites están sobre el horizonte. Las líneas continuas son válidas para los Landsat 1, 2, 3 y las discontinuas para el 4 y el 5 (Drury, 1987).

III.3.1. Return Beam Vidicon (RBV)

Con este nombre nos referimos a un sistema de cámaras de televisión capaces de captar una *instantánea* de la superficie terrestre a lo largo de la traza del satélite.

Han sido utilizados dos tipos diferentes de sistemas RBV. Para los Landsat 1 y 2 el RBV consistía en 3 cámaras de televisión de tipo electroóptico con una longitud focal de 126 mm, que registraban la reflectancia del terreno en tres bandas del visible. Las 3 cámaras captan una instantánea de 185 × 185 Km cada 25 segundos (fig. 3.8a). Esto produce imágenes de alta resolución consistentes en 4.125 líneas con 4.500 pixels por línea, lo que equivale a una resolución sobre el terreno de unos 80 metros.

En el Landsat 3 se prefirió un sistema RBV formado por 2 cámaras de televisión con doble longitud focal, que captaban una sola banda espectral (0,505-0,750 μm) en lo que se denomina *modo pancromático*. De esta manera, el área cubierta se reducía a un cuarto de la superficie recogida por una sola cámara RBV usada en los Landsat 1 y 2 pero, con ello, se conseguía una resolución espacial de 40 metros, frente a los 80 metros del sistema anterior (fig. 3.8b).

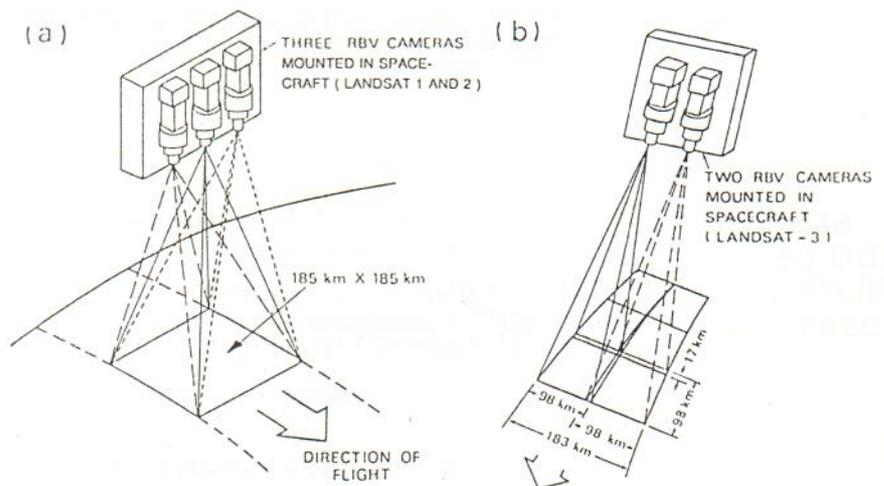


Figura 3.8.—El sistema RBV: (a) Las 3 cámaras RBV a bordo de los Landsat 1 y 3. (b) Las dos cámaras RBV instaladas en el Landsat 3 (Taranik, 1978).

El sistema RBV ha tenido múltiples problemas técnicos que lo hacen poco importante dentro del instrumental a bordo de los satélites Landsat. Ha sido utilizado, sobre todo, como elemento de comparación para la información aportada por el sensor MSS (King, 1981).

III.3.2. Multispectral Scanner (MSS)

Ha sido el principal sensor a bordo de los satélites Landsat 1, 2 y 3. Siempre ha sido el mismo en todas las plataformas espaciales, a excepción de en el Landsat 3, donde se añadió una banda térmica.

El sensor MSS es un aparato de barrido mecánico que adquiere datos de la superficie terrestre en cuatro bandas espectrales simultáneamente. El barrido se realiza mediante un espejo oscilante plano que rastrea el terreno en sentido W-E, en dirección perpendicular al movimiento del satélite. La componente longitudinal viene dada por la propia trayectoria orbital del satélite de dirección N-S. El espejo gira 4 veces un ángulo de $2,9^\circ$, lo que nos da un ángulo de visión (FOV) de $11,6^\circ$ (fig. 3.9).

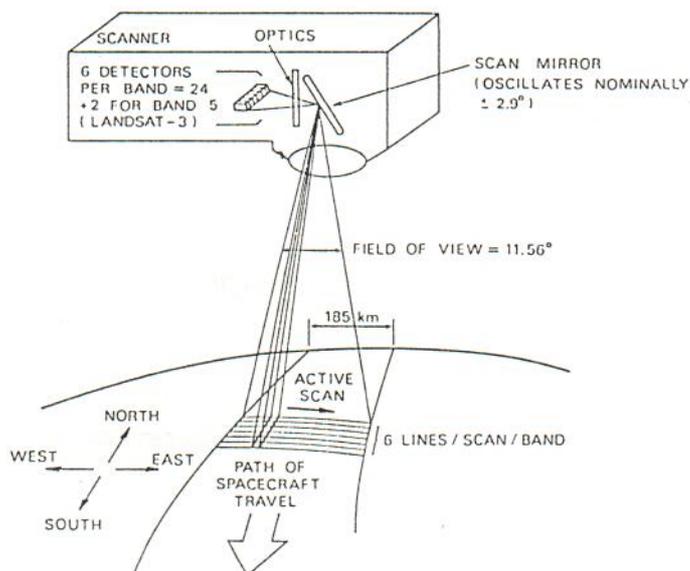


Figura 3.9.—Diagrama esquemático del sensor MSS (Taranik, 1978).

Cada vez que se produce un barrido W-E son captadas 6 líneas para una anchura en tierra de 185 Km. Como cada línea representa 79 metros en el terreno y son 6 las líneas barridas, obtenemos que en cada pasada son captados 474 m. Aproximadamente con 390 barridos se captan los 185 Km de largo que tiene una escena completa.

La energía electromagnética captada es reflejada hasta llegar a un detector. En el sensor MSS existen 24 detectores (6 por cada banda espectral). En el Landsat 3 existen dos más debido, como ya se ha dicho, a la existencia de una banda térmica. Cada detector produce un voltaje según la cantidad de radiación que ha recibido.

El voltaje es convertido en un valor digital codificado en 6 bits (valores entre 0 y 63) por un *MULTIPLEXER*. Estos valores digitales pueden ser cambiados posteriormente mediante procesamiento en las estaciones en tierra. Así, las bandas 4, 5, 6 son codificadas en 7 bits (valores entre 0 y 127), mientras que la banda 7 se mantiene en 6 bits.

En cada barrido, el voltaje producido por cada detector se muestrea en $9,95 \mu\text{m}$. Unas 3.300 muestras son tomadas a lo largo 185 Km que tiene cada línea. El IFOV es de $79 \times 79 \text{ m}$ (0,63 ha) y se encuentra separado en el terreno a intervalos de 56 m entre cada muestra. Por lo tanto, la radiación medida ha de ser asignada a una dimensión de $56 \times 79 \text{ m}$ para mantener la relación espacial (fig. 3.10).

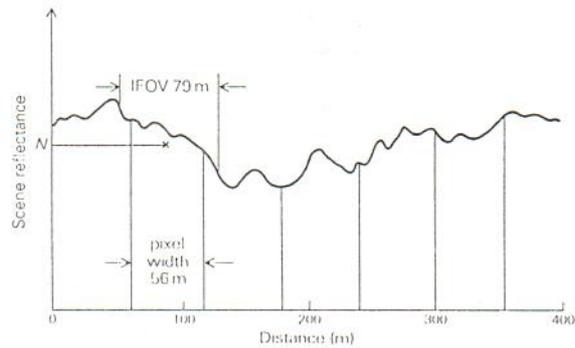


Figura 3.10.—Variación de la reflectancia de una banda MSS a lo largo de una línea de la escena (Drury, 1987).

A esta dimensión de 56×79 m es a lo que se denomina **pixel** (contracción del término inglés, *picture element*).

Una escena completa, corregida geoméricamente, es una matriz bidimensional formada por 2.340 líneas y 3.240 pixels por línea (2.983 líneas y 3.548 pixels por línea, en el caso del Landsat 3) (fig. 3.11).

Debido a la rotación de la Tierra durante los 25 segundos que tarda el satélite en captar una escena completa, ésta tiene forma de paralelogramo.

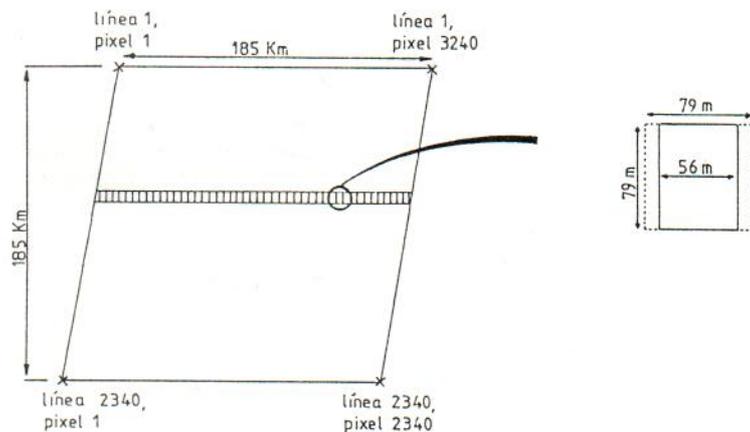


Figura 3.11.—Esquema de una escena Landsat MSS.

Debido a las variaciones orbitales introducidas en los satélites Landsat 4 y 5, el campo de visión instantáneo o IFOV ha sido modificado a 81,5 m y 82,5 m respectivamente, para conseguir un tamaño de pixel de 80×80 m compatible con los datos MSS obtenidos por la 1ª generación. Además, las bandas han sido renombradas como 1, 2, 3 y 4 correspondiendo con las bandas 4, 5, 6 y 7 de las primeras misiones.

III.3.3. Thematic Mapper (TM)

Se trata de un sensor electroóptico de barrido mecánico similar al MSS, pero a la vez con características espectrales, espaciales y radiométricas propias. En la tabla 3.4 podemos ver sus características más importantes.

Capta la energía electromagnética en 7 bandas espectrales (3 en la región del visible, 3 en el infrarrojo próximo y una en el infrarrojo térmico). La banda 7 se encuentra fuera de lugar en la progresión de las longitudes de onda del resto de las bandas, debido a que fue añadida, después de la planificación inicial, a petición de la comunidad

TABLA 3.4.
Bandas espectrales del sensor Theamatic Mapper y sus principales aplicaciones

Banda	Rango espectral (μm)	Resolución	Aplicaciones
1	0,45-0,52	0,8 %	Cartografía de aguas litorales. Diferenciación entre suelo y vegetación. Diferenciación entre coníferas y frondosas.
2	0,52-0,60	0,5 %	Mide la reflectancia de la vegetación en la región del verde, lo que es indicativo de su vigor.
3	0,63-0,69	0,5 %	Diferenciación entre tipos de plantas por encontrarse en la zona de absorción de la clorofila.
4	0,76-0,90	0,5 %	Cuantificación de la biomasa. Delineación de cuerpos de agua.
5	1,55-1,75	1,0 %	Diferenciación entre nubes y nieve. Indica el contenido en humedad.
6	10,4-12,5	0,5 NETD	Detecta situaciones de stress en la vegetación. Discrimina humedad del suelo. Cartografía térmica.
7	2,08-2,35	2,4 %	Cartografía hidrotermal. Discriminación de tipos de roca.

NEP: Noise Equivalent Reflectance
NETD: Noise Equivalent Temperature Difference.

geológica por la importancia de la región espectral en torno a $2 \mu\text{m}$, en la caracterización de procesos hidrotermales.

Mientras el sensor MSS realiza el barrido en una sola dirección, el TM adquiere información en ambas direcciones, para una franja de 185 Km de anchura. Como vemos en la figura 3.12, en cada barrido son captadas 16 líneas (480 metros), para una tira a lo largo de la traza del satélite.

Existen 100 detectores para captar la energía electromagnética (16 por cada una de las bandas que captan la energía reflejada y 4 para la banda térmica).

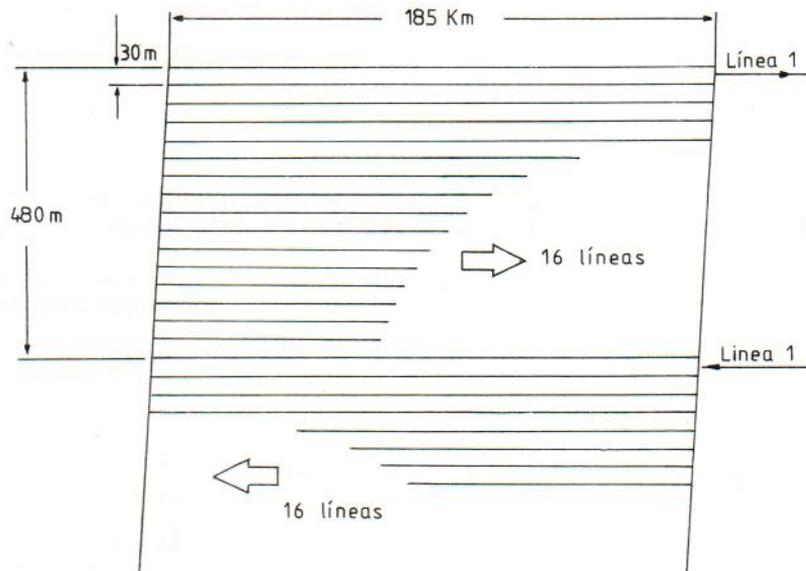


Figura 3.12.—Características del sistema de scanner Landsat Thematic Mapper.

TABLA 3.5.
Características de los sistemas a bordo de los satélites Landsat

Canal	Sistema	Bandas espectrales (nm)	IFOV (mts)	Rango Dinámico (bits)	Código NASA
1	RBV	0,475-0,575	79 × 79	—	Banda 1
2	RBV	0,580-0,680	79 × 79	—	Banda 2
3	RBV	0,698-0,830	79 × 79	—	Banda 3
—	RBV	0,505-0,750 (pancromático)	40 × 40	—	—
1	MSS	0,5-0,6	79 × 79	7	Banda 4
2	MSS	0,6-0,7	79 × 79	7	Banda 5
3	MSS	0,7-0,8	79 × 79	7	Banda 6
4	MSS	0,8-1,1	79 × 79	6	Banda 7
(5)	MSS	10,4-12,6	237 × 237	—	Banda (8)
1	TM	0,45-0,52	30 × 30	8	Banda 1
2	TM	0,52-0,60	30 × 30	8	Banda 2
3	TM	0,63-0,69	30 × 30	8	Banda 3
4	TM	0,76-0,9	30 × 30	8	Banda 4
5	TM	1,55-1,75	30 × 30	8	Banda 5
6	TM	10,4-12,5	120 × 120	8	Banda 6
7	TM	2,08-2,35	30 × 30	8	Banda 7

NOTA: Las bandas MSS han sido renombradas a partir del lanzamiento del Landsat 4, como 1, 2, 3, 4 y su IFOV es 81,5 (Landsat 4) y 82,5 (Landsat 5). La banda 8 (MSS) sólo fue utilizada en el Landsat 3.

La radiación captada por el sensor es codificada en 256 niveles de energía, correspondientes a 1 byte (8 bits).

Una escena completa de TM (185 × 185 Km) son 5.760 líneas por 6.920 pixels por línea.

El IFOV es de 30 × 30 m para todas las bandas salvo para la térmica (banda 6) que es de 120 × 120 m.

III.4. PRODUCTOS Y SERVICIOS LANDSAT

Los datos adquiridos por las estaciones en tierra pueden estar corregidos geométricamente en diferentes niveles. Generalmente, lo que se corrige son las variaciones en altitud y actitud del satélite, así como los efectos provocados por la curvatura y rotación de la Tierra. También es posible realizar un tratamiento radiométrico para calibrar los detectores del sensor.

La imagen puede ser geocodificada a SOM (*Space Oblique Mercator*) o a UTM (*Universal Transverse Mercator*).

Los productos que ofrece el sistema Landsat pueden clasificarse en 3 categorías:

- Fotográficos.
- Digitales.
- Ayudas.

En la siguiente tabla se pueden ver resumidos, los productos fotográficos más comunes en los que se comercializan los datos Landsat.

TABLA 3.6.
Productos fotográficos Landsat

Producto	Tamaño (cm)	Formato	Modo
Película	7 × 7	Positivo y Negativo	B/N
	24 × 24	Positivo y Negativo	B/N
	24 × 24	Positivo	C
Papel	24 × 24	Positivo	B/N y C
	48 × 48	Positivo	B/N y C
	96 × 96	Positivo	B/N y C

B/N: Blanco y negro
C: Color

Las composiciones en color combinan 3 bandas espectrales a elección del usuario. En la siguiente tabla se pueden ver los productos digitales en que se pueden adquirir los datos Landsat.

TABLA 3.7.
Productos digitales Landsat

Tipo	Sensor	Pistas	Densidad (bpi)
CCT	MSS	9	1.600/6.250
	TM	9	1.600/6.250
HDT	MSS	14	20.000
	TM	28	33.000

CCT: Cintas magnéticas compatibles con ordenador (Computer Compatible Tapes).
HDT: Cintas magnéticas de alta densidad (High Density Tapes).
Bpi: Bits por pulgada (bits per inches).

Las imágenes pueden estar parcial o totalmente corregidas. Se comercializan bien como escenas enteras o bien como cuartos de escena (fig. 3.13).

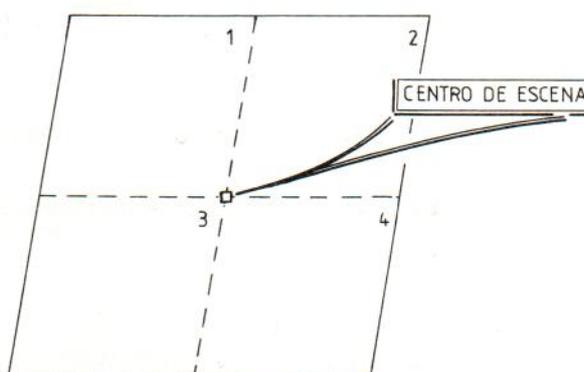


Figura 3.13.—Disposición de los cuartos de escena de una imagen Landsat TM.

Cuando lo que se quiere es una escena entera, el usuario puede adquirir las 7 bandas espectrales o solamente una. Cuando se trata de un cuarto de escena se incluyen las 7 bandas espectrales.

El tercer producto Landsat es lo que podríamos llamar las *Ayudas de Acceso*. Estas ayudas consisten en Microcatálogos, Microfichas, Microfilms y Mapas de Sistemas de Referencia en los que localizar la escena que cubre el área que se desea estudiar. También permiten conocer la calidad radiométrica y la cobertura nubosa de una determinada imagen.

La localización de una imagen Landsat viene dada por la situación del centro de escena en relación a una malla prefijada de órbitas (*path*) y líneas (*row*). En la figura 3.14 vemos la localización de los centros de escena de las imágenes TM que cubren la Península Ibérica. Por ejemplo, la escena que contiene la ciudad de Sevilla es la 202-034, que corresponde a la órbita 200, línea 34. Si el interés de nuestro estudio fuese solamente el casco urbano de Sevilla, no sería necesario adquirir la imagen entera, sino que como hemos visto anteriormente, sería suficiente contar con el cuarto 4 de la escena (202-034/4).

Las imágenes Landsat pueden adquirirse a través de:

- EOSAT (*Earth Observation Satellite Company*)
4300 Forbes Boulevard
Lanham, MD 20706
USA

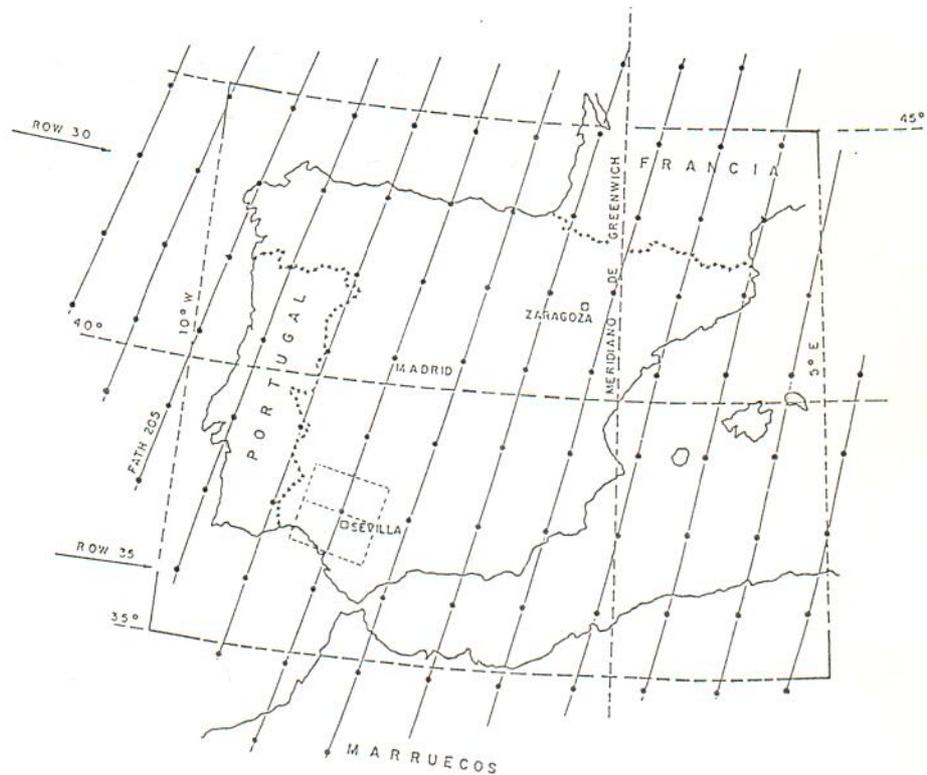


Figura 3.14.—Localización de los centros de escena de las imágenes Landsat *Thematic Mapper* que cubren la Península Ibérica.

Las escenas que cubren Europa y Norte de Africa también son comercializadas por la Agencia Espacial Europea (ESA).

— ESA-Earthnet Programme Office
User Services
Vía Galeleo Galilei
00044 Frascati
ITALIA

En la actualidad, EOSAT cuenta con un representante en España:

— IBERSAT, S. A.
Velázquez, 24, 5.ª
28001 MADRID
Tel. (91) 431 09 79

Por otro lado, la Agencia Espacial Europea tiene en nuestro país un NPOC (*National Points of Contact*).

— CONIE-INTA
Paseo del Pintor Rosales, 34
28008 MADRID
Tel. (91) 247 98 00

IV. TECNICAS DE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES

IV.1. GENERALIDADES DEL PROCESO DIGITAL DE IMAGENES

Una imagen digital es la representación de un objeto real mediante una matriz numérica bidimensional. Las propiedades medidas son convertidas desde un rango continuo de valores a un rango expresado por un número finito de enteros. Normalmente se registra en un byte o en código binario (2^8 valores desde 0 a 255). Cada elemento de la matriz recibe el nombre de *pixel* (*picture element*). Su posición en una imagen viene determinado por un sistema de coordenadas en x, y con el origen en la esquina superior izquierda (fig. 4.1).

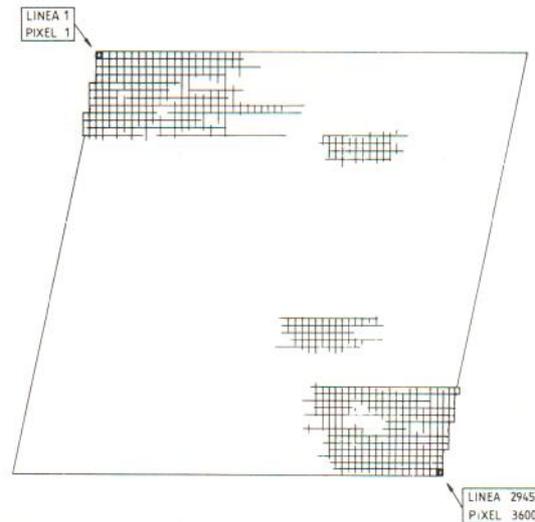


Figura 4.1.—Disposición de los píxeles en un cuarto de escena Landsat TM.

El proceso digital es el conjunto de transformaciones numéricas realizadas sobre la matriz original para obtener representaciones más adecuadas de la imagen, según las aplicaciones.

Cada pixel tiene asignado un valor digital que representa la energía asociada al rango de longitud de onda en el que el detector es sensible.

El objetivo de este capítulo es el de introducir al lector en los métodos del proceso digital de imágenes y su aplicación a la cuantificación de superficies en regadío y a la evaluación de las extracciones de agua subterránea.

De un modo general, el proceso digital de imágenes puede dividirse en 3 partes:

1. Restauración de la imagen:
 - a) corrección radiométrica
 - b) corrección geométrica
2. Realce de la imagen:
 - a) realce radiométrico
 - b) realce geométrico
3. Extracción de información:
 - a) componentes principales
 - b) operaciones aritméticas
 - c) clasificaciones

Las bases matemáticas del proceso de imágenes se pueden encontrar en Dainty y Shaw (1976), Rosenfeld y Kak (1976), Andrews y Hunt (1977), Pratt (1978), Gaskill (1978).

IV.2. RESTAURACION DE LA IMAGEN

Cuando un sensor a bordo de un satélite registra una imagen, ésta contiene errores en su geometría y en los valores radiométricos asignados a los píxeles.

Los procesos de restauración tienen como finalidad eliminar los errores radiométricos, ruido y distorsiones geométricas introducidas en la recogida y transmisión de datos.

IV.2.1. Corrección de la distorsión radiométrica

El origen de las distorsiones radiométricas está en:

- a) El efecto de la atmósfera sobre la radiación electromagnética.
- b) Errores de instrumentación.

Como vimos en el capítulo 2, la atmósfera dispersa selectivamente la radiación electromagnética según su longitud de onda. En el caso del sensor Thematic Mapper las bandas del visible suelen estar afectadas mucho más que las bandas del infrarrojo. Esto induce a una pérdida en la calibración de los valores radiométricos asociados a un determinado pixel.

Los errores radiométricos pueden también ser debidos al diseño y modo operativo del sensor. El más generalizado de estos errores es debido a los detectores.

Un detector ideal debería tener unas características de transferencia lineales, de tal manera que existiera una proporcionalidad entre la señal codificada y el nivel de radiación detectado (fig. 4.2).

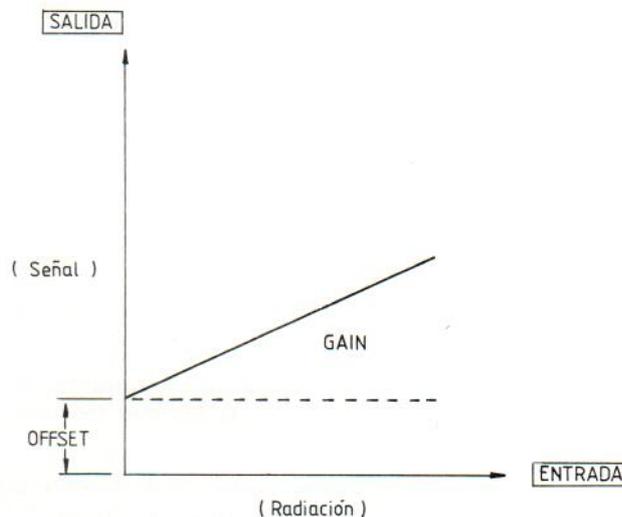


Figura 4.2.—Características de transferencia de un detector.

En la realidad, los detectores presentan un grado de no-linealidad y a menudo producen una pequeña señal aunque no se detecte radiación. Este valor recibe el nombre de *compensación* u *offset* y se atribuye a un ruido electrónico residual en el sistema, a temperaturas por encima del cero absoluto. La pendiente de la recta recibe el nombre de *ganancia* o *gain*.

En el caso del Landsat TM, existen 16 detectores por banda y estos desequilibrios se suelen traducir en un fenómeno de *rayado* (*striping*) de la imagen.

La corrección radiométrica se realiza mediante algoritmos matemáticos que relacionan los valores digitales de los pixels en cada banda, con su verdadera reflectancia en el terreno (Richards, 1986).

Desarrollos de estos algoritmos de corrección se pueden encontrar en Turner y Spencer (1972), Slater (1980), Foster (1984).

Cuando no se cuenta con la información necesaria (visibilidad, humedad relativa...) para aplicar dichos algoritmos y se supone que la imagen está deteriorada por el efecto de la atmósfera es posible realizar una corrección aproximada. Esta técnica se basa en que las bandas de longitud de onda larga están libres de perturbaciones atmosféricas.

Si analizamos el histograma de las distintas bandas del sensor (fig. 4.3) en una zona de umbría, una banda situada en el infrarrojo ($0,8$ a $1,1 \mu\text{m}$) dará valores de cero para ese área. En cambio, en el histograma de una banda situada en el visible ($0,5$ a $0,6 \mu\text{m}$)

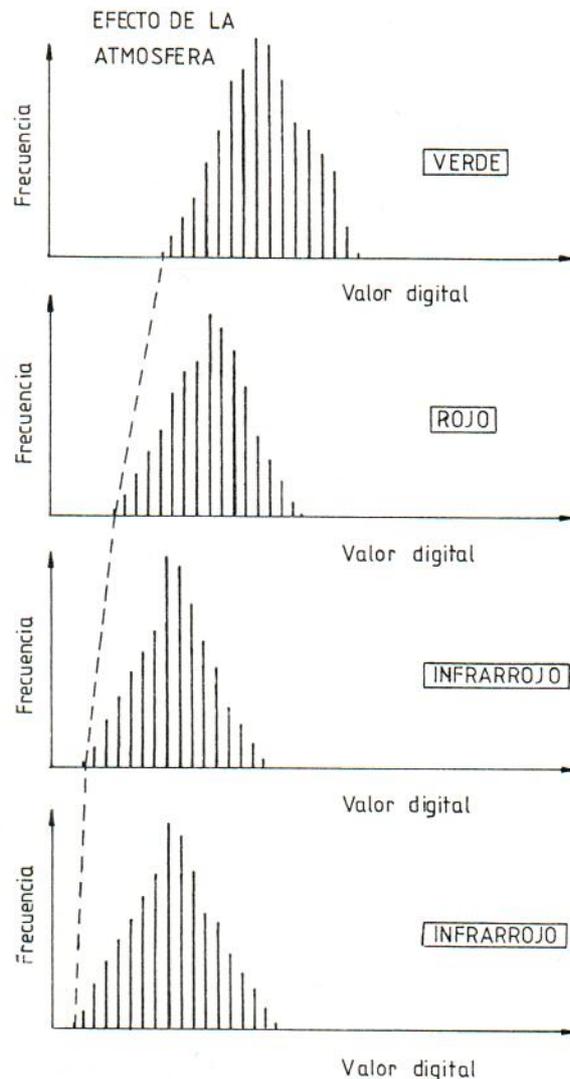


Figura 4.3.—Esquema del efecto de la dispersión atmosférica sobre distintos rangos de longitud de onda (adaptado de Chavez, 1975).

no existirán valores cero debido a la iluminación de la radiación dispersada por la atmósfera.

Sabins (1978) propone que para el Landsat MSS la banda 4 tiene un incremento típico de 11 en valor digital; para la banda 5 la corrección es normalmente 7 y para la banda 6, de 3.

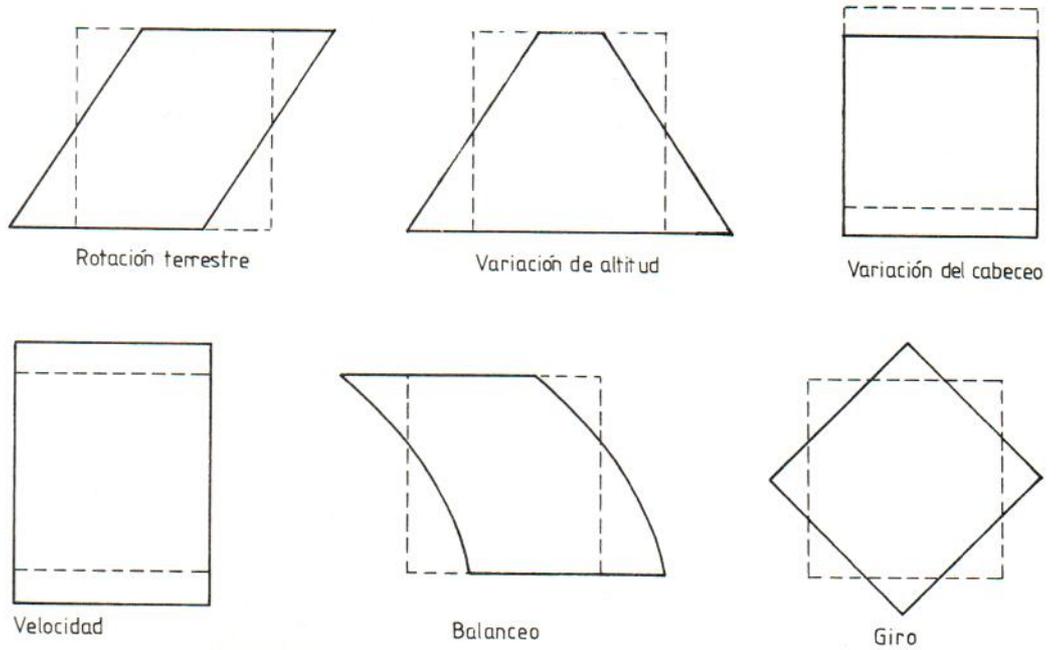
Actualmente, las imágenes del programa Landsat vienen corregidas radiométricamente, si bien siempre es interesante realizar una pequeña comprobación como la presentada anteriormente.

IV.2.2. Corrección de la distorsión geométrica

El origen de las distorsiones geométricas es debido a varios factores (fig. 4.4):

- a) La rotación de la Tierra durante la adquisición de la imagen.
- b) Distorsión panorámica debida al scanner.
- c) Oblicuidad en el barrido.
- d) Variaciones en la velocidad del espejo.
- e) Variaciones en la altitud, actitud y velocidad de la plataforma espacial.

