



**ABRIR CAPÍTULO 2. (INICIO)**

## 2600 COMARCAS AGRARIAS

No es nuestro objetivo el análisis humano, económico o productivo de Castilla y León. Si nos hemos detenido tan detalladamente en los aspectos fisiográficos de Castilla y León es porque la teledetección, en cuanto técnica, suele atender a aspectos físicos y medioambientales. Pero no podemos olvidar que los espacios no son pura física; están habitados, vividos, evolucionan sobre un legado histórico, económico y cultural; a nuestro modo de entender, la geografía física, aunque enfoque su quehacer en las metodologías más técnicas y cuánticas, no puede dejar de ser humanista. En este sentido, recordamos con grata memoria las enseñanzas y el quehacer geográfico del Prof. J. Estébanez (†1997), *maestro de geógrafos e investigador fecundísimo*, como de él recordaba el Prof. R. Puyol (1998)<sup>166</sup>.

En definitiva, las técnicas de análisis geográfico son medios para comprender los espacios y las personas que los han formado. Todo análisis regional que se precie de tal debe desglosar los pormenores humanos y económicos de ese espacio. A pesar de esta afirmación, nuestro estudio no lo incluye, para no alargar excesivamente el análisis de las bases sobre las que recae la aplicación, que son de índole física y metodológica, y no económica o humana.

Hemos incluido en nuestras fuentes un elemento de carácter humano, económico-administrativo y relativo a la explotación agrícola: las comarcas agrarias. La aplicación que haremos de las imágenes de satélite recae sobre las cubiertas naturales y por eso hemos desglosado tan pormenorizadamente las cubiertas vegetales de la Comunidad. No nos detendremos en aspectos relativos a la producción agrícola y las derivaciones económicas de la misma al presentar las comarcas agrarias a pesar de que las superficies de Castilla y León están tan modificadas por la agricultura.

La tabla 2.12 y la figura 2.30 sintetizan la distribución de comarcas agrarias de Castilla y León. Nuestra intención al incluir las comarcas agrarias en este estudio ha sido estrictamente instrumental, como un componente más del SIG de datos sobre Castilla y León y que posteriormente nos ayudará ubicar el análisis de la serie multitemporal de imágenes de satélite. La elaboración de la cartografía de las comarcas agrarias se ha realizado a partir de la información de municipios contenida en la BCN 200. Tomamos como fuente de comarcalización la aplicada por el MAPA (1985)<sup>167</sup> en su cartografía de cultivos y aprovechamientos a escala 1:200.000.

---

166 Puyol Antolín, R., (1998). In memoriam. José Estébanez Álvarez (1941-1997). *Anales de Geografía*. Universidad Complutense. 18, 9-10. Servicio de Publicaciones, Universidad Complutense. Madrid

167 MAPA (1985). Mapa de cultivos y aprovechamientos. Escala 1: 200.000. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Dirección General de Producción Agraria. Madrid. (Cartografías y memorias de las provincias de Ávila, Burgos, León, Palencia, Salamanca, Segovia, Soria, Valladolid y Zamora).

La utilización de esta fuente de datos introdujo datos vectoriales en nuestro estudio y por tanto un nuevo elemento conceptual y de tratamiento técnico de los datos. Se construyeron los polígonos de las 59 comarcas agrarias seleccionando los municipios e integrándolos en un nuevo polígono al que se asignó su categoría, etiquetas de identificación y topología propia y conjunta.

Nombre				Nombre			
AVILA	AV 01	01	Arévalo de Madrigal	SEGOVIA	SE 01	40	Cuellar
	AV 02	02	Ávila		SE 02	41	Sepúlveda
	AV 03	03	Barco de Ávila-Piedrahita		SE 03	42	Segovia
	AV 04	04	Gredos				
	AV 05	05	Bajo Alberche				
	AV 06	06	Valle del Tietar				
BURGOS	BU 01	07	Merindades	SORIA	SO 01	43	Pinares
	BU 02	08	Bureba - Ebro		SO 02	44	Tierras Altas - Valle de Tera
	BU 03	09	Demanda		SO 03	45	Burgo de Osma
	BU 04	10	Ribera		SO 04	46	Soria
	BU 05	11	Arlanza		SO 05	47	Campo de Gómara
	BU 06	12	Pisuerga		SO 06	48	Almazán
	BU 07	13	Páramos		SO 07	49	Arcos de Jalón
	BU 08	14	Arlanzón				
LEÓN	LE 01	15	Bierzo	VALLADOLID	VA 01	50	Tierra de Campos
	LE 02	16	Montaña de Luna		VA 02	51	Centro
	LE 03	17	Montaña de Riaño		VA 03	52	Sur
	LE 04	18	La Cabrera		VA 04	53	Sur - Este
	LE 05	19	Astorga				
	LE 06	20	Tierras de León				
	LE 07	21	La Bañeza				
	LE 08	22	El Páramo				
	LE 09	23	Esla-Campos				
	LE 10	24	Sahagún				
PALENCIA	PA 01	25	El Cerrato	ZAMORA	ZA 01	54	Sanabria
	PA 02	26	Campos		ZA 02	55	Benavente
	PA 03	27	Saldaña - Valdavia		ZA 03	56	Aliste
	PA 04	28	Boedo - Ojeda		ZA 04	57	Campos - Pan
	PA 05	29	Guardo		ZA 05	58	Sáyago
	PA 06	30	Cervera		ZA 06	59	Duero Bajo
	PA 07	31	Aguilar				
SALAMANCA	SA 01	32	Vitigudino				
	SA 02	33	Ledesma				
	SA 03	34	Salamanca				
	SA 04	35	Peñaranda de Bracamonte				
	SA 05	36	Fuente de San Esteban				
	SA 06	37	Alba de Tormes				
	SA 07	38	Cuidad Rodrigo				
	SA 08	39	La Sierra				

Tabla 2.12 Comarcas Agrarias de Castilla y León. Fuente y criterio de comarcalización: MAPA, serie cartográfica de cultivos y aprovechamientos. Escala 1: 200.000

Si nuestro estudio no considera ámbitos económicos, agrarios o humanos ¿qué razones nos han conducido a considerar de manera tan singular la espacialidad de las comarcas agrarias?. Las razones son dos: una técnica y la otra de método.

1. Por una parte nos interesaba integrar y trabajar con el máximo posible de datos susceptibles de ser integrados en un SIG.
2. En segundo lugar por entender que el orden de magnitud de estas unidades espaciales en Castilla y León son proporcionales a la escala de NOAA-AVHRR y al nivel de análisis que se puede llegar con este instrumento. De las 59 comarcas agrarias de Castilla y León solo cinco de ellas (Pinares, Gredos, Peñaranda de Bracamonte, Boedo, Cervera) son de *pequeña* extensión. Esta observación nos parece útil para avalar la aplicación de las observaciones NOAA al seguimiento de ciertos elementos que repercuten o evidencian la actividad agrícola de una comarca,

como por ejemplo el vigor de los pastos, la repercusión de fuegos forestales sobre masas arbóreas o su recuperación en el tiempo, el vigor de la producción de cereal en comparación con el mismo momento de otras campañas, incidencia de sequías, necesidad de aportes hídricos por regadío, etc. Todos estos son elementos cuya dinámica puede seguirse mediante observaciones NOAA, previendo situaciones críticas con anterioridad suficiente para adoptar medidas paliativas concretas.

Una vez señalado nuestro interés y proceder práctico con la información de las comarcas agrarias, no podemos omitir algunos comentarios sobre las actividades agrarias, ganaderas y / o forestales, en cuanto que éstas tienen una incidencia directa y estacional sobre las cubiertas. Lo mismo habría que decir de la repercusión de las políticas agrarias comunitarias.

El reciente estudio que sobre las CCAA han publicado García-Alvarado, Sotelo Navalpotro *et al.*, (1999)<sup>168</sup> aporta abundantes datos de la estructura y producción del sector agrario castellano-leonés y contextualiza las tendencias productivas agrarias de los últimos años en el total del Producto Regional Bruto (4,4%), Nacional (3,4%) y Europeo (2,2%); También desglosa la contribución de cada uno de los subsectores agrícolas al total productivo de cada región, tal y como reproducimos a continuación.

Provincias	Subsector Agrícola	Subsector Ganadero	Subsector Forestal	Otras	Final
Avila	9.502	23.521	949	212	34.184
Burgos	45.276	25.851	2.042	1.242	74.411
León	34.866	33.983	1.656	585	71.090
Palencia	24.687	16.973	496	337	42.493
Salamanca	17.459	38.813	960	380	57.612
Segovia	15.342	31.043	741	369	47.495
Soria	11.332	11.109	2.360	395	25.196
Valladolid	43.772	37.288	659	1.359	3.078
Zamora	20.343	31.693	840	708	53.584
Castilla Y León	222.579	250.274	10.703	5.587	489.143

Aportación de los distintos subsectores a la producción agraria en millones de pesetas. 1994.  
Fuente: García y Sotelo, *Cit. supra*, 1999, p. 264.

En el contexto de una aplicación como la que resume esta memoria, las estadísticas agrarias, o las de población o flujos de comercio por ejemplo, interesan en la medida en que nos hablan de la ocupación del espacio y de la incidencia que esas actividades productivas puedan tener sobre las cubiertas del terreno.

Así, en cuanto a las características de propiedad agraria, García, Morán y Alcolea, (Capítulo 7; en García y Sotelo, *Cit. supra*, 1999, p. 263) apuntan que, *según los datos recogidos en el Catastro de Rústica de mediados del presente siglo, en Castilla y León existían, 1,3 millones de explotaciones para 8,4 millones de Ha. catastrales, lo que suponía un tamaño medio de 6,4 Ha. en propiedad. A partir de 1960 se observa una reducción del número de explotaciones y un significativo aumento del tamaño de éstas. Así, según datos censales, entre 1962 y 1982, el número de unidades de explotación se ha reducido en un 35% .... lo que permite un ligero incremento del tamaño medio de las*

168 García-Alvarado, J. M., Sotelo Navalpotro, J.A., (editores) (1999). La España de las Autonomías. Colección Espacios y Sociedades. Serie General nº 9. Ed. Síntesis. Madrid.

explotaciones, descendiendo las que tenían un tamaño inferior a 5 Ha, y aumentando el resto; a pesar de ello, hoy el 75% son inferiores a 20 Ha. La reforma técnica de concentración parcelaria incidió directamente sobre el aumento de tamaño de las explotaciones, sobre todo en las décadas de los '70 y '80. Esto hace que, en algunas comarcas donde la propiedad está muy fragmentada, la discriminación espacial de la que es capaz NOAA haga desaconsejable su utilización.

Al observar con NOAA la ocupación del suelo castellano leones por la respuesta espectral de sus cubiertas, debe de tenerse en cuenta que, de las tierras bajo explotación agrícola solo el 9% de las tierras cultivadas tiene una disponibilidad directa de agua, mientras que el restante 91% son tierras de labor de secano. El número de hectáreas absoluto varía según las fuentes y años contabilizados; aunque e orden de magnitud es similar las diferencias no son baladíes y es en este tipo de valoraciones donde la teledetección juega un papel instrumental especial.

Fuente	Secano	Regadío
CORINE Land Cover (1985)	3.339.600 Has.	413.425 Has
García, Morán y Alcolea ( <i>Cit. supra</i> . P. 265)	3.042.876 Has	301.430 Has

Las tierras de labor de secano han ocupado históricamente la superficie de relleno de la depresión sedimentaria y algunas zonas de páramo que, aunque no son las más aptas, se han explotado en función de presiones demográficas y ciclos económicos. Las principales comarcas productivas en secano son:

	Principales comarcas productivas en secano
Avila	Arévalo Madrigal
Burgos	Bureba, Arlanza, Pisuerga, Páramos, Arlanzón.
León	Sahagún
Palencia	Cervera, Aguilar
Salamanca	Vitigudino, Ledesma, Fuente de S. Esteban, Ciudad Rodrigo
Segovia	Sepúlveda, Segovia
Soria	Gómara, Almazán, Arcos de Jalón
Valladolid	Tierra de Campos
Zamora	Sanábria, Aliste, Sáyago

Las tierras en regadío se concentran en las siguientes áreas, articuladas por la combinación de arterias fluviales, embalses de retención de recursos y políticas de inversión agraria que han posibilitado infraestructuras y comercialización de la producción.

1. Arterias Esla-Porma-Órbigo, que posibilitan los regadíos de las comarcas leonesas del Páramo, La Bañeza, Tierras de León y Esla-Campos y las zamoranas de Benavente y Los Valles.
2. Terrazas bajas del conjunto Pisuerga Carrión en Valladolid, Palencia y Burgos sobre las comarcas del sur del Duero, Tierra de Campos y Cerrato palentino y Ribera del Duero en Burgos.
3. Regadíos del Tormes sobre las comarcas del Campo de Salamanca y Peñaranda de Bracamonte, Aguas abajo del embalse de Santa Teresa.

- Regadíos de áreas menores como en la Fosa del Bierzo (Sil), zona de Ciudad Rodrigo (Águeda) y puntos de páramos y campiñas al Sur del Duero por riego artesiano.

<b>Principales comarcas productivas mixtas: Secano – Regadío</b>	
<b>Avila</b>	Avila, Barco-Piedrahita
<b>Burgos</b>	Ribera,
<b>León</b>	Esla-Campos, Montaña de Luna.
<b>Palencia</b>	Boedo-Ojeda, Cerrato, Campos, Saldaña-Valdavia, Guardo.
<b>Salamanca</b>	Salamanca, Peñaranda, Alba de Tormes, La sierra
<b>Segovia</b>	Cuellar
<b>Soria</b>	Burgo de Osma
<b>Valladolid</b>	Centro, Sur, Sur-Este
<b>Zamora</b>	Duero Bajo, Benavente y los Valles, Campos Pan

El resumen de comarcas con producción mixta es, en realidad, mucho más rico y complejo, ya que había que añadir comarcas de producción mixta agrícola-pastos o pastos forestal (Gredos y Alberche); agrícola-pastos-forestal (Merindades, Bierzo); agrícola-ganadera, (Tierras de León). La comprensión espacial de la distribución de estos usos de suelo junto con las especies naturales o de producción agrícola ayuda a comprender e interpretar la respuesta espectral captada por los sensores y reconvertida en un índice de vegetación.

En nuestra opinión, pensamos que la unidad espacial de las comarcas agrarias tiene utilidad propia en el contexto de las series multitemporales NOAA, como las siguientes.

- Para inventariar las características mensuales de las cubiertas agrícolas de secano.
- Para contrastes inter-anales del progreso de áreas productivas de secano.
- Para inventariar el estado de salud y la superficie de áreas forestales.
- Para seguimiento dinámico del contenido de humedad o niveles de sequedad de las masas forestales.
- Para cálculo de recursos hídricos de cuenca y previsiones de demanda en regadíos.
- Para contrastes inter-anales del vigor de los regadíos
- Como instrumento de seguimiento de directrices marcadas por la Política Agraria Comunitaria (PAC), como por ejemplo cálculo de áreas en producción por campaña, previsiones avanzadas de producción o control de retirada de tierras
- Para presentación de resultados a una población vinculada con el área que se analiza.

La incidencia de la PAC en Castilla y León es un área de estudio extenso y complejo en si mismo por las repercusiones económicas, humanas y de ordenación del territorio. El sector productivo agrario ha sido el área más controvertida en el contexto de la adhesión de España a la UE (1986), al entrar a formar parte de un mercado excedentario, mejor preparado y competitivo. Todas las CCAA han experimentado políticas recesivas en cuanto al volumen de producción agraria se refiere: *desde nuestro ingreso en la U.E., la producción final agraria española al igual que la de Castilla y León crece en pesetas corrientes cada año a lo largo de la década, decrece por el contrario, en términos*

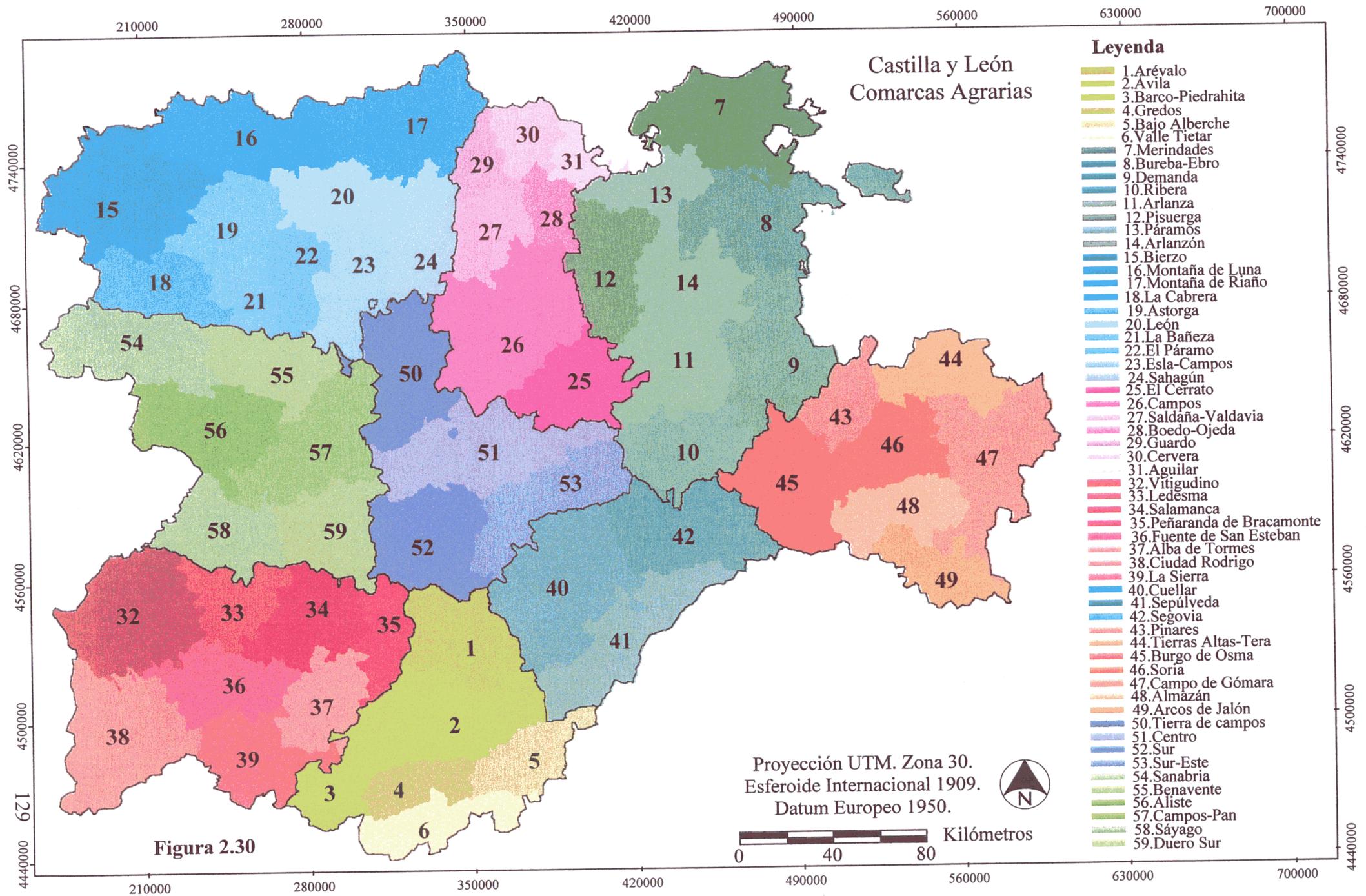
*reales, en pesetas constantes* (García, Morán y Alcolea *Cit. supra*, 1999, p.269). (Tasa de disminución de la PFA, España: 1,8. Castilla y León, 2,2).

Las rentas de los agricultores se han mantenido gracias a los pagos compensatorios sobre las actuaciones recesivas sobre el cereal, vid, vacuno o leche, o el abandono directo de tierras. En Castilla y León han sido especialmente compensadas las provincias de Valladolid, Palencia y Burgos (cereal de secano, girasol en barbechos de cereal), Páramo leonés, Benavente y Los Valles (regadío: sustitución de remolacha por maíz).