DISTORSIONES ALEATORIAS



DISTORSIONES SISTEMATICAS

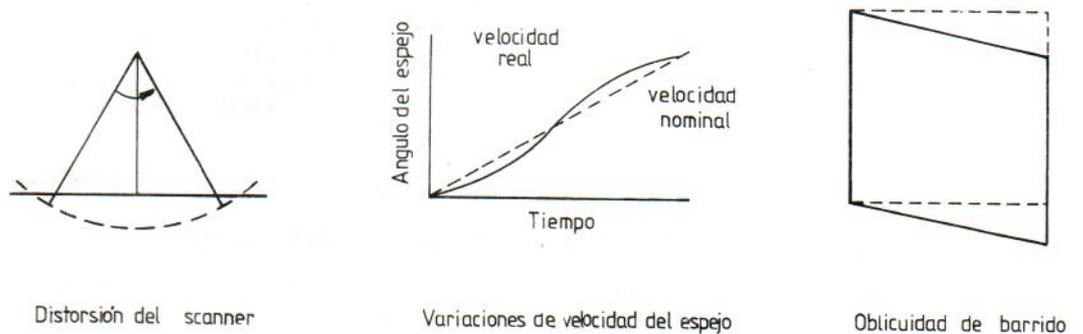


Figura 4.4.—Distorsiones geométricas de las imágenes Landsat.

La rotación de la Tierra de Oeste a Este, durante el tiempo de adquisición de la imagen por el sensor, hace que un punto captado al final del barrido se encuentre más hacia el Oeste que cuando comenzó la operación (fig. 4.5).

La distorsión panorámica es común en scanners donde el IFOV angular permanece constante. El resultado es que el tamaño del pixel sobre el terreno es mayor en los extremos de la imagen que en el nadir. Para el Landsat TM, donde el ángulo de barrido es aproximadamente $7,5^\circ$, la variación en el tamaño es de $1,02 p$, siendo p la dimensión del pixel en el nadir (Richards, 1986).

Los scanners de barrido mecánico como el Landsat MSS o el Landsat TM necesitan un tiempo finito para muestrear la imagen. Durante este tiempo el satélite se mueve produciendo una inclinación a lo largo de la traza.

Las variaciones en la velocidad de oscilación del espejo producen distorsiones geométricas, sobre todo en los bordes de la imagen.

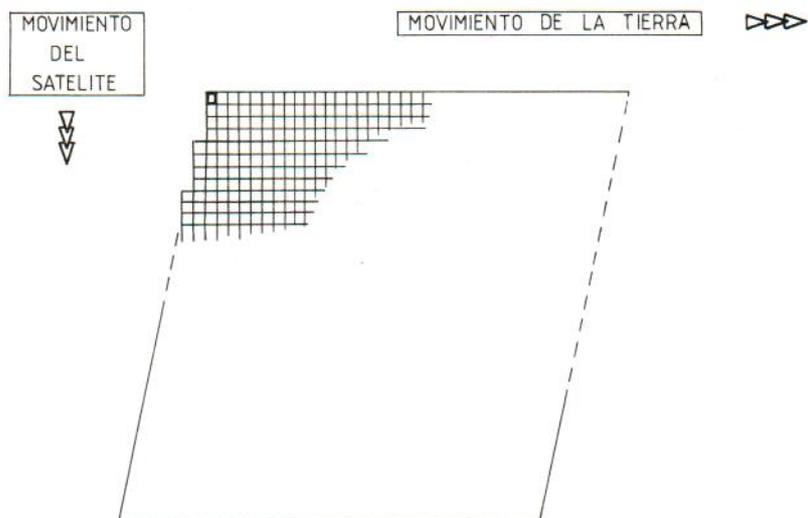


Figura 4.5.—Efecto de la rotación de la Tierra en la adquisición de imágenes desde satélite.

Las variaciones en la velocidad, altitud y actitud (*cabeceo o pitch, roll o balanceo y yaw o giro*) del satélite durante el barrido producen distorsiones geométricas muy variadas (fig. 4.4). Estas variaciones pueden ser descritas matemáticamente conociendo la *ephemeris* de la plataforma. A menudo, esta información es enviada a las estaciones receptoras en tierra. En el caso del sistema Landsat se utiliza para realizar correcciones antes de la distribución de los datos.

Existen 2 técnicas para corregir los distintos tipos de distorsión geométrica. La primera consiste en modelizar la naturaleza y magnitud de la fuente de distorsión y utilizar estos modelos para establecer fórmulas de corrección. Es muy útil en aquellos tipos de distorsión que están bien definidos, como la rotación de la Tierra, los efectos panorámicos, etc. La segunda técnica consiste en establecer relaciones matemáticas entre la posición de un pixel en una imagen y las coordenadas correspondientes a ese punto en el terreno.

Normalmente, los datos Landsat antes de su distribución pasan por un estadio de corrección geométrica que permite al usuario acceder a una imagen de alta calidad espacial, pero sin estar geocodificada (1).

Vamos a hacer hincapié en la segunda técnica ya que el software de proceso de imágenes de satélite contiene un módulo que permite la realización de este tipo de correcciones geométricas.

Los pasos a realizar para la corrección de una imagen utilizando polinomios de transformación son tres:

- i) Creación de los polinomios de transformación.
- ii) Registro.
- iii) Interpolación.

Para la *creación de los polinomios de transformación*, tenemos dos sistemas de coordenadas cartesianas: uno define la localización de un punto en el mapa (x,y) y el otro, define la posición de un pixel en la imagen (u,v). Estos dos sistemas se pueden relacionar mediante funciones:

$$u = f(x,y)$$

$$v = g(x,y)$$

Generalmente, estas funciones son polinomios de primero, segundo o tercer grado. Rara vez los polinomios son de orden mayor que tres, ya que los errores que se

(1) Desde 1984, EOSAT comercializa imágenes Landsat TM geocodificadas. Por defecto, el pixel es de 25 metros, la proyección UTM y el elipsoide de referencia, el de Clarke 1866.

introducen son mayores que los que se pretende corregir. Un ejemplo de polinomio de segundo grado sería el siguiente:

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2$$

Los valores de los coeficientes a_i y b_i son estimados definiendo la posición de un punto en el mapa y en la imagen. Estos puntos reciben el nombre de *puntos de control* (*ground control points, GCPs*). Se trata de rasgos u objetos, perfectamente definidos espacialmente (cruce de caminos, carreteras, ríos, torrentes...) que pueden ser identificados a la vez (fig. 4.6) en ambos sistemas de coordenadas (mapa e imagen).

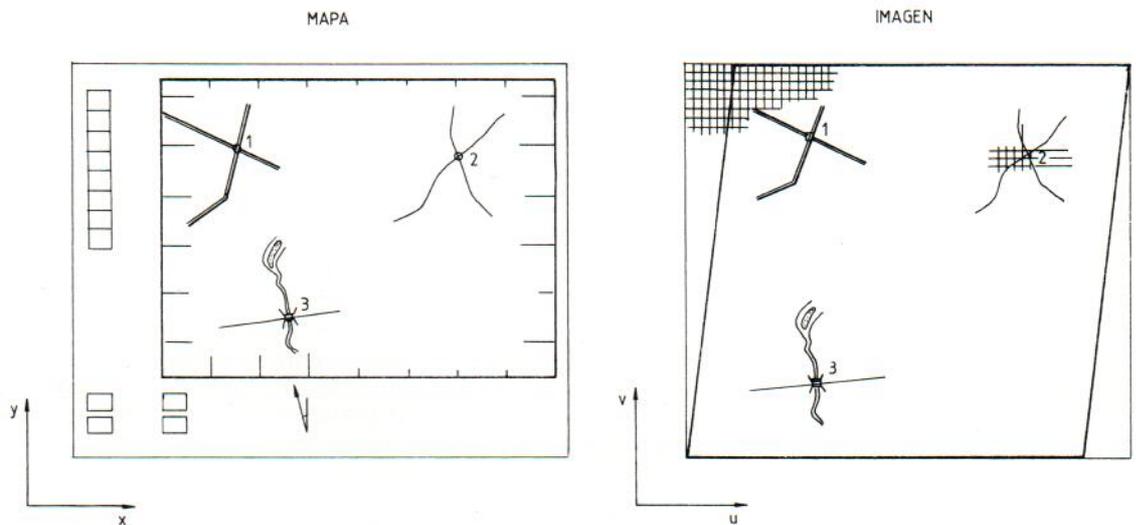


Figura 4.6.—Concepto de puntos de control en la corrección de una imagen.

Una vez se han determinado los polinomios de transformación el siguiente paso es el *registro de la imagen* (fig. 4.7) sobre el mapa. El proceso consiste en encontrar la localización de los puntos de la imagen en la malla de pixels definida con anterioridad sobre el mapa. La densidad de la malla se elige en función del tamaño de pixel que se desee en la imagen corregida y no tiene porqué ser el mismo de la imagen sin corregir (Richards, 1986).

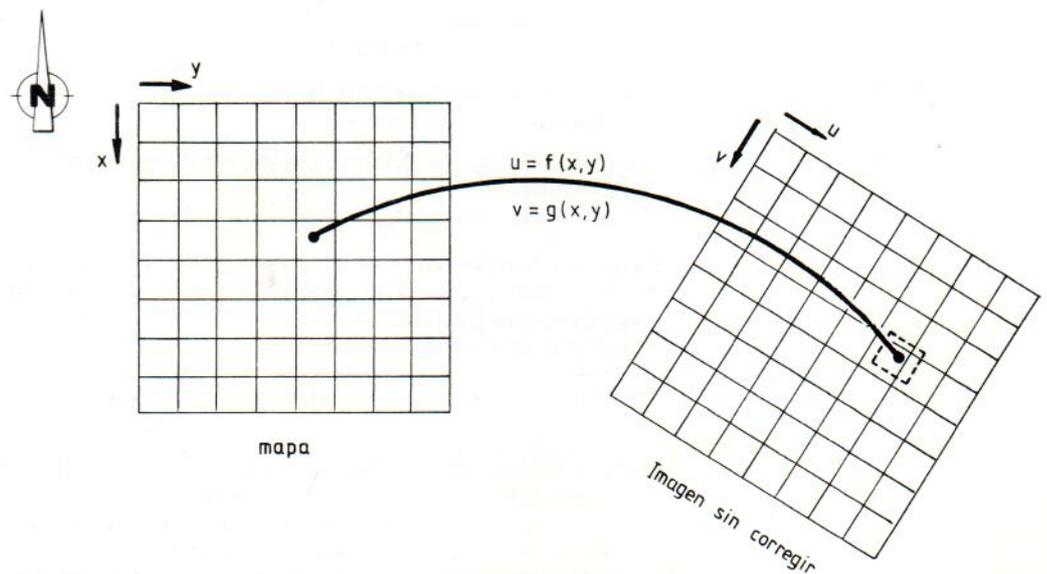


Figura 4.7.—Registro de una imagen digital.

Normalmente, los centros de pixel que van a ser corregidos no coinciden exactamente con los centros de pixel de la malla definida sobre el mapa, con lo que surge la duda de qué valor radiométrico debemos asignar a la nueva posición del pixel. A este proceso se le llama *interpolación* y puede realizarse mediante tres técnicas:

- a) *Registro según el vecino más próximo (Nearest neighbour resampling)*. Se escoge el valor del pixel cuyo centro esté más cercano al punto localizado en la imagen (fig. 4.8).

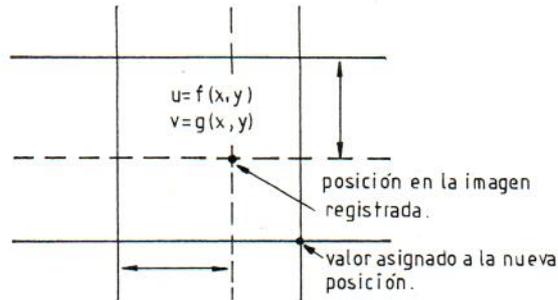


Figura 4.8.—Registro según el vecino más próximo.

- b) *Interpolación bilineal (Bilinear interpolation)*. Se utilizan tres interpolaciones lineales sobre los cuatro píxeles que rodean al punto de la imagen corregida (fig. 4.9).

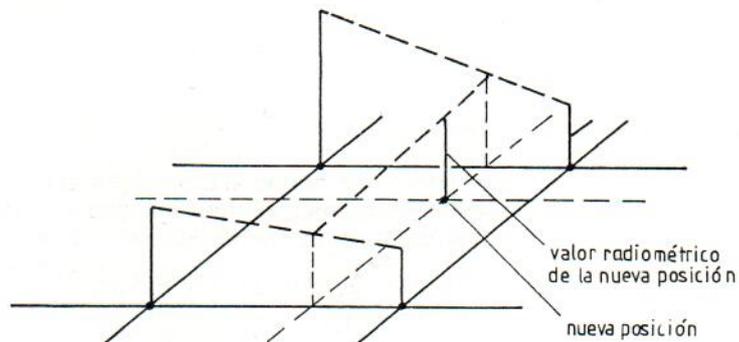


Figura 4.9.—Registro mediante interpolación bilineal.

- c) *Convolución cúbica (Cubic Convolution)*. Los polinomios cúbicos se ajustan a lo largo de cuatro líneas de cuatro píxeles alrededor del punto en la imagen, formando cuatro interpolaciones. Se utiliza un quinto polinomio para sintetizar un valor radiométrico en dicho punto (fig. 4.10).

La calidad de los puntos de control elegidos para una corrección geométrica viene dada por su localización precisa en el mapa y en la imagen y por su distribución a lo largo de toda la imagen.

En ocasiones, es necesario procesar juntas dos o más escenas de la misma región geográfica, pero adquiridas en distintas fechas. Es el caso de nuestro estudio que analiza la superficie en regadío de la Llanura Manchega durante los meses de abril, julio, agosto y septiembre. En este caso las escenas registradas deben permitir una comparación pixel a pixel.

Dos imágenes pueden ser registradas como hemos visto anteriormente, referenciando cada una de ellas, a una base geográfica. Otra forma de hacerlo es georeferenciar solamente una de ellas y realizar un *registro imagen a imagen* tomando la imagen georeferenciada como imagen *maestra (master)* y la otra como *subordinada (slave)*.

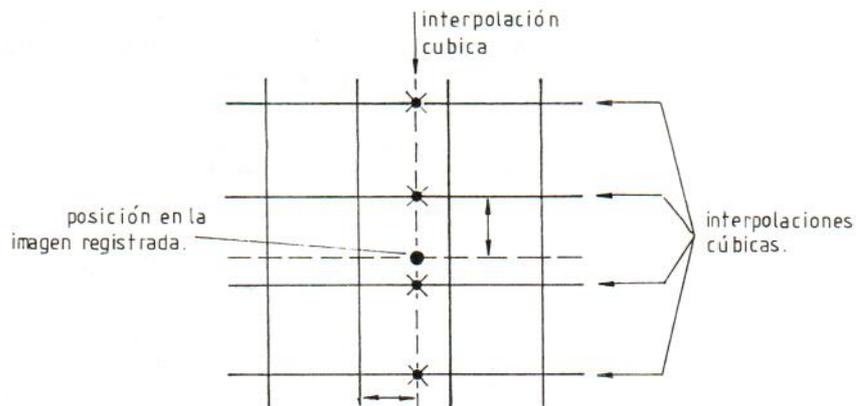


Figura 4.10.—Registro mediante convolución cúbica.

La técnica que se utiliza es similar al caso anterior, las coordenadas (x,y) del mapa son sustituidas por las coordenadas (m,n) correspondientes a la imagen maestra (imagen registrada) y (u,v) siguen siendo las coordenadas de la imagen que va a ser registrada (imagen subordinada).

Para más información sobre tratamiento y medidas para corregir las distorsiones geométricas de las imágenes digitales, consultar Billingsley (1983), Bernstein (1983).

Discusiones específicas sobre técnicas de interpolación y distribución de los puntos de control en una imagen se pueden encontrar en Shlien (1979), Orti (1981), Richards (1986).

IV.3. REALCE DE LA IMAGEN

El realce consiste en un conjunto de técnicas destinadas a mejorar la interpretación visual de la imagen. El realce puede ser radiométrico o geométrico. El realce radiométrico modifica el valor del píxel individualmente, aumentando el contraste de la imagen. El realce geométrico implica una mejora espacial, ya que se cambia el valor digital del píxel utilizando los valores de los píxeles que lo rodean.

Las composiciones en color constituyen un método para realzar las imágenes digitales, ya que el ojo humano, que tan sólo es capaz de distinguir 30 niveles de intensidad, es muy sensible al color, Fink (1976), Shepard (1969), Drury (1987).

Una escena de satélite queda definida por su histograma. Este representa la probabilidad estadística de encontrar un determinado valor digital en la imagen (fig. 4.11).

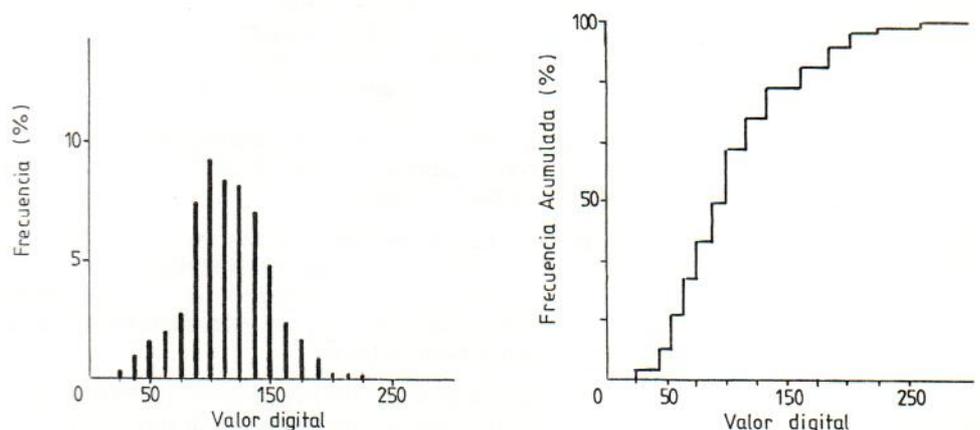


Figura 4.11.—Histograma original (a). Histograma acumulativo (b).

Una imagen tiene un sólo histograma, aunque existe la posibilidad de que un mismo histograma represente a varias imágenes diferentes. El histograma indica el contraste y la homogeneidad de la escena.

Asociado a esta idea está el concepto de histograma acumulativo (fig. 4.11) que representa el valor digital umbral en la imagen en relación al número de pixels. Es una función continua de la variación del valor digital dentro de la imagen.

IV.3.1. Técnicas de realce radiométrico

Normalmente, los datos contenidos en una imagen de satélite no ocupan todo el rango de valores disponibles (entre 0 y 255), sino que suelen acumularse en el centro del histograma (entre 40 y 120 aproximadamente). Estas imágenes presentan un contraste bajo ya que todas las intensidades están en un intervalo pequeño, pudiendo ocupar un rango mayor.

Las técnicas de realce radiométrico que se utilizan, se caracterizan porque los nuevos valores del pixel son generados a partir del valor original, independientemente de los pixels que lo rodean. Todas estas técnicas se realizan por *tablas de color (look up tables o LUT)* que relacionan el valor original con el nuevo valor del pixel. Tienen la particularidad de que son fácilmente implementadas en el software o hardware de los sistemas de proceso de imagen y el cambio de contraste se realiza en tiempo real.

El valor digital mínimo del histograma se hace igual a 0 y el máximo igual a 255. Cada barra del histograma se desplaza a una posición en la que se encuentra espaciada por igual. El procesador realiza esta tarea mediante LUT. Convierte un valor de entrada (x) en un valor de salida (y). Para un estiramiento lineal la función sería la ecuación de una recta.

El ordenador reemplaza el valor de entrada por el de salida y no necesita recalculer los valores de toda la imagen.

Las técnicas más utilizadas son:

- a) *Modificación del contraste.*
- b) *Ecuación del histograma.*
- c) *Density Slicing.*

La *modificación del contraste* consiste en un remuestreo de los valores digitales de la imagen para dar una distribución más favorable. El aumento de contraste se puede realizar por una expansión lineal del histograma (*Linear Contrast Stretch*) (fig. 4.12).

Sobre una imagen con un contraste bajo se realiza una expansión lineal del histograma para que ocupe todo el rango de valores disponibles, con lo que se consigue una sustancial mejora en la calidad visual de la imagen.

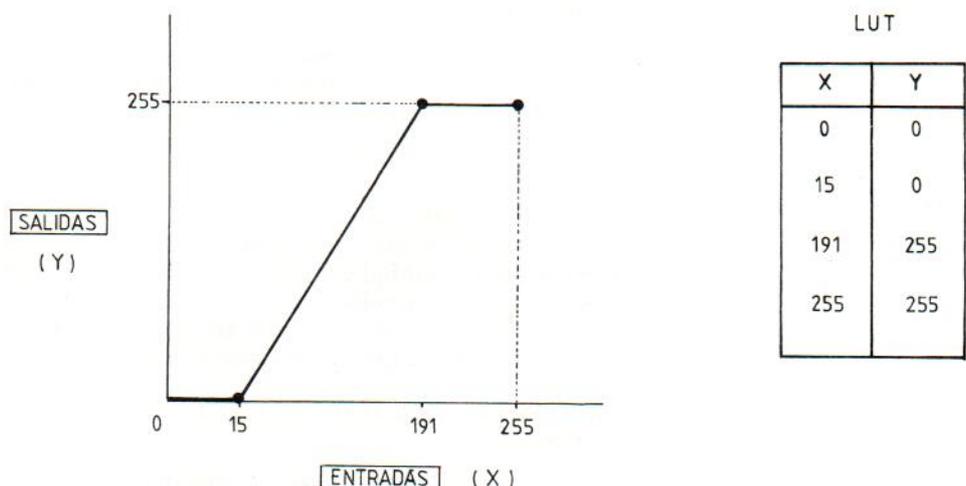


Figura 4.12.—Concepto de expansión lineal del histograma.

Algo similar se realiza con las imágenes de satélite aunque en este caso el rango de valores está comprendido entre 0 (negro) y 255 (blanco).

La totalidad de los sistemas de proceso de imagen incorporan un realce automático de contraste basado en la expansión lineal del histograma.

En ocasiones, existen en la imagen zonas muy oscuras o muy iluminadas y es necesario recurrir a métodos más complejos como los realces logarítmicos o estadísticos.

Mención aparte merece la modificación de contraste mediante *PIECEWISE LINEAR STRETCH*. Este método es muy práctico ya que el usuario es quien determina los puntos de ruptura del histograma (fig. 4.13).

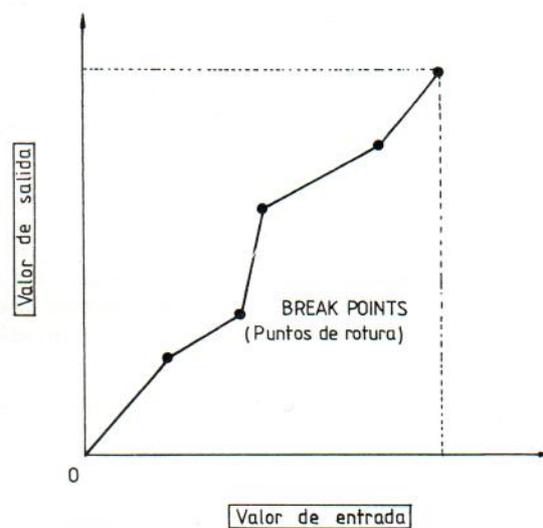


Figura 4.13.—Concepto de la función *piecewise linear stretch*.

La *ecualización del histograma* o normalización tiende a producir un histograma uniforme o cuasiuniforme. El principio de este método es que un histograma en el que todas las *barras (bins)* tuvieran la misma altura, representaría una imagen con alta calidad en todos sus valores digitales.

Richards (1986) propone un sencillo ejemplo para comprender esta técnica de realce de imagen.

La figura 4.14a corresponde a una hipotética imagen de 24 pixels, cada uno de los cuales puede tener un valor digital entre 0 y 15. La transformación de este histograma viene dada por un factor de escala $(L-1) N^{-1}$ que actúa sobre el histograma acumulativo de la imagen (figura 4.14b). Este factor de escala en nuestro caso es $15/24 = 0.625$.

La posición del nuevo valor digital viene dada por la posición en abcisas del histograma acumulativo original (x), tomando su nueva localización (y) del valor en ordenadas. La multiplicación por el factor de escala, nos da el nuevo valor. Si este valor no está disponible bien, porque no se trata de un número entero o porque el sistema no tiene ese tipo de salida implementado, se produce un reescalado, moviendo la barra del histograma al valor más próximo disponible (fig. 4.14c).

El proceso de generación del LUT a partir del histograma original queda recogido en la tabla 4.1.

Este método no puede crear valores digitales nuevos, ni tampoco distribuir pixels de un único valor sobre varios valores diferentes. Todo lo que hace es un muestreo de los valores de la imagen para dar un histograma lo más uniforme posible (Richards 1986).

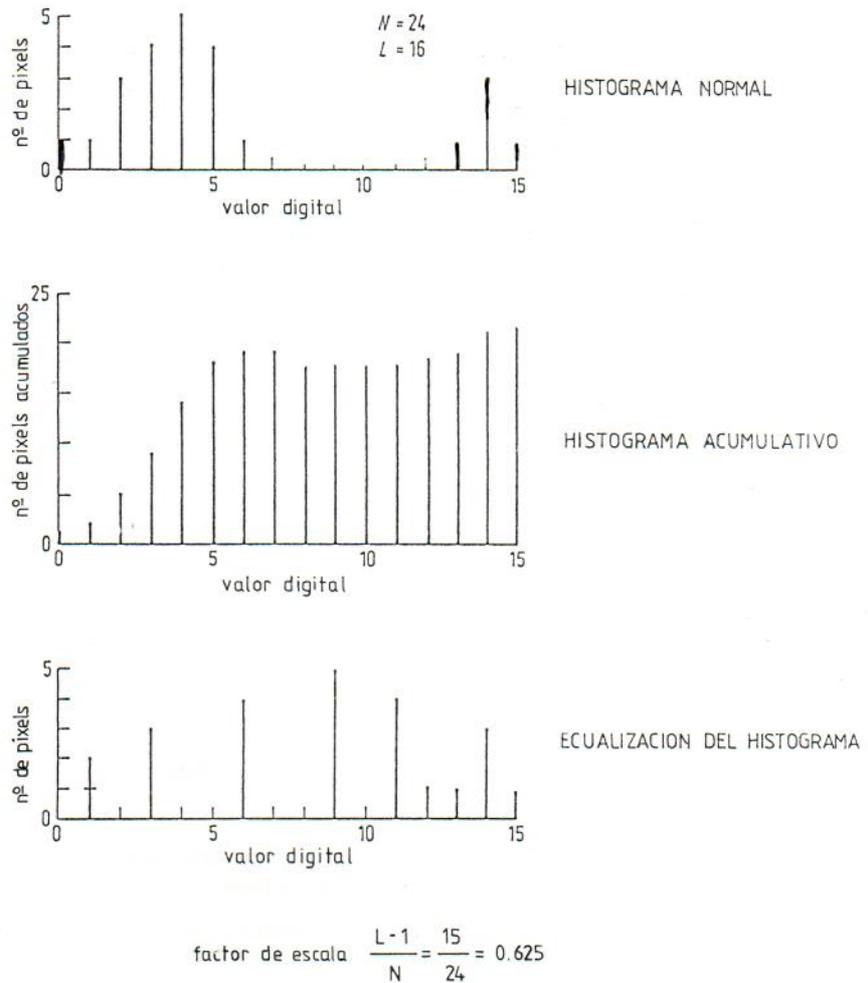


Figura 4.14.—Ejemplo de equalización de un histograma (a) histograma original. (b) histograma acumulativo utilizado para crear el LUT, (c) histograma resultante cuasiuniforme (Richards, 1986).

TABLA 4.1.
Creación del LUT en la equalización del histograma

Valores originales del histograma	Valores sin escala	Valores modificados	Valor digital más próximo
0	1	0,63	1
1	2	1,25	1
2	5	3,13	3
3	9	5,63	6
4	14	8,75	9
5	18	11,25	11
6	19	11,88	12
7	19	11,88	12
8	19	11,88	12
9	19	11,88	12
10	19	11,88	12
11	19	11,88	12
12	19	11,88	12
13	20	12,50	13
14	23	14,40	14
15	24	15,00	15

En la práctica, el sistema crea una tabla en la que se introducen los valores digitales originales de los pixels y se extraen los nuevos valores.

Density slicing es la conversión de un rango de niveles contiguos de gris en un valor puntual del sistema RGB (Mather, 1987). El rango entre 0 y 255 se convierte en varias rodajas o slices.

En la figura 4.15 se puede ver la función correspondiente al density slicing de una imagen en blanco y negro. Cada uno de los escalones es definido por el usuario.

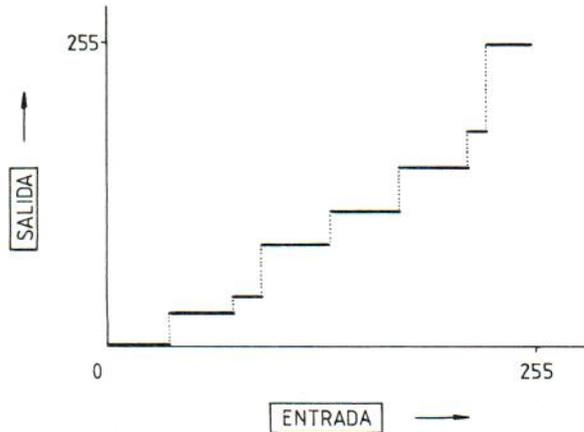


Figura 4.15.—Density slicing.

Este mismo proceso puede realizarse en imágenes en color permitiendo distinguir inmediatamente detalles muy finos.

Para una mayor información sobre técnicas de realce radiométrico de imágenes digitales consultar González y Wintz (1977), Castleman (1979), Hord (1982), Richards (1986), Mather (1987).

IV.3.2. Técnicas de realce geométrico

Estas técnicas se caracterizan porque el nuevo valor del pixel va a venir determinado por el conjunto de pixels que lo rodean. En teledetección, son utilizadas para suavizar los ruidos de la imagen y para detectar bordes y líneas.

En la mayoría de los casos se utiliza una caja o ventana que se desplaza por toda la imagen. El valor de los pixels cubiertos por la ventana se suma a los valores definidos previamente en ella. El resultado de esta operación se utiliza para definir el pixel sobre el que se encuentra centrada la caja. De esta manera al acabar el proceso, los valores radiométricos de todos los pixels de la imagen han sido modificados.

Las variaciones espaciales a lo largo de una imagen pueden ser expresadas como una función entre el valor digital de cada pixel y su distancia al origen (fig. 4.16).

Un filtro digital es utilizado para extraer de la imagen un componente de una escala particular. El modelo de variación espacial puede ser contemplado como una forma ondulatoria con longitudes de onda largas (bajas frecuencias), por tanto un filtro que separe estos componentes se denomina filtro de paso bajo. Por el contrario existirán detalles con una variación rápida y por lo tanto tendrán una longitud de onda corta (alta frecuencia). Al filtro que separe estos componentes, se le denomina filtro de paso alto (Mather, 1987).

El filtro de paso bajo (*Low pass filtering*) sirve para eliminar los ruidos introducidos en la creación de la imagen digital y que producen un fenómeno denominado de *salt and pepper* en zonas homogéneas. Desgraciadamente esta mejora en la imagen se realiza a expensas de una pérdida de la información de alta frecuencia, ya que se produce un suavizamiento general de la imagen.

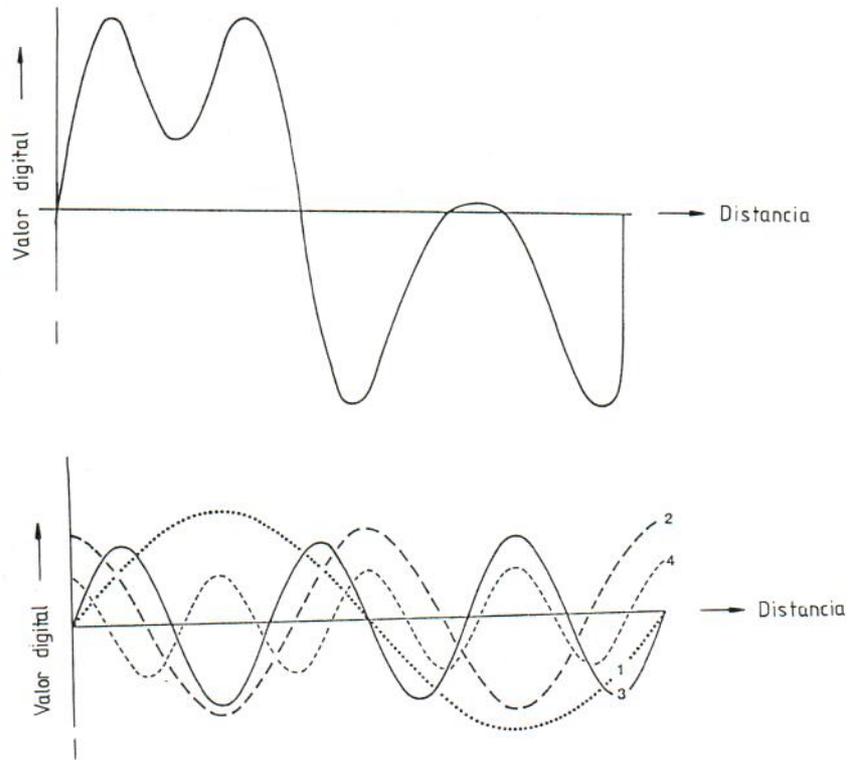


Figura 4.16.—Descomposición de la curva de distribución de valores digitales según la longitud de onda.

Un filtro de mediana (*Median filter*) permite el suavizamiento de la imagen pero manteniendo los elementos lineales. En este tipo de filtro el valor del pixel central que cubre la caja, viene dado por la mediana de los valores que lo rodean (vg. dado un rango de valores: 3, 1, 2, 8, 5, 3, 9, 4, 27 su media es 6,88, pero su mediana es 5). La ventaja de este tipo de filtros es que la mediana de un conjunto de números es siempre igual a uno de los valores presentes y además, es menos sensible a errores o a valores extremos en los datos.

El filtro de paso alto (*High Pass filtering*) se utiliza para detectar líneas y bordes en la imagen. Este tipo de filtro introduce un factor multiplicativo a cada pixel en relación a los valores de los pixels adyacentes, con lo que se consigue que destaquen.

Ejemplos de distintos tipos de filtros se pueden ver en la figura 4.17.

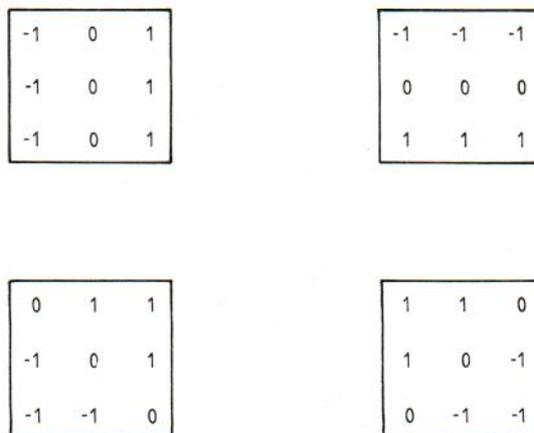


Figura 4.17.—Ejemplos de filtros direccionales.

Existe una gran variedad de tipos de filtros, con complicados desarrollos matemáticos. Vanderbrugg (1976) desarrolla un detector lineal de fácil utilización. Pavlidis (1982) estudia algoritmos para detección de bordes y segmentación de la imagen. Chavez y Bauer (1982) estudian el tamaño ideal de la ventana del filtro para realce de bordes. Nasrabadi et al. (1980), desarrollan un nuevo algoritmo lineal para utilizarlo en imágenes con mucho ruido. Mather (1987) realiza una presentación detallada de las técnicas de filtrado y analiza estudios anteriores que han utilizado o desarrollado estas técnicas.

Hay que tener presente que los realces no deberían hacerse hasta que otros tratamientos hayan finalizado, ya que se distorsionan los valores originales de los pixels (Soha et al., 1976).

IV.4. EXTRACCION DE INFORMACION

El carácter multitemporal y multispectral de los datos de teledetección permite transformaciones que producen nuevos componentes o bandas de la imagen. Estos componentes son una representación alternativa y distinta de los datos recogidos en la imagen. La relación entre los nuevos valores y los antiguos se realizan por medio de operaciones lineales. Entre las técnicas más importantes y generalizadas en el tratamiento digital para extraer la información contenida en la imagen se encuentran:

- i) *El análisis de componentes principales.*
- ii) *Operaciones aritméticas entre bandas.*
- iii) *Técnicas de clasificación.*

IV.4.1. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales es una forma de generar un conjunto de imágenes con una correlación cero entre las bandas y una máxima varianza.

Debido a estas propiedades, la información contenida en m bandas correlacionadas entre sí, queda expresada en p componentes principales siendo $p < m$.

Esta propiedad es muy útil para crear 3 componentes sintéticos a partir de 6 bandas del Landsat TM. De esta forma es posible visualizar los 3 componentes principales en una sola composición en falso color.

Otras características de los componentes principales es que reducen el tiempo de cálculo en las técnicas de clasificación, así como las necesidades de capacidad de almacenamiento en disco.

En una imagen de teledetección, las bandas adyacentes están correlacionadas. La presencia de correlaciones entre bandas implica redundancia en la información, es decir, repetición de datos.

La base del análisis de componentes principales se puede comprender con el siguiente ejemplo de Mather (1987). Si tenemos 2 variables x e y perfectamente correlacionadas. Su representación nos dará una línea recta (fig. 4.18).

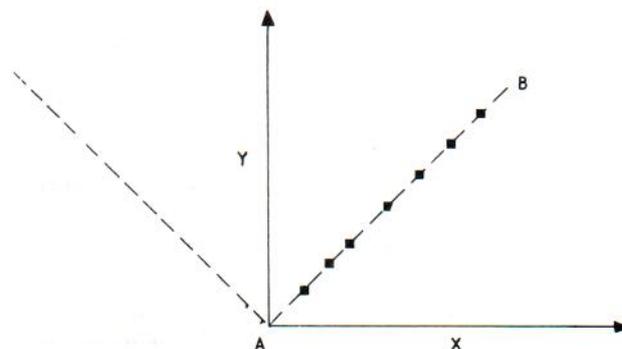


Figura 4.18.—Concepto del análisis de componentes principales.

La misma información quedaría recogida en un gráfico unidimensional que utilizase la línea AB como eje principal.

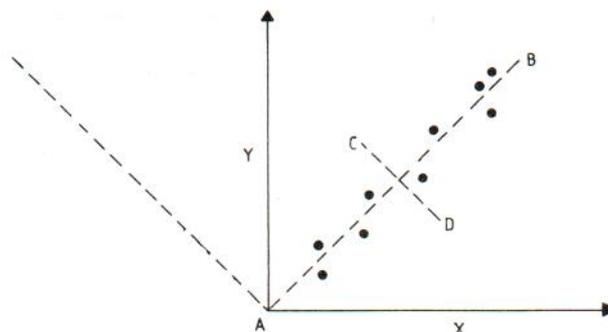


Figura 4.19.—Componentes principales de dos variables con alta correlación.

Si x e y no están perfectamente correlacionadas, su representación gráfica sería similar a la figura 4.19 y existiría una dirección dominante de variabilidad.

Tomando esta dirección de variabilidad como eje mayor, se puede definir un eje perpendicular a él. Una representación utilizando estos nuevos ejes proporciona una mayor relevancia de las estructuras presentes en los datos. Si la dirección CD contiene tan sólo una pequeña proporción de la variabilidad existente en los datos, podemos ignorarla y nos encontramos como en el caso anterior que partiendo de dos variables llegamos a una sola dimensión.

Generalmente los datos multiespectrales tienen una dimensionalidad menor que el número de bandas espectrales. Así, los datos Landsat TM tienen 3 dimensiones o funciones definidas a partir de las 6 bandas de reflexión del sensor.

Una transformación de componentes principales de una imagen multiespectral o multitemporal supone:

- definir la dimensionalidad de los datos,
- identificar los ejes principales de variabilidad dentro de estos datos.

Existe mucha bibliografía sobre análisis de componentes principales, cabe destacar para mayor información a Jensen y Waltz (1979) que explican la transformación componentes principales reduciendo al mínimo el desarrollo matemático; Richards (1984) que trabaja con 8 bandas de datos multitemporales; Richards (1986), Mather (1987).

IV.4.2. Operaciones aritméticas

Las operaciones aritméticas (adición, sustracción, multiplicación y división) se realizan sobre dos o más imágenes de la misma zona geográfica. Estas imágenes pueden contener información multiespectral (varias bandas) o multitemporal (varias fechas).

La adición se utiliza para ver si el rango dinámico de una imagen tratada es igual al de la imagen original o por el contrario es necesario un reescalado. Se utiliza para amortiguar ruidos.

La sustracción se utiliza para resaltar las diferencias existentes entre imágenes y se utiliza principalmente para detectar cambios en imágenes que han sido tomadas en distintas fechas.

La multiplicación se realiza entre una banda espectral y una *matriz (mask)* formada por unos y ceros. De esta forma, el valor del pixel que es multiplicado por 0 se transforma en 0 y sin embargo, el que es multiplicado por 1 mantiene su valor. Se utiliza cuando una imagen está formada por varias áreas distintas como por ejemplo, en una zona de costa donde el interés se puede centrar únicamente o bien en el mar

o bien en tierra. La máscara aísla una de las regiones haciendo cero el resto de la imagen.

La división o cociente entre bandas es una de las transformaciones más utilizadas en teledetección. Las razones por las que los cocientes de bandas son muy utilizados se pueden resumir en dos: la correlación entre los valores del cociente con la forma de las curvas de reflectancia espectral entre dos longitudes de onda y la reducción del efecto de la topografía (fig. 4.20).

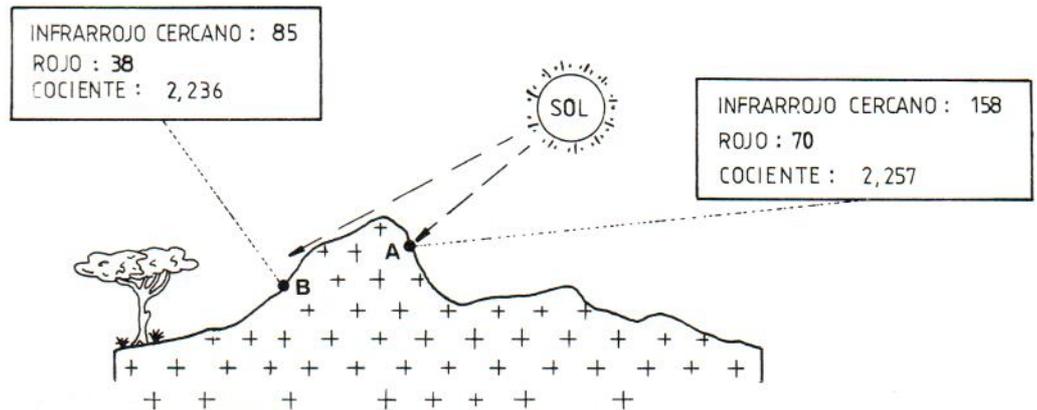


Figura 4.20.—Reducción del efecto de topografía por un cociente entre bandas del infrarrojo y del visible.

Han sido muy utilizados en biogeografía y exploración geológica (Jackson, 1983, Tucker, 1979). Aunque las posibilidades de crear cocientes es prácticamente infinita, Perry y Lautenschlager (1984) demuestran que la mayoría son equivalentes y el cociente IR/R es sin duda, el más interesante.

IV.4.3. Técnicas de clasificación

La clasificación automática de una imagen digital consiste en asociar los pixels en grupos que representan objetos del mundo real (fig. 4.21).

Existen dos técnicas diferentes y la mayoría de las veces, complementarias:

1) *Clasificación no supervisada*: es una medida por la que los pixels de una imagen son asignados a clases espectrales sin que el operador tenga conocimiento de la naturaleza de dichas clases. Los algoritmos que se utilizan son *clusters* o *agrupamientos*.

Estos procedimientos sirven para determinar el número y localización de las clases espectrales en las que se pueden dividir los datos digitales. El operador puede identificar *a posteriori* la naturaleza de las clases, con ayuda de mapas e información de campo.

La clasificación no supervisada puede ser interesante para conocer la estructura de las clases espectrales en una imagen antes de realizar un análisis más detallado por clasificación supervisada.

Existen una gran variedad de algoritmos más o menos complejos para el análisis de cluster. Para mayor información consultar Tryon y Bailey (1970), Anderberg (1973), Hartigan (1975), Van Ryziv (1977).

2) *Clasificación supervisada*: es aquella en la que el operador especifica el número de clases a diferenciar y las características estadísticas de cada clase. Sin duda es el procedimiento más utilizado en análisis cuantitativo de datos de teledetección.

Los diversos algoritmos que se utilizan están basados en que cada clase espectral

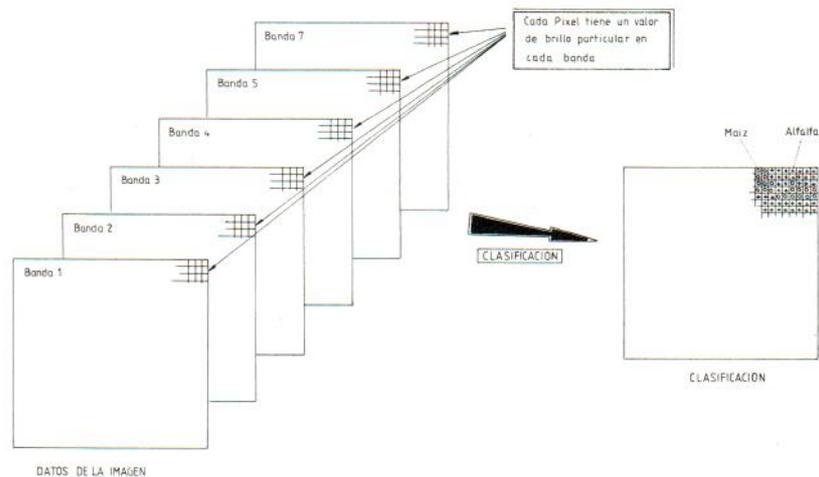


Figura 4.21.—Concepto de clasificación automática. Los datos corresponden a las 6 bandas de reflexión del sensor Thematic Mapper.

puede ser descrita por un modelo de distribución probabilística en el espacio multispectral.

Independientemente del algoritmo que se vaya a utilizar, Richards (1986) propone 5 pasos para llevar a cabo una clasificación supervisada:

- 1) Decidir los tipos de cubierta en los que se desea segmentar la imagen.
- 2) Elegir pixels representativos de cada una de las clases a diferenciar.
- 3) Utilizar dichos pixels para estimar los parámetros del algoritmo de clasificación que se va a utilizar. Al conjunto de parámetros de una clase dada se le llama *signatura* de la clase.
- 4) Clasificar todos los pixels de la imagen dentro de uno de los tipos definidos (clases de información).
- 5) Elaborar tablas o mapas con los resultados de la clasificación.

Para introducirnos en la técnica de la clasificación supervisada vamos a estudiar 3 de los algoritmos más comunes:

- Clasificador paralelepípedo. Un paralelepípedo es simplemente un cuerpo geométrico cuyas caras opuestas son paralelas.

Para definir este cuerpo todo lo que se requiere es una estimación para cada clase, de los valores más altos y más bajos en cada banda que se vaya a utilizar en el análisis. Los pixels son clasificados según la *caja* en la que caen (fig. 4.22).

Es rápido y eficiente. Presenta dificultades cuando la media de 2 categorías diferentes se superponen. Los pixels que están en esa zona, son clasificados como *no seguros* y son colocados arbitrariamente en una de las 2 clases.

- Clasificador de mínima distancia. Utiliza información sobre la localización de cada clase en un espacio cartesiano n-dimensional definido por n bandas que van a ser usadas como base de la clasificación.

La localización de cada categoría en el espacio n-dimensional viene dada por la *clase media o centro*. Cada pixel es asignado a una categoría mediante el cálculo de la distancia a los valores medios de cada clase (fig. 4.23).

Después del cálculo de distancias, el pixel se asigna a la clase más cercana. Si se encuentra lejos de todas, queda como *no clasificado*.

- Clasificador de máxima probabilidad. Utiliza también la media como medida de localización del centro de cada clase en el espacio n-dimensional además, hace

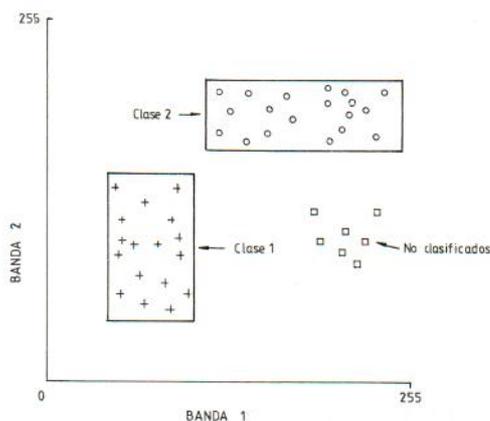


Figura 4.22.

Clasificador paralelepípedo en 2 dimensiones.

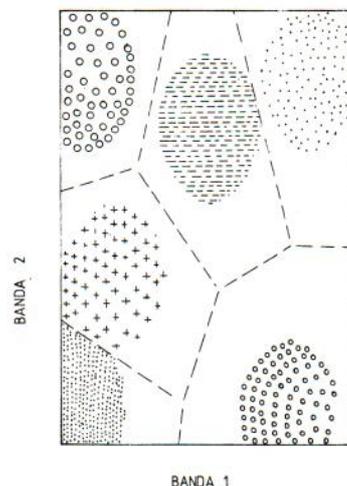


Figura 4.23.

Clasificador de mínima distancia en 2 dimensiones.

uso de una medida de la disposición o despliegue de los valores alrededor de la media en cada uno de los n ejes definidos en el espacio.

Al clasificar un pixel se evalúa la varianza y la correlación de las clases espectrales. Se supone que la distribución de los datos es Gaussiana (distribución normal). La distribución de una clase espectral queda definida por la *media* y la *matriz de covarianza* (describe varianza y correlación).

La longitud de los ejes de unas elipses proyectadas en un sistema de coordenadas (x,y) son proporcionales a la varianza de las 2 variables. La localización, forma y tamaño de la elipse refleja la media, varianza y covarianza de las 2 variables (fig. 4.24).

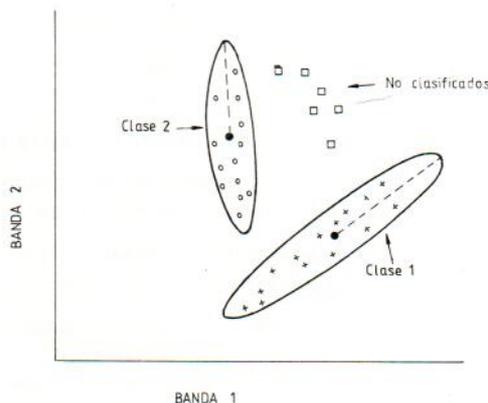


Figura 4.24.—Clasificador de máxima probabilidad en 2 dimensiones.

Aunque una clasificación de máxima probabilidad es muy costosa en tiempo, sus resultados son los más fiables. Cuantas más bandas utilizemos mejor será la clasificación.

Los tres métodos requieren estimar ciertas características estadísticas de las clases espectrales en las que son localizados los pixels. Estas estimaciones se establecen a partir de muestras identificadas sobre la imagen con ayuda de datos de campo, cartografía o fotografía aérea.

Para mayor información sobre las técnicas de clasificación utilizadas en análisis de imágenes de teledetección, consultar Swain y Davis (1978) donde además se incluye material conceptual sobre aspectos probabilísticos, Moik (1980), Robinove (1981), Richards (1986).

PARTE SEGUNDA

**APLICACION AL ACUIFERO
DE LA LLANURA MANCHEGA**

V. MARCO FISICO DEL AREA DE ESTUDIO

V.1. RASGOS GENERALES

La zona de estudio comprende la parte del acuífero de la Llanura Manchega incluida en el cuarto 1 de la escena Landsat TM, 200-033 (fig. 5.1).

La Llanura Manchega es una depresión morfoestructural rellena de materiales terciarios que está situada entre los Montes de Toledo y las estribaciones de la Cordillera Ibérica, en pleno centro de la cuenca alta del río Guadiana (Submeseta Meridional Castellana).

Se trata de una llanura de relieves poco acentuados, con un eje máximo SW-NE de 135 Km y otro N-S de 50 Km y una superficie total de 5.500 Km².

En los Ojos del Guadiana, en plena Llanura Manchega, nacia el río Guadiana por drenaje natural de las aguas subterráneas del acuífero. Sus afluentes por la izquierda son: Córcoles, Guadiana Alto y Azuer. Las aguas de estos ríos provienen del drenaje del acuífero del Campo de Montiel y rara vez alcanzan a sus colectores (el Záncara para los dos primeros y el Guadiana para el Azuer), debido a la infiltración en la llanura y a las derivaciones para riego.

Para el Guadiana Alto, este esquema queda interferido por la presa de Peñarroya (construida en 1959), que junto con las lagunas de Ruidera a cola del embalse, regulan sus aguas.

Los afluentes del Guadiana por la margen derecha, Záncara y Cigüela, nacen en la Sierra de Altomira con un régimen muy irregular y un elevado coeficiente de escorrentía.

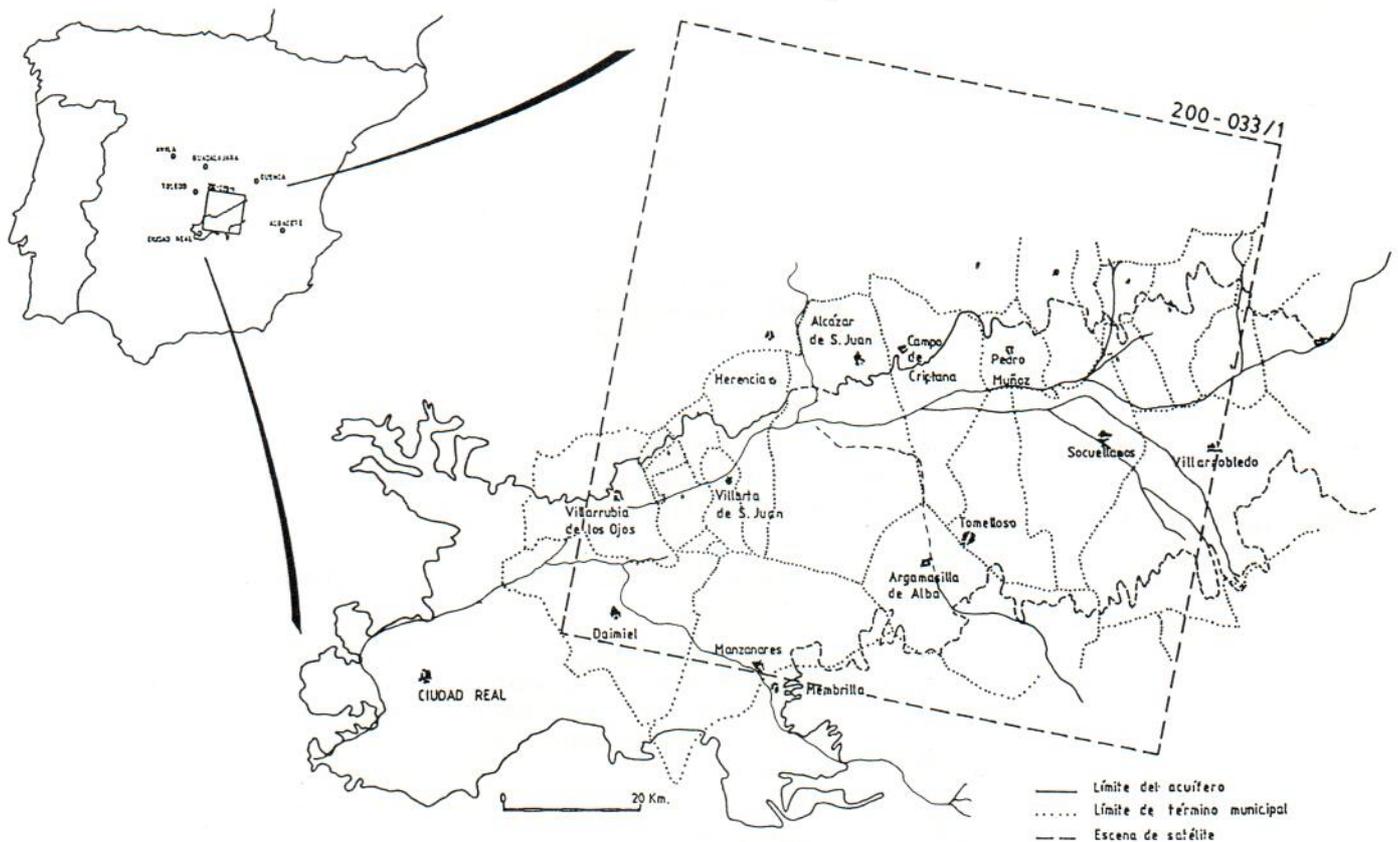


Figura 5.1.—Localización del área de estudio.

La escasa pendiente de la red unida a las características climáticas e hidrogeológicas de la región, origina extensas zonas húmedas, entre las que destacan por su importancia ecológica Las Tablas de Daimiel.

El clima de la región es mediterráneo templado, caracterizado por la existencia de una estación seca bien definida (verano). La humedad relativa se sitúa en torno al 65% de media anual, poniendo de manifiesto el ambiente seco de la zona.

Las temperaturas medias anuales varían entre 11,5 y 14,5° C, siendo los meses extremos, diciembre-enero (4-6° C) y julio (23-26° C). La duración de la época libre de heladas supera los 4-4,5 meses (IGME-IRYDA, 1979).

La precipitación media anual es de 415 mm con un elevado coeficiente de irregularidad interanual (fig. 5.2). La evapotranspiración potencial media anual es del orden de 850 mm/año. (MOPU, 1980).

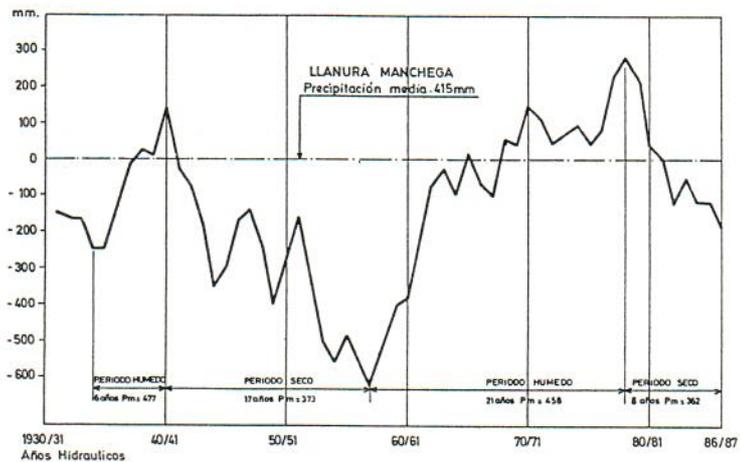


Figura 5.2.—Desviaciones acumuladas de la pluviometría anual respecto a la media en función del tiempo (SGOP, 1988).

Desde el punto de vista de la recogida de datos mediante teledetección aerotransportada o desde satélite, destacar que predominan los días poco nubosos y despejados sobre los cubiertos y que la insolación anual es muy alta, entre 2.600 y 2.700 horas.

V.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS

En la cuenca alta del río Guadiana, se pueden distinguir varias zonas geológicas, diferenciadas tanto por su litología como por su disposición estructural, las cuales se corresponden con unidades hidrogeológicas.

Destaca en la parte central, el acuífero de la Llanura Manchega con una superficie de 5.500 Km² y unos recursos hidráulicos renovables estimados en 335 Hm³/año (SGOP, 1988).

Geológicamente, la Llanura Manchega (fig. 5.3) es una depresión morfoestructural, en la que sobre un zócalo de materiales paleozoicos y mesozoicos, se ha producido una sedimentación continental progresiva (conglomerados, arenas, arcillas, margas, calizas) miocena. Recubriendo parcialmente estas formaciones encontramos materiales detríticos pliocuaternarios y cuaternarios (fig. 5.4).

El sistema acuífero de la Llanura Manchega está formado básicamente por dos unidades hidrogeológicas: una *superior*, compuesta por materiales calcáreo-margosos del Mioceno Superior y los niveles detríticos del Pliocuatnario, y una *inferior*, formada por materiales calcáreos y dolomíticos del Mesozoico (Jurásico y Cretácico). Entre ambas, existe una unidad intermedia de materiales detríticos del Mioceno inferior que actúa como acuitardo.

a) Unidad hidrogeológica superior

Formada por niveles con características hidrogeológicas muy diferentes, calizas y margas del Mioceno Superior y materiales detríticos del Pliocuatnario y Cuaternario,

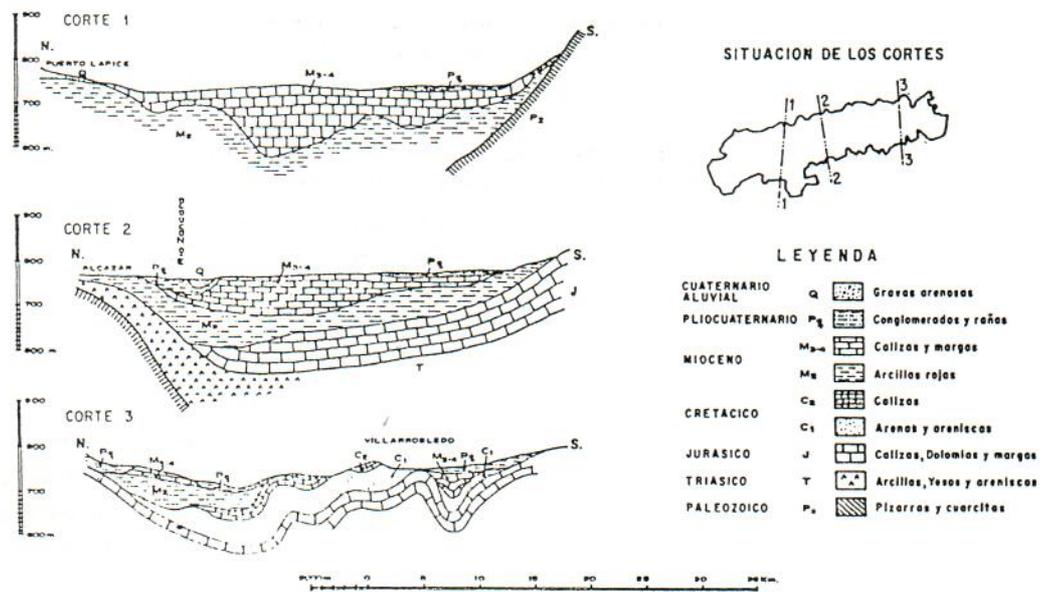


Figura 5.3.—Cortes geológicos esquemáticos de la Llanura Manchega (Niñerola et al., 1976).

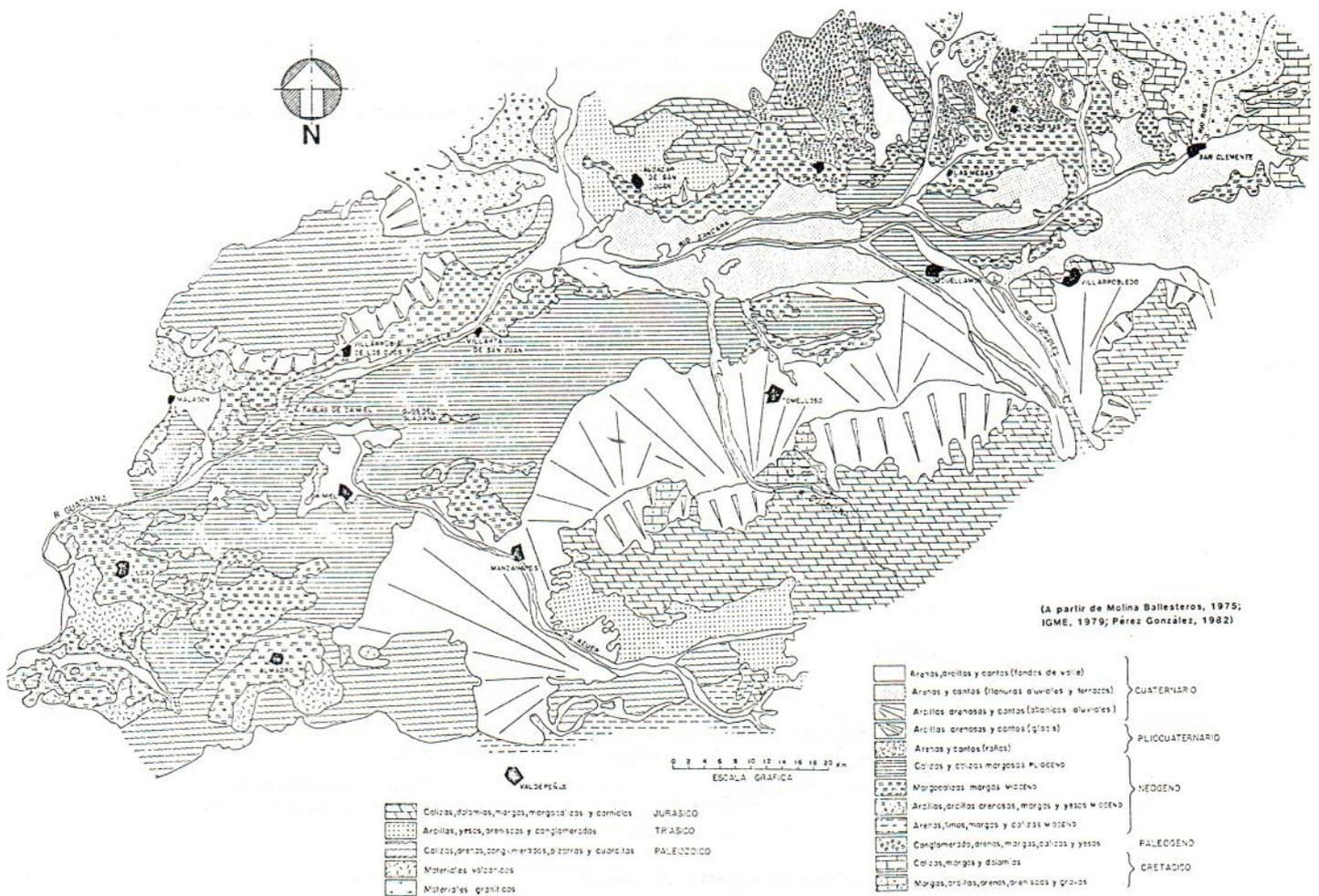


Figura 5.4.—Esquema geológico de la Llanura Manchega (Bustamante, 1988).

se extiende por la práctica totalidad de los 5.500 Km² de la llanura. Presenta un espesor medio de 35 metros, con valores máximos en torno a los 200 m.

Los parámetros hidráulicos varían según la naturaleza de los materiales. Para los niveles detríticos del Pliocuaternario y Cuaternario, la transmisividad oscila entre 0 y 500 m²/día, y el coeficiente de almacenamiento entre 10⁻¹ y 10⁻². En los niveles calcáreos del Mioceno Superior, que suponen el acuífero más importante de la depresión, la transmisividad varía entre 50 y 20.000 m²/día y el coeficiente de almacenamiento se ha estimado entre un 1 % y un 2 %, con un valor medio a de 1,5 % (Niñerola et al., 1976; SGOP, 1982).

b) Unidad hidrogeológica inferior

Está formada por tres niveles acuíferos distintos, calizas del Cretácico Superior, calizas del Jurásico Medio y dolomías del Jurásico inferior, separados entre sí por capas menos permeables, se extiende por unos 3.600 Km² en la parte central y oriental del zócalo y son continuación geológica de los acuíferos del Campo de Montiel y Sierra de Altomira, con los que están conectados hidráulicamente.

La unidad no tiene espesores constantes, ya que los materiales siguen la tendencia de la cuenca sedimentaria mesozoica, pero en general existe un aumento de potencia hacia el Este.

Los parámetros hidráulicos del conjunto se han estimado entre 200 y 600 m²/día para la transmisividad y valores de 4,10⁻³ para el coeficiente de almacenamiento (Niñerola et al., 1976; SGOP, 1982).

El funcionamiento hidráulico queda recogido en la figura 5.5. Las entradas al sistema se producen por:

— *Infiltración procedente de las precipitaciones.*—La recarga por infiltración se produce de forma bastante irregular, siendo prácticamente nula en aquellos años en que la precipitación es inferior a 300 mm; superior a 50 mm, cuando la precipitación supera los 450 mm y variable, en los años de precipitación intermedia, dependiendo de la distribución de las lluvias (SGOP, 1978; López García et al., 1979).