Una de las últimas evaluaciones de la incidencia de la PAC en la región tuvo lugar en el Congreso internacional de Desarrollo Rural, celebrado en Valladolid del 3 al 5 de Junio de 1998 (MAPA, 1998)<sup>169</sup>, en el que también se organizaron grupos de estudio y actuación ante las nuevas directrices de la PAC.

---

169 MAPA (1998). Desarrollo agrario y desarrollo rural: los agricultores, nuevos actores del desarrollo. Actas del Congreso Internacional sobre desarrollo rural. Valladolid 3-5.6.1998. MAPA. Centro de Publicaciones. Madrid.



# 3000 PRINCIPIOS DE TELEDETECCIÓN Y ANÁLISIS DE IMAGEN APLICADOS EN EL ESTUDIO

## 3100 INTRODUCCIÓN

Las fuentes de nuestro trabajo exigen que, antes de aproximarnos a cada una de ellas en particular para desglosar su estructura y los procesos de tratamiento y análisis, presentemos los fundamentos teóricos de teledetección y proceso de imagen asumidos en nuestro trabajo. En síntesis, se trata de cuatro grandes temas concatenados:

1. Los **principios físicos** de la teledetección; estructura del espectro electromagnético y respuesta de la vegetación en las distintas regiones del espectro; satélites y caracteres genéricos de los sensores.
2. Generación de información temática en **variables continuas** a partir de la información *bruta*: índices de vegetación, apología del NDVI, compuestos del valor máximo (MVC) del NDVI.
3. **Análisis** de la serie de MVC según la transformada discreta de **Fourier** y de sus **componentes principales** (ACP). Categorización de las imágenes: la **clasificación**.
4. **Gestión** de datos temáticos derivados de la teledetección en un sistema de información geográfica (SIG).

## 3200 TELEDETECCIÓN

Teniendo en cuenta que no existe una definición única y universal de la teledetección (Colwel, 1983)<sup>170</sup>, el concepto general lo resumen López y Caselles (1991)<sup>171</sup> con las siguientes palabras: "Se entiende por teledetección la adquisición de información sobre un objeto a distancia, esto es, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador. La teledetección parte del principio físico de la existencia de una perturbación (energía electromagnética, ondas de presión, campos gravitacionales) que el sistema observado produce en el medio, la cual se transmite al sistema receptor para ser registrada, almacenada y posteriormente interpretada". Los ámbitos de aplicación son muy diversos: física, ingeniería, matemática, estadística, informática, geografía, geología, meteorología, oceanografía, agronomía, urbanismo, etc.

Dicho de otro modo, la teledetección se basa en la interacción de la energía electromagnética emitida o reflejada en cualquier longitud de onda del espectro electromagnético por una superficie y la observación cuántica que de ese flujo energético realiza un sensor. Chuvieco (1996)<sup>172</sup> sintetiza los elementos de un sistema de teledetección en los siguientes:

---

170 Colwell, R., (1983). Manual of Remote Sensing, Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry.

171 López García, M. J. y Caselles, V. (1991). Introducción a la teledetección. En La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables. Agricultura. Curso de Postgrado. Coord.: Gandía, S. y Meliá, J. Universitat de València. Estudi General. Unidad de Teledetección. Departament de Termodinàmica. pp 20-45.

172 Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de Teledetección Espacial. Ed. Rialp. Madrid.

1. **Fuente de energía** detectada por el sensor; si el origen de la energía es externo al sensor se habla de teledetección pasiva, mientras que si la energía es emitida por el propio sensor se denomina teledetección activa;
2. **Superficie receptora** de la señal energética y que a su vez la emite o refleja según sus características físicas y químicas;
3. **Sensor**, instalado en un satélite, que capta la respuesta energética emitida o reflejada por la superficie y la envía al sistema de recepción;
4. **Sistema de recepción** en Tierra de los datos del sensor;
5. **Sistema de interpretación** que convierte la señal del sensor en información temática; se entiende que el principal reto es la transformación de los datos registrados en magnitudes físicas y, consiguientemente, en información útil para una aplicación o problema concreto.

Enumerados los componentes de un sistema de teledetección, surgen las primeras preguntas de orden práctico: ¿qué tipos de satélites hay? ; ¿cómo registran los sensores remotos la energía emitida o reflejada por las superficies?, ¿qué características tienen las imágenes?,...

No es fácil simplificar la **tipología** de los satélites. En cuanto al **objetivo** que dio origen a su misión, existen satélites meteorológicos (Meteosat, NOAA-AVHRR), para la observación de recursos naturales (Landsat-TM, SPOT), con fines estratégicos (Helios), para exploración planetaria (Sonda Magallanes), además de multitud de satélites para soporte de las telecomunicaciones. Atendiendo a sus **características orbitales**, se dividen en dos grandes tipos: los geoestacionarios, con su órbita sincronizada con la de la tierra para mantener un plano de observación fijo (Meteosat), y los heliosíncronos, con la órbita sincronizada con el sol; la altura orbital también influye, junto con las características del sensor, en el nivel de detalle de la imagen final. Los **sensores** transportados por los satélites pueden ser **activos o pasivos**: los primeros registran la reflexión energética emitida por ellos mismos sobre una superficie (radar, lidar). Los segundos dependen de la luz solar de manera que, a partir de ella, registran la respuesta electromagnética de energía reflejada o emitida por las cubiertas; los sensores que han registrado las imágenes de nuestro estudio son el AVHRR de NOAA y el sensor TM de Landsat, ambos con tecnología de barrido de un espejo móvil oscilante en sentido perpendicular a la trayectoria de la órbita.

Cualquier sensor remoto explora la superficie adquiriendo, a intervalos regulares, información sobre la energía que proviene de su **campo de visión instantánea** (IFOV) o superficie de observación real abarcada por el sensor; el IFOV depende, a su vez, de la apertura del dispositivo óptico del sensor y determina las dimensiones máximas de la superficie terrestre que pueden observarse en cada instante desde el sensor. Se expresa en radianes puesto que se refiere a un ángulo (de visión). Cada una de estas áreas de observación debe entenderse como una parcela; constituye la unidad mínima de información en la imagen, y se denomina **píxel** (*picture element*). Las dimensiones del píxel definen la aptitud de un sensor para distinguir los objetos en el plano espacial y es lo que caracteriza la **resolución espacial** del sensor. Sin embargo, la resolución espacial puede estar influida por el contenido de la imagen, por lo que deben tenerse en cuenta

otros factores como: geometría y contraste del objeto, resolución radiométrica, iluminación, claridad de la atmósfera, efecto de los píxeles vecinos, etc. En nuestro estudio hemos utilizado varias resoluciones espaciales, según la naturaleza y origen de los datos: 1.100 m en los datos NOAA-AVHRR, 30 m en los datos Landsat-TM, 200 m en los datos del Modelo Digital de Terreno, etc. En su momento explicaremos como se han tratado y acoplado estas diferencias.

El valor numérico obtenido por el sensor en cada píxel se denomina *nivel digital (ND)* y da razón de las *características espectrales* del sensor, es decir, de su capacidad para registrar la radiación electromagnética, separando señales con longitud de onda diferente. Esta aptitud discriminadora depende del dispositivo de filtro óptico que separa la radiación incidente en bandas espectrales más o menos amplias.

### 3210 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Llegado este punto conviene recordar la estructura del *espectro electromagnético*, sintetizada gráficamente en la Figura 3.1. Dependiendo de los materiales o cubiertas que se desee estudiar, se recurre a las longitudes de onda o sectores del espectro electromagnético que mejor reflejen sus propiedades. Cada zona del espectro donde el sensor recoge información se conoce como **banda** de la imagen. Las zonas del espectro más utilizadas en teledetección son: visible, infrarrojo y microondas.

El *espectro óptico o visible* se corresponde con la luz captada por el ojo humano. A pesar de no ser más que una minúscula parte del espectro electromagnético encierra la secuencia de colores del rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. Se puede dividir en tres bandas o colores primarios: *azul* (de 0.4 a 0.5  $\mu\text{m}$  de longitud de onda), *verde* (de 0.5 a 0.6  $\mu\text{m}$ ), y *rojo* (de 0.6 a 0.7  $\mu\text{m}$ ).

A su vez, el *infrarrojo* se subdivide en infrarrojo reflejado (radiación solar reflejada por la superficie terrestre; 0.7-8  $\mu\text{m}$ ) e infrarrojo lejano o térmico (radiación emitida por la superficie terrestre; 8-14  $\mu\text{m}$ ).

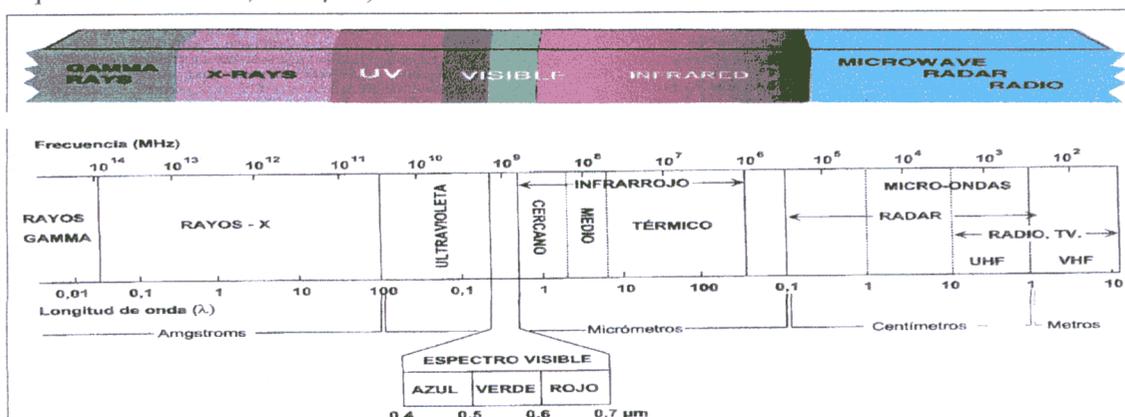


Figura 3.1. Estructura del espectro electromagnético. Adaptado de: Chuvieco, 1996, p. 49 y Logicon Geodynamics, 1997<sup>173</sup>.

173 Logicon geodynamics, Inc. (1997) Multispectral imagery reference guide. Spectral imagery training center. Fairfax, Virginia.

"Las características radiométricas del sensor definen la **resolución radiométrica**, que expresa su capacidad, en una banda espectral considerada, para distinguir señales electromagnéticas de energía diferente. La resolución radiométrica está condicionada por los intervalos de digitalización de la señal. En el dominio del infrarrojo térmico, esta resolución se traduce en medidas de temperatura diferente, mientras que en el visible, determina los valores de reflectividad". (López y Caselles, 1991, *Cit. supra*, p. 26.).

En nuestro estudio hemos utilizado datos provenientes de las zonas visible e infrarroja del espectro; en éstas, el ND está relacionado con la radiancia de los materiales. Conociendo los coeficientes de calibración del sensor AVHRR (en nuestro caso) se puede transformar el ND en radiancia, la cual permite posteriormente el cálculo de parámetros geofísicos como reflectividad o temperatura.

Las **imágenes se generan** por la conversión de estos niveles digitales en tonos de grises o colores mediante programas informáticos. Por tanto, las imágenes no son fotografías, ya que consisten en una matriz numérica de datos de tres dimensiones. Se debe tener siempre presente que cuando se trata información obtenida por teledetección, se trabaja con números, y no con fotografías. Toda esta información numérica, proveniente de la respuesta energética de la superficie en cada punto medido (píxel), y en cada porción del espectro en el que se hace (banda), se almacena en formato digital en ficheros informáticos. Esto permite su manipulación mediante programas informáticos, haciendo posibles todas las operaciones de corrección y realce de los datos (y por tanto de las imágenes) que se verán más adelante.

Los objetos de la superficie terrestre reflejan, absorben o transmiten la energía solar en diferentes longitudes de onda; el sumatorio de los tres flujos será igual a la unidad energética incidente sobre la superficie. Cada tipo de material absorbe y refleja una parte distinta del espectro, dando una **signatura espectral** propia, utilizada en teledetección para distinguir e identificar los materiales. Pero la cantidad de energía reflejada, transmitida o absorbida depende de la naturaleza de las superficies, y ese comportamiento es único y diferencial para cada una. Las firmas espectrales de los distintos materiales se plasman en las **curvas de reflectividad** espectral, que representan el porcentaje de **energía reflejada** para cada material en función de la longitud de onda. Existen curvas de reflectividad teóricas de los materiales, obtenidas a partir de medidas de laboratorio realizadas con espectrómetros (figura 3.2); pero, debe tenerse en cuenta que, en la realidad, existen muchos factores que modifican la respuesta espectral teórica de los materiales, por lo que las mediciones de laboratorio difieren de lo que observamos en las imágenes de satélite, aunque la línea de tendencia de cada superficie es válida. Los elementos principales de distorsión de la respuesta espectral son el ángulo de iluminación solar, el ángulo de observación del satélite, el relieve y la interacción con la atmósfera.

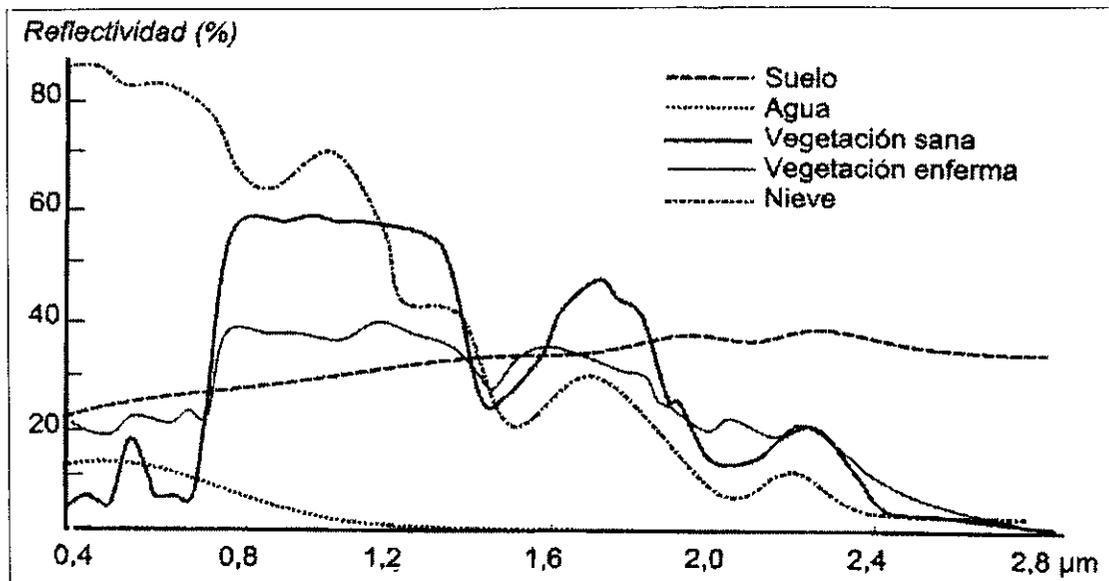


Figura 3.2 Signaturas espectrales estandarizadas de diversas superficies. Fuente. Chuvieco, 1996, p. 58.

Como hemos apuntado, en nuestro estudio hemos utilizado datos espectrales de las regiones óptica (rojo) e infrarroja del espectro electromagnético; en las secciones 3221, 3222 y 3223 de este capítulo nos ocupamos de las características de la radiación en las regiones visible e infrarroja (cercana y media) del espectro, en relación con la vegetación, por lo que ahora no nos detenemos en este aspecto. Además, algunas características de la radiación energética del espectro óptico se han apuntado en los párrafos anteriores. En síntesis, la *sección óptica* del espectro corresponde a las longitudes de onda dependientes de la energía solar, fuente principal de energía radiante en nuestro medio. Chuvieco (1996, p. 56) también engloba en estos límites las ondas del infrarrojo térmico medio “cuando los procesos de reflexión son dominantes sobre los de emisión”.

Hacemos una breve referencia a la sección del *infrarrojo térmico*, a la que ya no necesitaremos referirnos más adelante. Entre los 8 y 14 micrómetros, el espectro de energía de la superficie terrestre se corresponde con la *radiación emitida* por los materiales, de acuerdo con su temperatura. En otras palabras, las mediciones espectrales en el rango del infrarrojo térmico corresponden a la radiación emitida por la tierra (calor) y registran la temperatura de las distintas superficies. La superficie terrestre está siempre muy por encima del cero absoluto, por lo que emite radiación tanto de día como de noche. Una gran ventaja de las imágenes del infrarrojo térmico, por tanto, es que pueden ser adquiridas tanto de día como de noche. Aunque es posible medir la temperatura de las superficies vía satélite por la longitud de onda emitida en función de su temperatura, también es necesario conocer la emisividad del cuerpo para poder obtener la temperatura cinética. Además la presencia de la atmósfera terrestre modifica los valores de la radiancia medidos en el satélite. De ahí que la estimación de la temperatura de superficie con mediciones del infrarrojo térmico sólo sea un cálculo aproximado si se carece de parámetros de referencia atmosférica o del terreno (emisividad de los materiales).

Por último, la zona del espectro de mayores longitudes de onda utilizada en teledetección es la de las *microondas*. Las imágenes registradas en esta región son las de radar. Su proceso es más complejo que con las imágenes visibles e infrarrojas, pero su uso resulta especialmente apto para zonas habitualmente cubiertas por nubes.

### 3220 DETECCIÓN REMOTA DE LA BIOMASA: RESPUESTA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN Y FACTORES DETERMINANTES

Myers, V. I. (1983)<sup>174</sup> apunta la complejidad que encierra la detección remota de la biomasa, en concreto para su interpretación en inventarios agrícolas, previsión de pérdidas o rendimientos, ordenación agraria, etc. El dinamismo inherente a la biomasa, su interacción y dependencia de suelos y clima, controlan esa complejidad y riqueza de respuestas espectrales. A pesar de ello, la teledetección ofrece ventajas técnicas en el seguimiento y control de la vegetación sobre las técnicas tradicionales, entre las que señalamos: la tasación rápida de recursos de campo, el reconocimiento sinóptico de amplias áreas con las mismas condiciones de iluminación, el registro sistemático sobre una misma área permitiendo comparaciones temporales, coste competitivo de las imágenes por unidad de área cubierta en comparación con mediciones de campo o fotogrametría tradicional, la precisión de ajustes geométricos para la medida de parámetros agrofísicos.

Pero, antes de abordar la utilidad de la teledetección en el control de la biomasa, es necesario responder a varias preguntas: ¿cómo responde la vegetación a la luz solar en términos de respuesta espectral?, ¿qué elementos fisiológicos de la estructura de las plantas influyen sobre la radiación electromagnética?, ¿qué mecanismos adoptan las plantas en la reflexión de la luz?, ¿cómo influye la estructura troncal y foliar en la reflexión, transmisión y absorción del espectro luminoso?, ¿cómo se manifiestan los distintos estados de desarrollo, maduración y senescencia de las plantas?. Abordaremos estos aspectos en los siguientes párrafos por la importancia que encierran en el seguimiento de las superficies cultivadas por técnicas de teledetección. Podemos estructurar los *elementos de análisis de la respuesta espectral de la vegetación* en tres aspectos, haciéndonos eco del parecer de Gates *et al.*, (1965)<sup>175</sup>, Knipling (1970)<sup>176</sup> y Colwell (1974)<sup>177</sup>, también citados por Chuvieco (1996. p. 62. *Cit. supra*):

1. La respuesta espectral de las hojas, que varía según el estado fenológico, forma, contenido de humedad intercelular, etc.
2. La propia morfología de la planta, en la que resulta determinante la altura y el cubrimiento del suelo.

---

174 Myers, V. I. (1983). Remote sensing applications in agriculture. Capítulo 33 en Manual of remote sensing. Second edition. Vol. II. American society of photogrammetry. Falls Church. Virginia. Sheridan Press.