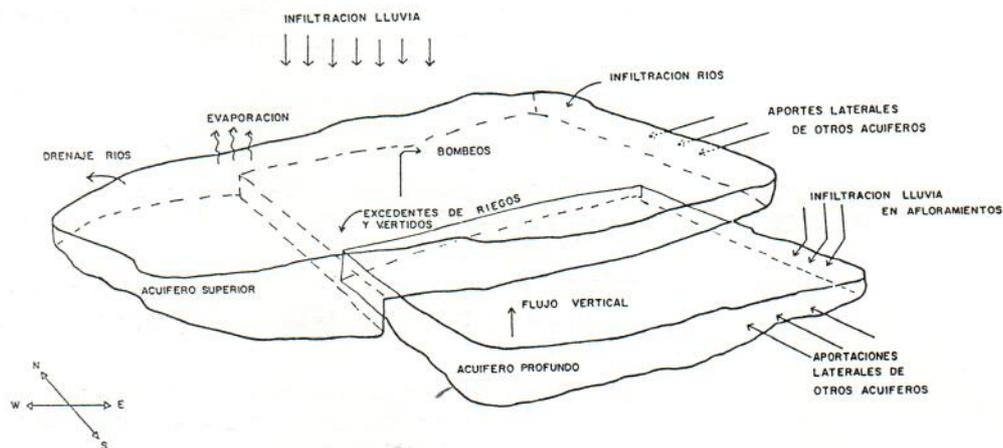


Figura 5.5.—Esquema del funcionamiento hidráulico del sistema acuífero de la Llanura Manchega.

— *Aportes laterales de otros acuíferos.*—El acuífero del Campo de Montiel con 60 Km de contacto, una transmisividad media de 500 m²/día y un gradiente de 1/200, aporta un volumen de agua que se estima en 55 Hm³. Para el acuífero de la Unidad Ibérica, con parámetros mucho menores, se considera una aportación de 5 Hm³ (López-Camacho y García de la Torre, 1979; SGOP, 1986).

— *Infiltración de los ríos en la Llanura.*—Los ríos que se infiltran total o parcialmente son Córcoles, Alto Guadiana y Azuer (IGME-IRYDA, 1976).

— *Infiltración de los excedentes de riego y vertidos urbanos.*

Las salidas del sistema son:

- *Extracciones de aguas subterráneas con destino a riego.*
- *Drenaje natural en los Ojos del Guadiana y las Tablas de Daimiel.*
- *Evapotranspiración directa del Embalse subterráneo.* Este fenómeno se puede producir en zonas donde el límite superior de la zona saturada está próximo a la superficie topográfica, debido a un proceso combinado de evaporación en la zona capilar y transpiración de las plantas (López-Camacho y García de la Torre, 1979).

El balance hidráulico quedaría establecido según datos de SGOP (1986) y SGOP (1988) como se ve en la tabla 5.1.

TABLA 5.1.
Balance hidráulico del acuífero de la Llanura Manchega (a partir de datos del SGOP, 1986 y 1988)

Concepto	Entradas (Hm ³ /a) recursos renovables	Salidas (Hm ³ /a)
Infiltración ríos	80	
lluvias	180	
Aportaciones subterráneas	60	
Excedentes de riegos	20	
Evapotranspiración		-10
Drenaje natural del acuífero		0
Bombeos netos		-524
TOTAL	340	-534

El déficit de 194 Hm³ es cubierto por el *vaciado* del embalse subterráneo.

El esquema hidráulico muestra la interdependencia existente entre las aguas subterráneas y superficiales y la regulación natural que el embalse subterráneo confiere a la cuenca del Guadiana. Actuando sobre él, se incide sobre la regulación total del conjunto (Niñerola et al., 1976).

V.3. EVOLUCION DEL ACUIFERO

El regadío es el capítulo que consume más agua en la Llanura Manchega. Desde 1974 hasta la actualidad, la extracción de aguas subterráneas con destino a riego, ha sufrido un espectacular crecimiento.

En 1977, el volumen de agua consumida ya superaba los recursos renovables y dada la irracionalidad de la explotación, existían zonas con una sobreexplotación manifiesta (Niñerola et al., 1979).

El 92 % del total de agua utilizada en la llanura son aguas subterráneas (SGOP, 1988). En la figura 5.6 podemos ver el crecimiento de las superficies en regadío en el acuífero desde 1974. En el último trienio (84-87) y pese al estado de opinión creado ante la sobreexplotación existente y sus graves consecuencias para la agricultura y ecología de la zona, el incremento de la superficie regada con aguas subterráneas ha sido de 25.345 has (25,1 %).

Destacar el aumento durante este período de tiempo de cultivos con elevadas dotaciones de agua, como el maíz, las hortalizas y los forrajeros. La extensión del maíz creció en torno a las 9.000 ha, las hortalizas se han incrementado en más de 6.000 ha y los forrajeros en unas 3.000 ha (SGOP, 1988).

Directamente relacionado con el crecimiento de la superficie de cultivos en regadío se encuentra la extracción de agua del acuífero (fig. 5.7).

En el trienio (84-87), se ha producido un incremento de 144 Hm³ con destino a riego, lo que supone un 33,5 % más. Este aumento es sensiblemente superior al experimen-

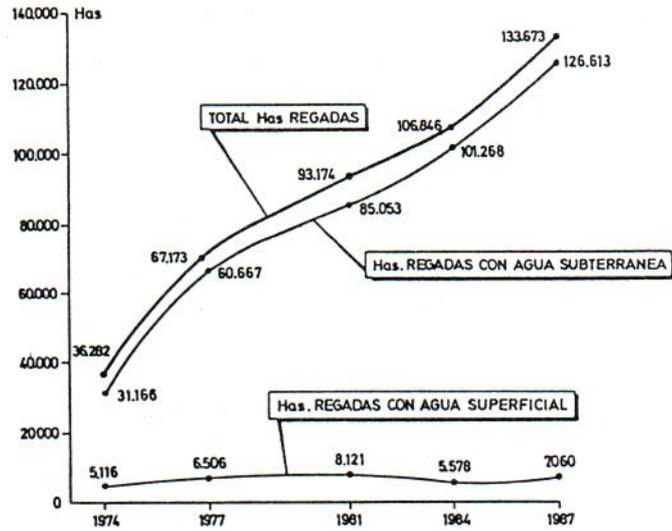


Figura 5.6.—Evolución de las superficies regadas en la Llanura Manchega (1974-87) (SGOP, 1988).

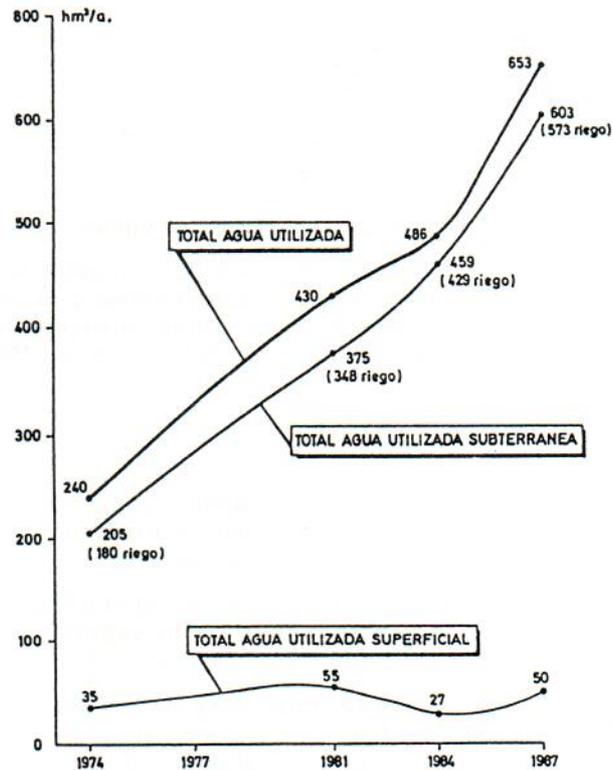


Figura 5.7.—Evolución de la utilización del agua en la Llanura Manchega (1974-87) (SGOP, 1988).

tado por la superficie regada durante el mismo período de tiempo y que se ha cifrado en un 25,1 %. Esto indica claramente que se ha tendido hacia cultivos con un módulo de riego elevado. Sólo al maíz es imputable un incremento en las extracciones de 77 Hm³.

Datos del estudio realizado por el Servicio Geológico de Obras Públicas sobre la evolución de las extracciones y niveles piezométricos en el acuífero de la Llanura Manchega, permiten calcular el desembalse producido en el acuífero (tabla 5.2), teniendo en cuenta los siguientes porcentajes de retornos de agua:

- Retornos de riego por aspersión (aguas subterráneas): 10%.
- Retornos de riego por inundación (aguas superficiales): 25%.
- Retornos del agua suministrada para abastecimiento y usos industriales: 25%.

TABLA 5.2.
Evolución del consumo de agua subterránea en la Llanura Manchega

Concepto	1981	1984	1987
Extracción total de Aguas Subterráneas (Hm ³)	373	457	603
Retorno riego aguas subterráneas (Hm ³)	35	43	57
Retorno riego aguas superficiales (Hm ³)	14	7	13
Retorno abastecimiento y uso industrial (Hm ³)	8	8	9
CONSUMO NETO	316	399	524

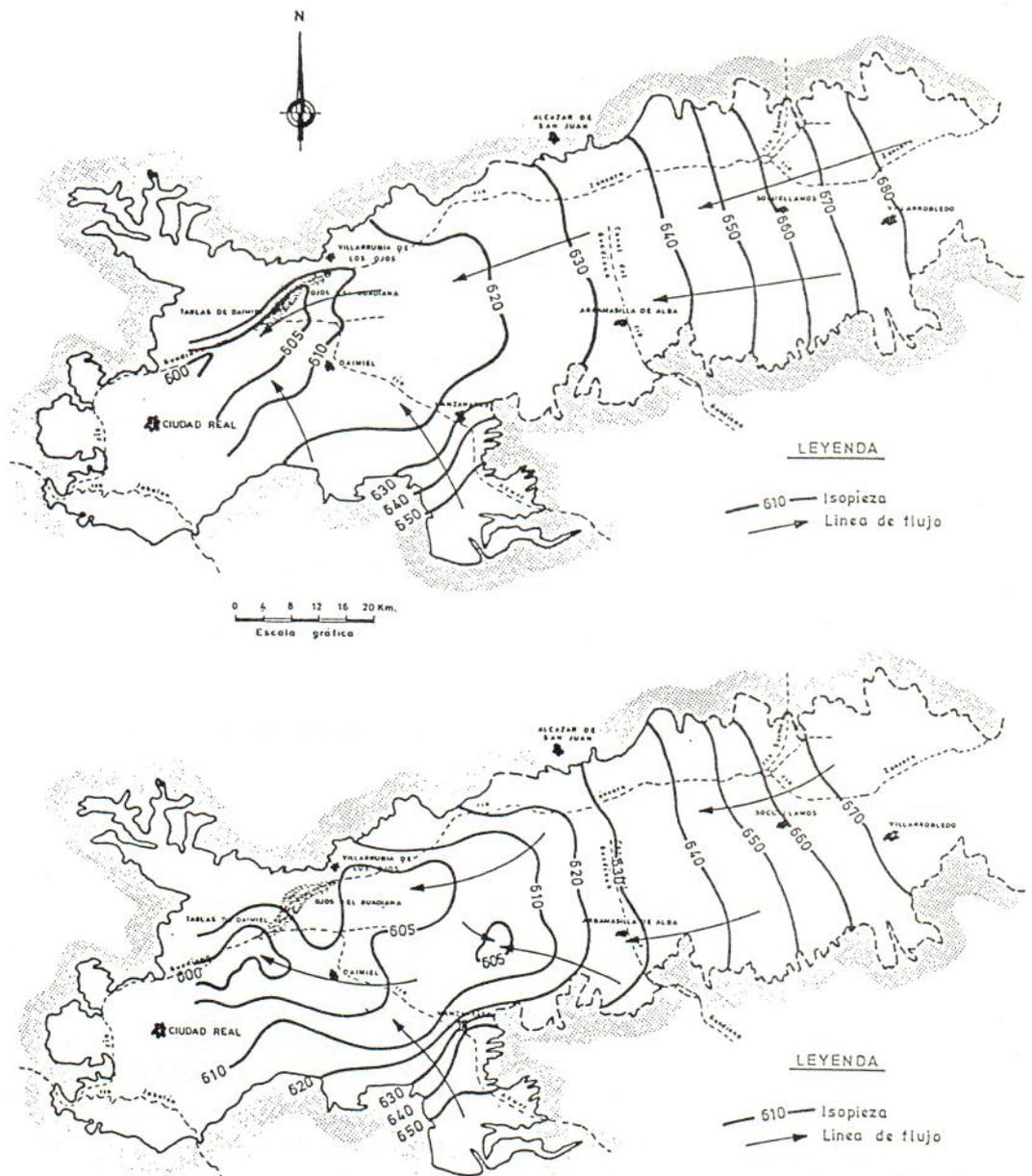


Figura 5.8.—Esquema piezométrico de la Mancha. (a) Septiembre 1980. (b) Septiembre 1984.

El incremento producido en el trienio 81-84 es del 26 %, mientras que el incremento del período 84-87 sobre el trienio anterior es prácticamente del 31 %. En los últimos 6 años el aumento estaría próximo al 70 %.

La configuración del esquema piezométrico de la Mancha se mantuvo constante durante el decenio (1974-84), con diferencias puntuales debidas al descenso general de la superficie piezométrica y a la aparición de conos de bombeo (fig. 5.8).

En el trienio 1984-87 (fig. 5.9), además de aumentar los conos de bombeo, se observa una distorsión de la superficie piezométrica. La dirección del flujo hidráulico subterráneo ha pasado de tener una dirección general E-W, a presentar dos direcciones preferenciales una N-SW y otra S-NW (Sgop, 1988).

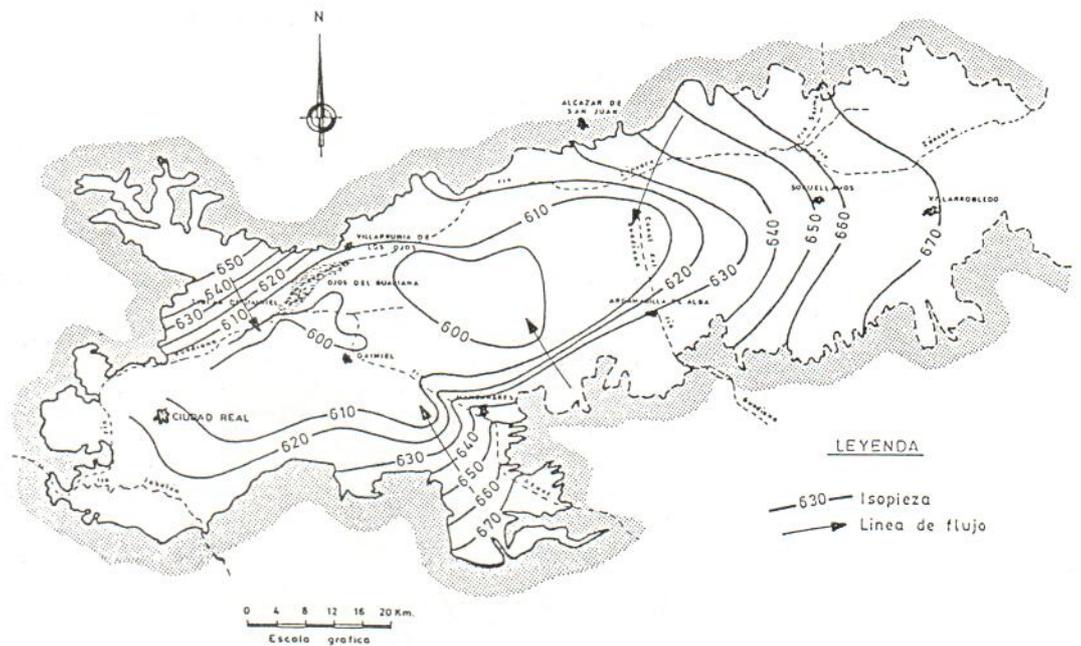


Figura 5.9.—Esquema piezométrico de la Mancha (octubre 1987) (SGOP, 1988).

En 1984, el río Guadiana y las Tablas de Daimiel dejaron de ser rebosadero natural del acuífero.

Los descensos medios sufridos por la superficie piezométrica quedan reflejados en la tabla 5.3.

TABLA 5.3.
Evolución de la superficie piezométrica del acuífero de la Llanura Manchega

Período	Descenso medio total (metros)	Descenso medio anual (m/a)
1974-81	3	0,2
1981-84	6	2
1984-87	5	1,7
1974-87	14	1,1

El déficit en el balance del acuífero, ha generado en los últimos años (1974-87) un *vaciado* en torno a los 2.500 Hm³. Este desembalse que no es sino consecuencia directa de la sobreexplotación a la que está sometido el acuífero, va a producir a corto plazo, graves consecuencias socioeconómicas derivadas de la escasez de agua para riego e importantes consecuencias ecológicas para las zonas húmedas de la Mancha (Ojos del Guadiana y Tablas de Daimiel).

El día 4 de febrero de 1987, la Junta de Gobierno de la Confederación Hidrográfica del Guadiana efectuó la declaración provisional de acuífero sobreexplotado.

VI. CAMPAÑA DE CAMPO

El objetivo de nuestro estudio es clasificar los cultivos existentes en la Llanura Manchega. La clasificación multispectral de una imagen, puede realizarse sin conocer datos del terreno, sin embargo, para obtener resultados fiables, es necesario poder correlacionar las clases espectrales diferenciadas, con los tipos de cultivo que representan. Esta asignación *clase espectral/tipo de cultivo*, puede realizarse posteriormente a la clasificación, como vimos para las clasificaciones no supervisadas, o con anterioridad, en el caso de una clasificación supervisada.

En ambas, es necesario contar con una información representativa y fiable sobre el área de estudio que facilite el tratamiento de los datos digitales de la imagen.

Esta información, tradicionalmente denominada *datos verdad-terreno (ground truth)*, se adquiere a partir de cartografía temática, fotografía aérea y visitas de campo.

Dado nuestro planteamiento de cuantificar la superficie de los cultivos en regadío, para establecer las extracciones de aguas subterráneas en la llanura, la *verdad-terreno* no podía extraerse de mapas de cultivos o fotografías aéreas ya existentes, sin perder el carácter actual del trabajo.

Por lo tanto, se llevaron a cabo dos campañas de campo. En la primera, el objetivo principal era la localización e identificación de parcelas con cultivos en regadío. La segunda campaña estaba destinada a la adquisición de *datos verdad terreno* que posteriormente serían utilizados en la clasificación de cultivos de la zona.

La primera campaña de campo se realizó en octubre de 1987 y se planteó como un muestreo estadístico aleatorio en 6 términos municipales situados a lo largo del acuífero. El objetivo de esta campaña era doble, por un lado, se trataba de familiarizarnos con las condiciones de cultivo en la zona y por otro, contar con una información estadística que nos sirviese en la fase de clasificación, para escoger parcelas testigo y determinar la fiabilidad de las clases establecidas.

Se eligieron 6 términos municipales repartidos por la Llanura Manchega y en cada uno de ellos se escogieron aleatoriamente, una serie de polígonos catastrales donde se muestrearon parcelas tanto en secano como en regadío. En cada una de las parcelas muestreadas se determinó:

- i) *Secano/regadío.*
- ii) *Tipo de cultivo.*
- iii) *Origen del agua para riego.*

Para este muestreo se utilizaron mapas catastrales a escala 1:5.000. La tabla 6.1 recoge los términos municipales analizados y el número de parcelas muestreadas en cada uno de ellos.

En Alcázar de San Juan, los polígonos que se muestrearon, correspondían en su totalidad a cultivos en secano, por lo que no han sido considerados en análisis posteriores.

En las figuras y tablas siguientes se recoge la localización de los polígonos muestreados e información sobre el número de parcelas y tipos de cultivos identificados.

Las características más importantes en este tipo de muestreo de campo son:

- Facilidad en su realización.
- Familiarizar al operador con las prácticas agrícolas de la zona: tipos de cultivos, sistemas de riego, tamaño de las parcelas...
- Permite contar en la fase de clasificación con una base de datos actualizada sobre el área de trabajo.

La segunda campaña de campo se realizó en enero de 1988. Se trabajó en tres términos municipales. Daimiel, en la zona occidental, Argamasilla de Alba, en la central y Socuéllamos, en la zona oriental de la llanura.

La elección de estas zonas se realizó atendiendo a su disposición a lo largo del acuífero que garantiza la representatividad de la información recogida, a la información suministrada por la primera campaña sobre la distribución de los cultivos en la llanura y a los datos aportados por la imagen de satélite, en relación a la superficie y variedad de las parcelas.

Se utilizaron fotografías a escala 1:50.000 realizadas directamente sobre el monitor RGB de alta resolución del equipo de proceso de imagen. La combinación de bandas espectrales utilizadas fue la 4-5-7 (falso color infrarrojo). Cada fotografía cubría un área aproximada de 16 × 11 Km. Las zonas escogidas presentaban parcelas homogéneas, con un tamaño superior a 2 ha, con fácil acceso y diversidad de cultivos.

Se contaba también con el resultado de un primer ensayo de la clasificación de superficies en regadío.

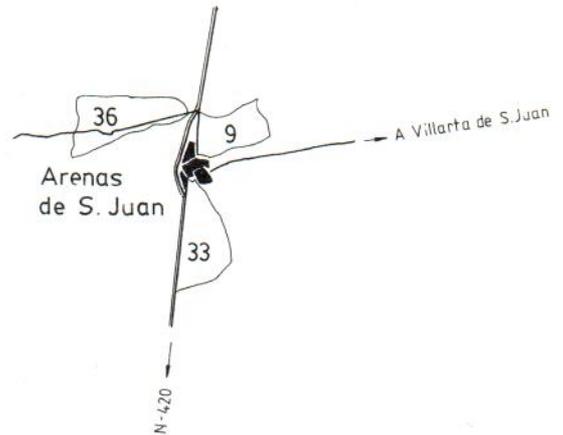
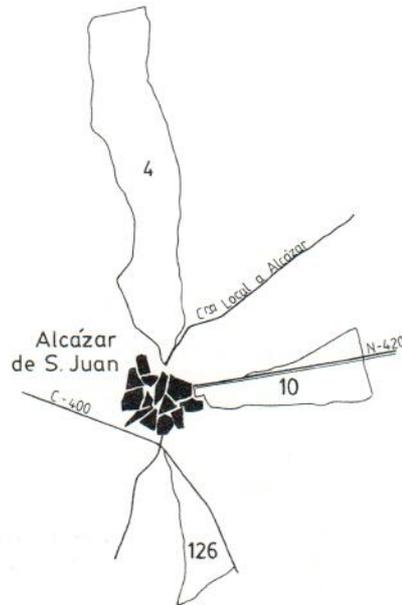


Figura 6.1.—Localización de los polígonos muestreados en Alcázar de S. Juan. Escala de la figura 1:100.000.

Figura 6.2.—Localización de los polígonos muestreados en Arenas de S. Juan. Escala de la figura 1:100.000.

TABLA 6.1.
Términos municipales en los que se ha realizado la 1.ª campaña de campo.
Fuente: Campaña de campo

Término Municipal	Número de polígonos	Número de parcelas
Alcázar de S. Juan	3	—
Arenas de S. Juan	3	243
Argamasilla de Alba	3	199
Daimiel	7	234
Manzanares	4	174
Socuéllamos	4	365

TABLA 6.2.
Número de parcelas muestreadas en Arenas de S. Juan.
Fuente: Campaña de campo

Polígono	Cereal	Remolacha	Viña	Melón	Olivos	Coles	Espárragos	Erial	Barbecho
33	2	1	100	—	5	—	—	—	—
36	7	—	100	—	2	—	—	—	—
9	7	—	9	1	—	1	5	2	1
TOTAL	16	1	209	1	7	1	5	2	1

El trabajo de campo que se realizó sobre estos documentos fotográficos pretendía verificar la fiabilidad de esta primera clasificación de superficies en regadío. También se adquirieron las *parcelas verdad-terreno* que posteriormente serían utilizadas en la fase de la clasificación.

En las fotografías 11 y 15 se puede ver la localización de las áreas muestreadas y las parcelas empleadas en la clasificación supervisada final, respectivamente.

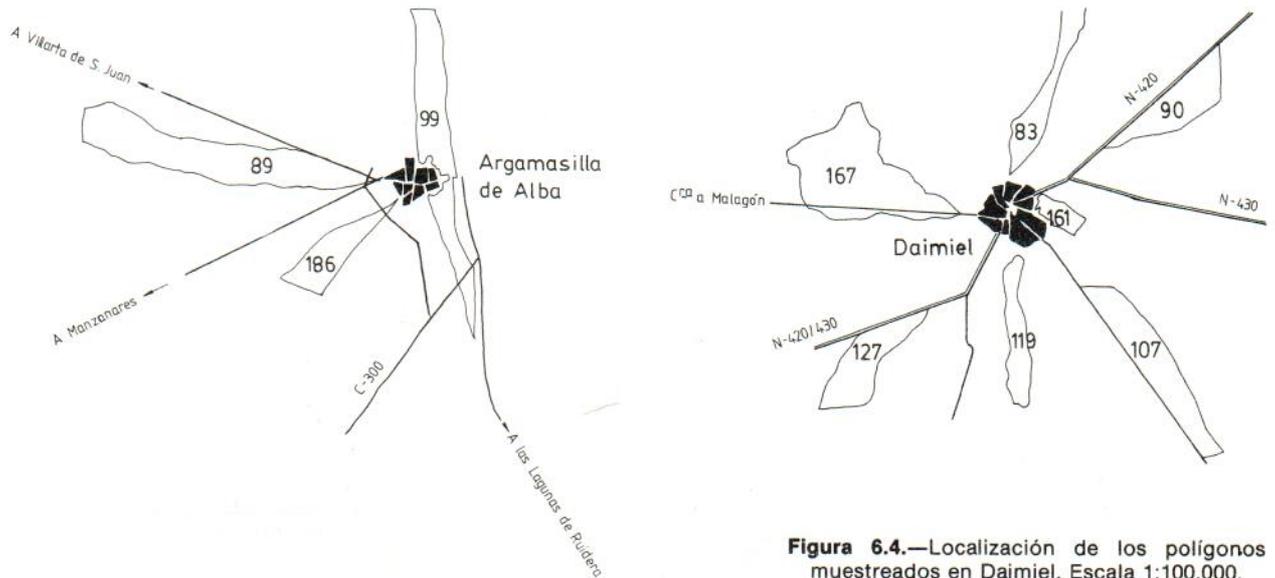


Figura 6.4.—Localización de los polígonos muestreados en Daimiel. Escala 1:100.000.

Figura 6.3.—Localización de los polígonos muestreados en Argamasilla de Alba. Escala de la figura 1:100.000.

TABLA 6.3.
Número de parcelas muestreadas en Argamasilla de Alba.
Fuente: Campaña de Campo

Polígono	Cereal	Remolacha	Viña	Melón	Huerta	Alfalfa	Maíz	Barbecho
89	14	—	7	4	—	6	10	6
186	5	1	12	26	—	9	18	1
99	19	2	—	3	1	19	32	4
TOTAL	38	3	19	33	1	34	60	11

TABLA 6.4.
Número de parcelas muestreadas en Daimiel.
Fuente: Campaña de Campo

Polígono	Cereal	Remolacha	Viña	Melón	Huerta	Alfalfa	Maíz	Olivar	Patatas	Cebolla
83	—	—	18	—	1	1	4	1	—	—
90	4	—	30	—	—	—	—	—	1	—
107	16	—	10	3	1	—	2	5	2	1
119	4	3	5	—	3	1	8	4	—	—
127	13	3	23	1	2	—	—	1	—	—
161	15	—	8	—	—	1	2	—	—	—
167	11	2	12	—	—	—	3	1	—	—
TOTAL	71	8	106	4	7	3	19	12	3	1

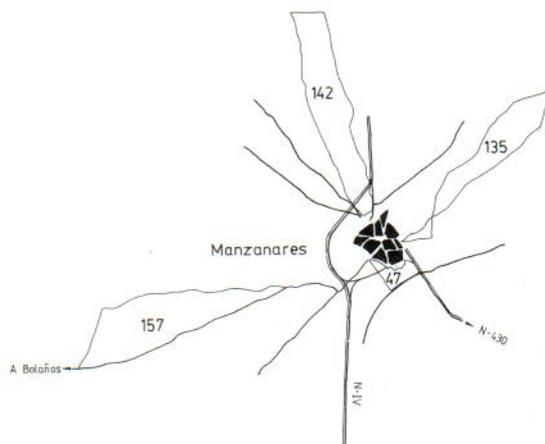


Figura 6.5.—Localización de los polígonos muestreados en Manzanares. Escala de la figura 1:100.000.

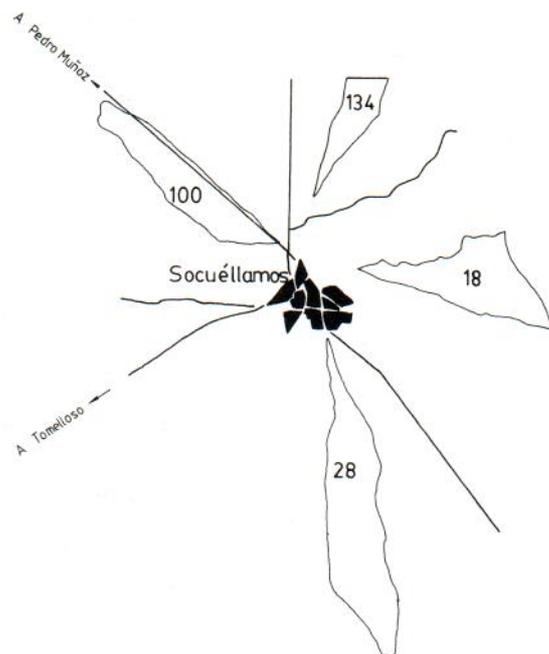


Figura 6.6.—Localización de los polígonos muestreados en Socuéllamos. Escala 1:100.000.

TABLA 6.5.
Número de parcelas muestreadas en Manzanares.
Fuente: Campaña de campo

Polígono	Cereal	Remolacha	Viña	Huerta	Alfalfa	Maíz	Olivar	Patatas	Barbecho
47	10	—	—	2	7	3	—	1	—
135	30	—	15	—	—	—	2	—	10
142	11	3	37	—	—	—	—	—	4
147	28	—	10	—	—	—	—	—	2
TOTAL	79	3	62	2	7	3	2	1	16

TABLA 6.6.
Número de parcelas muestreadas en el término municipal de Socuéllamos.
Fuente: Campaña de campo

Polígono	Cereal	Remolacha	Viña	Melón	Alfalfa	Maíz	Patatas	Girasol	Ajos
18	25	4	68	—	1	5	1	1	—
28	22	—	185	1	2	5	—	1	4
100	—	—	16	—	1	—	1	—	—
134	3	—	17	—	1	—	—	—	1
TOTAL	50	4	286	1	5	10	2	2	5

VII. TRATAMIENTO DE LOS DATOS LANDSAT

VII.1. EQUIPO DE PROCESO DE IMAGEN: DIPIX ARIES III

Este estudio se ha realizado sobre un equipo DIPIX ARIES III compuesto por las siguientes unidades:

- *Unidad de cálculo:* DIGITAL PDP 11/73 con 512 K de memoria central. Coma flotante por hardware. Sistema operativo RSX-11 M. Interfaces de comunicación.
- *Unidad de almacenamiento:* AMPEX CAPRICORN 165 con una capacidad de 165 Mb.
- *Unidad de cinta:* CIPHER con una velocidad de transferencia de 1.600 bpi (*bits per inches*).
- *Unidad de proceso de imagen:* DIPIX (ARIES III) con memoria de 14×24 bits. PAD DIGITIZER y monitor RGB de alta resolución.
- *Software:* ARIES III.

El conjunto de programas que constituye el software ARIES III, dispone de funciones de utilidad y de operaciones propias del tratamiento de imagen.

El sistema operativo RSX-11M de la unidad de cálculo, consta de las instrucciones necesarias para cargar y procesar imágenes a partir de cintas magnéticas (CCT) que contienen la información digitalizada.

Los comandos de la librería de proceso de imagen, están estructurados en niveles de progresivo detalle, según 7 módulos o temas básicos:

- Manejo de cintas magnéticas
- Visualización de imágenes
- Clasificaciones
- Correcciones geométricas
- Contrastes o filtros
- Análisis gráficos estadísticos
- Utilidad de manejo de imágenes

En la figura 7.1 podemos ver la arquitectura de un sistema DIPIX ARIES de proceso de imagen.

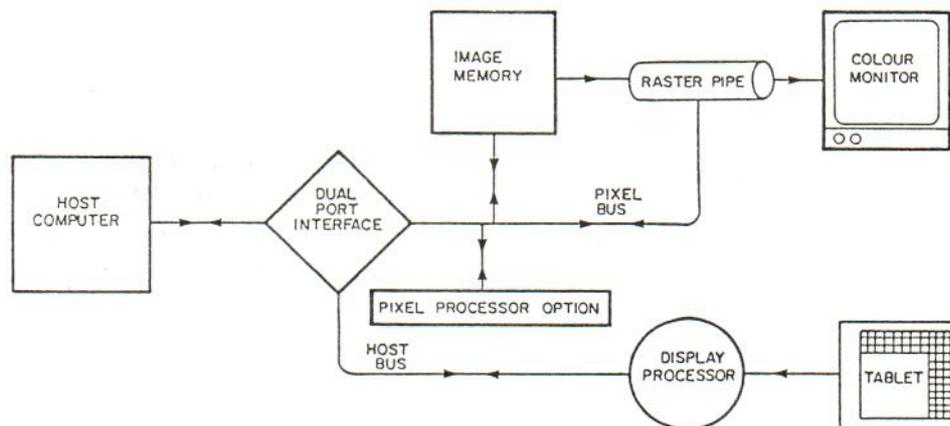


Figura 7.1.—Estructura de un procesador de imagen DIPIX ARIES.

VII.2. ANALISIS VISUAL Y ESTADISTICO

Debido a la necesidad de una alta capacidad de almacenamiento en disco, más de 64 Mb para cada una de las cuatro fechas que vamos a analizar, es necesario discriminar aquellas bandas cuya información no es especialmente interesante para los objetivos del estudio. La banda 6 no va a ser utilizada debido a sus especiales características espaciales (120 metros de resolución sobre el terreno) y radiométricas (corresponde al infrarrojo térmico).