175 Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C., Weidner, V. R., (1965). Spectral properties of plants; Appli. Opt., v. 4, p. 11-20.

176 Knipling, E. B., (1970) Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation; Remote Sens. of Environ., v. 1, p. 155-159.

177 Colwell, J. E., (1974). Vegetation canopy reflectance; Remote Sens. of Environ., v. 3, p. 175-183.

3. La localización de la masa vegetal, en razón de las variaciones particulares que pueden introducir en la respuesta espectral por factores de pendiente, orientación, insolación, asociación de especies y estructura de las plantaciones.

Por otra parte, laboratorios de teledetección agroforestal y agroindustrias realizan análisis específicos sobre comportamientos espectrales particulares, en función de objetivos de investigación o de producción. Para consultas sobre aplicaciones recientes y en curso en el ámbito de la Unión Europea se puede recurrir a la base de datos del Servicio de Información de Investigación y Desarrollo Comunitarios (CORDIS)<sup>178</sup>.

El **comportamiento espectral típico** de una masa de vegetación sana es el reflejado en la Figura 3.3. En el rango **visible**, el porcentaje de reflectividad oscilará entre el 6% del azul y el rojo y algo menos del 20% en el verde; los valores de reflectividad ascenderán bruscamente en el rango del **infrarrojo cercano** (50%) para volver a disminuir de manera oscilante en el rango del **infrarrojo térmico**.

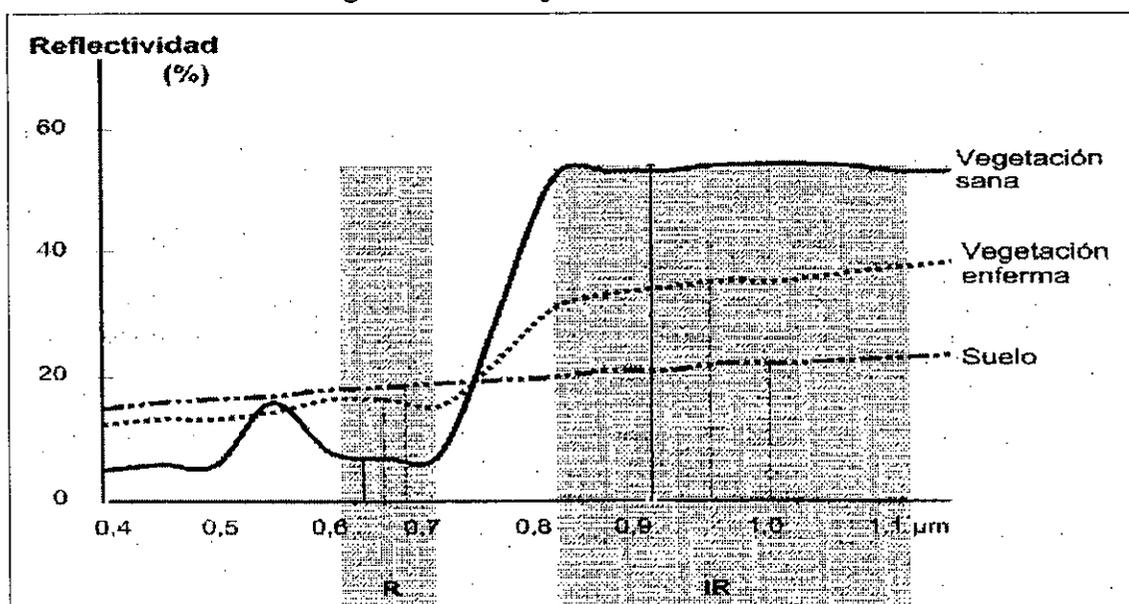


Figura 3.3 Valores porcentuales de reflectividad de la vegetación sana. Elementos foliares responsables de las reflectividades.

Pese a la afirmación del párrafo anterior sobre la estandarización de la respuesta espectral de la vegetación, avalada por estudios de laboratorio y de campo (Bernard y Meyer-Roux, 1994)<sup>179</sup>, no debemos olvidar que, la reflectividad de una masa vegetal registrada por un satélite es una suma compleja, integrada por la respuesta de la propia fisiología vegetal (tejidos foliares, frutos, tronco), la respuesta del suelo de fondo, la del contenido de humedad de los tejidos, etc. Así, por ejemplo, el número de hojas de la planta altera sustancialmente la respuesta espectral, tal y como señalan Gausman, H. W. *et al.*, (1969)<sup>180</sup> y Gandía, S. (1991)<sup>181</sup> para el caso de plantaciones de algodón.

178 <http://www.apollo.cordis.lu/cordis-cgi>

179 Bernard, A., Meyer-Roux, J., (1994). Proceedings of the Conference on the MARS project: Overview and Perspectives. EUR Publication N° 15599. Office for Official Publications of the EU. Luxembourg. 168 pp.

180 Gausman, H. W., Allen, W. A., Myers, V. I., Cárdenas, R. (1969) Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L.; Agron. J., v. 61, 374-376.

### 3221. RESPUESTA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN EN EL RANGO VISIBLE (0,5 $\mu$ M-0,75 $\mu$ M): LOS PIGMENTOS FOLIARES.

Los pigmentos foliares son los principales responsables de la baja reflectividad en el rango **visible** del espectro electromagnético. La absorción energética verificada por los pigmentos es máxima entorno a los 0,4 $\mu$ m y 0,6 $\mu$ m, coincidiendo con los rangos espectrales del azul y rojo; entorno a los 0,5 $\mu$ m se verifica un pico intermedio de mayor reflectividad que coincide con el rango espectral del verde, y es lo que hace percibir la vegetación sana de este color al ojo humano. La baja reflectividad en los rangos del azul y el rojo está relacionada con la clorofila contenida en la planta, que en esos rangos tiene su máxima absorción. Gandía, S. (1991, p.87)<sup>182</sup> puntualiza: "Cuando una planta está sometida a cualquier tipo de tensión, hídrica o de otro tipo, disminuye la producción de clorofila y la planta absorbe menos energía en las regiones típicas de absorción por la clorofila, aumentando la energía reflejada especialmente en la región del rojo, lo que les proporciona la apariencia amarillenta o clorótica".

Los dos investigadores Rusos Kleshnin y Shul'gin (1959)<sup>183</sup> evidenciaron este comportamiento espectral en 80 especies vegetales, sobre las que midieron la energía reflejada, transmitida y absorbida, entre los 0,4 $\mu$ m y los 0,8 $\mu$ m; los porcentajes de reflectividad eran similares en las regiones azul y roja (valores cercanos, aunque inferiores al 10%), mientras que en el verde el porcentaje de reflectividad ascendía entre el 15 y el 20%. Tras el tímido pico de reflectividad energética en el verde, todas las especies presentaban un brusco aumento en el rango del infrarrojo cercano (0,7 $\mu$ m - 1,4 $\mu$ m, reflectividad entorno al 50%). Siguiendo a Gates *et al.*, (1965, *Cit. supra*), la causa de la gran absorción energética en el rango del azul se debe al caroteno, xantofila y clorofila; este último pigmento foliar vuelve a tener otra importante zona de absorción energética en el rango del rojo (0,64 $\mu$ m).

El comportamiento espectral estandarizado de la vegetación verde sana queda en evidencia y contrasta con las respuestas que ofrecen especies con hojas de distinta pigmentación a la verde, ya sea por causas naturales inherentes a esa especie (por ejemplo, *Liriodendron tulipifera* L, de hojas amarillas), o por evolución fenológica a estado de senescencia. Hoffer y Johannesen (1969)<sup>184</sup> ilustraron las notables diferencias de respuesta espectral que ocasionan los distintos pigmentos foliares (Figura 3.4).

---

181 Gandía, S. (1991). La teledetección en el seguimiento de las áreas cultivadas. En: La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables. Agricultura. Curso de Postgrado. Coord.: Gandía, S. y Meliá, J. Universitat de València. Estudi General. Unidad de Teledetección. Departament de Termodinámica. pp 275-284.

182 Gandía, S. (1991). Interacción de la radiación solar con las superficies naturales. Recursos renovables. Agricultura. Curso de Postgrado. Coord.: Gandía, S. y Meliá, J. Universitat de València. Estudi General. Unidad de Teledetección. Departament de Termodinámica. pp 85-94

183 Kleshnin, A.F., Shul'gin, I. A., (1959). The optical properties of plant leaves; Dokl. Akademcii Nauk SSSR, v. 125, p. 1158. Traducción: A.I.B.S Doklady, v. 125, p. 108-110.

184 Hoffer, R.M., Johannesen, C.J., (1969). Ecological potential in spectral signature analysis; Remote Sensing in Ecology. University of Georgia Press, Athens, Georgia, p. 1-16.

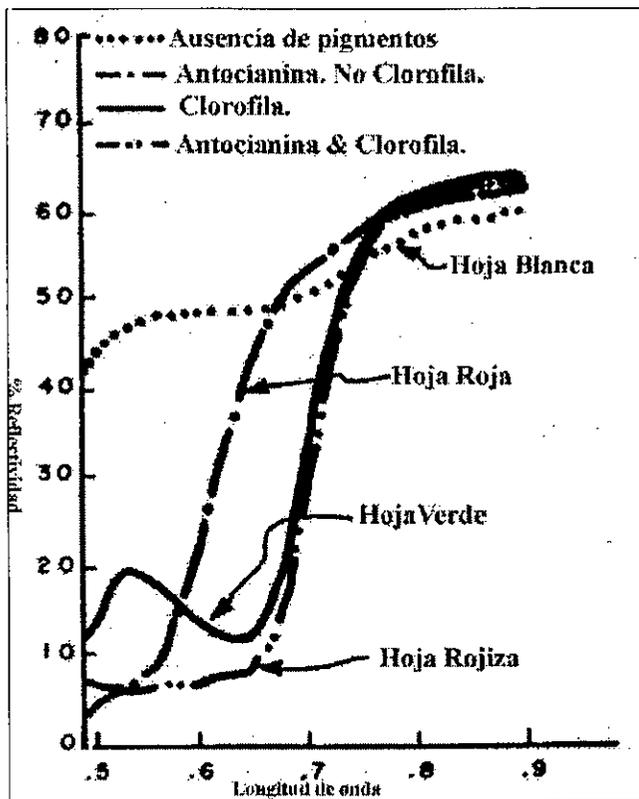


Figura 3.4. Respuesta espectral de cuatro hojas con distinta pigmentación, entre .5 y .9  $\mu\text{m}$

En la evolución fenológica habitual de las especies, el periodo de senescencia también altera la curva de reflectividad normalizada. La época de senescencia puede coincidir o no con el periodo otoñal. En relación con las observaciones sobre Castilla y León, las fechas de senescencia son muy distintas según la localización, altura del terreno, y el tipo de especie. Así, por ejemplo, la senescencia del cereal de invierno corresponde con la maduración del grano y el secado de la planta, a punto para la siega, lo cual ocurre en la primera quincena de junio en las llanuras y segunda quincena en sectores de páramo; del mismo modo, la senescencia de caducifolias comienza en las cotas más altas en la primera quincena de septiembre, y se dilata hasta la segunda quincena de

octubre al descender la altura.

Durante la senescencia del cereal, la albúmina, clorofila, ácido ribonucleico, proteínas, etc. se degrada comenzando por las hojas más antiguas hasta las más jóvenes, el tallo y las raíces. La coloración amarillenta viene dada por la pérdida de los pigmentos verdes de la clorofila, en favor de los pigmentos amarillos y naranjas de los carotenos y las xantofilas. Además, el proceso senescente se ve favorecido por el aumento de temperaturas, sequía, menor flujo de nutrientes, etc.

Tal y como ha probado Knipling (1967)<sup>185</sup>, durante el decurso senescente de las hojas, la reflectancia lumínica aumenta ostensiblemente en la región del verde ( $0,55\mu\text{m}$ ), por la propia degradación de la clorofila; si tras la pérdida de la clorofila queda abundante caroteno y antocianina, se originan nuevos picos relativos de reflectividad en las regiones roja y azul del espectro visible.

En el mismo experimento, Knipling observó que la senescencia foliar disminuye la reflectancia en la región del infrarrojo cercano ( $0,75\mu\text{m} - 1,35\mu\text{m}$ ), pero no tan notoriamente como el aumento de reflectividad ocasionado en el espectro visible. En el caso de los cultivos de cereal, la "meseta" de valores de reflectividad en la región del

185 Knipling, E. B., (1967). Physical and physiological basis for difference in reflectance of healthy and diseased plants; Clearinghouse for Federal Science and Technical Information, U.S. Dept. of Comm., Ad 652 679, 24 p.

infrarrojo cercano, desciende y se suaviza considerablemente durante la senescencia. Si este descenso coincide con el final del ciclo fenológico, solo será expresión de normalidad, pero si se da en otro momento del desarrollo de los cultivos, denunciará la presencia de células dañadas. (Cárdenas *et al.*, 1969-1970)<sup>186</sup>.

### **3222 RESPUESTA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN EN EL RANGO DEL INFRARROJO CERCANO (0,75 $\mu$ M-1,35 $\mu$ M): ESPACIOS AÉREOS FOLIARES.**

A pesar de que la distinta pigmentación foliar se traduce en reflectancias muy diversas en el rango visible, sin embargo, en todos los casos se aprecia una respuesta muy similar en la región del infrarrojo próximo y medio.

La reflectividad y la transmisividad de la vegetación en el infrarrojo cercano se caracterizan por ser habitualmente muy altas, mientras que la absorción es baja: se detecta aproximadamente un 45-50% de reflectividad, un 45-50% de transmisividad y menos de un 5% de absorción en las longitudes de onda del infrarrojo cercano. La causa se encuentra en la estructura esponjosa del tejido mesófilo de las hojas, que desarrolla espacios intercelulares aéreos; su importancia en teledetección radica en el efecto dispersor que ejercen esos espacios vacuos sobre la energía incidente en esta banda del espectro.

El análisis de la estructura foliar explica en parte su comportamiento espectral. En un corte transversal de una hoja encontramos los siguientes elementos (Gilabert, 1990)<sup>187</sup>:

- una cutícula cerosa, más o menos espesa
- una capa de células que forma la epidermis, donde se encuentran los estomas
- el parénquima en empalizada, formado por células alargadas bien ordenadas
- el mesófilo con células de forma irregular que determinan una capa con grandes espacios intercelulares
- otra capa de epidermis con estomas

En las mediciones de reflectividad realizadas por Hammond (1941)<sup>188</sup> sobre hojas de naranjo *Citrus sinensis*, las hojas maduras acusaron un 5% menos de reflectividad que las jóvenes en el rango del visible (0,5 $\mu$ m-0,75 $\mu$ m) y un 15% más en el rango del infrarrojo cercano (0,75 $\mu$ m-1,35 $\mu$ m). El efecto esponjoso de las hojas maduras aumenta la reflectancia, a causa del mayor número de espacios aéreos intercelulares. Según Fahn (1967)<sup>189</sup>, el desarrollo de cavidades aéreas es máximo cuando la hoja alcanza entre una

---

186 Cárdenas, R., Gausman, H.W., Allen, W.A., Schupp, M., (1969-1970). The influence of ammonia induced cellular discoloration within cotton leaves (*Gossypium hirsutum* L.) on light reflectance, transmittance and absorbance; Remote Sensing of Environment, v. 1, p. 199-202.

187 Gilabert, M. A., (1990). Caracterización radiométrica, en el intervalo espectral solar, de cultivos cítricos. Modelo geométrico de reflectividad de aplicación en Teledetección. Tesis Doctoral. Facultat de Física. Universitat de València.

188 Hammond, D., (1941). The expression of genes for leaf shape in *Gossypium hirsutum* L. and *Gossypium arboreum* L. American Journal of Botany., v 28, p. 124-138

189 Fahn, A., (1967). Plant anatomy. Pergamon Press. New York, p. 584.

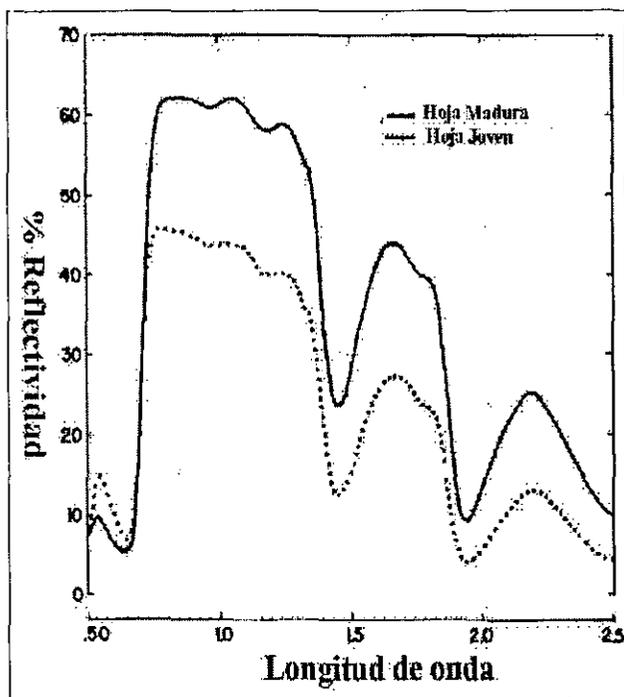


Figura 3.5. Reflectancia de hojas maduras.

tercera o una cuarta parte de su tamaño final; dicho de otro modo, las hojas maduras tienen mayor cantidad de vacíos intercelulares, por lo que el tejido mesófilo tiene una apariencia más esponjosa. La dispersión de la luz en las hojas tiene lugar entre la pared celular de celulosa hidratada y las cavidades aéreas. La Figura 3.5. lo ilustra. La línea continua muestra la reflectancia de una hoja madura de naranjo, con una reflectancia relativamente menor que las hojas jóvenes en el rango visible y una reflectancia notablemente superior en el rango del infrarrojo cercano.

### 3223 RESPUESTA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN EN EL RANGO DEL INFRARROJO MEDIO (1,35μM-2,5μM): EFECTO DEL AGUA EN LAS HOJAS.

En esta sección del espectro, las respuestas de la vegetación dependen, en cierta medida de la estructura foliar, pero sobre todo está determinada por la concentración de agua en los tejidos, presentando inflexiones importantes de absorción en las longitudes de onda de 1,45μm, 1,95μm y 2,7μm (Lusch, D. 1989)<sup>190</sup>.

El efecto absorbente del agua hace contrastar muy claramente la reflectividad de la vegetación en el infrarrojo medio, frente al infrarrojo cercano. La utilidad del comportamiento espectral de la vegetación comparado en estas dos secciones del espectro se ha aplicado con éxito al examen y seguimiento del contenido y estrés hídrico de cultivos y bosques (Goward *et al.*, 1985)<sup>191</sup>, así como a la diferenciación de especies en masas arbóreas compactas y mixtas (Sellers, 1985)<sup>192</sup>.

Hemos sintetizado el comportamiento espectral de la vegetación en las secciones óptica e infrarroja cercana y media del espectro electromagnético. En nuestro estudio hemos utilizado sistemáticamente los valores espectrales del visible (0,64μm, rojo) y del

190 Lusch, D. P., (1989). Fundamental considerations for teaching the spectral reflectance characteristics of vegetation, soil and water. Current Trends in Remote Sensing Education. M.D. Nellis, R. Lougeay, K. Lulla, Eds., Geocarto International Centre. Hong Kong. pp. 5-2.

191 Goward, S.N., Cruickshanks, G.D., Hope, A.S., (1985) Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetation landscape. Remote Sensing of the Environment, v. 18., 137-146

192 Sellers, P.J., (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. International Journal of Remote Sensing. Vol. 6, 1335-1372.

infrarrojo cercano ( $0,75\mu\text{m}-1,35\mu\text{m}$ ) registrados por los satélites NOAA, por ser estos los datos más aptos y contrastados para el estudio del comportamiento dinámico de la biomasa de Castilla y León. A partir del vigor teórico de la vegetación determinado por la relación diferencial entre las bandas roja e infrarroja del espectro, podemos aproximarnos con más o menos fiabilidad y complejidad de análisis a las múltiples causas que puedan alterar el comportamiento estandarizado de las especies, y que resumimos en la Tabla 3.1.

<b>ELEMENTOS DE ALTERACIÓN DE LA REFLECTIVIDAD NORMALIZADA DE LA VEGETACIÓN</b>	
<b>CAUSAS INTERNAS A LA PLANTA</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estado de maduración de la planta, desarrollo fenológico: Juventud, Madurez, Senescencia</li> <li>• Reflectividad de los distintos elementos de la planta.</li> <li>• Hoja, Tallo, Frutos</li> <li>• Pigmentos foliares</li> <li>• Contenido de agua en los tejidos</li> <li>• Volumen foliar. Distribución y posición de las hojas en la planta.</li> <li>• Espacios aéreos intercelulares del mesófilo</li> <li>• Porcentaje de cubrimiento del cultivo o copas</li> </ul>	
<b>CAUSAS EXTERNAS A LA PLANTA</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización geográfica: orientación, elevación, pendiente</li> <li>• Suelo: Composición química, contenido de agua y nutrientes.</li> <li>• Condiciones climáticas: cubrimiento de nubes, vapor de agua y aerosoles en la atmósfera, temperatura del aire,</li> <li>• Diversidad y homogeneidad de las especies. Estructura de cultivos.</li> <li>• Elementos de la medición: hora solar, posición del sensor y ángulo cenital y acimutal</li> <li>• Desastres naturales: heladas, viento, inundaciones, fuego, enfermedades y plagas.</li> </ul>	

Tabla 3.1. Relación de causas de alteración de la reflectividad normalizada de la vegetación.

### 3300 ÍNDICES DE VEGETACIÓN. CONCEPTO, TIPOS Y APOLOGÍA DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI)

Analizados los elementos físicos y fisiológico-botánicos responsables de la particular respuesta espectral de la vegetación, resulta más comprensible abordar el tema de los índices de vegetación (IV): usos, aplicaciones, ajustes analíticos y temáticos, limitaciones y bondades, etc. Debemos partir de un primer concepto general: todos los IV tratan los Niveles Digitales (ND) de las respuestas espectrales de manera que la contribución de la vegetación en la señal radiométrica siempre queda realizada. En otras palabras, los IV explotan las diferencias espectrales de las bandas situadas en el infrarrojo cercano (IRC) y el rojo (R); esas bandas, en los satélites y sensores utilizados en nuestro trabajo son las siguientes:

<b>SATÉLITE</b>	<b>SENSOR</b>	<b>BANDA (IRC)</b>	<b>BANDA (R)</b>
Landsat	MSS	7	5
Landsat	TM	4	3
SPOT	HRV	3	2
NOAA	AVHRR	2	1

Los primeros análisis de contraste eran meras relaciones entre las radiancias de las bandas del IRC y del R (Jordan, 1969<sup>193</sup>; Pearson y Miller, 1972<sup>194</sup>; Colwell, 1973<sup>195</sup>, 1974<sup>196</sup>; Carnegie *et al.*, 1974<sup>197</sup>; Rouse *et al.*, 1973<sup>198</sup>,). Gilabert (1991)<sup>199</sup> remarca a este respecto la conveniencia de utilizar los valores de reflectividad y no los de la radiancia o ND; para calcular los IV con rigor, las imágenes deben de ser corregidas atmosféricamente y convertir los ND a reflectividad. En caso de emplear directamente los ND de la imagen, no debe de concederse un valor físico absoluto a los resultados, sino tan solo una valoración relativa, por la cual, cuanto mayor sea el resultado, mayor vigor vegetal tendrá la zona observada.

Las siguientes aplicaciones desarrollaron los IV propiamente dichos; el trabajo de Rouse *et al.*, (1974)<sup>200</sup> establece el *NDVI (Normalised Difference Vegetation Index)* o diferencia normalizada entre la reflectividad de las bandas del IRC y del R, según la expresión:

$$IV = \frac{\text{Banda 7 MSS} - \text{Banda 5 MSS}}{\text{Banda 7 MSS} + \text{Banda 5 MSS}}$$

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

De la expresión del NDVI apuntada se deduce que:

Para R = 0, NDVI = 1

Para IRC = 0, NDVI = -1

El NDVI se ha utilizado profusamente, a pesar de las *deficiencias* que se le pueden imputar. Entre los elementos que disminuyen la bondad de cálculo del NDVI hay que tener en cuenta las señales contaminantes registradas por el sensor como son: la absorción del vapor de agua, la dispersión de Rayleigh, las condiciones de observación, el ángulo de iluminación solar, etc. Por el contrario, entre los aspectos más *positivos* del NDVI destacamos los siguientes:

- 
- 193 Jordan, C. F., (1969). Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor; *Ecology* 50:663-666.
- 194 Pearson, R. L., Miller, L. D., (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, Mich., 1357-1381.
- 195 Colwell, J. E., (1973). Bidirectional spectral reflectance of grass canopies for determination of above ground standing biomass; Ph.D. Thesis, Univ. of Michigan, University microfilm 75-15, 693, 174 p.
- 196 Colwell, J. E., (1974). Vegetation canopy reflectance; v.3, *Remote Sens. of Environ.*, p. 175-183.
- 197 Carnegie, D. M., de Gloria, S. D., Colwell, R. N., (1974). Usefulness of ERTS-1 and supporting aircraft data for monitoring plant development and range conditions in California's annual grassland; BL Final Report 53500-CT3-266 (N).
- 198 Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D.W., (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS; 3rd ERTS Symp., NASA SP-351,1:309-317.
- 199 Gilabert, M.A. (1991). Indices de vegetación. En: La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables. Agricultura. Curso de Postgrado. Coord.: Gandía, S. y Meliá, J. Universitat de València. Estudi General. Unidad de Teledetección. Departament de Termodinámica. pp 285-295.
- 200 Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D.W.; Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retroradiation (greenwave effect) of natural vegetation. Report No. RSC 1978-4, Remote Sensing Centre, Texas A&M Univ., College Station, TX.

- La variación de los valores del NDVI entre unos márgenes estandarizados (+1, -1) facilita notablemente la interpretación de resultados.
- Posibilidad de estimación y correlación con varios parámetros de la cubierta vegetal.

Puesto que el NDVI calculado a partir de los datos del sensor AVHRR es un elemento clave en la metodología de trabajo de este estudio, apuntamos a continuación algunas áreas de investigación en las que se utiliza para estimar distintos parámetros de la cubierta vegetal:

- Seguimiento de cambio global (Asrar, G., 1990<sup>201</sup>, Tarpley, J.D., 1991<sup>202</sup>; Hastings y Di, 1994<sup>203</sup>), avance de desertificación, flujo global de CO<sub>2</sub>.
- Seguimiento de áreas y producción agrícola (Programa MARS: EC JRC-IRSA, 1994<sup>204</sup>; Programa CROPCAST: Earthsat, 1997<sup>205</sup>), ciclos fenológicos.
- Inventarios agrícolas (Richardson *et al.*, 1977<sup>206</sup>).
- Estimación de rendimientos (Delgado de la Mata *et al.*, 1997<sup>207</sup>).
- Control de deforestación tropical (Malingreau y Tucker, 1987<sup>208</sup>; Malingreau, 1991<sup>209</sup>).
- Previsión, seguimiento y evaluación de incendios forestales (Burgan, R.E., 1995<sup>210</sup>; Chuvieco y Martín, 1994 a<sup>211</sup> y 1994 b<sup>212</sup>).

- 
- 201 Asrar, G., (1991). *Mission to Planet Earth: a global change program. Proc. 16th Annual conference of the Remote Sensing Society. Univ. College, Swansea*, pp. i-v.
- 202 Tarpley, J.D., 1991: The NOAA global vegetation index product: a review, *Palaeogeography-Palaeoclimatology. Palaeoecol.*, 90, 189-194.
- 203 Hastings, D.A. and L. Di, 1994: Modelling of global change phenomena with GIS using the global change data base. II: Prototype synthesis of the AVHRR-based vegetation from terrestrial data, *Remote Sens. Env.*, 49: 13-24.
- 204 European Commission DG XIII. Joint Research Centre. Institute for Remote Sensing Applications (1994). *The MARS Project: overview and perspectives. Proceedings. Villa Carlotta, Belgirate, Lake Maggiore, Italy, 17-18 Nov. 1993. Oficina de Publicaciones de las Comunidades Europeas. Luxemburgo.*
- 205 Earthsat (1997) *Cropcast Commodity Forecast*. <http://www.earthsat.com/crop/cropcast.html>
- 206 Richardson, A. J., Wiegand, C. L.; Torline, R. J.; Gautreaux, M. R., (1977). *Landsat agricultural land use survey; Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 43, no. 2, p. 207-216.
- 207 Delgado de la Mata, J.A.; Illera Gutiérrez, P.; González Alonso, F., Terrab, R. (1997) *Utilización de imágenes NOAA para la estimación de rendimientos de cosechas en Castilla y León*. En: *Teledetección, Usos y Aplicaciones* (Casanova, J.L., Sanz Justo, J., Editores). Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico. Universidad de Valladolid.
- 208 Malingreau, J.P. Tucker, C.J. (1987) *The contribution of AVHRR data for measuring and understanding global processes: Large-scale deforestation in the Amazon basin. Proc. IGARS'87, Ann Arbor*, pp. 443-448.
- 209 Malingreau, J.P. (1991). *Remote sensing for tropical forest monitoring: an overview. Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries* (A.S. Belward, y C.R. Valenzuela, Eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 253-278.
- 210 Burgan, R.E., (1995). *Use of Remotely sensed data for fire danger estimation. Int. Workshop on Remote Sensing and GIS applications to forest fire management. (E.Chuvieco, Ed.). Universidad de Alcalá de Henares, Alcalá de Henares*, pp. 87-97.
- 211 Chuvieco, E., Martín, M.P. (1994a). *Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 563-570.
- 212 Chuvieco, E., Martín, M.P. (1994b). *A simple method for fire growth mapping using AVHRR channel 3 data, International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 3141-3146.

- Caracterización de ecosistemas (Cihlar, J. *et al.*, 1991<sup>213</sup>). Clasificación global de la cobertura del suelo (Townshend, J., *et al.*, 1987<sup>214</sup>, 1991<sup>215</sup>).
- Fluctuación del contenido de humedad en las hojas y reservas de agua en el suelo (Blachard *et al.*, 1974<sup>216</sup>; Hermosilla A., *et al.*, 1997).
- Identificación y seguimiento de monocultivos (Kauth y Thomas, 1976<sup>217</sup>, Gallo y Flesch., 1989<sup>218</sup>; Duggin, M. *et al.* 1982<sup>219</sup>).

Mientras la aplicación del NDVI se ha realizado sobre un número exponencial de casos, otros índices de vegetación han depurado y refinado sus expresiones de cálculo, con el fin de corregir o atenuar las anomalías que introducen en el NDVI el efecto de factores externos a la vegetación, en especial la respuesta espectral del suelo. Entre estos hay que destacar:

Kauth y Thomas  
(1976, *Cit. supra*)

$$SBI = 0.43 * MSS 4 + 0.63 * MSS 5 + 0.59 * MSS 6 + 0.26 * MSS 7$$

$$GVI = -0.29 * MSS 4 - 0.56 * MSS 5 + 0.60 * MSS 6 + 0.49 * MSS 7$$

ajustan la relación vegetación-suelo con un cálculo cuatridimensional, combinando dos índices de dos bandas cada uno: el primero es el índice de brillo del suelo (**SBI, Soil Brightness Index**) y el segundo, el índice de vegetación verde (**GVI, Green Vegetation Index**). Los índices se calculan según las expresiones reseñadas, para las reflectividades de las bandas 4, 5, 6, y 7, de Landsat MSS.

Richardson y Wiegand (1977, *Cit. supra*) diseñaron el índice de vegetación perpendicular (**PVI, Perpendicular Vegetation Index**), introduciendo un parámetro contabilizador de las variaciones espectrales del suelo, según la expresión:

$$PVI = \sqrt{(R_{gg5} - R_{p5})^2 + (R_{gg7} - R_{p7})^2}$$

Donde:

**PVI**, es la distancia perpendicular entre la vegetación y la línea de suelo.

**R<sub>p</sub>**, es la reflectividad de la vegetación (en bandas 5 y 7 del sensor MSS).

**R<sub>gg</sub>**, es la reflectividad del suelo subyacente a la vegetación.

- 
- 213 Cihlar, J., St-Lauren, L., Dyer, J.A., (1991). Relation between the normalised difference vegetation index and ecological variables, *Remote Sensing of Environment*, 35: 279-298.
- 214 Townshend, J., Justice, C., Kalb, V., (1987). Characterisation and classification of South American land cover types using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 1189-1207.
- 215 Townshend, J., Justice, C., Li, W., Gurney, C., McManus, J., (1991). Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of Environment*, vol35, pp. 243-255.
- 216 Blachard, M. B., Greeley, R., Toettelman, R., (1974). Use of visible, near infrared and thermal infrared remote sensing to study soil moisture; *Proc. 9th Int. Symp. on Remote Sens. of Environ.*, Ann Arbor, Michigan.
- 217 Kauth, R. J.; Thomas, G. S., (1976). The tasselled cap-a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat; *Proc. of the Symp. Machine Processing of Remote Sens. Data*, LARS, Purdue.
- 218 Gallo, K.P., Flesch, T.K., (1989). Large area crop monitoring with the NOAA AVHRR: estimating the silking stage of corn development, *Remote Sens. Env.*, 27: 73-80.
- 219 Duggin, M.J., Piwiniski, D., Whitehead, V., Ryland, G. (1982). Evaluation of NOAA-AVHRR data for crop assessment. *Applied Optics*, 21(11). 1873-1875.

Huete (1988)<sup>220</sup> simplifica el procedimiento de cálculo, con el fin de minimizar el efecto del brillo del suelo en la respuesta espectral de la vegetación, para lo cual desarrolla el índice de vegetación ajustado al suelo (*SAVI, Soil Adjusted Vegetation Index*), cuya expresión es:

$$SAVI = \frac{IRC - R}{IRC + R + L}$$

El objetivo del SAVI es minimizar la influencia que ejerce el suelo en la respuesta espectral de la cubierta vegetal, incorporando el *factor L* a la ecuación del NDVI. *L* es una constante de ajuste de la línea vegetación-suelo y, posteriormente, Huete *et al.*, (1994)<sup>221</sup> establecen el valor de *L* en torno a 0,5, tras numerosas aplicaciones y verificaciones en campo. Los resultados del SAVI son muy buenos en comparación con los del NDVI, puesto que reduce las variaciones introducidas por el suelo y purifica la señal correspondiente exclusivamente a la vegetación. Resulta más apropiado la aplicación del SAVI en el caso de medios semiáridos.

Como hemos dicho, *L* se define como una constante, pero, de hecho, el valor de ese parámetro también está sometido a oscilaciones, de acuerdo con las variaciones de reflectividad de cada suelo, por sus características intrínsecas y por el grado de humedad que alcance en cada momento; Qi y Kerr (1994)<sup>222</sup> modifican el SAVI por el *MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)*, donde *L* deja de ser una constante y pasa a ser una función de las reflectividades roja e infrarroja de la superficie, de manera que la cantidad de vegetación se sopesa según la expresión:

$$L = 1 - 2 \gamma NDVI \times WDWI$$

Donde, *WDVI* es el índice de vegetación ponderado (*Weighted Difference Vegetation Index*). Richardson y Wiegand, 1977<sup>223</sup>; Clevers, 1988<sup>224</sup>) y  $\gamma$  representa la línea de suelo según la expresión:

$$WDVI = IRC - \gamma R$$

A partir de lo apuntado en los párrafos anteriores, podría cuestionarse la razón por la que no se ha utilizado el SAVI para el análisis de nuestra serie de imágenes NOAA-AVHRR, en lugar de haberlas procesado y analizado a partir del NDVI, ya que en términos de cubrimiento de vegetación, gran parte de Castilla y León puede considerarse una región semiárida. Las razones por las que hemos utilizado el NDVI en nuestro estudio son múltiples:

- 
- 220 Huete, A.R., (1988). *A soil-adjusted vegetation index (SAVI)*. Remote Sens. Env.,25: 295-309.
  - 221 Huete, A. R., Justice, C., Liu, H., (1994). Development of vegetation and soil indices from MODIS-EOS. Remote Sensing of Environment, vol. 49. pp. 224-234.
  - 222 Qi, J., Kerr, Y. H., (1994). On current compositing algorithms Proceedings of the 6th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isere. France, 17-21 January 1994. Pp. 135 - 142.
  - 223 Richardson, A. J., Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43, 1541 - 1552.
  - 224 Clevers, J. G., (1988). The deviation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. Remote Sensing of Environment, 25, 53 - 70.

1. La variedad de suelos en un área tan extensa y la falta de bases de datos edáficas digitales, hacen que el cálculo del componente  $L$  para el SAVI o MSAVI sea un objetivo de trabajo más allá de lo abarcable en nuestro estudio.
  2. La disponibilidad del algoritmo de cálculo del NDVI ya automatizado e incorporado a la cadena de proceso y análisis de imagen descrito en el capítulo 4, sección proceso de obtención del NDVI.
  3. La existencia de estudios previos sobre la zona, ya realizados con NDVI: MARS, Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid.
- Sería interesante, en un futuro, someter la serie NDVI87m a estudios y comparaciones con SAVI, línea de investigación que ahora solo apuntamos y dejamos abierta.

Hay otros índices de vegetación que completan esta revisión. *GEMI* y *ARVI* son índices con parámetros destinados a la corrección de distorsiones atmosféricas; distorsiones que, en definitiva, reducen el valor del NDVI. El índice de seguimiento medioambiental global, o *GEMI (Global Environmental Monitoring Index*: Pinty y Verstraete, 1992<sup>225</sup>), se diseñó específicamente para corregir la contribución atmosférica en los datos registrados por el sensor AVHRR; está concebido para gestionar una amplia transmisividad atmosférica, lo que en la práctica origina un amplio rango de valores sobre las superficies terrestres. La ecuación de cálculo del GEMI aplica una combinación no lineal de reflectividades roja e infrarroja según la expresión:

$$GEMI = \eta (1 - 0.25 \eta) - \frac{R - 0.125}{1 - R}$$

En la que  $\eta$  se calcula según:

$$\eta = \frac{2 (IRC - R) + 1.5 IRC + 0.5 R}{IRC + R + 0.5}$$

Otra vía de ajuste del NDVI a las condiciones atmosféricas es la que proporciona el índice de vegetación atmosféricamente resistente (*ARVI, Atmospherically Resistant Vegetation Index*: Kaufman y Tanré, 1992<sup>226</sup>) y que opera con las distintas dispersiones de los canales azul y rojo del espectro según la expresión:

$$ARVI = \frac{IRC - RA}{IRC + RA}$$

Donde, IRC es la reflectividad aparente del infrarrojo cercano y RA un factor de diferencia de reflectividad entre el azul y el rojo, que se obtiene a partir de la expresión:

$$RA = R - \gamma (A - R)$$

En la que  $A$  y  $R$  corresponden a la reflectividad aparente de las bandas azul y roja, y  $\gamma$  es un parámetro de calibración que varía con el tipo de atmósfera, aunque el valor standard es 1.

225 Pinty, B., Verstraete, M., (1992). GEMI: a non linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, 101, 15-20.

226 Kaufman, Y., Tanré, D., (1992) *Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, pp. 261-270.

Queda patente el hecho de que cada formulación de índice de vegetación tiene aspectos positivos y deficiencias en cuanto al grado de discriminación de la biomasa. Leprieur *et al.*, (1966)<sup>227</sup>, remarca la sensibilidad de todos los IV en su tarea detectora de la vegetación, a pesar de las diferencias propias del diseño de cada algoritmo. Al mismo tiempo, resalta el valor que tienen las largas series de datos NOAA-AVHRR, puesto que la repetitividad del dato atenúa los valores extremos de observación así como las distorsiones ocasionadas por una geometría forzada, fluctuación de aerosoles y grado de transparencia de la atmósfera, carencia de una refinada corrección atmosférica, etc. La incertidumbre sobre la composición atmosférica debe llevarnos a una obligada prudencia en la interpretación de la biomasa detectada. Todas estas pautas señaladas por Leprieur para el NDVI derivado del AVHRR se han tenido en cuenta y verificado en nuestra serie de IV.