Se han visualizado las 6 bandas restantes. El proceso consiste en decodificar el valor digital de cada pixel, en un valor analógico que se corresponde con un nivel de gris en una escala de 0 a 255. El resultado son imágenes, en blanco y negro, de cada una de las bandas que capta el satélite.

Puesto que el ojo humano no es capaz de distinguir los 256 niveles de gris (Fink, 1976; Drury, 1987) se realizaron imágenes en falso color por combinación de 3 bandas. Esta operación consiste en sumar la intensidad de radiación de cada una de las bandas a las que se les ha asignado previamente un color básico según el orden: rojo, verde y azul.

Se han ensayado varias combinaciones, viéndose que las bandas del espectro visible registran la radiación reflejada por la vegetación con una señal débil, haciendo muy difícil la discriminación de tipos distintos, al aparecer la cubierta vegetal de modo uniforme. Por el contrario, las bandas del infrarrojo próximo captan la radiación donde las diferencias de reflectancia entre cultivos son más acusadas.

En general, las imágenes presentan una excelente calidad, a excepción de la fecha de julio (foto 2), donde se puede apreciar ruido (humos o nubes dispersas) con el consiguiente deterioro.

Como complemento a este primer análisis visual, se ha realizado un estudio estadístico de los valores radiométricos de cada banda. En las figuras 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5 se pueden ver los histogramas de las 6 bandas para cada una de las fechas.

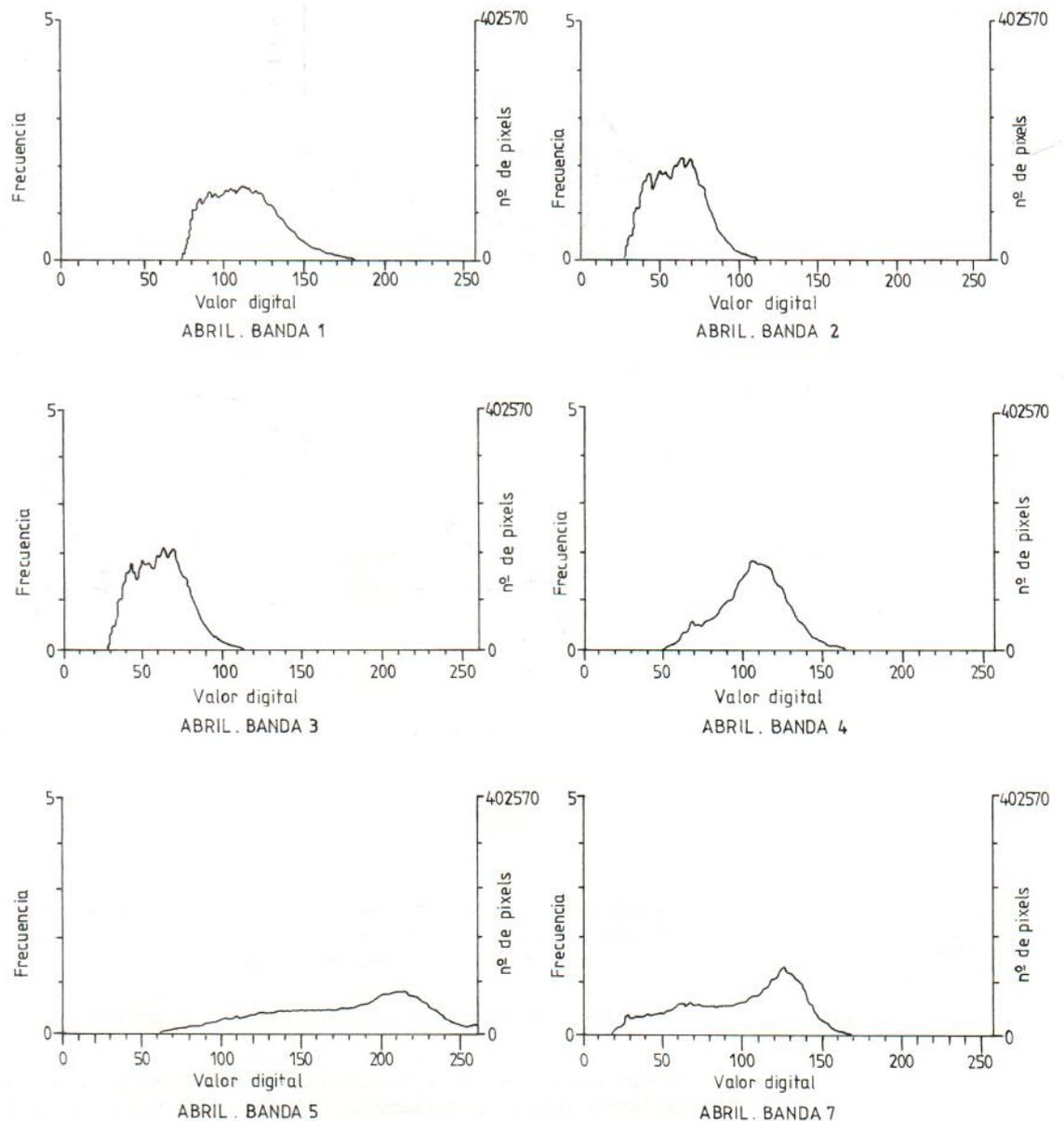


Figura 7.2.—Histogramas de las bandas de la imagen de abril.

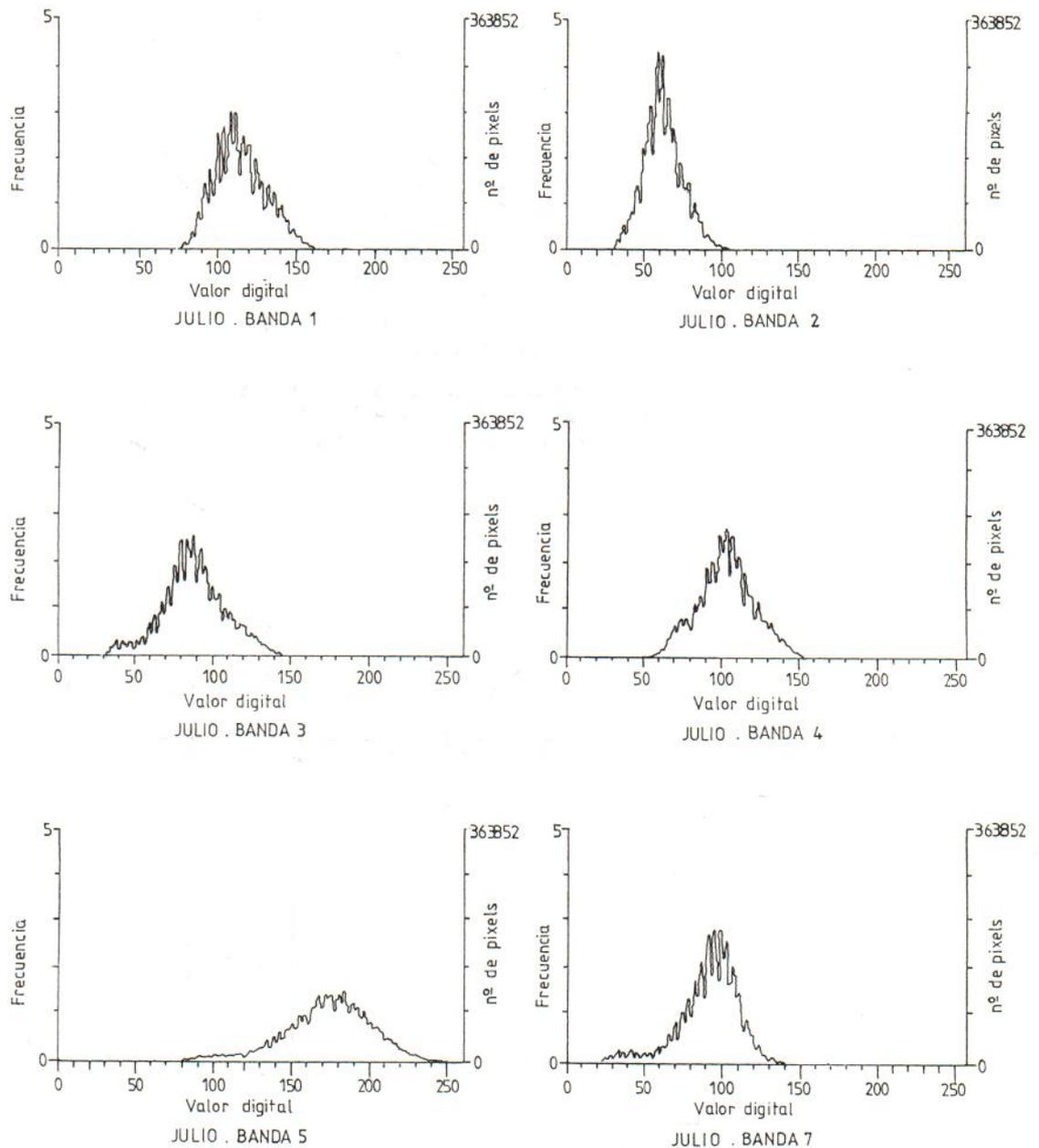


Figura 7.3.—Histogramas de las bandas de la imagen de julio.

El software del procesador de imagen nos permite conocer las siguientes variables estadísticas:

- Media y desviación standard de cada una de las bandas.
- Coeficiente de correlación entre bandas. Nos indica la información adicional que cada banda introduce en la imagen, y por tanto su mayor o menor poder discriminante.
- Matrices de varianza y covarianza.

Tras el análisis de los datos estadísticos, las bandas 4, 5 y 7, que corresponden al infrarrojo reflejado, se mostraron como las más adecuadas para la identificación y clasificación de áreas en regadío. Igualmente, nos pareció interesante utilizar la banda 3 para optimizar la identificación de cultivos, ya que se trata de una banda situada en la zona de absorción de la clorofila.

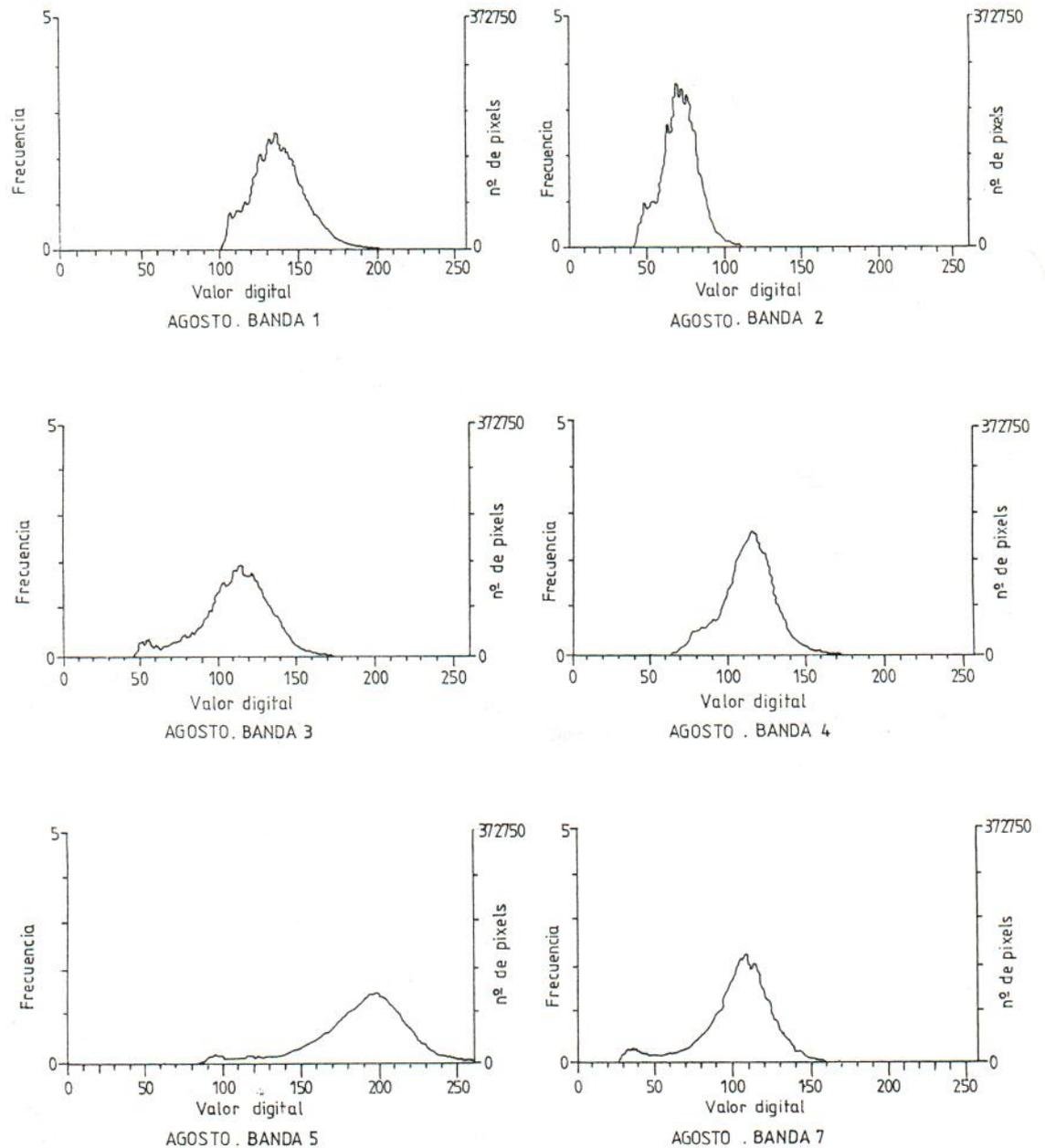


Figura 7.4.—Histogramas de las bandas de la imagen de agosto.

Si analizamos los histogramas de la imagen de julio podemos ver que éstos no son continuos, sino que existen una serie de *saltos* que no se adaptan a ninguna secuencia. En las especificaciones que acompañan a la escena no se recogen anomalías de ningún tipo y la cobertura nubosa que se da es del 0%. Sin embargo, los histogramas indican falta de registro continuo en los datos recogidos, probablemente debida a los humos o nubes dispersas que se pueden apreciar visualmente en la imagen.

Aunque en principio seguimos trabajando con la escena de julio, en la fase de clasificación hubo que desecharla debido a la falta de continuidad en sus datos.

La importancia de esta fase de análisis en el proceso de imágenes reside en la reducción del volumen de información a manejar en fases posteriores y en el conocimiento de la calidad de los datos con que se cuenta. En nuestro caso, se han

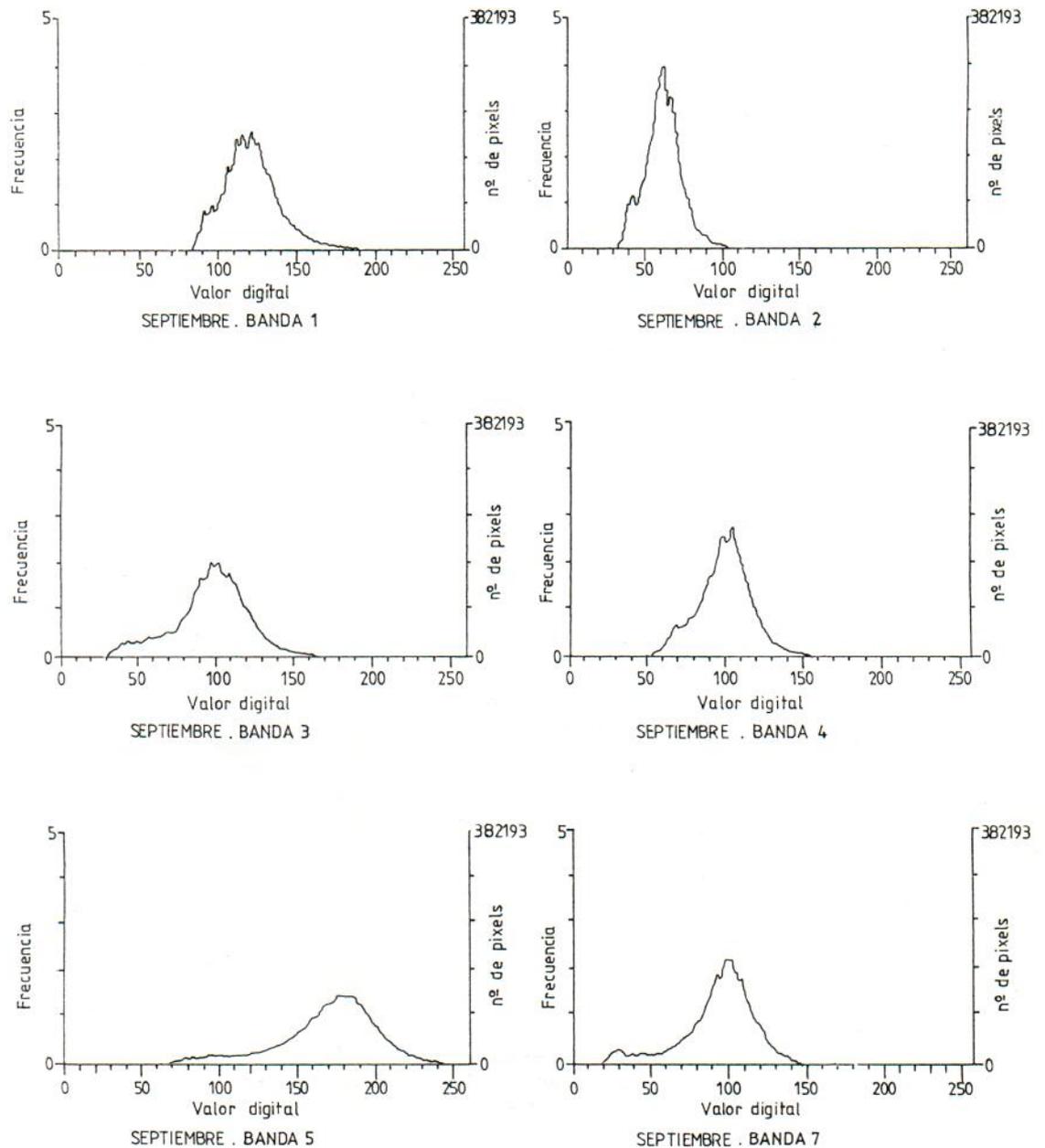


Figura 7.5.—Histogramas de las bandas de la imagen de septiembre.

descartado las bandas (1, 2 y 6) y se ha visto que la imagen de julio que en principio era una escena óptima por su localización temporal y por sus características técnicas, no reúne condiciones para su utilización.

El siguiente paso consiste en crear una subescena delimitando la zona del acuífero que va a ser analizada.

Para unas dimensiones iniciales del cuarto de escena de 2.945 líneas y 3.600 pixels por línea, las subescenas con la zona de estudio tienen un tamaño:

- Escena de abril: 2.486 líneas y 3.232 pixels por línea (foto 1).
- Escena de agosto: 2.486 líneas y 3.000 pixels por línea (foto 3).
- Escena de septiembre: 2.486 líneas y 3.076 pixels por línea (foto 4).

VII.3. REGISTRO DE LAS IMAGENES

Debido al modelo orbital del satélite Landsat 5, las escenas no se encuentran referenciadas geográficamente. Es necesario realizar la corrección de la imagen a un sistema de proyección, en nuestro caso a UTM. Esta adaptación nos permite: una rápida localización ya que la imagen se puede superponer sobre un mapa topográfico, la combinación de datos tomados en varias fechas y, por lo tanto, la posibilidad de realizar una clasificación multitemporal.

El registro se puede hacer directamente a coordenadas UTM o también sobre otra imagen referenciada previamente.

VII.3.1. Registro de la imagen a U.T.M.

El registro de una imagen a un sistema de proyección cartográfica como es el U.T.M., consiste en una transformación polinómica entre las coordenadas relativas de la escena Landsat y las coordenadas U.T.M., con el fin de ajustarla al sistema de proyección.

La imagen elegida para este tipo de registro ha sido la de agosto por su excelente calidad. Se han localizado un conjunto de puntos de referencia, denominados *puntos de control*, en la subescena de satélite y se han calculado sus coordenadas Landsat (línea y pixel) y sus coordenadas U.T.M. (Norte y Este). En la tabla 7.1 se recogen los puntos de control utilizados, los cuales se hallan repartidos por toda la subescena. El error standard en línea y pixel es menor de 22 metros, por lo tanto inferior al tamaño original del pixel (30 metros).

TABLA 7.1.
Puntos de control utilizados en el registro de la subescena de agosto a coordenadas UTM

GCP	Línea	Pixel	UTM Norte	UTM Este	Línea residual	Pixel residual
1	970	3.208	362050	533470	-16,9	14,9
2	2.913	2.866	309350	513950	-13,8	29,9
3	2.827	496	323950	447920	22,1	-36,1
4	1.229	458	368900	455100	-10,3	23,2
5	2.513	2.278	323600	499500	9,9	6,1
6	2.321	468	338200	449725	-53,3	-38,4
7	906	3.108	364400	530960	26,6	-21,0
8	1.230	459	368910	455120	32,8	20,3
9	2.876	434	322890	446000	17,4	32,1
10	1.800	3.073	339480	525400	-16,6	-21,0
11	1.422	1.492	358180	480500	-18,5	-9,5
12	2.296	3.078	325590	523020	20,6	-0,5

Orden de la transformada: 1
Error standard por pixel: 21,87454605
Error standard por línea: 22,25764275

Con estos datos se plantea el modelo de regresión lineal:

$$LX = f(UN, VE)$$

$$LY = f(UN, VE)$$

donde, LX es la coordenada X (línea) de la escena Landsat.
LY es la coordenada Y (columna) de la escena Landsat.
UN es la coordenada UTM Norte.
UE es la coordenada UTM Este.

Una vez ajustadas estas ecuaciones, el polinomio de transformación determina las coordenadas relativas a Landsat, de todos los puntos de la imagen, en función de las coordenadas UTM. En la corrección se utilizó un polinomio de primer grado.

Una vez registradas las dimensiones y coordenadas de los vértices de la subescena utilizada son los siguientes:

Mínimo Este	442025	pixel 1
Máximo Este	535000	pixel 3520
Mínimo Norte	4325000	línea 2441
Máximo Norte	4376000	línea 1

Para hacer más fácil la cuantificación de superficies, se ha remuestreado el tamaño del pixel a 25 por 25 metros. De esta forma, 16 pixels equivalen a 1 ha.

En la fotografía 5 se puede ver un detalle de la imagen antes (izquierda) y después (derecha) de ser corregida geoméricamente. En la fotografía 6 se ve la subescena de agosto ya corregida a UTM.

VII.3.2. Registro de imagen a imagen

Las imágenes de abril y septiembre se registraron directamente a la imagen de agosto, ya corregida a UTM. Así, se minimiza el error de registro y se optimizan las imágenes para la clasificación multitemporal.

Al igual que en el caso anterior, el registro imagen a imagen consiste en aplicar una transformación polinómica entre las coordenadas relativas (líneas y pixel) de las imágenes que se van a registrar. Se localizan puntos de control comunes en ambas imágenes. Las tablas 7.2 y 7.3 muestran los puntos de control empleados en el registro de la imagen de abril y septiembre respectivamente, utilizando agosto como imagen maestra.

En ambos casos, el registro se ha llevado a cabo con un error standard inferior a 0,5 pixels y 0,5 líneas, valores óptimos para la fase de clasificación multitemporal. La desviación espacial es menor de 1 pixel.

TABLA 7.2.
Puntos de control utilizados en el registro de la imagen de abril sobre la de agosto

GCP	Línea abril	Pixel abril	Línea agosto	Pixel agosto	Línea residual	Pixel residual
1	2781	636	6976	1834	0,2	-0,2
2	968	3395	5510	5297	0,0	0,0
3	936	1459	5077	3134	0,5	-0,2
4	1830	600	5902	1989	-0,3	0,4
5	2850	2071	7348	3428	0,1	-0,1
6	2045	3184	6674	4840	-0,1	-0,1
7	1023	642	5006	2201	-0,3	0,1
8	2539	3307	7253	4877	-0,1	0,2

Orden de la transformada: 1
Error standard por pixel: 0,17544182
Error standard por línea: 0,20475711

TABLA 7.3.
Puntos de control utilizados en el registro de la imagen de septiembre sobre la de agosto

GCP	Línea septiembre	Pixel septiembre	Línea agosto	Pixel agosto	Línea residual	Pixel residual
1	1245	463	5251	2114	0,3	-0,1
2	1964	480	6060	1986	-0,4	0,0
3	2932	1241	7302	2641	0,1	0,2
4	2847	1928	7348	3428	0,3	-0,3
5	2236	3242	6932	5026	-0,4	-0,2
6	866	1500	5039	3354	0,3	-0,1
7	1000	674	5019	2401	-0,4	0,2
8	2600	3216	7335	4923	-0,2	0,4
9	2814	439	7005	1766	0,1	0,0
10	699	3168	5194	5258	0,0	0,0
11	623	3194	5114	5303	-0,1	0,3
12	1488	3192	6084	5123	0,5	-0,4

Orden de la transformada: 1
Error standard por pixel: 0,21035229
Error standard por línea: 0,26240221

Para las tres subescenas, la interpolación se ha realizado por *el vecino más próximo* (*nearest neighbour*) puesto que lo que se pretende es realizar una clasificación multitemporal utilizando las tres fechas (Richards, 1986).

Si analizamos los histogramas de las bandas corregidas (fig. 7.6, 7.7, 7.8 y 7.9) y los comparamos con los de esas mismas bandas antes de ser corregidas geoméricamente, se puede ver cómo la distribución estadística de los niveles radiométricos permanece constante. Esta circunstancia es importante ya que nos indica que no hemos introducido variaciones radiométricas significativas en la imagen corregida, que pudieran modificar la respuesta espectral de los cultivos en el acuífero.

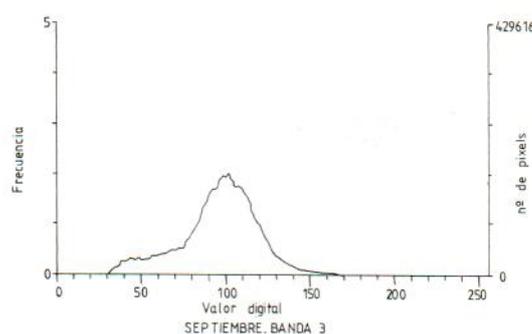
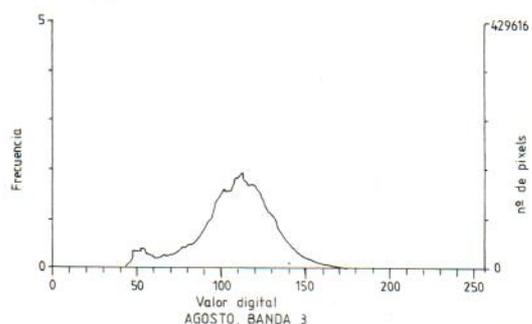
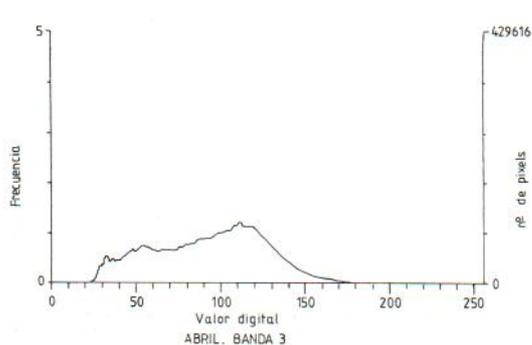


Figura 7.6.—Histogramas de la banda 3 corregida geoméricamente.

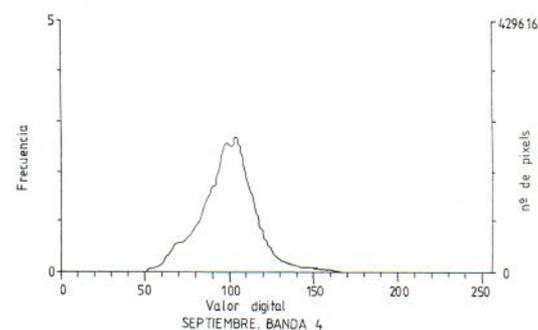
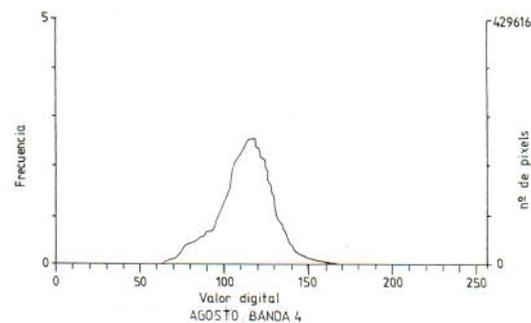
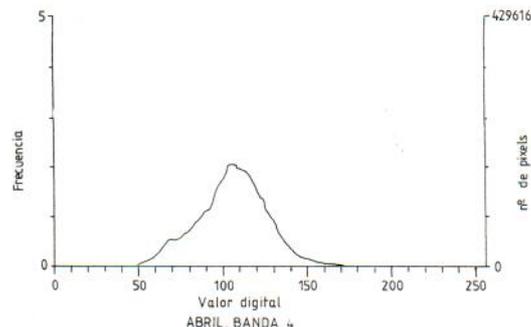


Figura 7.7.—Histogramas de la banda 4 corregida geoméricamente.

El volumen de información que vamos a manejar, ha pasado de 256 Megabytes cuando comenzamos el trabajo, a unos 104 Mb, lo que supone una reducción del 60% en las necesidades de capacidad en disco. Este descenso en el volumen de datos no supone una menor información útil para las necesidades de nuestro estudio, en cambio, es un ahorro considerable de tiempo de proceso (horas CPU).

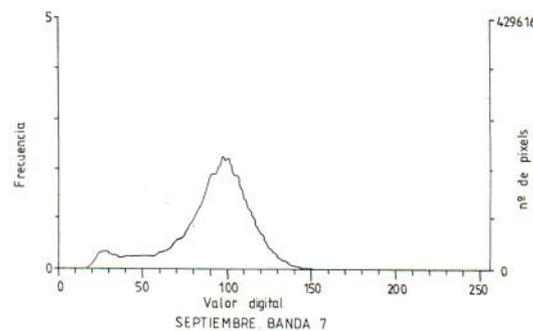
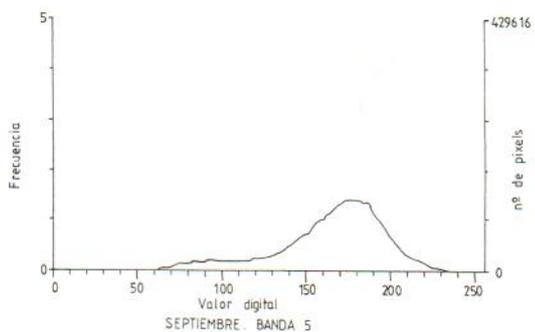
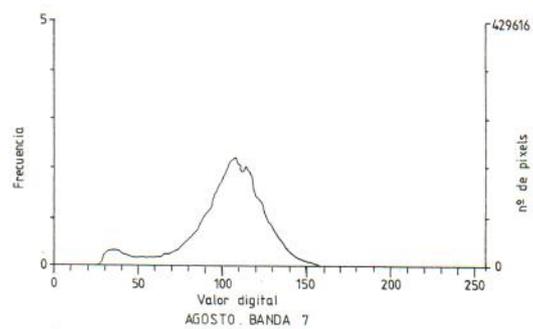
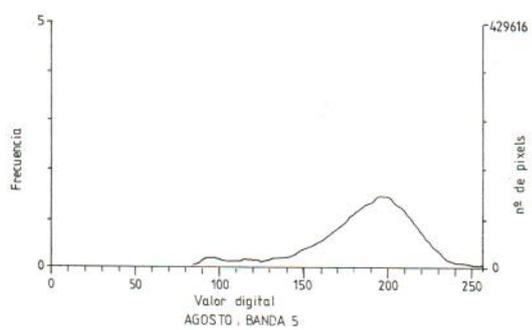
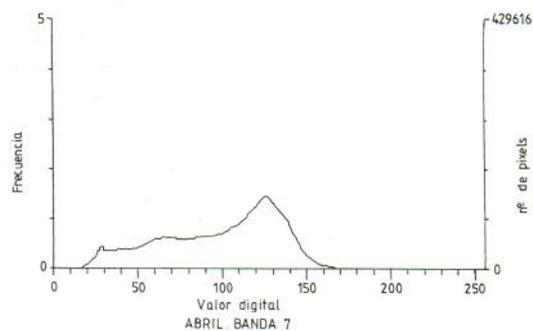
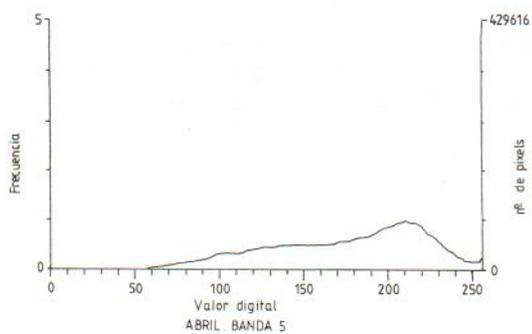


Figura 7.8.—Histogramas de la banda 5 corregida geoméricamente.

Figura 7.9.—Histogramas de la banda 7 corregida geoméricamente.

VII.4. ESTRATEGIA DE CLASIFICACION

Los objetivos que se quieren alcanzar en esta fase de clasificación son dos:

- i) *Clasificación de las superficies en regadío.*
- ii) *Clasificación de los cultivos de la zona en regadío.*

Cada uno de estos objetivos requiere una metodología de trabajo diferente.

VII.4.1. Clasificación de superficies en regadío

La identificación de las superficies en regadío para cada fecha, se ha realizado mediante un cociente entre dos bandas de infrarrojo (banda 4/banda 5) (Richards, 1986).

La sistemática seguida para cada fecha ha sido la siguiente: Se han visualizado las bandas 4 y 5, sin realzar y con 6 bits por fichero. Se han obtenido sus histogramas para conocer el nivel mínimo o de *corte* (CUTOFF LEVEL) y el nivel máximo o de *saturación* (SATURATION LEVEL) con los que realzar la imagen.

El cociente se ha generado mediante la función:

$$F\emptyset = GAIN \times (F4/F5) + OFFSET$$

donde

$F\emptyset$ es la banda resultante

F4 es la banda 4

F5 es la banda 5

GAIN y OFFSET son parámetros de normalización o reescalado.

Los valores de GAIN y OFFSET se modifican hasta que la *banda cociente* ($F\emptyset$) se adapta a las áreas en regadío, de acuerdo con los datos recogidos en campo.