Las revisiones analíticas de los índices de vegetación de Hielkema (1978)<sup>228</sup> y Tucker (1979)<sup>229</sup> siguen teniendo un gran valor teórico y práctico; análisis actualizados sobre este tema pueden encontrarse en las revisiones críticas de Perry y Lautenschlager (1984)<sup>230</sup>, Guyot y Baret (1990)<sup>231</sup> y Leprieur *et al.*, (1996, *Cit. supra*) así como en los informes técnicos a la Comisión Europea elaborados a partir de contratos de investigación y desarrollo suscritos con el Centro para la Observación de la Tierra (CEO) de la Dirección General XII, por varios grupos Europeos de investigación, dentro del programa de Medio Ambiente y Clima (Proyecto MARS<sup>232</sup>, Proyecto MEGAFIREs<sup>233</sup>, CONTROL-FIRE-SAT<sup>234</sup>).

### 3310 COMPOSICIÓN DEL VALOR MÁXIMO (MVC) DEL NDVI.

En esta sección examinamos la razón de ser y la utilidad de las composiciones periódicas del valor máximo (*MVC, Maximum Value Composite*) del NDVI derivado de NOAA-AVHRR. La gestión de una serie de observaciones concatenadas nos inserta

- 
- 227 Leprieur, C., Kerr, Y.H., Pichon, J.M. (1996). Critical assessment of vegetation indices from AVHRR in a semi-arid environment. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 17, Nº. 13. 2549-2563.
- 228 Hielkema, J. V., (1978). Advanced training and research on satellite remote sensing techniques and applications in the United Kingdom and the United States; AGLT/RSU Series 2/79, Food and Agr. Org. of the U.N., Rome, Italy.
- 229 Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation; *Remote Sens. of Environ.*, v. 8, p. 127-150.
- 230 Perry, C. R., Lautenschlager, L. F. (1984). Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 14: 169-182.
- 231 Guyot, G., Baret, F. (1990). Potentials and limits of vegetation indices. Beltsville Symposium XV "Remote Sensing for Agriculture", May 16-18, 1990, Goddard Space Flight Centre, Greenbelt, Maryland.
- 232 MARS: Monitoring Agriculture through Remote Sensing. EC DG VI. Joint Research Centre. Space Applications Institute. Agricultural Information Systems Unit.
- 233 MEGAFIREs: Remote sensing of large wild fires in the European Mediterranean basin, at European and local levels. Contrato Nº: ENV4-CT96-0256 DG12.DTEE. Coordinador: Universidad de Alcalá de Henares. Dpto. Geografía. (España)
- 234 CONTROL-FIRE-SAT. Proyecto Design of a framework for producing and providing Earth Observation based information services for forest fire management at European and Local levels.. Contrato Nº: ENV4 CT 97 - 0479. Coordinador: Infocarto, S.A. (España).

de lleno en las valoraciones multitemporales. Gandía, S.(1991, p. 318)<sup>235</sup> apunta que “los estudios multitemporales se basan en la superposición espacial de todas las imágenes consideradas en el estudio y en la clasificación, haciendo uso de cuanta información se dispone, es decir, utilizando como bandas (variables) conjuntamente las de todas las fechas”.

El MVC del NDVI (Holben, 1986<sup>236</sup>, Cihlar, 1996<sup>237</sup>), es una imagen resultante de un periodo discreto de observaciones (10,12,15, 16 días), en la que cada píxel toma el valor máximo del NDVI alcanzado durante ese periodo. Esta selección determina el momento de mayor verdor dentro del periodo y, por lo tanto, la menor distorsión o contaminación por nubes u otros factores atmosféricos. Se ha apuntado la conveniencia de utilizar periodos de 11 días para el MVC derivado de NOAA-AVHRR, ya que la programación orbital cumple un ciclo completo cada 11 días; en cualquier caso, la praxis es muy variada, realizándose compuestos semanales, decenales, quincenales o mensuales. Nosotros hemos optado por estos últimos.

El análisis de una sola imagen NOAA-AVHRR no resulta del todo representativo pues, aunque se corrijan las alteraciones atmosféricas y geométricas, persisten otros factores que alteran el registro de los ND, como son: diferencias en la posición del sol, el ángulo cenital solar, fluctuaciones en la transparencia de la atmósfera, variación de los parámetros orbitales del satélite, etc.; cualquiera de estas variables causa, día a día, diferencias en los ND registrados por el sensor sobre un mismo punto de la superficie. Así, por ejemplo, la apertura angular de las observaciones del AVHRR en posición de nadir es de 55°, lo que produce un ángulo de mira respecto a la superficie de la tierra de 68°. Las observaciones desviadas del nadir originan al menos tres problemas en el cálculo e interpretación del NDVI por las que el valor queda reducido (Goward *et al.*, 1991<sup>238</sup>; Stoms *et al.*, 1997<sup>239</sup>):

1. **Variaciones en la resolución espacial.** El tamaño del píxel NOAA-AVHRR centrado en el nadir de la observación tiene una resolución espacial de 1.1 Km. de lado, mientras que los píxeles en los extremos alcanzan fácilmente 2.4 por 6.5 Km. Al efectuar las correcciones geométricas de la imagen, los valores de los píxeles distorsionados se solapan, causando distorsiones. Según Goward, observaciones con ángulos de elevación menores de 25° deben desestimarse.

---

235 Gandía, S. (1991). La teledetección en los inventarios agrarios. En: La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables. Agricultura. Curso de Postgrado. Coord.: Gandía, S. y Meliá, J. Universitat de València. Estudi General. Unidad de Teledetección. Departament de Termodinàmica. pp 313-324.

236 Holben, B.N., (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7 (11): 1417-1437.

237 Cihlar, J., Xiao, Q., (1996). Land cover classification with AVHRR multichannel composites in northern environments. *Remote Sensing of Environment*. 58: 36-51.

238 Goward, S. N., Markham, B., Dye, D. G., Dulaney, W., Yang, J. (1991). Normalised difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote sensing of environment*, 35 (2): 257-277.

239 Stoms, D. M., Bueno, M. J., Davis, F. W., (1997). Viewing geometry of AVHRR image composites derived using multiple criteria. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 63, N° 6., pp. 681-689.

2. **Mayor filtro atmosférico** actuando sobre la reflectividad de las superficies, por el aumento de la trayectoria angular. Todas las imágenes de satélite están sujetas al filtrado que la atmósfera ejerce sobre la radiancia. En las imágenes desplazadas del nadir este efecto se ve incrementado por el aumento de trayectoria que la energía reflejada debe atravesar. En el caso del sensor AVHRR, la dispersión causada por aerosoles resulta más manifiesta en el canal rojo (canal 1) que en el infrarrojo (canal 2), y es máxima en las imágenes de la tarde orientadas hacia el Este.
3. **Variaciones en la reflectividad bidireccional.** La mayoría de las cubiertas terrestres tienen características de reflectividad bidireccional (superficies lambertianas, Meliá, 1991, pp.55)<sup>240</sup> estableciendo diferencias entre los valores de reflectividad registrados por el sensor y los valores al nivel de la superficie.

La influencia que pueden tener estos factores sobre la calidad de una serie multitemporal y sobre la clasificación final mantiene una línea de investigación abierta (Cilhar, J., *et al* 1994)<sup>241</sup>. Stoms, D. (1997, *Cit. supra*) considera la posibilidad de un algoritmo de composición del MVC que incluya el ángulo cenital de cada observación como un elemento ponderado en el cálculo. La reducción del valor final del MVC es conocida y, mientras se depuran metodologías, no se puede perder conciencia de las distorsiones que introducen los factores mencionados, se debe de controlar la cadena de grabación y georreferenciación de las imágenes para no incluir imágenes con un ángulo de observación excesivamente bajo, de manera que los elementos de distorsión sean una constante sistemática. En el caso de la serie NDVI87m, las imágenes de los MVC mensuales nunca han tenido ángulos de observación inferiores a 20°.

Puede plantearse la siguiente objeción respecto al uso sistemático del MVC: puesto que las observaciones desviadas del nadir incurren, en principio, en mayores distorsiones y en la disminución final del NDVI, parece más apropiado desestimar las imágenes desviadas del punto de nadir.

Esta apreciación parece lógica y prudente para un cálculo acertado y para asegurar la calidad del dato en su origen; sin embargo, Stoms *et al.* (1997, *Cit. supra*), demuestra resultados muy satisfactorios de las series multitemporales de NDVI compiladas en MVC, a pesar de que la geometría de algunas observaciones diarias no sea óptima. La razón de citar a Stoms no es otra que la de avalar el procedimiento seguido en nuestro estudio para la elaboración de los MVC mensuales de la serie NDVI87m; ciertamente, algunas de las imágenes presentaban ángulos de observación muy bajos, con una geometría de la Península Ibérica bastante distorsionada; a pesar de todo, esas imágenes no se desestimaron para la elaboración de nuestros MVC siempre y cuando, al aplicar la corrección geométrica, el error cuadrático medio fuera menor de 0.5, aplicando un

---

240 Meliá Miralles, J., (1991). Fundamentos físicos de la teledetección: Leyes y principios básicos. En: La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables. Agricultura. Curso de Postgrado. Coord.: Gandía, S. y Meliá, J. Universitat de València. Estudi General. Unidad de Teledetección. Departament de Termodinàmica. pp 51-83.

241 Cihlar, J., Manak, D., D-Iorio, M., (1994). An evaluation of compositing algorithms for AVHRR data over land. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 8 (6): 893-916.

polinomio de corrección de segundo grado. Así, podemos decir que este ha sido el criterio de control de calidad de la geometría de las imágenes tomadas para la serie de MVC. Naturalmente, otro de los criterios de selección de las imágenes ha sido el horario: todas las imágenes se corresponden con observaciones diurnas de los NOAA-AVHRR sobre la Península. Esta premisa queda impuesta al trabajar con la respuesta espectral visible e infrarroja de la vegetación.

Hay otro aspecto que añade valor a las series multitemporales del MVC, construidas y mantenidas de manera sistemática y es la diversidad de aplicaciones que pueden darse a una misma serie. Aportamos dos ejemplos en los que se aprecia la rentabilidad de costes de una técnica que, a priori, podría no justificar la inversión requerida. El Servicio Geológico de los EEUU mantiene en el Centro de Datos EROS el registro permanente del NDVI mediante el sensor AVHRR; Stoms nombra varias líneas de gestión en las que se explotan habitualmente esos datos: caracterización de cubiertas del terreno y cartografía (Loveland *et al*, 1991<sup>242</sup>; Kremer y Running, 1993<sup>243</sup>; Paruelo y Lauenroth, 1995<sup>244</sup>), seguimiento de cultivos (Wade *et al*, 1994)<sup>245</sup>, control de incendios (Kasischke *et al*, 1993)<sup>246</sup>, evaluación de biodiversidad (Walker *et al*, 1992)<sup>247</sup> y variaciones fenológicas interanuales de las especies (Reed *et al*, 1994)<sup>248</sup>. La segunda gran serie de NDVI-MVC que queremos mencionar es la construida por el proyecto *MARS (Monitoring Agriculture through Remote Sensing)* de la UE. En la actualidad hacen uso de esa serie de datos estamentos de la UE como DGVI (Agricultura), Eurostat (Oficina de estadística), CEO (*Centre for Earth Observation*) para necesidades internas de gestión de la Comisión y en el marco de proyectos de investigación y desarrollo (p. ej. Proyecto MEGAFiReS).

Antes de continuar con los procesos de análisis de imagen de la serie multitemporal, y en concreto ahora nos referimos a nuestra **serie NDVI87m**, debemos apuntar que la articulación de la serie se ha concebido como una sola imagen compuesta de 87 bandas con los valores del NDVI-MVC mensuales. Así, la banda 1 corresponde a enero de 1990, la banda 2 a febrero de 1990, ...,y la banda 87 a marzo de 1997. La capacidad de

- 
- 242 Loveland, T., Merchant, J., Ohlen, D., Brown, J., (1991). Development of a land cover characteristics data base for the conterminous US. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 57 (11): 1453-1463.
- 243 Kremer, R., Running, S., (1993). Community type differentiation using NOAA-AVHRR data within a sagebrush-steppe ecosystem. *Remote Sensing of Environment*. 46(3):311-318.
- 244 Paruelo, J., Lauenroth, W., (1995). Regional patterns of NDVI in North American shrublands and grasslands. *Ecology*, 76(6): 1888-1898.
- 245 Wade, G., Mueller, R., Cook, P., Doraiswamy, P., (1994) AVHRR map products for crop condition assessment: a geographic information systems approach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60(9): 1145-1150.
- 246 Kasischke, E., French, N., Harrell, P., Christensen, N., Ustin, S., Barry, D., (1993). Monitoring wild fires in boreal forests using large area AVHRR-NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment*. 45(1): 61-71.
- 247 Walker, R., Stoms, D., Estes, J., Cayocca, K., (1992). Improved modelling of biological diversity with multitemporal vegetation index data. Technical papers of the 1992 annual meeting of ASPRS/ACSM, Albuquerque, New Mexico. 3-8 March. Pp 562-571.
- 248 Reed, B., Brown, J., VanderZee, D., Loveland, T., Merchant, J., Ohlen, D., (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*. 5(5). 703-714.

agrupar múltiples imágenes en una sola imagen multibanda es, desde nuestro punto de vista, uno de los aspectos que más facilitan el análisis de la serie y su clasificación, por extensa que esta pueda llegar a ser.

### 3400 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

Otro paso adelante en el análisis y generación de información temática a partir de las imágenes de satélite es el análisis de componentes principales (ACP), técnica derivada del análisis factorial (Child, 1970)<sup>249</sup> y aplicada a múltiples ámbitos científicos. El ACP se utiliza en teledetección para facilitar la comprensión de grandes volúmenes de datos registrados por los sensores, para la fusión de datos de distinta resolución, para determinar las mejores bandas que deben entrar en una composición o como filtro previo a la clasificación de una base multitemporal de imágenes.

La necesidad de aplicación del ACP surge del siguiente hecho: la información espectral registrada para un mismo píxel por las distintas bandas de una imagen está correlacionada hasta tal punto que la información resulta redundante; ¿por qué?: las superficies tienen comportamientos espectrales muy similares en las regiones adyacentes del espectro, por lo que el registro de esos valores en bandas contiguas puede ser igual, muy parecido o deducible de los datos de otra banda. En otras palabras, los valores de una banda pueden tener tal grado de correlación con los de otra, que resulten irrelevantes o redundantes. En resumen, la primera finalidad práctica del ACP es la depuración de datos, lo que se traduce en una reducción del volumen de información, del espacio informático y del tiempo de proceso requerido.

El ACP utiliza un conjunto de datos de entrada como variables, por ejemplo las bandas de una imagen multiespectral o, en nuestro caso, los MVC de la serie NDVI87m; el proceso discierne la capacidad de discriminación de los datos de partida, analiza la dimensionalidad intrínseca de los mismos y determina las variables canónicas que encierran la mayor parte de la información. El ACP transforma linealmente las múltiples variables de entrada en un nuevo conjunto de variables denominadas *componentes* y que guardan perfecta independencia entre ellas y un orden, en función del porcentaje de contribución de la varianza del conjunto de datos original. Moreno, J. (1991, p. 245)<sup>250</sup> lo expresa del siguiente modo: "... se trata de, a partir de un conjunto dado de  $n$  bandas originales, hallar la combinación (lineal) de  $b$  ( $n < b$ ) bandas que proporciona una mayor retención de la información contenida en todas las bandas originales (en el sentido de la varianza)".

Desde el punto de vista de cálculo estadístico, el ACP mejora la distribución de los datos, ya que redistribuye la variación interbanda mediante un proceso de referenciación

---

249 Child, D., (1970). The essentials of factor analysis. Holt, Rinehart and Winston.

250 Moreno, J., (1991). Discriminación y clasificación. En: La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables. Agricultura. Curso de Postgrado. Coord.: Gandía, S. y Meliá, J. Universitat de València. Estudi General. Unidad de Teledetección. Departament de Termodinámica. pp 241-272.

espectral de los datos respecto a unos nuevos ejes. Estos maximizar la separación o diferencias que se producen en el seno de los datos a lo largo de las diferentes bandas. Para realizar este proceso se parte de la **matriz de varianza-covarianza** de la las bandas de la serie original; mediante un proceso de diagonalización se obtienen los **autovectores**, tantos como bandas. A partir de este dato se obtiene la **matriz de autovalores** en la que cada componente trasluce la proporción de **información original** que retiene. Los **componentes principales** se obtienen por una combinación lineal de los autovalores con los datos originales, según la expresión:

$$P_e = \sum_{k=1}^n d_k E_{ke}$$

Donde,

$e$  : número de componente principal

$P_e$  : valor del píxel para el componente principal  $e$

$k$  : es una banda del dato original en particular

$n$  : número total de bandas

$d_k$  : valor del píxel para la banda  $k$

$E$  : matriz de autovectores

$E_{ke}$  : el elemento de la matriz en línea  $k$  , columna  $e$

Una vez obtenidos los componentes principales se observa que el autovalor de cada uno de ellos disminuye progresivamente. Llegado este punto interesa saber tres cosas:

1. Conocer la varianza de cada uno de los componentes principales; en realidad, cada autovalor es la varianza de cada componente.
2. Conocer el porcentaje de varianza que explica cada uno de los componentes; para calcularla se utiliza la expresión:

$$\%_p = \frac{\text{autovalor } \lambda_p \times 100}{\sum_{p=1}^n \text{autovalor } \lambda_p}$$

Donde,

$\%_p$  : porcentaje de la varianza total explicada por el componente  $p$ .

$\sum_{p=1}^n \text{autovalor } \lambda_p$  : Suma de todos los autovalores.

3. Conocer cuanto aporta cada una de las bandas a cada uno de los componentes; el cálculo del *peso* de cada una de las bandas en cada uno de los componentes se verifica mediante la expresión:

$$R_{kp} = \frac{akp \sqrt{lp}}{\sqrt{Vark}}$$

Donde,

$akp$ : autovector de la banda  $K$  y componente  $P$ .

$lp$ :  $p$ -ésimo autovalor.

$Vark$ : varianza de la banda  $k$ .

En definitiva, se trata de retener los  $n$  componentes principales que retengan mayor proporción de información de la serie original. En cuanto al significado estadístico de los nuevos componentes, por regla general, los tres primeros suelen aglutinar más del 95% de la varianza original, aunque este comportamiento no es constante, especialmente en largas series multitemporales. ¿Qué significado espectral tiene cada uno de los nuevos componentes?: en cada análisis lo determina la matriz de autovectores, sobre la que deberemos examinar los valores obtenidos entre la relación *componente/banda original*. A partir de los valores positivos, negativos o promediados de cada uno de los autovectores, se podrá determinar el resalte espectral a que corresponde cada componente. También hay que tener muy en cuenta los valores

residuales de los componentes, con una baja atribución de la varianza, ya que muchas veces explican ocurrencias anómalas.

El ACP es aplicable no solo a los ND absolutos sino también a variables derivadas como el NDVI, lo cual revaloriza las series multitemporales de estos índices (Eastman y Fulk, 1993<sup>251</sup>; Eastman y Toledano, 1996<sup>252</sup>). Además, el ACP puede aplicarse a toda la serie de observaciones, en el caso de estudios globales o plurianuales, o puede aplicarse sobre una serie de entradas selectivas, en el caso de análisis estacionales.