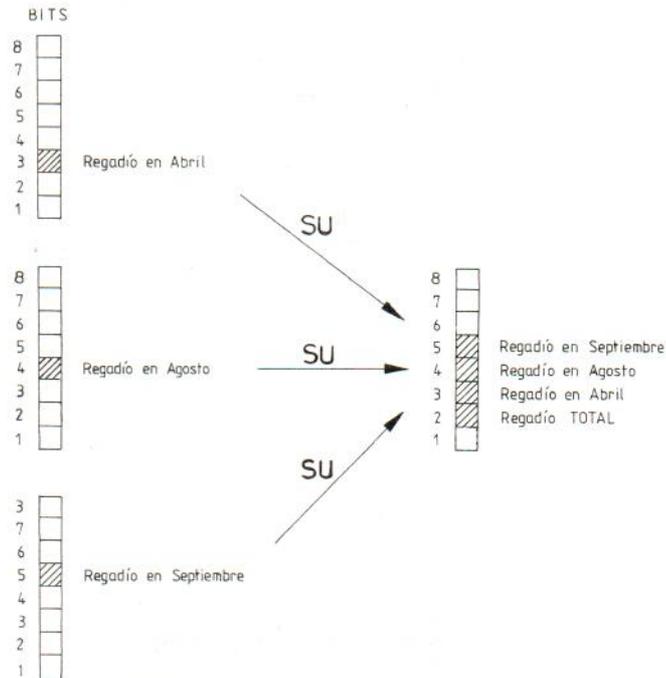


Figura 7.10.—Creación de un fichero con la clasificación de superficies en regadío de la zona.

Utilizando la función PIECEWISE LINEAR STRECH, la información que contiene este fichero se ha posicionado ocupando un sólo bit por pixel.

Para obtener la superficie total en regadío (RT), se han sumado las *bandas cociente* de cada fecha:

$$RT = ABRIL.F\emptyset + AGOSTO.F\emptyset + SEPTIEMBRE.F\emptyset$$

Cada fichero que contiene la superficie en regadío de una fecha tiene una dimensión de 8,5 Megabytes. Para optimizar la capacidad de disco, se ha creado un fichero de 8,5 Mbytes que contiene el área en regadío para cada fecha y el regadío total en la zona (fig. 7.10).

En las fotografías 7 a 9 pueden verse los resultados obtenidos para los meses de abril, agosto y septiembre. La fotografía 10 representa el regadío total identificado en la zona con las 3 fechas utilizadas.

VII.4.2. Clasificación de cultivos

La metodología seguida para la identificación de los cultivos existentes en el acuífero de la Llanura Manchega, ha sido una *clasificación mixta no supervisada/supervisada*. Los pasos que se han llevado a cabo han sido:

- 1) Utilización de la clasificación no supervisada para determinar las clases espectrales que pueden discriminarse en la imagen.
- 2) Utilización de los datos de campo para asociar *clases espectrales* con cubiertas vegetales (*clases de información*).
- 3) Creación de las *firmas espectrales* de los cultivos.
- 4) Clasificación de una zona test utilizando un algoritmo de máxima probabilidad.
- 5) Extensión de la clasificación a toda la imagen, con las *signaturas espectrales* obtenidas en la zona test.

Como la clasificación es un proceso iterativo, de sucesivas aproximaciones, hemos creado un *mosaico* con una dimensión de 400 líneas y 500 pixels por línea, donde realizar diversos ensayos.

Este mosaico está formado por 3 áreas situadas dentro del acuífero y una cuarta fuera de él (fotos 11 y 12).

Las tres áreas escogidas dentro del acuífero, corresponden a zonas donde se realizó la segunda campaña de campo: Daimiel (zona occidental del acuífero), Argamasilla de Alba (zona central) y Socuéllamos (zona oriental). El área fuera del acuífero está situada al Sur de Herencia. Esta última zona se ha tomado para comprobar la adecuación, al resto de la imagen, de las clasificaciones ensayadas.

El proceso de clasificación se ha iniciado con una clasificación no supervisada en la zona test. El usuario especifica el número de clases en que quiere diferenciar la imagen y las bandas que va a utilizar. Se crea un histograma n-dimensional y se registran *máximos* (puntos en el histograma que son más altos que sus vecinos más inmediatos). Con estos datos, se generan *signaturas espectrales* de máxima probabilidad.

En nuestro caso, se han creado 16 clases, utilizando las bandas 3 y 4 de todas las fechas (6 bandas en total).

En las fotografías 13 y 14 se puede ver el resultado de dos clasificaciones no supervisadas. En cada una se han creado 16 clases espectrales.

Utilizando los datos de campo, se han asociado las clases espectrales a distintos tipos de cultivos. En la figura 7.11 se ven las características radiométricas de los cultivos más importantes en el acuífero de la Llanura Manchega.

Los grupos que vamos a poder diferenciar son cuatro: maíz, alfalfa, cereal y otros. En este último quedan encuadrados aquellos cultivos como el melón, el girasol o la remolacha que pertenecen a una sola clase espectral.

Con la información obtenida en la clasificación no supervisada y utilizando los datos de verdad-terreno, se establece la respuesta o firma espectral de los cultivos. Esta, nos va a servir para realizar la clasificación supervisada de la imagen, diferenciando clases espectrales que coinciden con tipos de cultivos.

En la fotografía 15 se ven las parcelas que se han utilizado para generar la *signatura espectral* de los cultivos y en la tabla 7.4 el número de parcelas (*training areas*) por cultivo que han sido necesarias.

TABLA 7.4.
Número de parcelas utilizadas para crear la *signatura espectral* de los cultivos

Zona	Maíz	Alfalfa	Cereal
Daimiel	1	4	5
Argamasilla de Alba	2	1	3
Socuéllamos	4	1	2
TOTAL	7	6	10

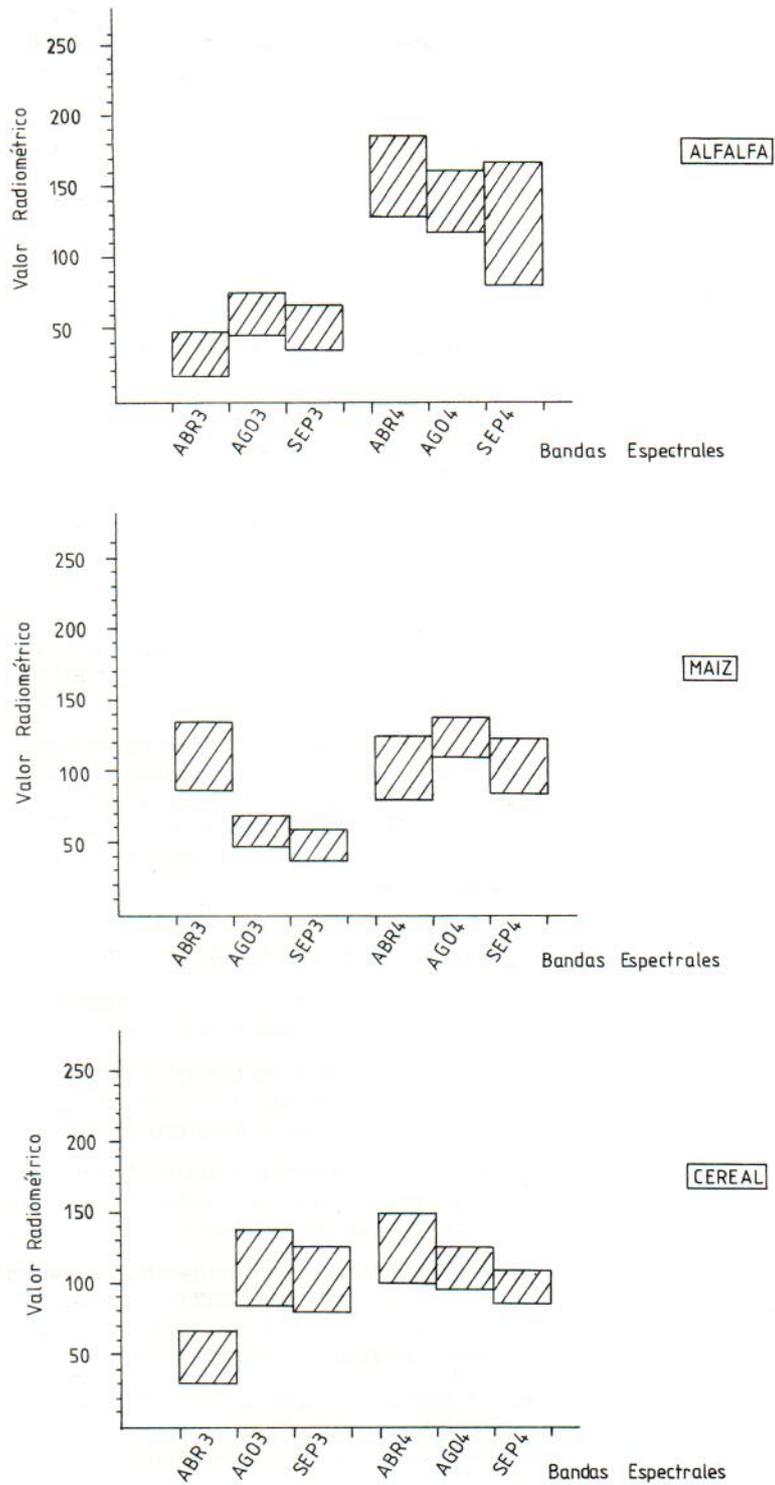


Figura 7.11.—Respuestas espectrales de los cultivos más significativos de la Llanura Manchega.

Se intentó generar también la firma espectral de la vid, pero los resultados de la clasificación no fueron satisfactorios, ya que si bien se adaptaban a parcelas que en efecto eran viñas, los pixels aparecían dispersos.

Como se puede ver en las tablas siguientes, las signaturas espectrales se han creado utilizando las bandas 3 y 4 de cada fecha.

TABLA 7.5.
Respuesta espectral de la alfalfa utilizada en la clasificación supervisada
Número de pixels muestreados: 525

	Banda	Media	Desviación standard		
ABR3		31,91	6,11		
ABR4		156,84	19,96		
AGO3		52,06	6,08		
AGO4		148,94	12,13		
SEP3		42,47	9,80		
SEP4		129,47	25,25		
COEFICIENTES DE CORRELACION					
	1	2	3	4	5
2	-0,349				
3	0,562	-0,328			
4	-0,175	0,418	-0,586		
5	0,164	-0,368	0,608	-0,826	
6	0,091	0,270	-0,351	0,813	-0,890

TABLA 7.6.
Respuesta espectral del maíz utilizada en la clasificación supervisada
Número de pixels muestreados: 1.579

	Banda	Media	Desviación standard		
ABR3		97,90	16,42		
ABR4		92,82	15,92		
AGO3		49,53	4,63		
AGO4		128,07	6,50		
SEP3		45,09	11,53		
SEP4		101,86	13,94		
COEFICIENTES DE CORRELACION					
	1	2	3	4	5
2	-0,875				
3	-0,086	-0,036			
4	0,066	0,016	-0,263		
5	-0,445	-0,413	0,511	0,126	
6	0,465	0,450	-0,156	-0,047	-0,715

TABLA 7.7.
Respuesta espectral del cereal
Número de pixels muestreados: 831

	Banda	Media	Desviación standard		
ABR3		45,99	7,70		
ABR4		118,92	10,71		
AGO3		108,20	12,54		
AGO4		105,75	8,21		
SEP3		94,89	7,33		
SEP4		86,96	7,14		
COEFICIENTES DE CORRELACION					
	1	2	3	4	5
2	-0,289				
3	0,290	-0,314			
4	0,423	-0,039	0,777		
5	-0,109	0,466	0,202	0,240	
6	0,145	0,475	-0,006	0,240	0,827

Estas tres firmas espectrales son las que se han utilizado para clasificar toda la subescena del acuífero de la Llanura Manchega. Los resultados de esta clasificación pueden verse en las fotografías 16 a 18. Representan sucesivamente, las parcelas identificadas como alfalfa, maíz y cereal.

La superposición de las dos clasificaciones que se han realizado, superficies en regadío y cultivos, nos ha permitido diferenciar 5 grupos de interés: alfalfa, maíz, cereal regadío, cereal seco y otros cultivos en regadío.

VII.5. RESULTADOS

La cuantificación de las superficies clasificadas se realiza automáticamente. En nuestro caso, esta cuantificación se lleva a cabo por término municipal y solamente para aquellas superficies incluidas dentro del acuífero.

Se han dibujado los límites del acuífero según IGME-IRYDA (1975), creando un fichero con la información digitalizada. Este fichero contiene por un lado, el borde y por otro, el área del acuífero (foto 19).

Igualmente, se han creado 3 ficheros con la información digitalizada de los términos municipales incluidos en la zona de estudio (foto 20).

La cuantificación se lleva a cabo mediante una matriz de confusión, en la que en abscisas aparecen los grupos diferenciados en la clasificación y en ordenadas, los 22 términos municipales considerados. El procesador contabiliza el número de píxeles que pertenecen a dos clases al mismo tiempo.

La cuantificación de la superficie en regadío en la zona de estudio, se ha realizado para cada una de las fechas que se han estudiado.

La tabla 7.8 recoge los resultados que se han obtenido por término municipal. Para cada fecha, se especifican los píxeles contabilizados y su valor sobre el terreno expresado en hectáreas (16 píxeles equivalen a 1 ha).

TABLA 7.8.
Superficie en regadío para las 3 fechas analizadas

Término municipal	Abril		Agosto		Septiembre	
	Píxeles	Hectáreas	Píxeles	Hectáreas	Píxeles	Hectáreas
Alcázar de San Juan	139.940	8.746,25	171.710	10.731,88	154.074	9.629,63
Alhambra	331	20,69	6	0,38	28	1,75
Arenas de San Juan	9.428	589,25	4.894	305,88	3.142	196,38
Argamasilla de Alba	39.021	2.438,81	78.036	4.877,25	66.441	4.152,56
Campo de Criptana	37.171	2.323,19	21.826	1.364,13	30.886	1.930,38
Daimiel	49.777	3.111,06	47.605	2.975,31	41.076	2.567,25
El Pedernoso	7.194	449,63	4.247	265,44	4.525	282,81
El Provencio	179	11,19	99	6,19	486	30,38
Herencia	25.924	1.620,25	31.505	1.969,06	26.860	1.678,75
Las Labores	4.089	255,56	6.156	407,25	4.863	303,94
Las Mesas	6.805	425,31	2.094	130,88	1.910	119,38
Las Pedroñeras	8.180	511,25	3.601	225,06	6.713	419,56
Manzanares	80.787	5.049,19	53.483	3.342,69	52.795	3.299,69
Mota del Cuervo	18.389	1.149,31	664	41,50	1.473	92,06
Pedro Muñoz	4.361	272,56	1.764	110,25	2.423	151,44
Puerto Lápice	5.607	350,44	2.727	170,44	1.848	115,50
Socuéllamos	17.348	1.084,25	17.652	1.103,25	18.605	1.162,81
Sta. M. de los Llanos	1.788	111,75	2.021	126,31	2.668	166,75
Tomelloso	10.780	673,75	14.442	902,63	17.128	1.070,50
Villarrobledo	22.878	1.431,13	18.709	1.169,31	17.959	1.122,44
Villarrubia de Ojos	7.180	448,75	2.012	125,75	2.717	169,81
Villarta de San Juan	17.003	1.062,69	17.456	1.091,00	14.261	891,31
TOTAL	514.180	32.136,25	503.069	31.441,81	472.881	29.555,06

Si superponemos las clasificaciones obtenidas para las tres fechas, obtenemos la superficie total en regadío que el satélite capta (foto 10). La tabla 7.9 recoge la cuantificación de la superficie total en regadío que ha sido registrada con las imágenes de abril, agosto y septiembre. Estos valores se dan por término municipal y en la tabla se incluye la superficie que se ha analizado y el porcentaje que representan las zonas en regadío respecto a la superficie considerada en el interior del acuífero.

TABLA 7.9.
Superficie total en regadío por término municipal

Término municipal	Superficie total regadío (ha)	Superficie analizada interior acuífero (ha)	% en regadío
Alcázar de San Juan	19.525,44	50.576,00	38,61
Alhambra	11,13	1.892,50	0,59
Arenas de San Juan	885,38	6.426,51	13,78
Argamasilla de Alba	7.642,88	24.734,32	30,90
Campo de Criptana	3.959,63	23.247,38	17,03
Daimiel	6.664,19	20.085,26	33,18
El Pedernoso	46,31	354,25	13,07
El Provencio	49,38	2.784,88	1,77
Herencia	3.437,39	9.981,70	34,44
Las Labores	724,95	3.448,01	21,03
Las Mesas	525,14	8.521,20	6,16
Las Pedroseras	890,56	11.655,94	7,64
Manzanares	9.058,07	36.558,70	24,78
Mota del Cuervo	565,38	7.433,45	7,61
Pedro Muñoz	292,12	7.972,06	3,66
Puerto Lápice	561,18	3.670,18	15,29
Socuéllamos	2.362,13	37.438,94	6,31
Sta. M. de los Llanos	49,57	459,57	10,79
Tomelloso	1.835,75	23.881,82	7,69
Villarrobledo	2.952,39	38.879,40	7,59
Villarrubia de Ojos	613,06	8.339,56	7,35
Villarta de San Juan	2.283,50	6.552,37	34,85
TOTAL	64.935,53	334.894,00	19,39

La tabla 7.10 recoge los resultados de la clasificación de cultivos realizada en el acuífero de la Llanura Manchega.

La tabla 7.11 contiene la superficie en hectáreas, de los cultivos en regadío que se han diferenciado. Esta información es de gran interés, ya que nos va a permitir evaluar las necesidades de agua de la zona, al aplicar unas dotaciones medias por cultivo ($m^3/ha/año$).

Durante el año 1987, El Servicio Geológico de Obras Públicas ha actualizado las dotaciones de agua para los cultivos de la Llanura Manchega. La tabla 7.12 recoge los valores considerados, comparándolos con los valores que se manejaban hasta el momento y que databan del año 1984.

Aplicando estas dotaciones a los cultivos identificados en nuestro estudio, obtenemos la demanda de agua para riego de la zona (tabla 7.13). Estas necesidades se cifran en $383 Hm^3$ para una superficie en regadío de 64.936 ha de un total de 334.894 ha analizadas dentro de los límites definidos para el acuífero.

Tan importante como la información numérica es la información visual que aporta la teledetección desde satélite.

Una vez corregidas geoméricamente, las imágenes se convierten en un documento temático. La información digital (registros, clasificaciones, máscaras, etc.) puede ser

TABLA 7.10.
Cuadro general de clasificación de superficies en el interior del acuífero

Término municipal	REGADIO										SECANO							
	Alfalfa		Maíz		Otros cultivos en regadío		Cereal regadío		Total		Cereal		Otros		Total		Total interior	
	Pixels	Hectáreas	Pixels	Hectáreas	Pixels	Hectáreas	Pixels	Hectáreas	Pixels	Hectáreas	Pixels	Hectáreas	Pixels	Hectáreas	Pixels	Hectáreas	Pixels	Hectáreas
Alcázar de San Juan . . .	38.591	2.411,94	89.564	5.597,75	104.044	6.502,75	80.208	5.013,00	312.407	19.525,44	95.185	5.949,06	401.624	25.101,50	496.809	31.050,56	809.216	50.576,00
Alhambra	0	0,00	0	0,00	38	2,38	140	8,75	178	11,13	3.629	226,81	26.473	1.654,56	30.102	1.881,37	30.280	1.892,50
Arenas de San Juan . . .	1.316	82,25	1.092	68,25	5.919	369,94	5.839	364,94	14.166	885,38	7.104	444,00	81.554	5.097,13	88.658	5.541,13	102.824	6.426,51
Argamasilla de Alba . . .	10.479	654,94	52.180	3.261,25	35.587	2.224,19	24.000	1.502,50	122.286	7.642,88	48.654	3.040,88	224.809	14.050,56	273.463	17.091,44	395.749	24.734,32
Campo de Criptana	7.936	496,00	10.697	668,56	27.822	1.738,88	16.899	1.056,19	63.354	3.959,63	33.525	2.085,31	275.079	17.192,44	308.604	19.287,75	371.958	23.247,38
Daimiel	4.662	291,38	29.821	1.863,81	31.589	1.974,31	40.555	2.534,69	106.627	6.664,19	37.955	2.372,19	176.782	11.048,88	214.737	13.421,07	321.364	20.085,26
El Pedernoso	0	0,00	0	0,00	60	3,75	681	42,56	741	46,31	1.209	75,56	3.718	232,38	4.927	307,94	5.668	354,25
El Provencio	0	0,00	36	2,25	568	35,50	186	11,63	790	49,38	2.132	133,25	41.636	2.602,25	43.768	2.735,50	44.558	2.784,88
Herencia	3.624	226,50	20.562	1.285,13	13.190	824,38	17.622	1.101,38	54.998	3.437,39	16.053	1.003,31	88.656	5.541,00	104.709	6.544,31	159.707	9.981,70
Las Labores	426	26,63	4.940	308,75	2.859	178,69	3.374	210,88	11.599	724,95	4.597	287,31	38.972	2.435,75	43.569	2.723,06	55.168	3.448,01
Las Mesas	1.306	81,63	70	4,38	2.643	165,19	4.383	273,94	8.402	525,14	15.206	952,25	112.701	7.043,81	127.937	7.996,06	136.339	8.521,20
Las Pedroseras	721	45,06	1.623	101,44	6.309	394,31	5.596	349,75	14.249	890,56	19.706	1.231,63	152.540	9.533,75	172.246	10.765,38	186.495	11.655,94
Manzanares	5.687	355,44	31.792	1.987,00	48.042	3.002,63	59.408	3.713,00	144.929	9.058,07	85.032	5.341,50	354.978	22.186,13	440.010	27.500,63	584.939	36.558,70
Mota del Cuervo	138	8,63	117	7,31	4.839	302,44	3.952	247,00	9.046	565,38	12.839	802,44	97.050	6.065,63	109.889	6.868,07	118.935	7.433,45
Pedro Muñoz	828	51,57	185	11,56	3.188	199,25	473	29,56	4.674	292,12	4.986	311,63	117.893	7.368,31	122.879	7.679,94	127.553	7.972,06
Puerto Lápice	45	2,81	1.640	102,50	3.337	208,56	3.957	247,31	8.979	561,18	4.809	300,56	44.935	2.808,44	49.744	3.109,00	58.723	3.670,18
Socuéllamos	5.347	334,19	6.872	429,50	15.958	997,38	9.617	601,06	37.794	2.362,13	46.445	2.902,81	514.784	32.174,00	561.229	35.076,81	599.023	37.438,94
Sta. M. de los Llanos . . .	0	0,00	4	0,25	75	4,69	714	44,63	793	49,57	1.312	82,00	5.248	328,00	6.560	410,00	7.353	459,57
Tomelloso	4.073	254,56	6.106	381,63	13.065	816,56	6.128	383,00	29.372	1.835,75	26.050	1.628,13	326.687	20.417,94	352.737	22.046,07	382.109	23.881,82
Villarrobledo	942	58,88	15.979	998,69	9.494	593,38	20.823	1.301,44	47.238	2.952,39	54.054	3.378,38	520.778	32.548,63	574.832	35.927,01	622.070	38.879,40
Villarrubia de Ojos	36	2,25	848	53,00	3.596	224,75	5.329	333,06	9.809	613,06	12.261	766,31	111.363	6.960,19	123.624	7.726,50	133.433	8.339,56
Villarta de San Juan . . .	3.008	188,00	11.249	703,06	9.874	617,13	12.405	775,31	36.536	2.283,50	12.941	808,81	55.361	3.460,06	68.302	4.268,87	104.838	6.552,37
TOTAL	89.165	5.572,84	285.377	17.836,07	342.096	21.381,04	322.329	20.145,58	1.038.967	64.935,53	545.714	34.107,13	3.773.621	235.851,34	4.319.335	269.958,47	5.358.302	334.894,00

TABLA 7.11.
Cuantificación de superficies de cultivos en regadío

Término Municipal	Alfalfa	Maíz	Otros cultivos	Cereal regadío	Total regadío
Alcázar de San Juan	2.411,94	5.597,75	6.502,75	5.013,00	19.525,44
Alhambra	0	0	2,38	8,75	11,13
Arenas de San Juan	82,25	68,25	369,94	364,94	885,38
Argamasilla de Alba	654,94	3.261,25	2.224,19	1.502,50	7.642,88
Campo de Criptana	496,00	668,56	1.738,88	1.056,19	3.959,63
Daimiel	291,38	1.863,81	1.974,31	2.534,69	6.664,19
El Pedernoso	0	0	3,75	42,56	46,31
El Provencio	0	2,25	35,50	11,63	49,38
Herencia	226,50	1.285,13	824,38	1.101,38	3.437,39
Las Labores	26,63	308,75	178,69	210,88	724,95
Las Mesas	81,63	4,38	165,19	273,94	525,14
Las Pedroseras	45,06	101,44	394,31	349,75	890,56
Manzanares	355,44	1.987,00	3.002,63	3.713,00	9.058,07
Mota del Cuervo	8,63	7,31	302,44	247,00	565,38
Pedro Muñoz	51,75	11,56	199,25	29,56	282,12
Puerto Lápice	2,81	102,50	208,56	247,31	561,18
Socuéllamos	334,19	429,50	997,38	601,06	2.362,13
Sta. M. de los Llanos	0	0,25	4,69	44,63	49,57
Tomelloso	254,56	381,63	816,56	383,00	1.835,75
Villarrobledo	58,88	998,69	593,38	1.301,44	2.952,39
Villarrubia de Ojos	2,25	53,00	224,75	333,06	613,06
Villarta de San Juan	188,00	703,06	617,13	775,31	2.283,50
TOTAL (ha)	5.572,84	17.836,07	21.381,04	20.145,58	64.935,53

TABLA 7.12.
Dotaciones de agua para riego en la Llanura Manchega (en m³/ha/año)

Tipo de cultivo	Dotación (1987)	Dotación (1984)
CEREALES	2.000	1.500
LEGUMINOSAS	5.000	5.000
TUBERCULOS	6.000	4.500
CULTIVOS INDUSTRIALES:		
— Remolacha	8.000	8.000
— Girasol y soja	4.000	3.000
— Otros	7.000	7.000
FORRAJEROS:		
— Alfalfa	9.000	9.000
— Maíz forrajero	4.000	4.000
HORTALIZAS:		
— Tomate	8.000	8.000
— Melón	6.000	5.000
— Berenjena y pimientos	8.000	12.000
— Otros	7.000	7.000
FRUTALES	5.500	5.500
VIÑEDO	1.500	1.500
MAIZ Y SORGO	8.000	7.000

TABLA 7.13.
Consumo de agua (Hm³) durante el año 1987

Término Municipal	Alfalfa	Maíz	Otros cultivos	Cereal regadío	Total (Hm ³)
Alcázar de San Juan	21,71	44,78	45,52	10,03	122,03
Alhambra	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03
Arenas de San Juan	0,74	0,55	2,59	0,73	4,61
Argamasilla de Alba	5,89	26,09	15,57	3,01	50,56
Campo de Criptana	4,46	5,35	12,17	2,11	24,10
Daimiel	2,62	14,91	13,82	5,07	36,42
El Pedernoso	0,00	0,00	0,03	0,09	0,11
El Provencio	0,00	0,02	0,25	0,02	0,29
Herencia	2,04	10,28	5,77	2,20	20,29
Las Labores	0,24	2,47	1,25	0,42	4,38
Las Mesas	0,73	0,04	1,16	0,55	2,47
Las Pedroseras	0,41	0,81	2,76	0,70	4,68
Manzanares	3,20	15,90	21,02	7,43	47,54
Mota del Cuervo	0,08	0,06	2,12	0,49	2,75
Pedro Muñoz	0,47	0,09	1,39	0,06	2,01
Puerto Lápice	0,03	0,82	1,46	0,49	2,80
Socuéllamos	3,01	3,44	6,98	1,20	14,63
Sta. M. de los Llanos	0,00	0,00	0,03	0,09	0,12
Tomelloso	2,29	3,05	5,72	0,77	11,83
Villarrobledo	0,53	7,99	4,15	2,60	15,28
Villarrubia de Ojos	0,02	0,42	1,57	0,67	2,68
Villarta de San Juan	1,69	5,62	4,32	1,55	13,19
TOTAL (Hm ³)	50,16	142,69	149,67	40,29	382,80

transferida en cinta magnética en un formato compatible y convertida en información analógica (negativo o positivo).

Al encontrarse georeferenciada la imagen, las salidas fotográficas coinciden con los límites del MTN, escala 1:50.000. Esta escala es la máxima a la que podemos llegar utilizando imágenes del sensor Thematic Mapper. Si vamos a escalas mayores, comienza a verse el pixel y se producen distorsiones de la imagen (efecto zoom).

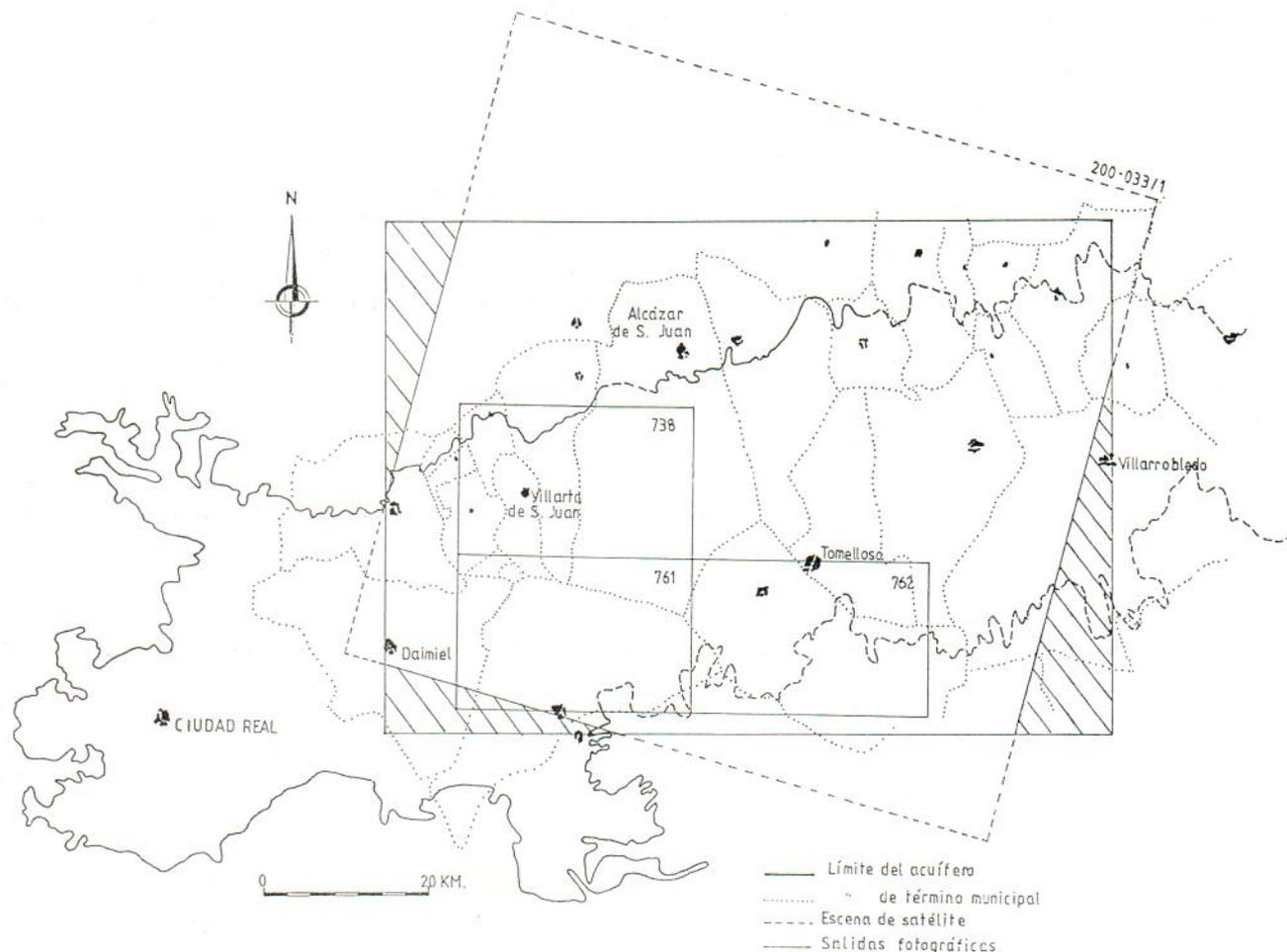


Figura 7.12.—Localización de las salidas fotográficas.

Para tener un *documento base* de trabajo, se ha escogido una imagen en *falso color* de las tres bandas del infrarrojo, aplicando los colores básicos según el orden:

Rojo	Banda 4
Verde	Banda 5
Azul	Banda 7

El proceso seguido ha sido:

- i) Corrección geométrica de la imagen según un sistema UTM.
- ii) Expansión del histograma de cada una de las bandas espectrales para aumentar el contraste de la imagen.
- iii) Aplicación de un filtro Laplaciano (filtro de paso alto).
- iv) Superposición de una malla UTM de 5 Km.
- v) Salida a cinta magnética para elaborar un *FILM WRITER*.

También se ha obtenido un documento fotográfico de la clasificación de cultivos. La fila o fichero con la clasificación se ha enmascarado utilizando la fila que contiene la superficie del acuífero. De esta forma, el área fuera del acuífero no se considera en la cuantificación.

Los documentos fotográficos finales se han realizado a partir de un positivo generado por impresión láser de los datos transferidos a cinta magnética (fotografías 21 a 26).

En la figura 7.12 se puede ver la situación de las salidas fotográficas que se han elaborado.

La calidad de la impresión de los datos digitales nos permite contar con documentos a escala 1:50.000 sin distorsiones y coincidiendo con los límites de los mapas topográficos nacionales.

VIII. DISCUSION Y CONCLUSIONES

VIII.1. EN RELACION AL ESTUDIO

Durante el año 1987, el Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas llevó a cabo el estudio, *Evolución de las extracciones y niveles piezométricos en el acuífero de la Llanura Manchega*. En él se analizaba la evolución del acuífero en los tres años del período 1984-87. Un capítulo importante de este estudio era la cuantificación de las extracciones de agua subterránea. Para ello, se aplicaba a las superficies de cultivos una dotación de agua específica de manera similar a como se ha hecho en nuestro estudio. La metodología seguida para conocer las superficies en regadío existentes en los años 1985, 86 y 87 era la realización de encuestas en cada municipio, visitando las Cámaras Agrarias Provinciales y algunas Cámaras Agrarias Municipales para contrastar datos.

En la tabla 8.1 se presenta la comparación de las extracciones de aguas subterráneas obtenidas en nuestro estudio utilizando datos de satélite y con las obtenidas por el método de las encuestas.

TABLA 8.1.
Evaluación de la extracción de aguas subterráneas por imágenes Landsat TM y por encuestas

Término Municipal	Landsat TM (Hm ³)	Superficie analizada (%)	Encuesta (Hm ³)
Alcázar de S. Juan	122,03	75	185,3
Arenas de S. Juan	4,61	100	4,4
Campo de Criptana	24,10	70	25,8
Daimiel	36,42	45	59,6
Herencia	20,29	41	35,4
Las Labores	4,38	100	4,4
Las Mesas	2,47	100	5,0
Las Pedroñeras	4,68	53	22,3
Manzanares	47,54	74	40,4
Pedro Muñoz	2,01	79	3,5
El Provencio	0,29	27	6,0
Puerto Lápice	2,80	67	2,8
Socuéllamos	14,63	100	27,9
Tomelloso	11,83	99	15,4
Villarrobledo	15,28	45	32,5
Villarrubia/Ojos	2,68	30	5,7
Villarta de S. Juan	13,19	100	12,0

La comparación se ha hecho en base a 16 términos municipales comunes a ambos estudios. La columna 3 representa el porcentaje de superficie del término municipal analizada en nuestro estudio, ya que tan sólo se han considerado aquellas áreas incluidas en los límites del acuífero tal y como fueron definidos por IGME-IRYDA (1975) (Ver figura 5.1.)

De los 16 términos municipales, tan sólo en 6 se ha analizado la totalidad de la superficie. En Arenas de San Juan los valores aportados por las encuestas indican unas extracciones de 4,4 Hm³, y los datos de satélite nos dan 4,6 Hm³. En Las Labores, las encuestas indican un consumo de 4,4 Hm³, frente a los 4,38 Hm³ de los datos de satélite. Algo similar ocurre en Villarta de S. Juan, donde las extracciones se cifran en 12 y 13,19 Hm³ para encuestas y datos Landsat, respectivamente. En cambio, tanto Las Mesas como Tomelloso presentan valores sensiblemente distintos, según la cuantificación haya sido hecha por uno u otro método. La explicación está posiblemente en la ubicación de ambos términos municipales en el acuífero, Las Mesas en el límite Nororiental y Tomelloso en el área regable del embalse de Pañarroya. Por su parte en Socuéllamos existe una diferencia de prácticamente el 50 % menos en los valores obtenidos por los datos de satélite.

Especial atención a 2 términos, Daimiel y Villarrobledo, que aunque no han sido analizados en su totalidad, se encuentran incluidos en los límites del acuífero. En Villarrobledo con el 45% de la superficie analizada (área incluida en la escena de satélite), se han cuantificado demandas de agua para riego de 15,28 Hm³, dada su situación en el acuífero podemos suponer una evolución similar en la parte que no ha

sido estudiada, por lo tanto, aplicando un coeficiente de corrección hasta llegar a la totalidad del término municipal, el consumo se podría cifrar en 34,0 Hm³, frente a los 32,5 contabilizados por el método de las encuestas.

En el caso de Daimiel, sin embargo, con una superficie analizada del 46 % del término municipal, el consumo se ha estimado en 36,42 Hm³. Si suponemos un incremento similar para el resto de la zona, las extracciones de agua estarían en torno a los 79,2 Hm³, frente a los 59,6 Hm³ cuantificados por el método de las encuestas. Esto supondría un aumento de 19,6 Hm³ sobre los valores que actualmente se manejan en la gestión del área, con el consiguiente agravamiento si cabe, de la situación del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.

En general, el resto de los términos municipales son muy difíciles de comparar, pero se puede apreciar que un análisis detenido de las características y situación geográfica de cada uno de los términos municipales, nos da desviaciones aceptables entre los dos rangos de valores. Estas diferencias son consecuencia de las distintas metodologías empleadas en los dos estudios.

Mención aparte para Argamasilla de Alba, que no ha sido incluido en la tabla 8.1, ya que en su mayor parte se riega con aguas superficiales procedentes del embalse de Peñarroya. Datos del SGOP (1988) indican que la superficie regada con aguas subterráneas en el término, es de 5.019 ha, con unas extracciones de 15,2 Hm³/a. Por otro lado, la superficie regada con aguas superficiales es de 5.200 ha, con un consumo de 39,5 Hm³/a, lo que supone 54,7 Hm³ utilizados en todo el término municipal.

En el tratamiento digital de los datos de satélite no se ha diferenciado entre cultivos dentro y fuera de la zona regable del embalse de Peñarroya. La cuantificación se ha realizado como agua total utilizada en el término municipal con destino a riego, obteniéndose unas necesidades de 50,56 Hm³/a.

El módulo de riego determinado en ambos estudios es diferente. Para el riego de 133.673 ha se han utilizado 623,8 Hm³ (SGOP, 1988), lo que representa un módulo de riego de 4.660 m³/ha/a. Mediante proceso digital, para una superficie de 64.935 ha en regadío, se han utilizado 382,80 Hm³, lo que supone un módulo de riego de 5.895 m³/ha/a. Este sustancial incremento es debido a que en el área geográfica de nuestro estudio es donde se ha producido el mayor desarrollo de cultivos con elevadas dotaciones de agua, principalmente maíz (8.000 m³/ha/a).

Se podría concluir esta discusión sobre los resultados del estudio diciendo que los valores obtenidos están dentro de un rango aceptable y suponen un punto más de contrastación para la mejor gestión de los recursos hídricos del área.

VIII.2. EN RELACION A LA METODOLOGIA

Probablemente, el primer paso a la hora de desarrollar una metodología basada en teledetección aeroespacial, sea la elección del satélite. En la actualidad, contamos con la posibilidad de utilizar imágenes procedentes de dos satélites de recursos naturales: el francés SPOT y el americano Landsat. Ambos presentan características propias y diferentes, que en la mayoría de las ocasiones, lejos de excluirse, se complementan.

Mientras SPOT tiene una mejor resolución espacial (20 metros en modo multiespectral y 10 metros en modo pancromático), presenta una menor resolución espectral (2 bandas en el visible y una en el infrarrojo próximo). Por el contrario, Landsat tiene una menor resolución espacial (30 × 30 metros), pero su resolución espectral es mayor, con 3 bandas en el visible, 3 en el infrarrojo reflejado y una en el infrarrojo térmico.

La elección del satélite está condicionada por los objetivos del estudio. Para evaluar la cantidad de agua subterránea extraída de acuífero, es necesario conocer la superficie de cultivos en regadío de la llanura. Por lo tanto, se necesita un alto poder de resolución espectral que permita diferenciar distintos tipos de cultivos.

La elección de Landsat TM se debió a tres factores:

- Mayor resolución espectral.
- Mayor repetitividad de las observaciones (cada 16 días).
- Continuidad en el registro de datos.

La utilización de Landsat TM nos condicionaba el tamaño de las parcelas a discriminar, mayores de 1 ha, y la escala gráfica quedaba limitada, en modo temático, a 1:50.000 como máximo.

Una vez elegido el satélite que mejor se adapte a nuestras necesidades, debemos escoger la imagen o imágenes que van a ser utilizadas. Esta elección está condicionada por:

- La disponibilidad de imágenes de la zona.
- La calidad radiométrica de los datos de las imágenes.
- El ciclo agrícola de los cultivos de la zona.
- El estado fenológico de los cultivos.
- El calendario de riegos.

Mientras los 3 primeros son generales a cualquier estudio de teledetección aeroespacial, los últimos son específicos de nuestro estudio y requieren un conocimiento previo de la zona de trabajo.

Un análisis multitemporal (varias fechas) se hace necesario cuando existen cultivos de invierno y cultivos de primavera. El uso de 2 fechas de pasada del satélite abril/mayo y julio/agosto, permite un seguimiento de los cultivos y superficies en regadío en la zona de la Llanura Manchega.

En cuanto al muestreo de campo, decir que el modelo aleatorio utilizado en este estudio ha dado buenos resultados. Sus principales características son su rapidez y sencillez de ejecución. Suministra información básica para la fase de clasificación y una base de datos actualizada para determinar la fiabilidad de los resultados obtenidos durante el tratamiento de las imágenes.

Cuando se inició el estudio, se había planteado la posibilidad de diferenciar 7 grandes grupos de cultivos existentes en la llanura. El análisis de la respuesta espectral que cada uno de estos cultivos ofrecía en la imagen, nos obligó a diferenciar solamente cuatro grupos: maíz, alfalfa, cereal y otros. Este último, engloba cultivos similares en cuanto a respuesta espectral.

La clasificación no supervisada suministra las clases de información que pueden ser diferenciadas en una imagen digital. A partir de estos datos, una clasificación supervisada de máxima probabilidad aporta los mejores resultados.

El grado de fiabilidad de la clasificación se puede establecer por medio de una matriz de confusión. En abscisas se consideran los resultados procedentes de la clasificación y en ordenadas, los datos del muestreo de campo (tabla 8.2). Para facilitar la

TABLA 8.2.
Matriz de confusión para establecer el grado de fiabilidad de la clasificación

	Clasificación									
	1	2	3	4	5	6	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
1	58	1	0	0	3	1	63	92,1	5	5
2	0	40	4	0	2	1	47	85,1	7	6
3	4	0	16	0	6	2	28	57,1	12	4
4	0	0	0	11	0	1	12	91,7	1	0
5	1	5	0	0	59	3	68	86,8	9	11
Total							218		84	26
							Fiabilidad estimada $184/218=84,4\%$			

- 1: Maíz
- 2: Cereal regadío
- 3: Alfalfa
- 4: Cereal seco
- 5: Otros
- 6: Sin clasificar
- (i): Número de parcelas de una clase según datos de campo
- (ii) Fiabilidad estimada de la clasificación (en %)
- (iii) Número de parcelas mal clasificadas según datos de campo
- (iv): Número de parcelas de una clase que pertenecen a otra clase.

comparación, se han considerado parcelas completas en lugar de grupos aislados de pixels. En la diagonal de la matriz aparece el número de parcelas que han sido clasificadas correctamente.

Las cuatro columnas añadidas a la matriz de confusión representan (i) el número de parcelas que sabemos que pertenecen a una clase de información en base a los datos de campo, (ii) la fiabilidad estimada en tanto por ciento para cada una de las clases diferenciadas. Para ello se divide el número total de parcelas correctamente clasificadas por el número total de parcelas identificadas según campo, como pertenecientes a dicha clase, (iii) es el número de parcelas que siendo de un tipo de cultivo han sido mal clasificadas, al quedar encuadradas en otras clases. Por último, (iv) es el número de parcelas que han sido localizadas en una clase determinada, pero sin embargo pertenecen a otra clase según la información procedente del muestreo de campo.

La comparación se ha hecho en base a los documentos cartográficos escala 1:50.000 elaborados con los resultados de la clasificación (fotografías 22, 24 y 26) y a los mapas catastrales con los que se recogió la información de campo en la primera campaña (figuras 6.1 a 6.6).

La fiabilidad de la clasificación se ha estimado en un 84,4 %, lo que puede considerarse como óptima, más si tenemos en cuenta que existen clases con una fiabilidad por encima del 90 %.

Dos recomendaciones para terminar. Por un lado, la necesidad de realizar estudios más profundos para la separación entre cereal de secano y cereal de regadío y por otro, un estudio específico para la clasificación de la viña y la diferenciación entre aquella que se riega y la que no.

Ambos proyectos deberían tener un mayor componente de campo para comparar y contrastar entre los datos del terreno y los de satélite.

Por último, tener en cuenta que no es posible extrapolar la respuesta espectral de los cultivos a otras zonas geográficas o a otros períodos de tiempo.

VIII.3. EN RELACION A LA TECNICA

La utilización de imágenes de satélite en la planificación y gestión supone un avance en el conocimiento global de un territorio.

Las principales características que avalan esta técnica son:

- *El seguimiento y control de extensas áreas.* Se cuenta con información desde 1972, momento en que se lanzó el primer satélite de la serie Landsat. La repetitividad de las observaciones proporciona una base de datos digitalizada con amplias aplicaciones a los recursos naturales. Por otra parte, la actualización de la cartografía se convierte en una herramienta básica en trabajos de planificación.
- *Objetividad.* Los resultados de la fotointerpretación o del tratamiento digital de las imágenes tienen como base los datos aportados por el satélite.
- *Rapidez.* La escala óptima de trabajo en teledetección es la de cuenca hidrográfica, provincia, Comunidad Autónoma o incluso a nivel nacional. Es decir, en su aplicación a grandes extensiones de terreno es donde se obtiene la mayor economía de tiempo y calidad de resultados. Hay que tener en cuenta que la unidad de trabajo en teledetección desde satélite es el cuarto de escena, con un área de más de 8.000 Km².
- *Bajo coste por hectárea.* Tradicionalmente, los estudios por teledetección se han considerado caros. Sin embargo, hay que decir que para grandes extensiones de terreno, el precio por hectárea analizada está entre 1 y 10 pesetas/ha.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERBERG, M. R. (1973): *Cluster Analysis for Applications*. Academic Press. New York.
- ANDREWS, H. C. y HUNT, B. R. (1977): *Digital image restoration*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- BERNSTEIN, R. (1983): *Image Geometry and Rectification*: in R. N. COLWELL (ed.). Manual of Remote Sensing. American Society of Photogrammetry. Falls Church, Va.
- BILLINGSLEY, F. C. (1983): *Data Processing and Preprocessing*: in R. N. COLWELL (ed.). Manual of Remote Sensing. American Society of Photogrammetry Falls Church, Va.
- BUSTAMANTE, J. (1988): *El subsuelo como agente depurador de vertidos líquidos contaminantes*: BIE, 49. SGOP. Madrid.
- CASTLEMAN, K. R. (1979): *Digital Image Processing*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, N. J.
- CNES (1983): *SPOT: Sistema de Teledetección por satélite*. Toulouse.
- COLWELL, R. N.; BREWER, W.; LANDIS, G.; LANGLEY, P.; MORGAN, J.; RINKER, J.; ROBINSON, J. M. y SOREM, A. L. (1963): *Basic matter and energy relationships involved in remote reconnaissance*: *Photogrammetric Engineering*, v. 29: 761-799.
- CUMMING, I. G. y BENNETT, J. R. (1979): *Digital Processing of Seasat SAT Data*: Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. Washington D.C.
- CHAVEZ, P. S. (1975): *Atmospheric, solar and MTF corrections for ERTS digital imagery*: Proceedings of Phoenix meeting, American Society of Photogrammetry.
- CHAVEZ, P. S. y BAUER, B. (1982): *An automatic kernel-size selection technique for edge enhancement: Remote Sensing of Environment*, 12: 23-38.
- DAINTY, J. C. y SHAW, R. (1976): *Image Science*. Academic Press. New York.
- DRURY, S. A. (1987): *Image Interpretation in Geology*. Allen & Unwin. London.
- ELACHI, Ch. (1981): *Spaceborne Radar Observation of the Earth Surface*: Proc. 15th Symp. on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. Michigan: 21-32.
- ELACHI, C.; BICKNELL, R.; JORDAN, R. L. y WU, C. (1982): *Spaceborne Synthetic Aperture Imaging Radars. Applications, Techniques and Technology*: Proc. IEEE, 70: 1174-1209.
- FINK, W. (1976): *Image coloration as an interpretation aid*: Proc. SPIE/OSA Conf. Image Process. 74: 209-215.
- FOSTER, B. C. (1984): *Derivation of Atmospheric Correction Procedures for Landsat MSS, with Particular Reference to Urban Data*: Int. Journal Remote Sensing, 5: 799-817.
- FREDEN, S. y GORDON, F. (1983): *Landsat satellites*: in COLWELL (ed.). Manual of Remote Sensing. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Va.
- GASKILL, J. (1978): *Linear systems, Fourier Transforms and Optics*. John Wiley and Sons. New York.
- GONZÁLEZ, R. C. y WINTZ, P. (1977): *Digital Image Processing*. Addison-Wesley. Mass.
- HARTIGAN, J. A. (1975): *Clustering Algorithms*. John Wiley and Sons. New York.
- HORD, R. M. (1982): *Digital Image Processing of Remotely sensed Data*. Academic Press. New York.
- HUNT, G. R. (1980): *Electromagnetic radiation: the communication cinto in Remote Sensing*: in SIEGAL, B. S. y GILLESPIE, A. R. (eds.). Remote Sensing in Geology. John Wiley. New York: 5-45.
- IGME-IRYDA (1975): *Los Recursos de agua en la Llanura Manchega, su utilización actual y posibilidades futuras*. Informe n.º 7. Ciudad Real.
- IGME-IRYDA (1979): *Investigación hidrogeológica de la Cuenca Alta y Media del Guadiana: Marco geográfico y económico, demanda y consumo de agua*. Informe Técnico n.º 1. Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas. Madrid.
- JACKSON, R. D. (1983): *Spectral indices in n-space*: Remote Sensing of Environment, 13: 409-421.
- JAMES, D. G.; ELLIOT, J. C.; YOUNG, D. y BISHOP, D. (1984): *Landsat D Prime*: Nasa News Release n.º 84-22. Florida, USA.
- JENSEN, S. K. y WALTZ, F. A. (1979): *Principal Components Analysis and Canonical Analysis in Remote Sensing*: Proc. American photogrammetric Soc. 45th Ann Meeting: 337-348.
- KING, R. B. (1981): *An evaluation of Landsat-3 RBV imagery for obtaining environmental information in Tanzania*: Mat. R. S. and Appl. London. Remote Sensing Society: 85-95.
- LILLESAND, T. M. y KIEFER, R. W. (1979): *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons. New York.
- LO, C. P. (1986): *Applied Remote Sensing*. Longman Inc. New York.
- LÓPEZ GARCÍA, J.; LÓPEZ-CAMACHO, B.; SAHUQUILLO, A. y GARCÍA DE LA TORRE, J. (1979): *Relaciones precipitación-infiltración de los embalses subterráneos de gran extensión superficial*.

- Aplicación de un modelo de simulación a la Llanura Manchega.* II Simposio Nacional de Hidrología. Tomo V. Pamplona: 109-123.
- LÓPEZ-CAMACHO, B. y GARCÍA DE LA TORRE, J. (1979): *Utilización del Balance Hídrico Global de la Cuenca Alta del Guadiana en la predicción de situaciones futuras.* II Simposio Nacional de Hidrología. Tomo V, Pamplona: 359-379.
- MAPA (1982): *Calendario de siembra, floración y recolección.* Secretaría General Técnica del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- MATHER, P. M. (1987): *Computer processing of remotely-sensed images.* John Wiley and Sons. London.
- MOIK, J. (1980): *Digital processing of remotely-sensed images.* NASA Special Publication 431, Washington DC.
- MOLINA BALLESTEROS, E. (1975): *Estudio del Terciario Superior y del Cuaternario del Campo de Calatrava. Ciudad Real.* Trab. sobre Neógeno-Cuaternario de la Secc. Paleón. de Vert. y Humana. Madrid.
- MOPU (1980): *Plan Hidrológico Nacional. Avance 80.* Grupo de Trabajo regional del Guadiana. Confederación Hidrográfica del Guadiana.
- NASA (1976): *Landsat data users handbook:* Goddard Space Flight Center, Document n.º 76SDS-4248 Greenbelt, Md.
- NASRABADI, N. M.; IBIKUNLE, J. O. y KING, R. A. (1984): *A new line detection technique in noisy images:* Proceedings of the Tenth Anniversary International Conference of the Remote Sensing Society, Satellite remote sensing-review and preview, Remote Sensing Society, University of Nottingham: 237-246.
- NIÑEROLA PLA, S.; TRAC, M. Q.; TORRENS, J.; BATLLE, A. y CALVIN, J. (1976): *El Embalse Subterráneo de la Llanura Manchega.* I Simposio Nacional de Hidrogeología. Tomo I. Valencia: 234-253.
- ORTI, F. (1981): *Optimal Distribution of Control Points to Minimize Landsat Image Registration Errors:* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 47: 101-110.
- PAVLIDIS, T. (1982): *Algorithms for graphics and image processing.* Springer-Verlag. Berlín.
- PÉREZ GONZÁLEZ, A. (1982): *Neógeno y Cuaternario de la Llanura Manchega y sus relaciones con la Cuenca del Tajo.* Tesis doctoral de la Fac. CC. Geológicas. UCM. Madrid.
- PERRY, C. R. y LAUTENSCHLAGER, L. F. (1984): *Functional equivalence of spectral vegetation indices:* Remote sensing of Environment, 14: 169-182.
- PETRIE, G. (1970): *Some considerations regarding mapping from earth satellites:* Photogrammetric Record, 6: 590-624.
- PRATT, W. K. (1978): *Digital image processing.* John Wiley and Sons. New York.
- RICHARDS, J. A. (1984): *Thematic Mapping from Multitemporal Image Data Using the Principal Components Transformation:* Remote Sensing of Environment, 16: 35-46.
- RICHARDS, J. A. (1986): *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction.* Springer-Verlag. Berlín.
- ROBINOVE, C. J. (1981): *The logic of multispectral classification and mapping of land:* Remote Sensing of Environment, 11: 231-244.
- ROSENFELD, A. y KAK, A. C. (1976): *Picture processing by computer.* Academic Press. New York.
- SABINS, F. F. (1978): *Remote Sensing. Principles and Interpretation.* Freeman. San Francisco.
- SGOP (1978): *Sobre la influencia en las Tablas de Daimiel en la extracción de aguas subterráneas en la Llanura Manchega.* Informe 11/78. Madrid.
- SGOP (1982): *Estudio de las demandas de agua y de las aportaciones superficiales y subterráneas de la cuenca alta del Guadiana. Informe n.º 1.* Informe 12/82. Madrid.
- SGOP (1982): *Modelo digital de simulación del embalse subterráneo de la Llanura Manchega. Informe n.º 2.* Informe 12/82. Madrid.
- SGOP (1982): *Análisis de alternativas de utilización de aguas superficiales y subterráneas de la Llanura Manchega. Informe n.º 3.* Informe 12/82. Madrid.
- SOP (1982): *Estudio de gestión del sistema de recursos hidráulicos en la cuenca alta del Guadiana. Informe n.º 4.* Informe 12/82. Madrid.
- SGOP (1982): *Estudio de la viabilidad de recarga artificial en el acuífero de la Llanura Manchega. Informe n.º 56.* Informe 12/82. Madrid.
- SGOP (1986): *Sobreexplotación del acuífero de la Llanura Manchega.* Informe 06/86. Madrid.
- SGOP (1988): *Evolución de las extracciones y niveles piezométricos en el acuífero de la Llanura Manchega.* Estudio 06/88. Madrid.
- SHEPPARD, J. J. (1969): *Pseudocolor as a means of image enhancement:* Am J. ophthalmol. Arch. Am. Acad. Optom 46: 735-754.

- SHLIEN, S. (1979): *Geometric Correction, Registration and Resampling of Landsat Imagery*: Canadian J. Remote Sensing, 5: 74-89.
- SILVA, L. F. (1978): *Radiation and Instrumentation in Remote Sensing*: in SWAIN y DAVIS (ed.). Remote Sensing: The Quantitative Approach. McGraw-Hill. New York.
- SLATER, P. N. (1980): *Remote Sensing: Optics and Optical Systems*. Addison-Wesley. London.
- SOHA, J. M.; GILLESPIE, A. R.; ABRAMS, M. J. y MADURA, D. P. (1976): *Computer techniques for geological applications*: Proceedings caltech/JPL Conference on Image Processing Technology, Data sources and Software for Commercial and Scientific Applications, Jet Propulsion Lab. SP43-30: 4.1-4.21.
- SWAIN, Ph. y DAVIS, S. M. (1978): *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. Mc. Graw Hill. New York.
- TARANIK, J. V. (1978): *Characteristics of the Landsat Multispectral Data System*. Open File Report: 78-187. US Geological Survey.
- TOMLINSON, R. F. (1972): *Geographical Data Handling*. vol. 1: International Geographical Union Commission on Geographical Data Sensing and Processing for the UNESCO/IGU. Second Symposium on Geographical Information Systems. Ottawa, Canadá.
- TOMIYASU, K. (1978): *Tutorial Review of Synthetic Aperture Radar (SAR) with Applications to Imaging of the Ocean Surface*: Proc IEEE, 66: 563-583.
- TRYON, R. C. y BAILEY, D. E. (1970): *Cluster Analysis*. McGraw-Hill. New York.
- TURNER, R. E. y SPENCER, M. H. (1972): *Atmospheric Model for Correction of Spacecraft Data*: Proceeding 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment. Ann Arbor. Michigan; 895-934.
- TUCKER, C. J. (1979): *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*: Remote Sensing of Environment, 10: 127-150.
- ULABY, F. T.; MOORE, R. K. y FUNG, A. K. (1982): *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*. vol. II. Reading Mass. Addison-Wesley. London.
- USGS. (1979): *Lansat Data Users Handbook*. Virginia.
- VANDERBRUGG, G. J. (1976): *Line detecton in satellite imagery*: IEEE. Transactions on Geoscience Electronics, GE-14: 37-44.
- Van RYZIN, J. (1977): *Classification and clustering*. Academic Press. New York.
- VERGER, F. (1982): *L'observation de la Terre par les satellites*: Que sais-je? n.º 1989. Paris.
- WIDGER, W. K. (1966): *Orbits, altitude, viewing geometry, coverage and resolution pertinent to satellite observations of the Earth and its atmosphere*: Proceedings of the 4th Symposium on R. S. of Environment: 484-537.

APENDICE FOTOGRAFICO

Foto 1.—Composición en falso color (4-5-7) del cuarto 1 de la escena 200-033 del Landsat 5 TM. La fecha de pasada del satélite corresponde al 14 de abril de 1987. Los cultivos aparecen en rojo.

Foto 2.—Composición en falso color (4-5-7) del cuarto 1 de la escena 200-033 Landsat 5 TM. La fecha de pasada del satélite es el 3 de julio de 1987. Nótese la existencia de *ruido* en el centro de la imagen.

Foto 3.—Composición en falso color (4-5-7) del cuarto 1 de la escena 200-033 Landsat 5 TM. La fecha de pasada del satélite corresponde al 4 de agosto de 1987. En rojo los cultivos de primavera de la zona.

Foto 4.—Composición en falso color (4-5-7) del cuarto 1 de la escena 200-033 Landsat 5 TM. La fecha de pasada del satélite es el 5 de septiembre de 1987.

Foto 5.—Detalle del ángulo inferior izquierdo de la imagen de agosto antes y después de ser registrada a coordenadas UTM.

Foto 6.—Composición en falso color (4-5-7) de la imagen de agosto corregida a UTM.

Foto 7.—Resultado de la clasificación de superficies en regadío para la imagen de abril.

Foto 8.—Resultado de la clasificación de superficies en regadío para la imagen de agosto.

Foto 9.—Resultado de la clasificación de superficies en regadío para la imagen de septiembre.

Foto 10.—Superficie total en regadío identificada en la Llanura Manchega utilizando imágenes Landsat TM (año 1987).

Foto 11.—Localización de las zona-test utilizadas en la fase de clasificación. Las dimensiones en el terreno son 5 × 6,25 Km.

Foto 12.—Mosaico realizado con las zonas-test.

Foto 13.—Resultado de una clasificación no supervisada. Se han diferenciado 16 clases espectrales. En la parte inferior izquierda de la imagen se ven pivots de maíz con distinta respuesta espectral.

Foto 14.—Clasificación no supervisada (16 clases espectrales).

Foto 15.—Localización de las parcelas (*training aéreas*) utilizadas en la clasificación supervisada final. (A) es alfalfa, (M) es maíz y (C) es cereal.

Foto 16.—Parcelas identificadas como alfalfa en la clasificación multitemporal.

Foto 17.—Parcelas identificadas como maíz en la clasificación multitemporal.

Foto 18.—Parcelas identificadas como cereal en la clasificación multitemporal.

Foto 19.—Digitalización de los límites del acuífero.

Foto 20.—Digitalización de los 22 términos municipales incluidos en el acuífero.

Foto 21.—Resultado de la clasificación de cultivos en regadío en el acuífero de la Llanura Manchega. En amarillo: alfalfa; en rojo: maíz; en verde: cereal regadío y en azul: otros cultivos en regadío. En gris: zona fuera del acuífero. Densidad de la malla UTM: 5 Km.

Foto 22.—Detalle de la clasificación de cultivos en regadío. La imagen coincide con la hoja 738 (Villarta de San Juan) del MTN. Leyenda: ídem. Malla UTM: 5 Km.

Foto 23.—Composición en falso color (4-5-7) de la imagen de agosto coincide con la hoja 761 (Llanos de Caudillo) del MTN. Malla UTM: 5 Km.

Foto 24.—Detalle de la clasificación de cultivos en regadío. La imagen coincide con la hoja 761 (Llanos del Caudillo) del MTN. Leyenda: ídem. Malla UTM: 5 Km.

Foto 25.—Composición en falso color (4-5-7) de la imagen de agosto. Coincide con la hoja 762 (Tomelloso) del MTN. Malla UTM: 5 Km.

Foto 26.—Detalle de la clasificación de cultivos en regadío. La imagen coincide con la hoja 762 (Tomelloso) de MTN. Leyenda: ídem. Malla UTM: 5 Km.

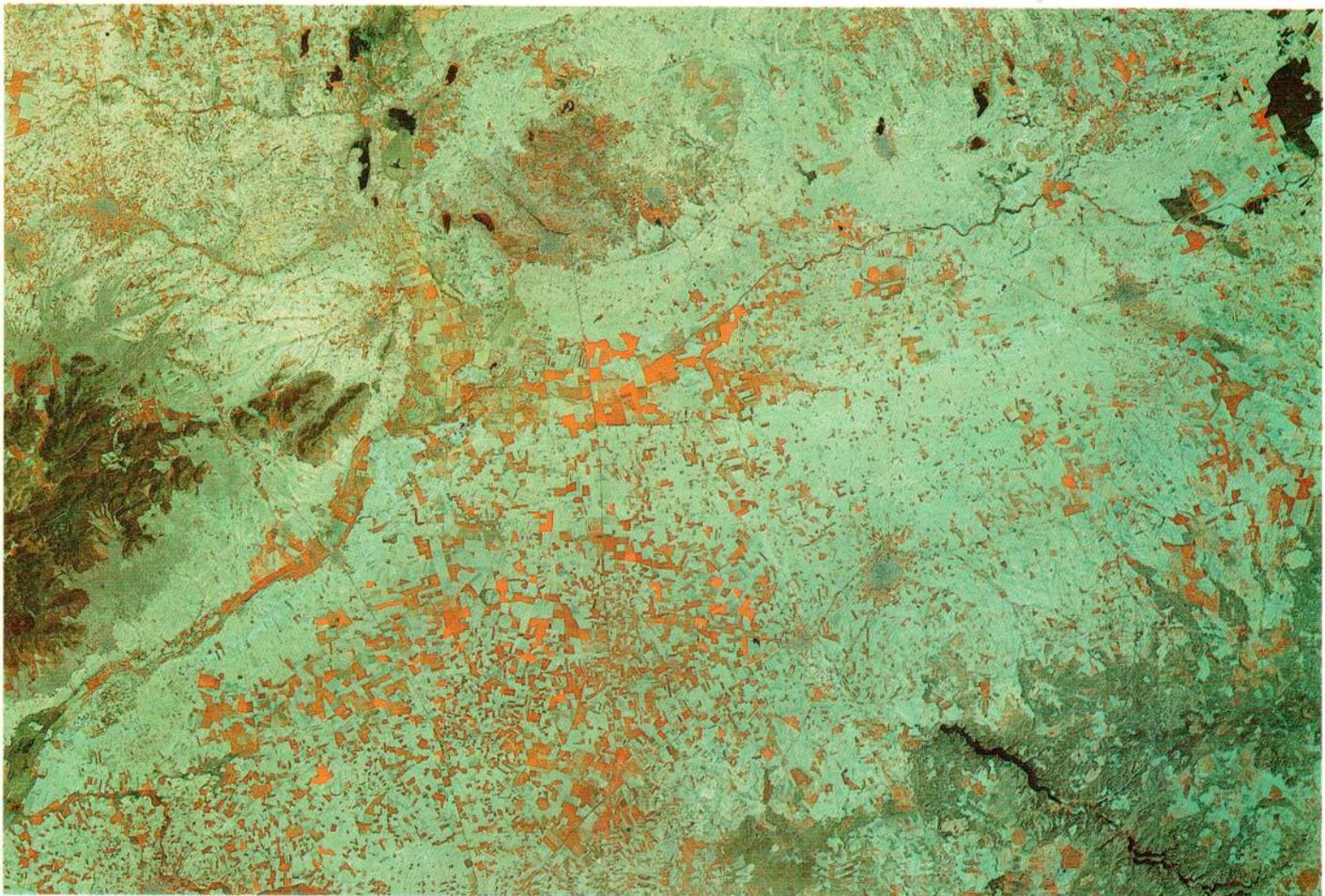


Foto 1.—Composición en falso color (4-5-7) del cuarto 1 de la escena 200-033 del Landsat 5 TM. La fecha de pasada del satélite corresponde al 14 de abril de 1987. Los cultivos aparecen en rojo.