Al aplicar el ACP sobre una serie de NDVI, los datos difieren en el tiempo pero no en su contenido espectral; es la situación inversa de una imagen multiespectral en la que se analizan los ND, donde la temporalidad es la misma para un número de bandas espectrales de valores variables. La consecuencia de procesar la serie de NDVI mediante el ACP es que los componentes resultantes eliminan redundancias informativas y quedan de manifiesto los patrones de NDVI a lo largo del tiempo.

### **3500 ANÁLISIS DE FOURIER DE LA SEÑAL ESPECTRAL**

#### **3510 INTRODUCCIÓN**

Muchos fenómenos físico-naturales se repiten en el tiempo con intervalos que obedecen a leyes más o menos complejas y que generan patrones espaciales propios. Un ejemplo puede ilustrar esta afirmación: la respuesta espectral de un bosque de caducifolias mantiene ciclos estacionales constantes, con ciertos márgenes de oscilación y ajuste a las imposiciones de elementos como la humedad, temperatura o insolación.

**Eventos de la naturaleza** tales como una respuesta espectral en el tiempo, la cantidad de precipitación registrada en el año o el contenido y variación de humedad en el suelo **son cuantificables**, puesto que podemos establecer **leyes de asociación** entre los parámetros a analizar (en estos casos, el tiempo frente a la respuesta espectral, la precipitación o el contenido de humedad). En otras palabras se establecen **funciones** de cálculo entre varios elementos de la naturaleza.

Esto nos ha llevado a analizar nuestros datos según un método concreto de la **Teoría de Funciones**<sup>253</sup>: la Transformada Discreta de Fourier o análisis de armónicos (TDF); pero, para avalar la adecuación del método de análisis a los datos de la serie, resulta necesaria una revisión previa de conceptos que fundamenten progresivamente la aplicación de la TDF. Así, a partir del concepto de función (elementos y tipos), incorporaremos los de Serie de Fourier (SF), Transformada de Fourier (TF) y Transformada Discreta de Fourier.

---

251 Eastman, J., Fulk, M., (1993). Long sequence time series evaluation using standardised principal components. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.59, pp.1307-1312.

252 Eastman, J., Toledano, J., (1996). Forest monitoring in Malawi. Earth Observation Motoring. (9) 96, pp.28-32.

253 El ámbito de operación de la Teoría de Funciones entra, por una parte en el Cálculo y, por otra, se extiende hasta confundirse con el Análisis.

## 3520 FUNCIONES

La definición clásica nos dice que **función** es una aplicación de los reales en los reales, entendiendo aplicación como asociación. En otras palabras, a cada valor real se le asocia otro valor real. Ayres y Mendelson (1997)<sup>254</sup> sintetizan el concepto de función como “una asignación, para cada valor de una variable  $x$  en un cierto conjunto, de exactamente un valor de otra variable  $y$ . La variable  $y$  se llama entonces variable dependiente y la  $x$  variable independiente. El conjunto en el que se pueden escoger los valores de  $x$  se llama **dominio** de la función, pudiendo ser este finito o infinito. El conjunto de todos los valores correspondientes de  $y$  se llama **recorrido** de la función”. La definición más genérica de una función para un valor arbitrario es  $f(x)$ . Si una función se determina por  $f$ , la expresión  $f(b)$  denota el valor obtenido cuando  $f$  se calcula en un número  $b$  del dominio de  $x$ . La representación gráfica de una función es el gráfico de la ecuación  $y = f(x)$ .

En el caso de nuestra serie de datos, para cada valor real de tiempo del periodo de medición ( $x = 87$  meses) existe un valor real de respuesta espectral de la superficie ( $y = \text{NDVI} \pm 1$ ). Por ende, el **dominio** de nuestra función es finito y será de 87 meses, y el **recorrido** oscilará entre  $-1$  y  $+1$ .

Las funciones no siempre tendrán una expresión matemática sintética (Fórmula), ya que existen funciones que no pueden expresarse de manera analítica por ser asociaciones muy complejas que no siguen leyes matemáticas. El cálculo de funciones de fenómenos de la naturaleza mediante expresiones matemáticas no es trivial. Función es una ley de asociación y esa existe aunque no se pueda expresar matemáticamente mediante una expresión cerrada. En palabras de Spivak (1992, p. 50)<sup>255</sup>, “una función es una regla cualquiera que hace corresponder números a ciertos otros números, no necesariamente una regla que pueda ser expresada mediante una fórmula algebraica, ni siquiera mediante una condición uniforme aplicable a todo número”. En ocasiones se puede aproximar una expresión matemática a una función mediante ajustes.

Hay dos aspectos que pueden **dificultar el cálculo de una función**: 1º) la falta de una medida continua y 2º) la falta de una expresión matemática sintética para el cálculo de la función.

**Primero**, para saber cómo varía el elemento dependiente ( $y$ , p. ej. la reflectividad), se deben tomar medidas, para lo que se lleva a cabo un **muestreo** de la función, ya que ésta es constante, trascendente, inalcanzable permanentemente. Para entenderlo en el contexto de nuestra aplicación, aunque los satélites NOAA efectúan un barrido constante, de hecho, sobre unas determinadas coordenadas  $X$  e  $Y$ , la observación no es constante, sino periódica (hasta 6 veces al día) dando un carácter de muestreo a los

---

254 Ayres, F., Mendelson, E., (1997). Cálculo diferencial e integral. 3ª Ed. McGraw-Hill. Madrid

255 Spivak, M. (1992). Calculus. Cálculo infinitesimal. 2ª Ed. Ed. Reverté, S.A. Barcelona.

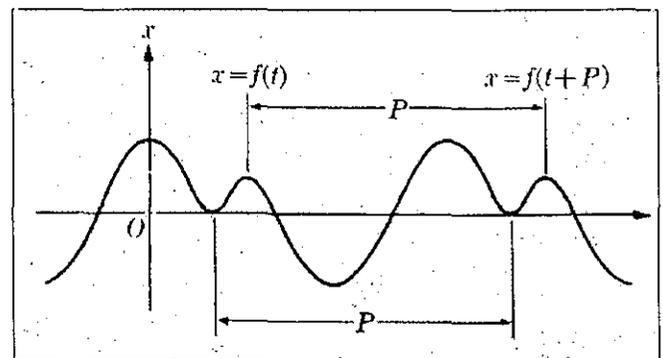
datos de la serie. Ciertamente, la sincronización de las naves NOAA procura una alta frecuencia de muestreo, aunque para ciertas aplicaciones todavía resulta parca.

**Segundo**, es deseable ajustarse a una ley matemática, aunque no todas las funciones se expresan en una ley matemática con propiedades de unicidad. En otras palabras, las funciones que se dan en la realidad no siempre pueden expresarse matemáticamente.

Existen muchos **tipos de funciones**. Nombramos las principales con el fin de encuadrar el tipo de relaciones a establecer según la naturaleza de los datos y así ubicar las funciones aplicadas a nuestra serie.

Una función  $f(x)$  se dice *continua* si se registran valores en todo punto de su dominio (propiedades). Una función  $f(x)$  es *discreta* si una o varias condiciones de continuidad fallan. Esta diferenciación puede parecer muy básica, pero es capital en nuestro análisis ya que, aunque la serie de 1012 imágenes pueda parecer un continuo de datos, especialmente cuando el registro ha sido diario, en análisis de funciones matemáticas la serie no es continua. La toma de datos de reflectividades es puntual, limitado al instante de barrido del sensor sobre el campo de visión del área de estudio

Función *periódica* es aquella que mantiene fluctuaciones con estricta periodicidad; es decir, para cualquier valor  $x$ , pasado un tiempo  $T$ , se vuelve a tener el mismo valor  $x$ , según la expresión  $f(x + T) = f(x)$ . El ejemplo gráfico adjunto a este párrafo muestra como  $f(x)$  se repite a intervalos iguales del periodo  $P$ .



La descomposición espectral de Fourier puede realizarse en dos casos:

1. En una función periódica sobre un dominio infinito. En este caso se exige estricta periodicidad, es decir que para un valor  $x$ , pasado un tiempo  $t$ , se vuelve a obtener el mismo valor de  $x$ .
2. Cuando se trata de una función no periódica sobre un dominio finito.

¿Qué tipo de datos forma nuestra muestra de señales NDVI87m?: una serie finita discontinua definida en un dominio finito. Un aspecto a favor de la aplicación del análisis de Fourier es que, partiendo de una situación de observaciones (muestras) finitas (1012 tomas) y no estrictamente periódicas puesto que las muestras no son siempre diarias a lo largo de los 87 meses de muestreo. Se le puede aplicar la transformada por tenerla definida en un dominio finito ya que si no es estrictamente periódica no se le puede aplicar la transformada.

### 3530 SERIES DE FOURIER

Como hemos indicado, la mayor parte de los fenómenos cíclicos que encontramos en la naturaleza mantienen ritmos oscilatorios, capaces de ser descompuestos en una función periódica. Alonso y Finn (1986, p.359)<sup>256</sup> apuntan: “Uno de los movimientos más importantes observados en la naturaleza es el **movimiento oscilatorio** ...De todos los movimientos oscilatorios, el más importante es el movimiento armónico simple que, además de ser el más sencillo de describir matemáticamente, constituye una aproximación muy cercana de muchas oscilaciones encontradas en la naturaleza”. La ecuación matemática es:

$$y = \Delta \cos (k\theta + \phi)$$

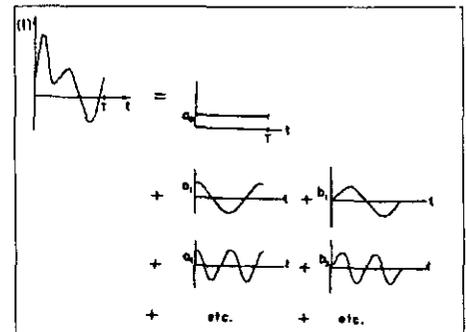
donde,  $\Delta$  es la amplitud,  $k$  es el número del armónico,  $\theta$  es el ángulo y  $\phi$  la fase.

Jean Baptiste Fourier (1768-1827) demostró que toda función **periódica** definida en un dominio infinito o bien toda función discreta definida en un dominio finito puede descomponerse en una **suma de senos y cosenos de ángulo**, múltiplos de uno fundamental (frecuencia fundamental) incluido el cero. La suma de sinusoides recibe el nombre de **Serie de Fourier**. Tal descomposición puede articularse como una función  $f(t)$  periódica del espacio o del tiempo; la articulación matemática y gráfica de una serie de Fourier es:

$$\begin{aligned} f(t) &= a_0 \\ &+ a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t \\ &+ a_2 \cos 2\omega t + b_2 \sin 2\omega t \\ &+ a_3 \cos 3\omega t + b_3 \sin 3\omega t \\ &+ \dots \end{aligned}$$

Donde  $\omega = 2\pi/T$ , y  $a$  y  $b$  son constantes numéricas que nos dicen cuanto de cada oscilación componente está en la oscilación  $f(t)$ . Así, vemos que sumando movimientos armónicos simples cuyas frecuencias son múltiplos de una frecuencia fundamental y cuyas amplitudes

sean seleccionadas correctamente, podemos obtener casi cualquier función periódica arbitraria. Lo inverso es también valedero, y constituye el teorema de series de Fourier, el cual establece que una función periódica  $f(t)$  de periodo  $P = 2\pi/\omega$  puede expresarse del siguiente modo, como la suma de la serie de senos y cosenos apuntada anteriormente:



**Figura 50.2** Representación gráfica de una representación armónica  $f(t)$  resultado de la suma de funciones armónicas simples. Fuente: Feynman, *et al* (1987, pg. 50.4)<sup>257</sup>.

256 Alonso, M., Finn, E., (1986) Física. Vol. I. Mecánica. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, Delaware.

257 Feynman, R., Leighton, R., Sands, M., (1987). Física. Vol. 1: Mecánica, radiación y calor. Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. Wilmington, Delaware. USA.

$$x = f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t \\ + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots + b_n \sin n\omega t$$

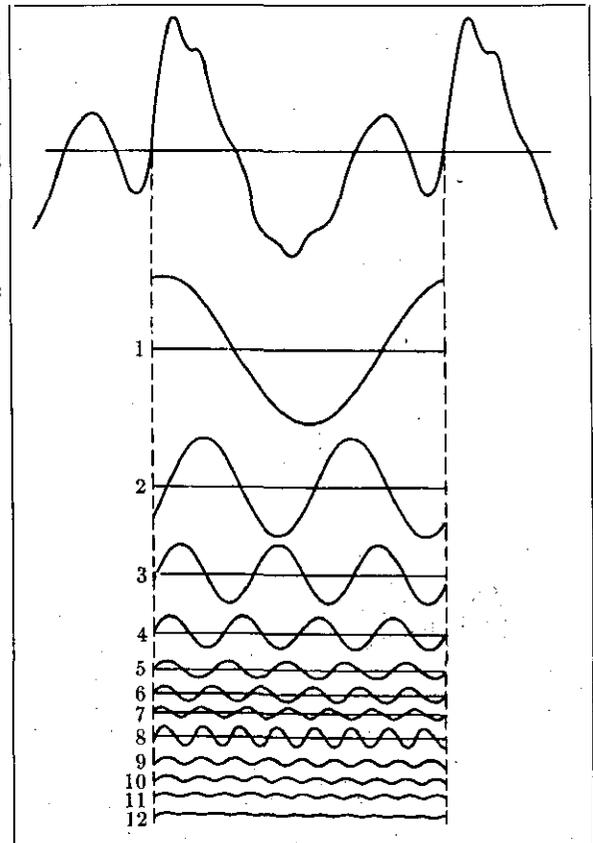
La frecuencia  $\omega$  se denomina frecuencia fundamental, mientras que  $2\omega$ ,  $3\omega$ , etc., son los armónicos de la frecuencia fundamental. Los coeficientes  $a_n, b_n$ , se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$a_0 = 1/P \int_0^P f(t) dt$$

$$a_n = 2/P \int_0^P f(t) \cos n\omega t dt$$

$$b_n = 2/P \int_0^P f(t) \sin n\omega t dt$$

La aplicación del teorema de las series de Fourier permite considerar cualquier clase de movimiento periódico como la superposición de movimientos armónicos simples. Así, la figura aneja a este párrafo representa la curva de una función periódica analizada en sus componentes de Fourier hasta el armónico doce (fuente: Alonso y Finn, 1986, *Cit. supra*, pg 396)



### 3540 TRANSFORMADA INTEGRAL DE FOURIER

Otro concepto a considerar en el análisis de Fourier es el de la transformada integral o, simplemente, transformada de Fourier, para el caso en el que la serie de datos no sea periódica, sino un **continuo de valores de frecuencia**, variando de forma continua tanto la frecuencia como la suma de senos. En el caso no periódico, la curva de valores se extiende desde  $-\infty$  a  $+\infty$ , y se entiende que ese intervalo cubre un periodo.

La premisa básica de las transformadas es que cualquier función unidimensional puede ser descompuesta en una integración de funciones sinusoidales elementales frecuencia varía de manera continua. Su expresión matemática se verifica mediante una integral.

$$F(x) = \int_0^{\infty} \{A(\alpha) \cos \alpha x + B \operatorname{sen} \alpha x\} dx$$

Donde,

$$A(\alpha) = 1/\pi \int_0^{\infty} f(x) \cos \alpha x dx$$

$$B(\alpha) = 1/\pi \int_0^{\infty} f(x) \operatorname{sen} \alpha x dx$$

El interés de aplicar la TF a la señal capturada por el satélite es descomponer la señal original en **ciclos** con el fin de observar si alguno de los *subciclos* tiene especial fuerza.

### 3550 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

De nuevo, la transformada discreta de Fourier es una función de análisis para series que carecen de un muestreo continuo de datos y que, en concreto, se organizan como un conjunto discreto de parejas de reales, emparejados de dos en dos. La TDF actúa sobre esas parejas, para obtener información de la periodicidad encerrada en ese conjunto discreto de datos.

La TDF desarrolla una nueva teoría de análisis sobre la serie y las transformadas de Fourier. En sentido estricto, a la TDF no se le pueden aplicar los mismos conceptos que a los análisis de series citados hasta ahora. ¿Por qué?: el análisis de las series de Fourier y la transformada de las series de Fourier se aplican cuando la serie temporal de partida es continua, mientras que la Transformada Discreta de Fourier es el método adecuado cuando la serie temporal es discreta, como en nuestro caso, ya que la serie NDVI87m está definida en un intervalo finito y el registro de sus datos es periódico en cada toma del satélite. A priori, la aplicación de la TDF parece lógica en el caso de NDVI87m, aunque la bondad del método se ratifica al final del análisis con la obtención de los resultados.

Hemos dicho que el teorema de Fourier sostiene que una serie temporal puede entenderse como la suma de múltiples funciones sinusoidales, o **armónicos**, cuya varianza es el resultado de la suma de las varianzas de los armónicos. Como veremos enseguida, podemos expresar la varianza de cualquier armónico como la parte proporcional de la varianza total de la serie temporal de la cual se deriva.

En economía se analizan las series temporales cuantificando números índices y descomponiendo la señal original en una suma de rectas y ciclos, donde las rectas indican tendencias globales y los ciclos indican oscilaciones entorno a las tendencias. En ingeniería (eléctrica) se examinan y descomponen las señales temporales en *wavelets* para averiguar la recurrencia e intensidad de los pulsos. Los físicos analizan las señales

temporales construyendo *embeddings* en un espacio n-dimensional con el fin de controlar la evolución futura de la señal.

En cada una de las estaciones de medición la serie temporal de 87 datos se puede describir como una suma de armónicos del tipo:

$$y = A \cos( K_0 + \varphi )$$

Donde,  $A$  es la amplitud  
 $K$  es el número del armónico.  
 $O$  es el ángulo  
 $\varphi$  es la fase

La suma de armónicos de la serie temporal ( $ST$ ) se expresa del siguiente modo:

$$ST = A_0 \cos( K_0 + \varphi_0 ) + A_1 \cos( 1_0 + \varphi_1 ) + A_2 \cos( 2_0 + \varphi_2 ) + \dots + A_{43} \cos( 43_0 + \varphi_{43} ) = \sum_{i=0 \dots 43} A_i \cos( i_0 + \varphi_i )$$

En definitiva pretendemos averiguar “el peso” de cada uno de los armónicos en esta serie; en el sumatorio la expresión anterior  $A_i$  es el *peso* de cada armónico  $i$  en la serie temporal. Al aplicar la transformada discreta de Fourier se obtienen 87 pares de datos que en realidad son 87 números complejos de los que solo sirven 44 pares de ellos, es decir:  $(c_0, d_0), (c_1, d_1) \dots (c_{43}, d_{43})$ . El resto de los datos ( $i = 44 \dots 86$ ) son los complejos conjugados de los anteriores y no proporcionan ninguna información.

La relación entre la amplitud ( $A$ ) y la fase ( $\varphi$ ) de cada armónico se obtiene por las

siguientes expresiones:  $A_i = \frac{2}{87} \sqrt{(c_i^2 + d_i^2)}$        $\varphi_i = \arctang(d_i / c_i)$

El total de **armónicos** no es igual al número de observaciones (87) sino la mitad (43). El primer armónico es el de valor cero (armónico fundamental) y corresponde a una señal en el conjunto de observaciones que no oscila sino que es constante. Prescindiendo de este armónico, observamos que los datos de la serie oscilan entorno a valores constantes que no son cero. Un armónico es significativo en la señal original si su amplitud es significativamente distinta de cero.

Para nuestra interpretación geográfica de frecuencias y secuencias de NDVI en el conjunto de Castilla y León nos interesa saber que momento en el **tiempo** de la serie **representa cada armónico**. Para esto, el valor del ángulo  $O$  debe de ser transformado en el tiempo mediante:  $O = 2\pi(t-1)/T$  Siendo:  $O$ , el ángulo;  $T$  el periodo total de estudio ( $T=87$ );  $t$ , son los valores a dar para el cálculo de  $y$  en la ecuación  $y = A \cos( K_0 + \varphi )$ , entre 1, 2, 3 ...86, 87;  $\pi$ , la constante 3.14159.