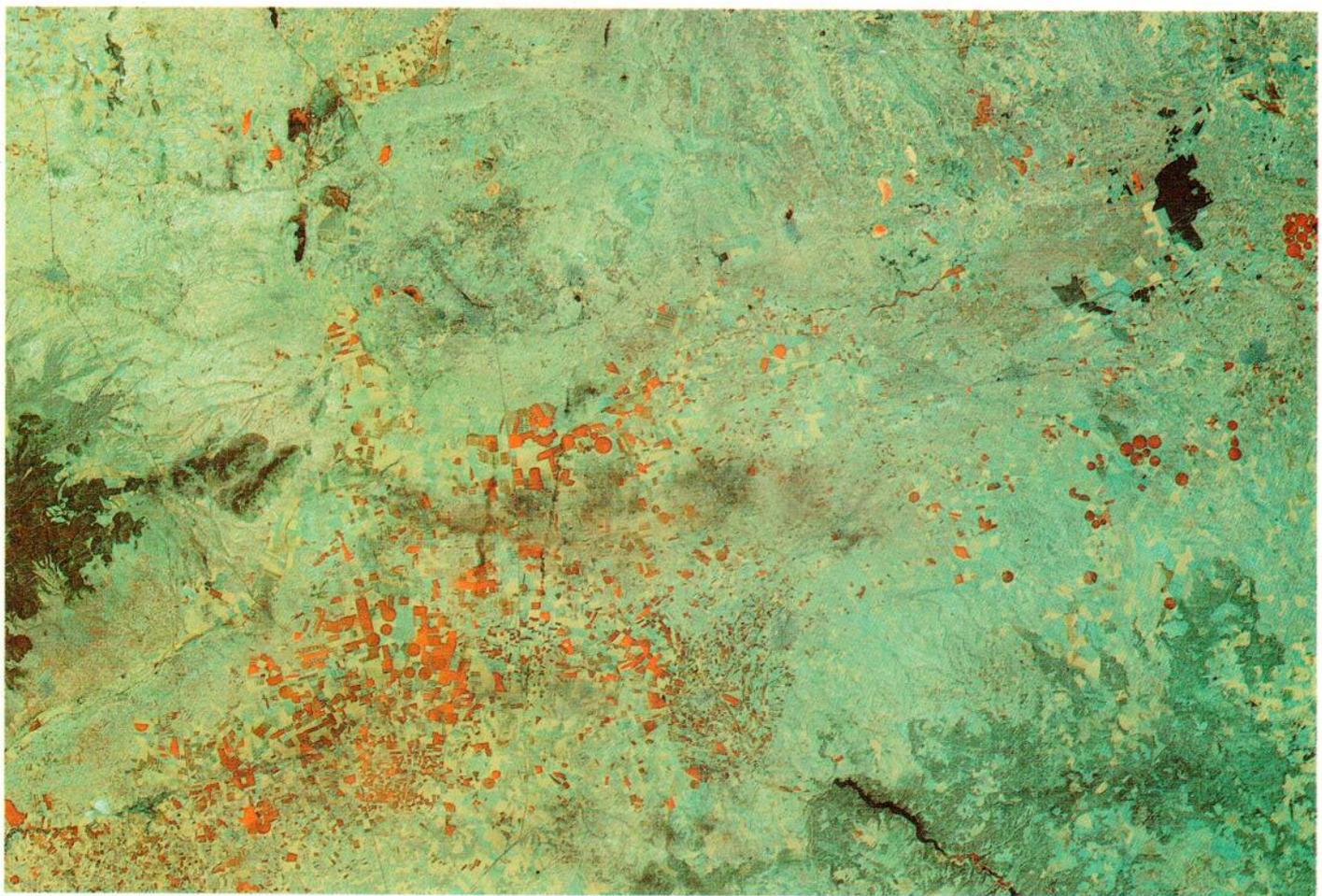


Foto 2.—Composición en falso color (4-5-7) del cuarto 1 de la escena 200-033 Landsat 5 TM. La fecha de pasada del satélite es el 3 de julio de 1987. Nótese la existencia de *ruido* en el centro de la imagen.



Foto 3.—Composición en falso color (4-5-7) del cuarto 1 de la escena 200-033 Landsat 5 TM. La fecha de pasada del satélite corresponde al 4 de agosto de 1987. En rojo los cultivos de primavera de la zona.

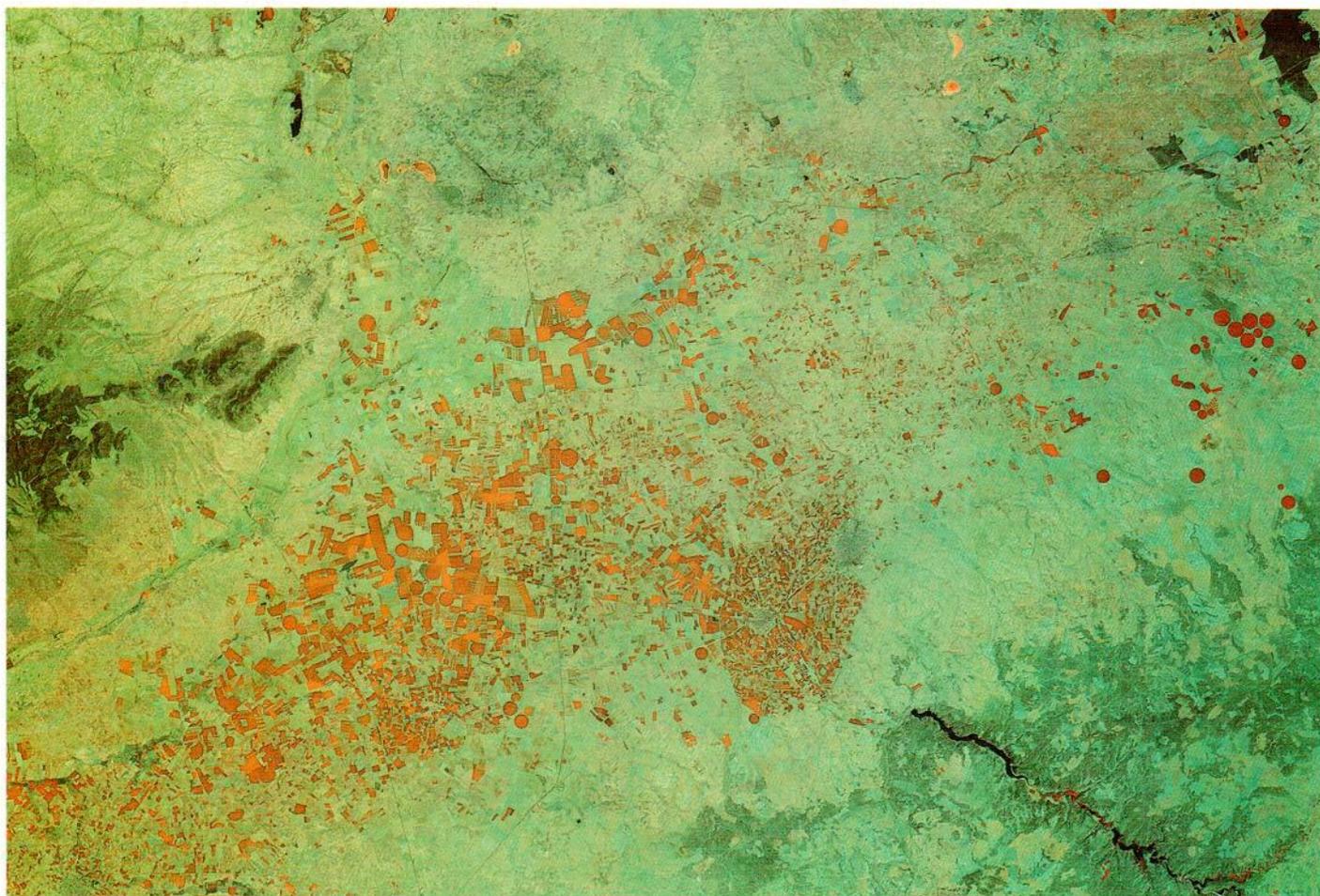


Foto 4.—Composición en falso color (4-5-7) del cuarto 1 de la escena 200-033 Landsat 5 TM. La fecha de pasada del satélite es el 5 de septiembre de 1987.

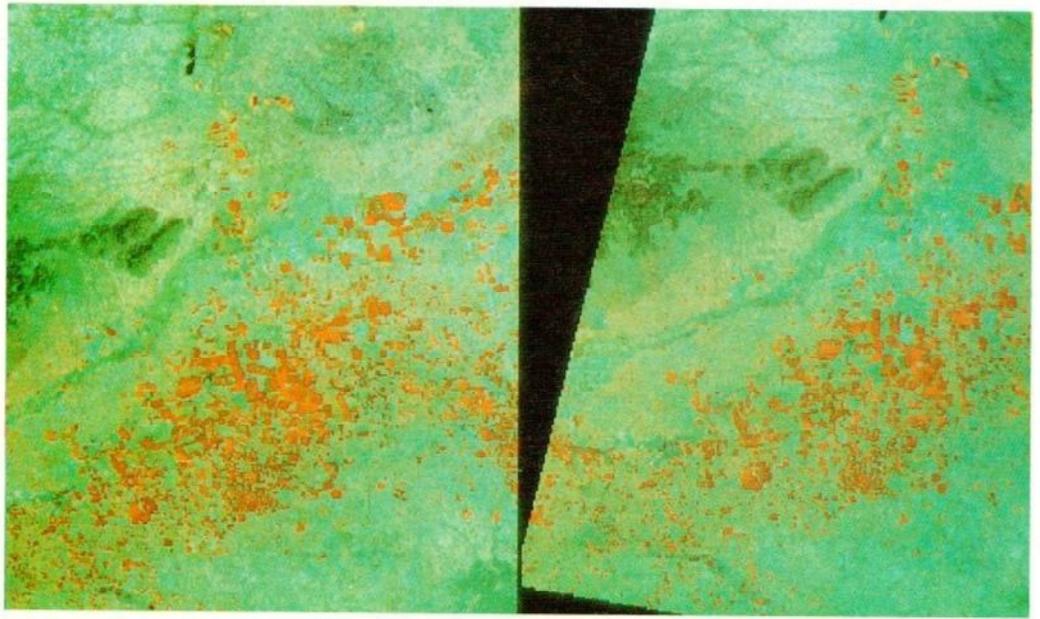


Foto 5.—Detalle del ángulo inferior izquierdo de la imagen de agosto antes y después de ser registrada a coordenadas UTM.



Foto 6.—Composición en falso color (4-5-7) de la imagen de agosto corregida a UTM.



Foto 7.—Resultado de la clasificación de superficies en regadío para la imagen de abril.

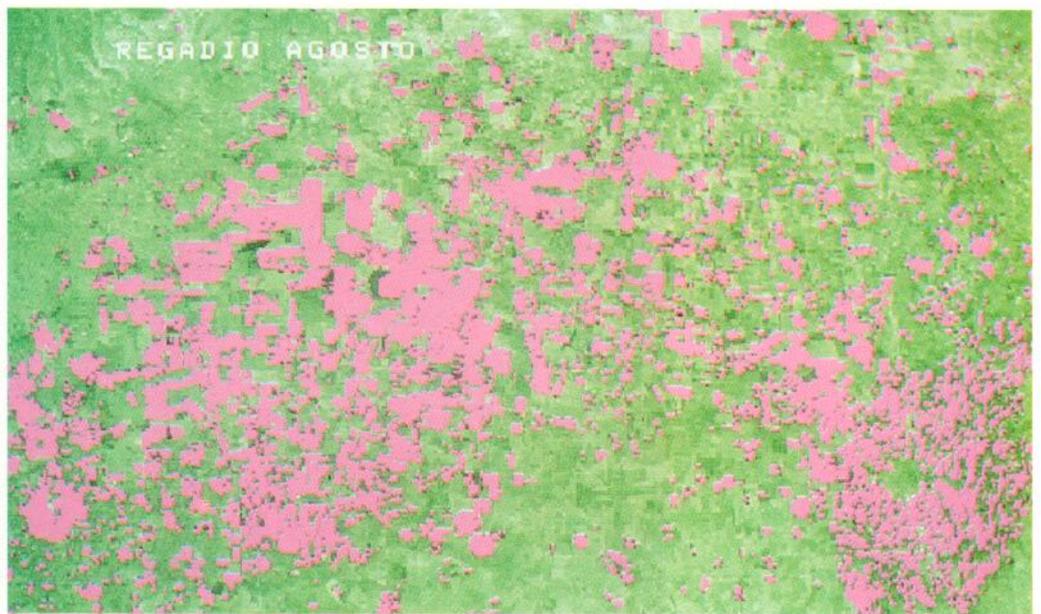


Foto 8.—Resultado de la clasificación de superficies en regadío para la imagen de agosto.

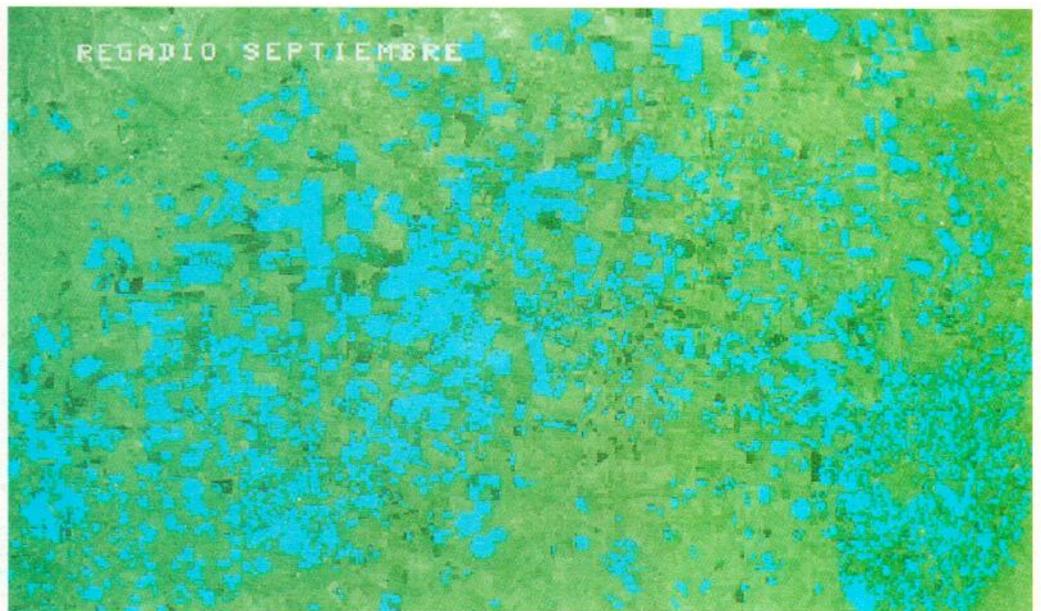


Foto 9.—Resultado de la clasificación de superficies en regadío para la imagen de septiembre.



Foto 10.—Superficie total en regadío identificada en la Llanura Manchega utilizando imágenes Landsat TM (año 1987).

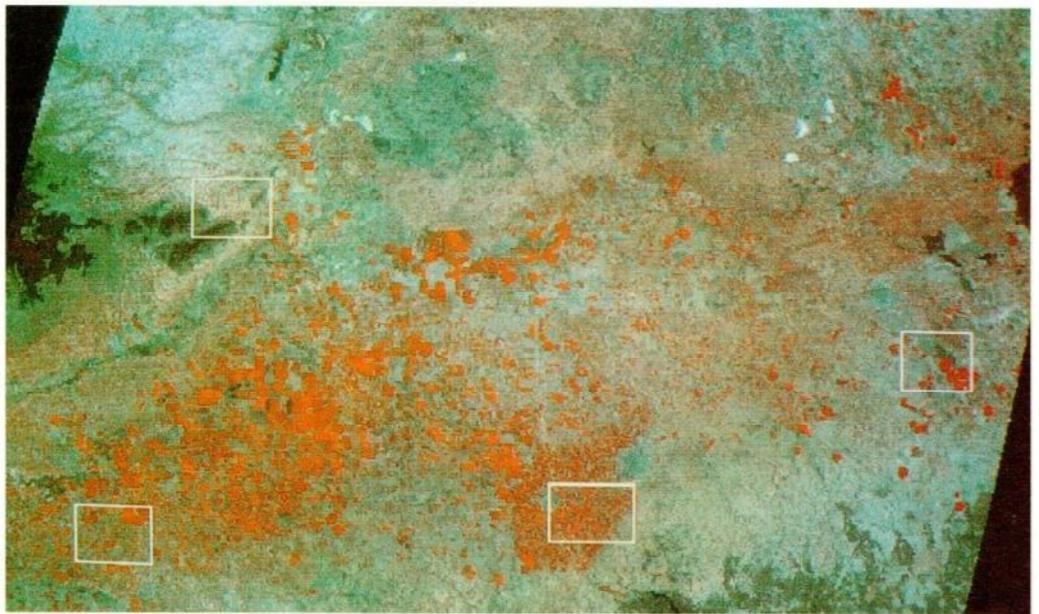


Foto 11.—Localización de las zona-test utilizadas en la fase de clasificación. Las dimensiones en el terreno son $5 \times 6,25$ Km.

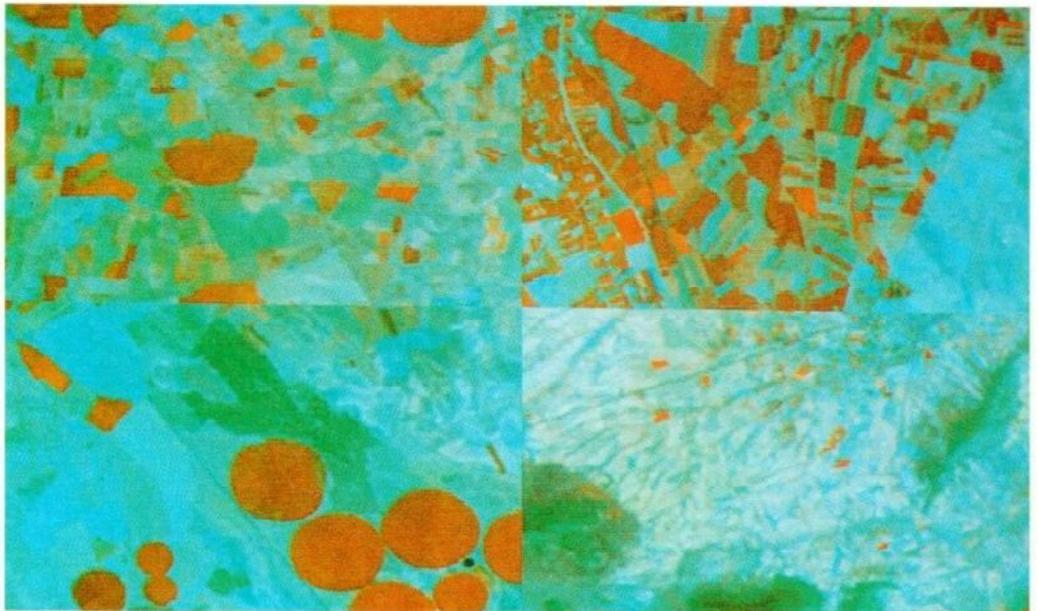


Foto 12.—Mosaico realizado con las zonas-test.



Foto 13.—Resultado de una clasificación no supervisada. Se han diferenciado 16 clases espectrales. En la parte inferior izquierda de la imagen se ven pivots de maíz con distinta respuesta espectral.



Foto 14.—Clasificación no supervisada (16 clases espectrales).

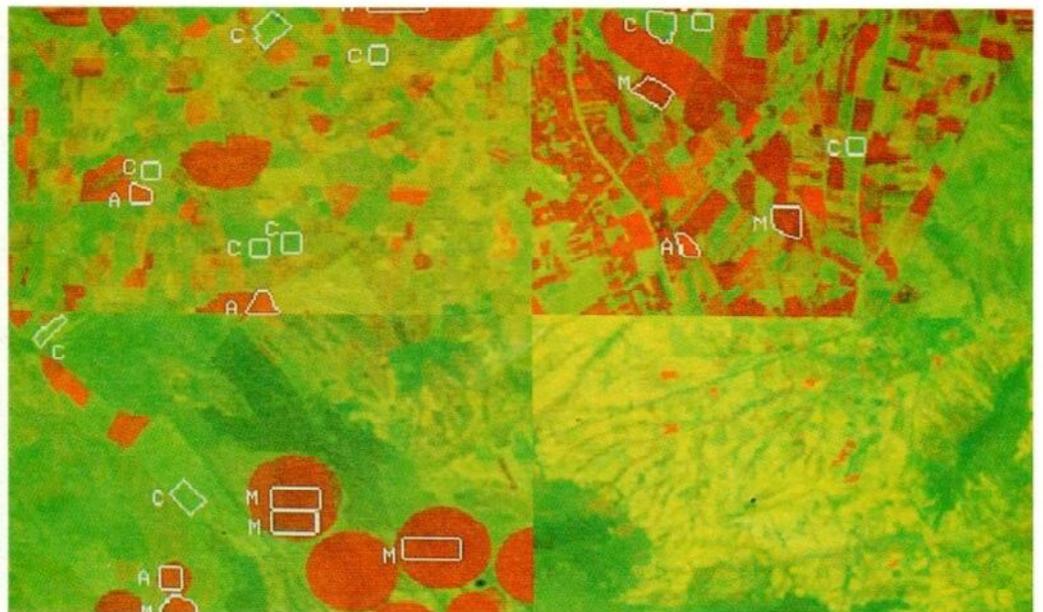


Foto 15.—Localización de las parcelas (*training aéreas*) utilizadas en la clasificación supervisada final. (A) es alfalfa, (M) es maíz y (C) es cereal.



Foto 16.—Parcelas identificadas como alfalfa en la clasificación multitemporal.

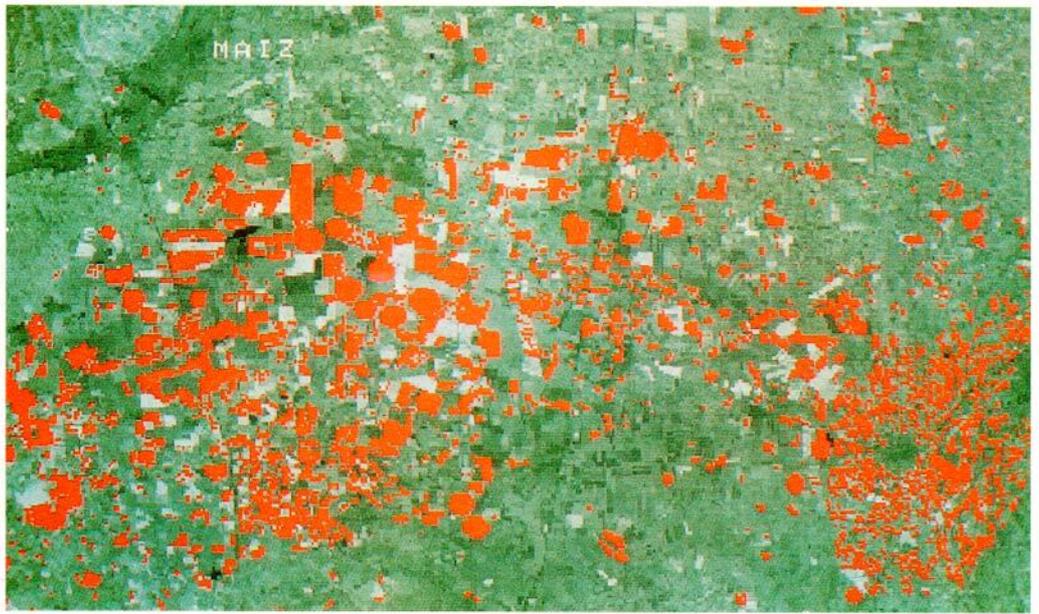


Foto 17.—Parcelas identificadas como maíz en la clasificación multitemporal.

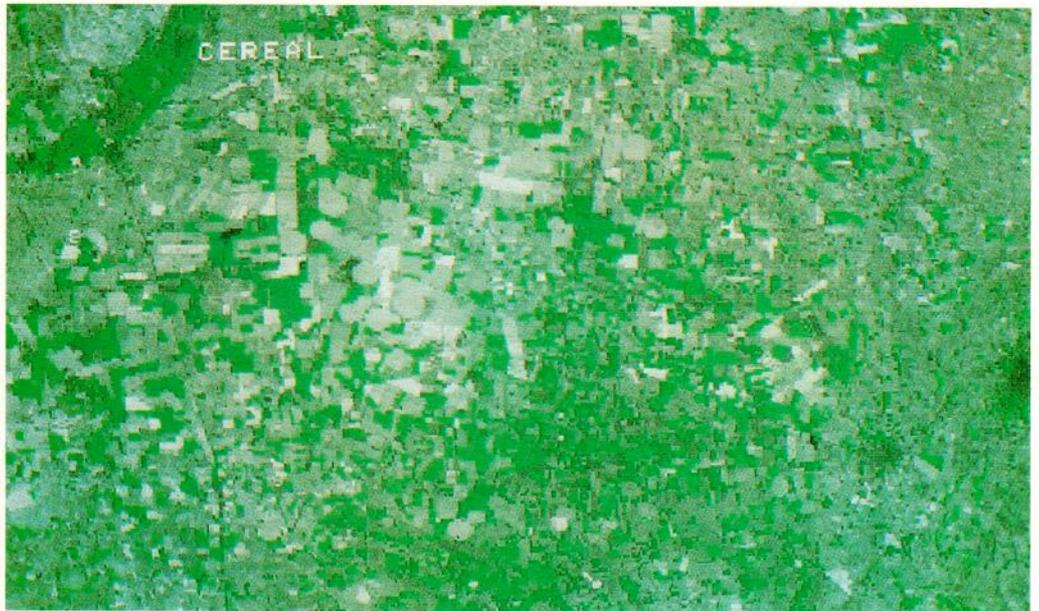


Foto 18.—Parcelas identificadas como cereal en la clasificación multitemporal.



Foto 20.—Digitalización de los 22 términos municipales incluidos en el acuífero.



Foto 19.—Digitalización de los límites del acuífero.

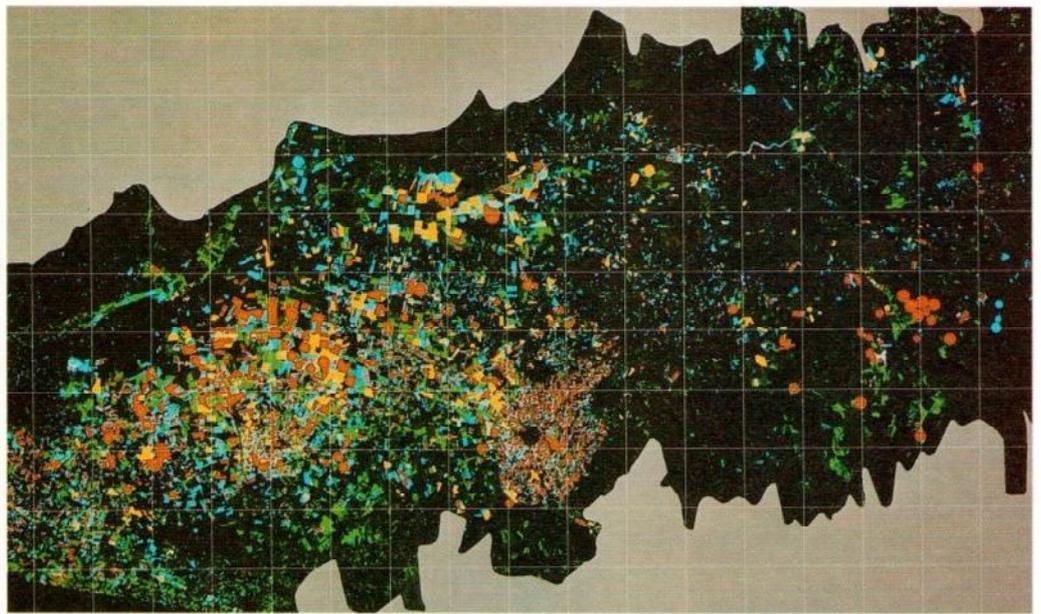


Foto 21.—Resultado de la clasificación de cultivos en regadío en el acuífero de la Llanura Manchega. En amarillo: alfalfa; en rojo: maíz; en verde: cereal regadío y en azul: otros cultivos en regadío. En gris: zona fuera del acuífero. Densidad de la malla UTM: 5 Km.

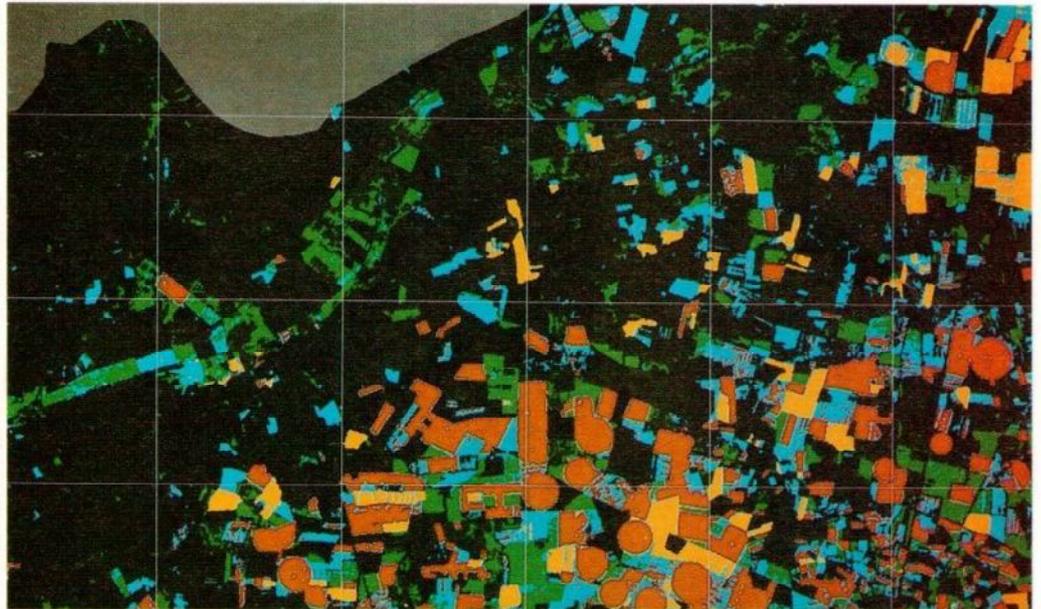


Foto 22.—Detalle de la clasificación de cultivos en regadío. La imagen coincide con la hoja 738 (Villarta de San Juan) del MTN. Leyenda: idem. Malla UTM: 5 Km.



Foto 23.—Composición en falso color (4-5-7) de la imagen de agosto coincide con la hoja 761 (Llanos de Caudillo) del MTN. Malla UTM: 5 Km.

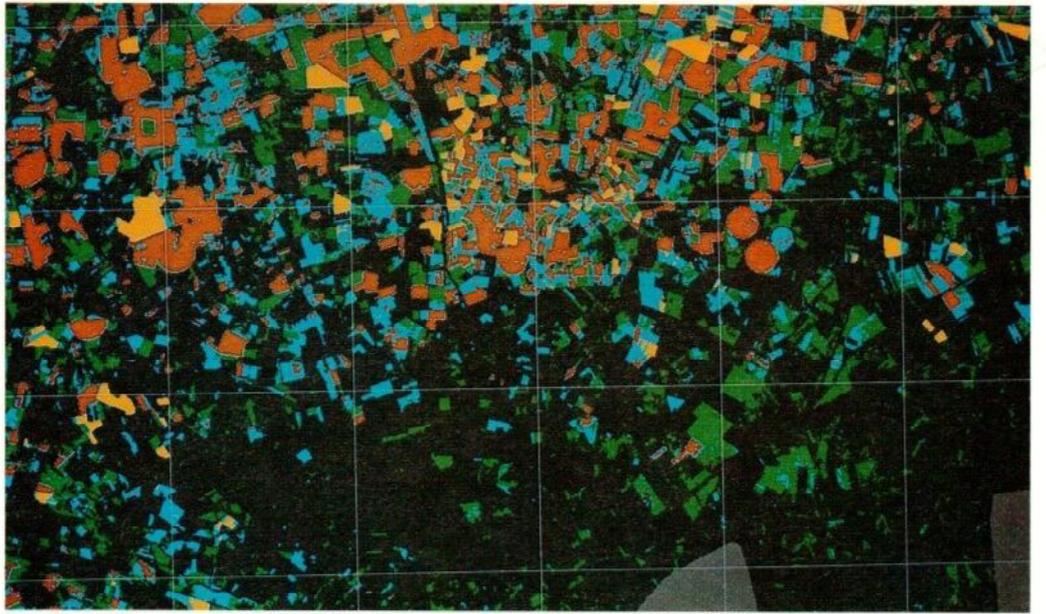


Foto 24.—Detalle de la clasificación de cultivos en regadío. La imagen coincide con la hoja 761 (Llanos del Caudillo) del MTN. Leyenda: idem. Malla UTM: 5 Km.



Foto 25.—Composición en falso color (4-5-7) de la imagen de agosto. Coincide con la hoja 762 (Tomelloso) del MTN. Malla UTM: 5 Km.

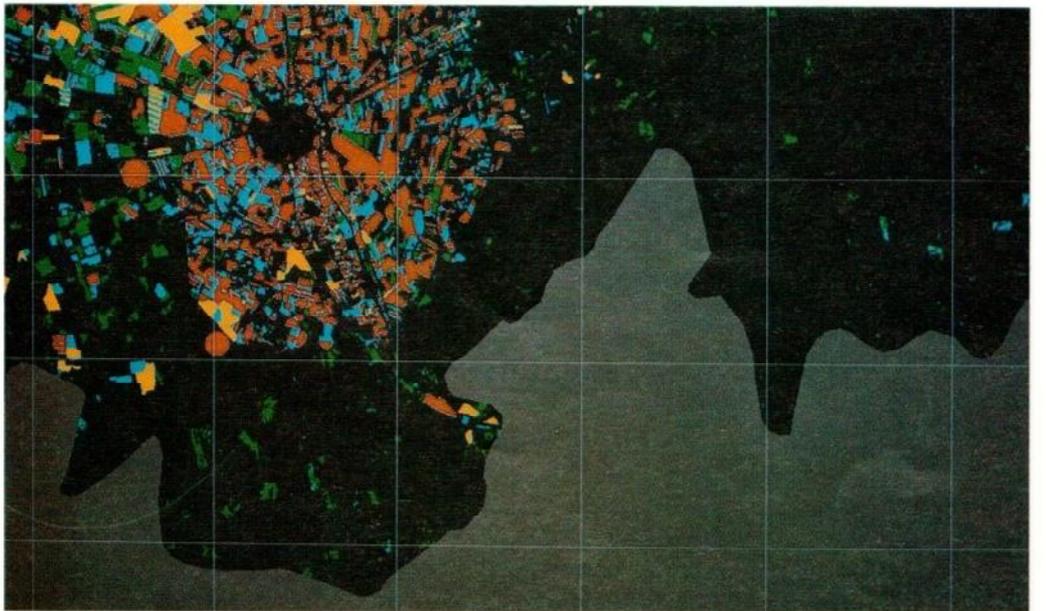


Foto 26.—Detalle de la clasificación de cultivos en regadío. La imagen coincide con la hoja 762 (Tomelloso) de MTN. Leyenda: idem. Malla UTM: 5 Km.