En términos más coloquiales, en el caso de  $K = 1$  estaremos formulando la ecuación del primer armónico, que nos hablará de la componente cíclica de los datos que oscilan una vez en 87 meses, para  $K = 7$  hablamos de siete oscilaciones en 87 meses, o lo que es

igual a 1 vez en 12 meses; por tanto el armónico 7 nos mostrará los ciclos anuales de vigorosidad de las cubiertas. (ver tabla 5.11 para la correspondencia armónicos/meses).

En nuestro trabajo hemos calculado los armónicos de la serie NDVI87m y hemos representado las varianzas de los sucesivos armónicos en los *periodogramas* del Anexo 7, también denominados *discreta* o *línea de potencia del espectro*. En la presentación y comentario de resultados del capítulo 5 se verá hasta que punto y en que zonas de Castilla y León la respuesta espectral de la superficies tiene un comportamiento unimodal o bimodal (uno o dos ciclos álgidos durante el año) y si estos ciclos principales encierran varianzas de pequeña proporción que nos hablan de la presencia de subciclos cada 3 o 4 o seis meses. El Análisis de armónicos mediante la TDF ayuda a este fin.

### **3600. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES**

La necesidad de representar la superficie de la tierra y lo que acontece sobre ella ha sido una constante histórica, difícil de alcanzar hasta nuestro siglo por carencias técnicas. La fotografía aérea y las imágenes de satélites para el seguimiento de recursos naturales han proporcionado medios más adecuados para la cartografía temática, por su visión global de grandes superficies en muy poco tiempo. La clasificación temática suele ser el objetivo final de la mayoría de los trabajos de teledetección; en muchos casos la información tematizada pasa a ser fuente de alimentación de un sistema de información geográfica, entrando en otra cadena de procesos de análisis y representación, de la que nos ocuparemos en el siguiente epígrafe.

Pero como contrapartida, los datos fotogramétricos o de alta resolución espacial suelen ser muy costosos, su registro territorial es de una globalidad limitada por el alto nivel de detalle (por ejemplo, 185×185 Km en el caso de Landsat TM) y requieren grandes espacios informáticos para el proceso del volumen de datos registrado. En este sentido, el sensor ideal para estudios globales, con mayor nivel de resolución espacial que el alcanzado hasta el momento está todavía por llegar: resolución temporal diaria, resolución espacial entre 300 y 500 m de píxel, mayor discriminación espectral del sensor, acceso directo a los datos, etc. Los programas de desarrollo espacial encaminados a esta actuación parece que serán una realidad en el primer lustro del tercer milenio, dentro de los planes de actuación de la NASA-NOAA con el sensor *MODIS* y de la Agencia Espacial Europea con los sensores *Vegetation* y *MUST*.

Mientras los satélites y sensores ideales se hacen realidad, la explotación de los datos NOAA-AVHRR sigue aplicándose en beneficio de las ciencias de la tierra maximizando su excelente resolución temporal, a pesar de que su resolución espacial sea tosca; la cobertura diaria les permite ser utilizados como fuente de información adecuada para estudios de coberturas y cambios del terreno.

¿**Qué es la clasificación** de imágenes?: es el proceso de agrupar *píxeles* en un número finito de clases individuales, o categorías de datos, basándose en los valores de fichero. Cuando un píxel satisface un conjunto de criterios, se asigna a la clase que cumple esos criterios. Cuando nos referimos a los valores de fichero, estos pueden tratarse de los NDV originales o los obtenidos por una transformación, como por ejemplo los NDVI de nuestra serie; hacemos esta observación para resaltar el hecho de que, aunque las imágenes NDVI87m han sido objeto de una pseudo clasificación por la tematización continua del NDVI, el apilamiento de las 87 imágenes en una sola hace que la serie sea, a todos los efectos, una sola imagen multispectral, con 87 bandas y por lo tanto susceptible de clasificación.

El **objetivo general** de esta sección es desglosar brevemente el proceso de clasificación y los posibles métodos de cálculo a desarrollar en cada una de ellas, de manera que se tenga un panorama de encuadre de la opción adoptada en nuestro estudio. El **objetivo particular** es justificar los métodos de clasificación de nuestras fuentes por los que hemos optado: clasificación no supervisada de la serie NDVI87m y clasificaciones supervisadas sin verdad terreno para las imágenes Landsat TM.

Todo proceso de clasificación conlleva dos grandes etapas: la definición de las áreas de entrenamiento y la reasignación de píxeles a las clases definidas. En la **etapa de entrenamiento** se lleva a cabo la definición de áreas de referencia que controlarán la clasificación, mediante la relación establecida entre las clases espectrales y las clases temáticas o informacionales que se quieran derivar de la imagen. Se puede suponer que establecer tales paridades es una tarea ardua y pocas veces evidente o con relaciones biunívocas; Moreno, J. (1991, *Cit. supra*, p. 242) recomienda un análisis factorial preliminar de los datos brutos de la imagen para explorar su capacidad y rangos de discriminación de la información o “una clasificación no supervisada automática del conjunto de datos disponibles con el fin de explorar cuales son las clases espectrales intrínsecamente presentes en dicho conjunto de datos”; otros criterios para la selección acertada de áreas de entrenamiento pueden encontrarse en Fitzpatrick-Lins (1978<sup>258</sup>, 1980<sup>259</sup>) y Chuvieco y Congalton (1988)<sup>260</sup>.

Los **métodos de clasificación** de áreas de entrenamiento son: supervisados, no supervisados o mixtos. La **clasificación supervisada** requiere la elección en el campo de *áreas de entrenamiento*: superficies amplias y fácilmente reconocibles en las imágenes o cartografías de apoyo. Es aconsejable tomar muestras de la reflectividad de

---

258 Fitzpatrick-Lins, K., (1978). Accuracy and consistency comparisons of land use and land cover maps made from high altitude photographs and Landsat multispectral imagery. U.S. Survey Journal of Research, vol. 6, pp. 23-40.

259 Fitzpatrick-Lins, K., (1980). Mapping urbanized area expansion through digital image processing of Landsat and conventional data. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, Publication 79-113, March, 90 pp.

260 Chuvieco, E., Congalton, R., (1988) Using cluster analysis to improve the selection of training statistics in classifying remotely sensed data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.54, pp.1275-1281.

esas áreas con un radiómetro de campo, en la misma fecha de barrido de la imagen o en fechas inmediatas. Los datos de campo permiten establecer relaciones guiadas entre los ND de la imagen y las categorías reconocidas en las áreas de entrenamiento. Este procedimiento de clasificación limita los márgenes de error por la precisión inherente al control de campo y verificaciones sobre el terreno; las ventajas son todavía más patentes en el caso de áreas con gran fragmentación de cubiertas. Entre los inconvenientes que se imputan a la clasificación supervisada están el grado de rigidez y subjetivismo que infringen las muestras además de los problemas para clasificar zonas de transición de cubiertas donde no suelen darse relaciones de correspondencia nítida. A esto hay que añadir los costes del muestreo que serán tanto más altos cuanto más diversa y amplia sea el área de escena a clasificar. Imágenes de distintos sensores requieren tamaños de áreas de entrenamiento y muestreos de campo diferentes.

La **clasificación no supervisada**, también denominada análisis de clusters o aglomerados, tiene como objetivo formar grupos de objetos homogéneos dentro de una variedad de atributos cualitativos (NDVI) o cuantitativos (ND). El proceso puede considerarse automático y no requiere el conocimiento previo del área ni la toma de muestras en campo. Se asume que “las variables del análisis son indicadores de las características de cada individuo y desempeñan todas ellas el mismo papel como criterios de definición del grado de homogeneidad que tienen los individuos (*píxeles*) del grupo. Los métodos estadísticos que se incluyen bajo el nombre genérico *análisis cluster* tratan, pues, de elaborar una taxonomía numérica, es decir, una clasificación de objetos basada en información numérica. Son los modelos más recientes de análisis estadístico multivariante y los más heurísticos” (Abdenbi, 1997, p.139)<sup>261</sup>.

La idoneidad de la clasificación no supervisada mantiene un debate permanente. Chuvieco (1996, *Cit. supra*, p. 381) le imputa una gran aleatoriedad además de un mayor interés por la interpretación rápida a costa de la precisión del proceso y los resultados. Moreno (1991, *Cit. supra*, p. 247) entiende este procedimiento como una técnica exploratoria para la identificación de clases canónicas, aunque en otro momento afirma que “las premisas que se establecen en un análisis *clustering* son tan específicas que el método acaba siendo más supervisado que los propios métodos supervisados de clasificación”. Abdenbi (1997, *Cit. supra*, p. 140) advierte la rápida actualización de los algoritmos de cálculo, de lo que se deduce que la elección del método y algoritmo de cálculo deben ajustarse a cada caso, según el contexto del problema y el tipo de datos que se manejan. Por nuestra parte entendemos que la clasificación no supervisada puede ser adecuada en los siguientes casos:

1. Como aproximación estadística a datos desconocidos y como guía hacia la clasificación supervisada por la identificación automática de clases espectrales.
2. Como aplicación de alta operatividad, en casos en los que la rapidez de resultados puede compensar una cierta pérdida de precisión de los mismos.

---

261 Abdenbi, M., (1997). Seguimiento y control de la vegetación mediante imágenes NOAA-AVHRR. Memoria para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas. Universidad de Valladolid. Facultad de Ciencias. Departamento de Física Aplicada I.

3. Como final de tratamiento de una larga serie temática multitemporal, sobre la que se ha mantenido un riguroso control de procesos intermedios.

El punto de partida para el análisis es, por tanto, una matriz de individuos por variables ( $n \times p$ ), que en nuestro caso corresponde con la imagen unitaria NDVI87m, en la que los individuos son los *píxeles* sobre Castilla y León y las variables, las 87 bandas correspondientes a los NDVI-MVC de la serie; la clasificación puede verificarse sobre la totalidad de las variables o sobre un subconjunto, lo que de nuevo prueba la bondad de la serie multitemporal apilada en una sola imagen multicanal. Sobre esta estructura de datos resulta más fácil hacer clasificaciones estacionales y comparar desviaciones de imágenes particulares.

El proceso de cálculo matemático y estadístico de la clasificación no supervisada comienza por la búsqueda y agrupación de *píxeles* uniformes: ¿qué criterio se sigue para decidir si nuestro conjunto de  $n$  individuos (*píxeles*), de los que conocemos  $p$  variables, es un todo no estructurado o pueden diferenciarse en él grupos afines?. Se deben determinar dos principios:

1. La distancia de similitud específica entre individuos, de donde se calculará la matriz de distancias.
2. La distancia para la combinación de grupos

La matriz de distancias entre individuos se calcula a partir de la matriz original, habiendo definido alguna medida de distancia entre individuos; por ejemplo, distancia euclídea, del coseno, de Manhattan o City-Block, de Chebychev, de potencias, etc. Nosotros hemos optado por la fórmula de mínima distancia espectral para formar los grupos de *píxeles* (Moreno, 1991, *Cit. supra*, p.249); la combinación de grupos se ha realizado mediante el algoritmo ISODATA (Duda y Hart, 1973<sup>262</sup> y ERDAS Imagine<sup>263</sup>), conocido también como de agregación por centros móviles; se trata de un algoritmo de cluster de tipo no jerárquico, que parte de:

1. un número de centros de clase arbitrarios, prefijados por el operador;
2. se calculan los nuevos centros de gravedad, se configuran los nuevos grupos, a los que se asignan cada uno de los *píxeles* en función de su cercanía al centro más próximo.
3. el proceso es iterativo hasta alcanzar el criterio de parada, por ejemplo que un número determinado de *píxeles* no cambien de clase en iteraciones consecutivas.

Las **clasificaciones mixtas** de áreas de entrenamiento combinan los elementos más positivos de las dos formas explicadas hasta ahora. Unas veces el método no supervisado antecede al supervisado como guía; otras, se aplican por separado para sintetizar los resultados finales de cada clasificación.

---

262 Duda, R., Hart, P., (1973). Pattern classification and scene analysis. John Wiley & Sons, New York.

263 Erdas (1996). Erdas Imagine field guide. 3<sup>rd</sup> Edition. Erdas Co. Atlanta.

Como indicamos, la segunda etapa en el proceso de clasificación es la **reasignación de píxeles a las clases definidas**; para el caso de la clasificación no supervisada, ya ha quedado visto con el proceso ISODATA, pero existen otros métodos de reasignación. Normalmente se subdividen en paramétricos y no paramétricos.

Los **métodos de reasignación paramétricos** se basan en modelizar la distribución de los *píxeles* pertenecientes a cada clase en función de las variables clasificatorias, de acuerdo con funciones matemáticas preestablecidas como modelo; esas funciones dependen de un conjunto de parámetros que son los que caracterizan la distribución. La ventaja de los métodos paramétricos es su simplicidad matemática y, en la mayoría de los casos, los escasos requerimientos de espacio informático; como contrapartida, la dificultad se encuentra en la determinación del modelo matemático que determine la distribución de *píxeles* de cada clase; puesto que la distribución de *píxeles* solo extraordinariamente adopta un formato “normal”, los modelos matemáticos deben adaptarse a esa realidad por ajuste de mínimos cuadrados (Duda y Hart, 1973, *Cit. supra*). Entre los métodos paramétricos podemos citar: el clasificador de **máxima probabilidad** (complejo pero con máximo ajuste por contar con la distribución de probabilidad que va a caracterizar cada clase a partir de la matriz de varianza-covarianza y del vector de medias de las zonas de entrenamiento; incluye además pesos ponderados en los criterios de reasignación), la distancia de **Mahalanobis** y el clasificador de **mínima distancia**

Los **métodos de reasignación no paramétricos** operan con la distribución de *píxeles* real y completa, sin pretender reducir su realidad a un modelo matemático. Como contrapartida, exigen equipos de cálculo mejor dimensionados que para el caso anterior (procesadores paralelos, holgura de memoria, etc.). Entre los métodos no paramétricos podemos citar: clasificador por paralelepípedos, por distribución del histograma, por estimación del núcleo o método de Parzen y el método del vecino más próximo. No es el objetivo de esta memoria desglosar los contenidos de estos métodos de reasignación de píxeles a las categorías de una clasificación.

Al comienzo de esta sección señalamos como objetivo particular la justificación de los métodos de clasificación aplicados a nuestras imágenes; en el capítulo 4 describimos las características de esas imágenes y los procesos a que han sido sometidas.

Fuente	Método de Clasificación
1. Imagen-serie NDVI87m	No supervisado
2. Escena Landsat TM 201-31 Aranda de Duero	Supervisado con control de signaturas sin muestras de campo
3. Mosaico Landsat TM sobre Castilla y León	No supervisado

¿Por qué se ha clasificado la **imagen-serie NDVI87m** por el método **no supervisado**?: entendemos que esta imagen es susceptible de ser tratada y clasificada de diversas maneras; de hecho, la riqueza de datos que contiene así lo exige y por eso también hemos aplicado el ACP y el análisis de Fourier. Hemos procedido a clasificarla por el

método no supervisado en nuestro intento de validar una metodología práctica, rápida y semiautomática de clasificación de cubiertas y de seguimiento de procesos bióticos regionales. Por las características de las imágenes NOAA-AVHRR en serie multitemporal entendemos que el control de la clasificación reside, no tanto en un método de clasificación supervisada, sino en el control de los procesos intermedios de georreferenciación, construcción del MVC e incorporación a la imagen-serie final.

Al aplicar la clasificación no supervisada sobre una serie progresivamente acumulativa, se pretende observar una mejora gradual en la discriminación de cubiertas, a medida que el número de registros de la serie aumenta mes a mes con nuevos NDVI-MVC.

Además, la estructura de los MVC en una sola imagen-serie la hemos concebido como una base de consulta rápida y comparativa; será rápida si permite un análisis ágil de todos o parte de sus componentes. Será comparativa si permite contrastes internos y contrastes con las tomas que se van efectuando en el presente y que engrosan la serie de MVC. Si aplicáramos una metodología de clasificación supervisada, con las tomas de datos de campo que estas requieren, los objetivos de rapidez y comparación de las tomas diarias con la serie multitemporal perderían todo su sentido.

La **escena Landsat TM 201-31** se clasificó por un método supervisado sin toma de muestras espectrales en campo para la verificación de las áreas de entrenamiento, siendo conscientes de las deficiencias implicadas. Teniendo en cuenta que el proceso de imágenes de alta resolución no es objetivo prioritario de nuestro trabajo, actuamos de este modo por dos motivos:

1. Para constatar las diferencias entre imágenes Landsat TM y NOAA-AVHRR: características de la imagen, idoneidad de aplicación, métodos de pre-procesado y clasificación, volúmenes de espacio requeridos, tiempos de proceso, etc.
2. Para comparar el grado de discriminación de cubiertas alcanzado entre la clasificación no supervisada de la serie multitemporal y la clasificación supervisada de una sola imagen de alta resolución, que para ser comparada con la anterior, debería someterse necesariamente a una degradación del tamaño de píxel.

Trabajar con el **mosaico de escenas Landsat TM** sobre la totalidad de la Comunidad Autónoma de Castilla y León suponía un reto técnico y un elemento más de comparación con la serie NDVI87m. Se decidió clasificar el mosaico por los métodos supervisado y no supervisado, para comparar procesos y resultados con las anteriores clasificaciones y con la voluntad de experimentar la posibilidad de incorporar mayor nivel de detalle espacial en la clasificación de cubiertas.

La clasificación de estas dos fuentes se realizó como mero ejercicio de aplicación de método y para contar con cierto soporte comparativo de la clasificación NDVI87m. No se buscaban resultados metodológicos de estas aplicaciones.

### 3700 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

En esta sección no se pretende hacer un examen conceptual y técnico de los SIG, sino una introducción a la experiencia de gestión de datos geográficos surgida a partir del primer objetivo de trabajo (construcción y examen de una serie multitemporal de NDVI-MVC derivados de NOAA-AVHRR); las características de geocodificación de la serie NDVI87m, los sistemas informáticos empleados para su proceso y archivo, así como la información geográfica de apoyo que necesariamente se fue incorporando poco a poco a nuestro trabajo de análisis de la serie, nos han ido llevando de la mano a la construcción de un SIG, que integra:

1. Serie de **1012 imágenes NOAA-AVHRR** de la península Ibérica, georreferenciadas (canales 1 y 2. Ver calendario de las imágenes en Anexo 1),
2. serie de **1012 imágenes** con el valor del índice de vegetación normalizado **NDVI**,
3. Serie de **87 compuestos** mensuales del NDVI sobre la **península Ibérica**,
4. Serie de **87 compuestos** mensuales del NDVI sobre la **Comunidad de Castilla y León** (serie NDVI87m),
5. **Imagen multicanal NDVI87m** sobre Castilla y León,
6. **Imagen Landsat TM 201-31**, Aranda de Duero, de 23.09.92. Ortorrectificada. Tamaño de píxel: 35 m. 6 canales,
7. **Mosaico Landsat TM** sobre Castilla y León. 3 canales. Ortorrectificada. Tamaño de píxel: 35 m,
8. Modelo digital del terreno (**MDT**) sobre Castilla y León. Tamaño de píxel: 200 y 80 m,
9. Base **CORINE** de ocupación y usos de suelo de Castilla y León,
10. Base digital de las **comarcas agrarias** de Castilla y León,
11. Base cartográfica digital de **municipios** de Castilla y León,
12. Base cartográfica digital de **núcleos urbanos** de Castilla y León,
13. Base cartográfica digital de **ríos** de Castilla y León,
14. Base digital de ubicación de **60 estaciones termopluiométricas** del INM en Castilla y León,
15. Base cartográfica digital de los contornos de la Península Ibérica, comunidad de Castilla y León y provincias.

*Pero, ¿qué tienen en común todos estos datos para integrarse en un mismo sistema de información?, ¿cuáles son las notas distintivas de un sistema de información geográfica?, ¿qué elementos articulan un SIG?. Veamos algunos aspectos de los SIG en relación con el seguimiento de usos y cubiertas del suelo, ordenación del territorio y control de recursos naturales, ámbitos de uso práctico de bases de datos tan completas y costosas como las que acabamos de citar.*

Los SIG son estructuras físicas (hardware) y lógicas (software) capaces de codificar, almacenar, transformar, analizar y representar información geoespacial; también se pueden entender como bases de datos vinculadas por referencias geográficas: la característica intrínseca de los datos de un SIG es que son topológicos. Conviene no

perder de vista las definiciones acuñadas en los trabajos de Marble y Peuquet (1983)<sup>264</sup>, Burrough (1986)<sup>265</sup>, Star y Estes (1990)<sup>266</sup>, Bosque (1992)<sup>267</sup>, Langran (1993)<sup>268</sup>, Cebrián (1994)<sup>269</sup>, Gutiérrez y Gould (1996)<sup>270</sup>, Basildo y López (1998)<sup>271</sup>.

En definitiva, los SIG son instrumentos de gestión de datos espaciales puesto que manejan la localización absoluta de las notaciones almacenadas, así como las relaciones cualitativas entre ellas. Expresado de un modo más gráfico, cada notación temática queda registrada en un campo o capa independiente, pero la gestión de esos datos es multitemática si todos tienen la misma referenciación geográfica (Georreferenciación o topología).

La necesidad de los SIG surge desde numerosos ángulos; aquí nos centraremos solo en dos aspectos: primero, en la necesidad de los SIG que imponen los objetivos finales de una aplicación o trabajo de ordenación del territorio y segundo, en la que surge de la propia naturaleza, volumen y estructura de los datos que confluyen en el SIG.

En el primer caso, y quizá por la connaturalidad que ha adquirido la comunicación en nuestras vidas, nos interesa saber dónde ocurren los hechos y cual es la naturaleza de esos asuntos. Y esto es cierto en un amplio abanico de temas: fenómenos sociales, políticos, de género, ecológicos. Pero el interés llega a querer predecir acontecimientos contando con factores variables previsibles: no es suficiente el tener localizados unos datos, hay que analizarlos. ¿Qué objetivo hay detrás de este interés?: comprender y ordenar el territorio para la aplicación de políticas, mejorar procedimientos, etc... en definitiva para mejorar las condiciones de las sociedades que ocupan esos espacios, aumentando la calidad de planificación y la mejora de servicios.

En el segundo caso, la posibilidad de gestionar el gran volumen de datos que almacenan por regla general los SIG's, de gestionar simultáneamente los volúmenes de datos que acumula un SIG, se ha hecho factible solo con el advenimiento y mejora de los sistemas informáticos. Algunos SIG's requieren herramientas especialmente potentes, en cuanto a procesadores de datos, gestión de bases relacionales, etc.

---

264 Marble, D., Peuquet, D., (1983). Geographical Information Systems and Remote Sensing. En Colwell, R., Manual of Remote Sensing, Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry. Vol I. Cap 22, pp 923-986.

265 Burrough, P., (1986). Principles of geographical information systems for land resources assessment. Clarendon Press, Oxford.

266 Star, J., Estes, J., (1990). Geographic information systems: an introduction. Englewood Cliffs, N. J.; Prentice-hall.

267 Bosque Sendra, J., (1992). Sistemas de información Geográfica. Ed. Rialp. Madrid.

268 Langran, G., (1993). Time in Geographic Information Systems. Taylor and Francis. London.

269 Cebrián, J.A., (1994). GIS concepts. Infocarto, S.A.. Universidad de Cáceres.

270 Gutiérrez Puebla, J., Gould, M., (1996). Sistemas de información geográfica, Colección Espacios y Sociedades, nº 2. Ed. Síntesis. Madrid.

271 Basildo Martín, R., López Nieva, P., (1998). Aproximación bibliográfica a los sistemas de información geográfica aplicados a la ordenación del territorio y los recursos naturales. Anales de Geografía de la Universidad Complutense. Nº 18. Servicio de Publicaciones. Universidad Complutense.

La aproximación a los SIG depende, en primer lugar de las personas y de los intereses, tal y como resumimos en el siguiente esquema

Personas	Intereses
Usuario SIG	Viajero, Comerciante, Militar, Ingeniero, Político, Marino, Aviador, Investigador, Administrador...
Productor Información SIG	Topógrafo, Geógrafo, Geodesta, Delineante, Impresor, Informático...
Distribuidor Información SIG	Cartoteca, Comercio, Informática, Comunicaciones, Editor...
Empresario	Enseñanza, Industria, Ingeniería

Las aplicaciones de los SIG son incontables: diseño y gestión de redes de distribución de agua, gas, telecomunicaciones; gestión de urgencias sanitarias y de protección civil en general; planes generales de ordenación urbana y de comarcas rurales; inventarios de recursos naturales; control de masas forestales y riesgo de incendios; redes de distribución comerciales; sistemas gestores de tráfico; distribución y nivel de uso de equipamientos sociales, etc. La enumeración podría resultar interminable, prueba de la utilidad de esta herramienta en las más diversas necesidades. De nuevo, el intercambio de experiencias de aplicaciones SIG entre instituciones y particulares resulta muy rica a través de la red mundial de comunicaciones (foros de discusión).

El equipamiento técnico de un SIG consta de dos grandes elementos básicos: hardware, software (de análisis, simulación, integrados en sistemas expertos). La figura 3.6 resume los elementos de hardware básicos necesarios en cualquier SIG. La potencia y capacidad de los instrumentos deberá planearse en función de los presupuestos, volumen y tipo de datos del estudio e integración con otros sistemas.

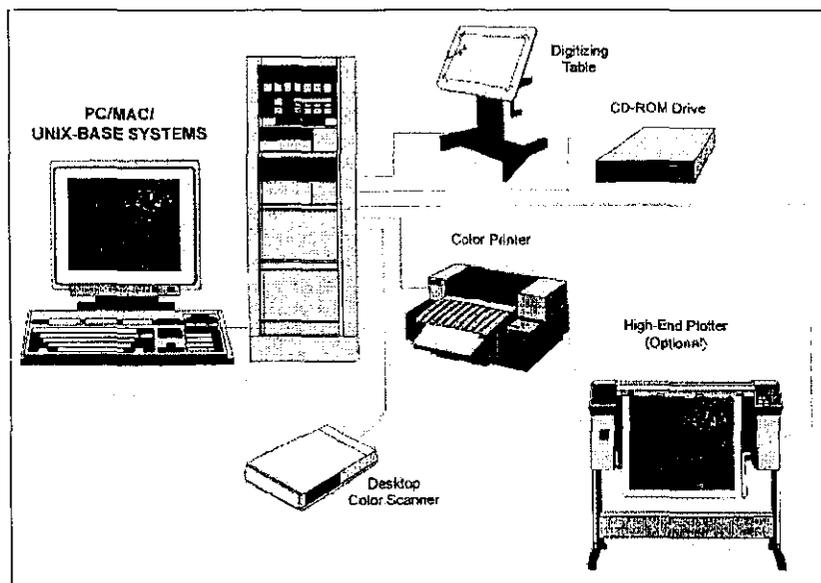


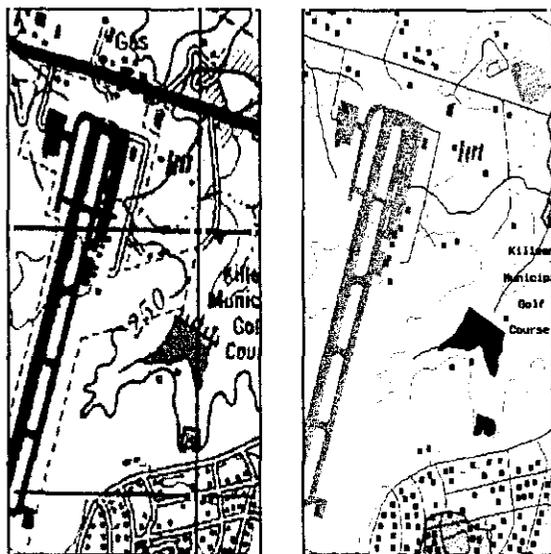
Figura 3.6 Esquema de elementos básicos de hardware de un SIG

Otro de los temas cruciales en los SIG son los datos. El origen es diverso: documentos cartográficos convencionales analógicos, fotografías aéreas, imágenes de satélite, bases alfanuméricas, etc. Lo importante para que todos esos datos constituyan un verdadero SIG es que posean un formato digital ráster o vectorial compatible y una referenciación espacial común.

El tratamiento y representación de **datos ráster** en un SIG corresponde a una división regular del espacio en forma de células (píxeles) del igual forma y tamaño. El tamaño del píxel proporciona la resolución espacial de los datos; el valor de píxel (categoría) proporciona el atributo; la posición del píxel, la coordenada de localización en el espacio. La conversión de datos analógicos a datos digitales ráster se realiza mediante barrido óptico (escaneado) de los documentos o rasterizando bases de datos vectoriales. Entre los aspectos positivos de la rasterización de datos está la posibilidad de integrar documentos espaciales tradicionales a bases de cálculo numéricas; por el contrario, debe de tenerse en cuenta que los datos ráster resultan muy voluminosos (un documento A4, escaneado a 300 dpi requiere 9 Mb), además el tiempo de acceso y tratamiento es más largo que el caso de datos vectoriales.

El tratamiento y representación de **datos vectoriales** en un SIG se articula en la síntesis de la información geográfica en puntos, líneas y polígonos, georreferenciados y manteniendo las relaciones topológicas entre los elementos. Los datos vectoriales proceden de la introducción manual de datos (vectorización) sobre pantalla o tableta de digitalización,, importación de datos numéricos (bases de datos, GPS, etc.) o vectorización automática de datos ráster. Lo más positivo de los datos vectoriales es el escaso volumen informático que requieren y la rapidez de tratamiento, mientras que su inclusión y actualización en una base de datos es muy lenta y costosa.

En la planificación de un SIG y en relación con los datos, debe tenerse en cuenta (i) el tipo más idóneo de datos a utilizar o la combinación deseable de ambos para que haya



Representación de una misma base de datos en formato ráster y vectorial.

una verdadera interrelación del aspecto gráfico y de los atributos; (ii) la protección de los datos: permisos de acceso, almacenaje y rutas de salvamento, gestión de modificaciones e historiales de trabajo; (iii) la actualización de la base de datos: con qué periodicidad, planificando la integridad de los datos después de las actualizaciones, comercializando versiones antiguas, etc.

Por las características de esta memoria, tiene especial relevancia la consideración de los datos de teledetección como fuente de alimentación de un SIG. En los capítulos de las fuentes, el proceso de tratamiento y el análisis queda de manifiesto las

posibilidades de actualización de una base de datos con objetivos medioambientales y cartográficos por medio de observaciones NOAA-AVHRR. En nuestro caso, la actualización absoluta de la base de datos es mensual: cada mes se incluye en la base multitemporal una nueva imagen del valor compuesto del NDVI. Pero esa actualización

absoluta conlleva actualizaciones relativas diarias, puesto que cada día se programan y procesan nuevas imágenes (hasta 6 posibles en nuestras latitudes).

La dificultad de actualización de una base de datos geográfica, la temática de análisis o el coste de actualización de los mismos pueden hacer aconsejable la construcción o retroalimentación de un SIG mediante datos de teledetección. Este modo de proceder ha resultado satisfactorio en el seguimiento de daños artificiales (vertidos petroleros, incendios forestales, contaminación costera, etc.), seguimiento de daños naturales y actuaciones paliativas sobre el medio y de protección civil<sup>272</sup> (inundaciones, sequías, deslizamientos, mareas rojas, etc.); seguimiento de dinámicas naturales multitemporales: evolución de cosechas, flujos de corrientes marinas, control de la extensión y salud de las masas forestales, actualización de cartografías de uso.

Al igual que en otras secciones ofrecemos, por último, varios puntos de información sobre aplicaciones, bases de datos cartográficas o bibliográficas de SIG.

<a href="http://mapfinder.nos.noaa.gov">http://mapfinder.nos.noaa.gov</a> <a href="http://www.pmel.noaa.gov/vents/coax/coax.html">http://www.pmel.noaa.gov/vents/coax/coax.html</a>	Servicio cartográfico SIG de la Agencia NOAA
<a href="http://icg.fas.harvard.edu/maps">http://icg.fas.harvard.edu/maps</a>	Fondo cartográfico digital de la universidad de Harvard
<a href="http://gis.mit.edu/projects">http://gis.mit.edu/projects</a>	Recursos SIG en el Michigan Institute of Technology
<a href="http://www.weather.com/weather/maps">http://www.weather.com/weather/maps</a>	SIG meteorológico interactivo
<a href="http://www.maxweil.com/caltrans">http://www.maxweil.com/caltrans</a>	SIG interactivo con actualización de datos e tiempo real de la Dirección General de Tráfico del Estado de Carolina del Sur
<a href="http://piue.sedac.ciesin.org/piue/ddviewer">http://piue.sedac.ciesin.org/piue/ddviewer</a>	Bases de datos de población mundial, censos y cartografía demográfica.
<a href="http://www.erin.gov.au/database/db.html">http://www.erin.gov.au/database/db.html</a>	Base de datos medioambiental australiana con herramientas SIG de cartografía
<a href="http://www.gisca.adelaide.edu.au/cgi-bin/eco/ecogis">http://www.gisca.adelaide.edu.au/cgi-bin/eco/ecogis</a>	Cartografía SIG interactiva para ecorutas en Australia
<a href="http://opgis.lst.se/textl.htm">http://opgis.lst.se/textl.htm</a>	SIG de catalogación de las fuentes de contaminación atmosférica en Suecia
<a href="http://ice.ucdavis.edu:8080/">http://ice.ucdavis.edu:8080/</a>	Sistema de información medioambiental de California
<a href="http://www.lib.virginia.edu/gic">http://www.lib.virginia.edu/gic</a>	Centro de información geográfica de la Universidad de Virginia
<a href="http://www.indurot.uniovi.es/sistem">http://www.indurot.uniovi.es/sistem</a>	Universidad de Oviedo: Area de sistemas de información geográfica
<a href="http://www.geogra.alcala.es">http://www.geogra.alcala.es</a>	Universidad de Alcalá de Henares
<a href="http://www.latuv.es">http://www.latuv.es</a>	Laboratorio de teledetección de la Universidad de Valladolid

**Tabla 3.2** Algunos puntos de información y bases de datos SIG en la Internet. Consulta: 22.07.99

272 Proyecto *ENVIREF*: Environmental monitoring of refugee camps using high resolution satellite data. EC. DG XII. Ciencia, Investigación y Desarrollo. Programa: Clima y Medio Ambiente. Contrato N°: ENV4.CT980762.

## **4000 FUENTES Y PROCESO DE TRATAMIENTO**

### **4100 INTRODUCCIÓN**

Tal y como indicábamos en la introducción del capítulo anterior, ahora nos ocuparemos de describir la naturaleza, estructura y proceso de las fuentes de datos utilizadas en este estudio y que han sido las siguientes:

1. Imágenes NOAA-AVHRR, (4200, 4300).
2. Imagen Landsat TM 201-31 y Mosaico TM sobre Castilla y León. (4400).
3. Modelo digital del terreno, (4500).
4. Base CORINE de ocupación y usos de suelo de Castilla y León (4600).
5. Base Cartográfica Nacional, (4700).
6. Base de datos climáticos (60 estaciones termoplumiométricas completas), (4800).

La estructura de exposición de este capítulo es sencilla: después de la descripción de cada una de las fuentes, desglosamos el proceso seguido hasta obtener los elementos de análisis que se esperaba de cada una de ellas. El espacio dedicado a las imágenes NOAA-AVHRR es más extenso, por la importancia dada a esta fuente en el conjunto de nuestro estudio y por el volumen absoluto que representan, en términos informáticos y de tiempo de proceso. La última sección (4900) del capítulo incluye un análisis de costes de las fuentes de datos y de los sistemas de tratamiento (hardware y software).

### **4200. DESCRIPCIÓN DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR.**

#### **4210. MARCO INSTITUCIONAL DE LA MISIÓN NOAA DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA**

La Agencia NOAA (*National Oceanic Atmospheric Administration*) comenzó su andadura el 3 de octubre de 1970, como una sección del Ministerio de Comercio de los Estados Unidos; la creación de la agencia fue resultado de importantes decisiones políticas y presupuestarias que, en su origen, reconocían la importancia y riqueza que entrañan los océanos y la atmósfera para el bienestar y desarrollo mundial.

La Agencia NOAA está compuesta por varias entidades científicas con competencias medioambientales:

- El servicio oceánico nacional (*National Oceanic Service*).
- El servicio meteorológico nacional (*National Meteorological Service*).
- El servicio pesquero (*National Marine Fisheries Service*).
- El servicio de información y datos de satélites medioambientales (*National Environmental and Information Service*).
- La oficina de investigación atmosférica y oceánica (*Office of Oceanic and Atmospheric Research*).

El bagaje científico acumulado por estas instituciones previo a su fusión en una única agencia ha sido de gran importancia, ya que su actividad se remonta a principios del

siglo XIX. El origen del Servicio de Información y Datos de Satélites Medioambientales se enraíza en el Servicio de Prospecciones Geodéticas Costeras, responsable del registro de datos climáticos y de los primeros lanzamientos de sondas en el siglo XIX; posteriormente, y ya en nuestro siglo, el Centro Nacional de Datos Climáticos se establece en 1950 en Ashville, Carolina del Norte. Gracias a la presión que ejercieron para el desarrollo y lanzamiento de satélites meteorológicos, los científicos del Instituto Meteorológico (*Weather Bureau*) fueron los primeros que llevaron a cabo la grabación sistemática de datos de satélites en la década de los 50. En este sentido, el lanzamiento del TIROS-1 en abril de 1960 supuso un hito.

La idea de crear una agencia estatal gestora e impulsora de las ciencias de la tierra es anterior al establecimiento de NOAA. En 1965, el mismo Presidente Johnson dirigió la unificación de los servicios en un único departamento conocido como el *Environmental Science Services Administration* (ESSA). Esto supuso un avance significativo en la creación de la futura NOAA y de su objetivo de desarrollo de tecnologías y ciencias medioambientales.

En 1966, el Congreso de los Estados Unidos aprobó el acta sobre recursos marinos (*Marine Resources and Engineering Development Act, PL 89-454*) por la que se creó una comisión (*Stratton Commission*) para la revisión y asesoramiento de las actividades relacionadas con el medio marino.

Aunque las competencias de la comisión eran de carácter asesor, ésta reconoció la necesidad científica de estudiar los océanos y la atmósfera de modo interactivo, para comprender ambos en su totalidad. Así, en 1969 la Comisión *Stratton* emanó el documento *Our nation and the sea: a plan for national action*. La recomendación esencial de la Comisión abogaba por la creación de una nueva agencia nacional oceánica y atmosférica, responsable de la gestión de los programas nacionales civiles relativos a la atmósfera y los océanos. Como resultado de las deliberaciones del Comité Ejecutivo, se acordó el Plan de Reorganización N° 4, de 1970: el Presidente Nixon propuso la creación de la Agencia NOAA, adscrita al Departamento de Comercio. La descripción de la Agencia NOAA dentro del plan presidencial decía, entre otras cosas:

*NOAA hará posible un programa federal equilibrado para mejorar nuestro conocimiento de los recursos marinos y así permitir su desarrollo y uso al tiempo que se protejan contra la explotación indiscriminada que nos ha conducido en el pasado a la pérdida de muchos bienes naturales.*

*NOAA hará posible un programa consolidado para lograr un conocimiento más profundo de los fenómenos oceánicos y atmosféricos que afectan tan directamente nuestras vidas y actividades.*

*NOAA facilitará la cooperación entre intereses públicos y privados para servicio de intereses mutuos. Espero que NOAA guíe el Programa Nacional de Investigación y Desarrollo Oceánico y Atmosférico. NOAA coordinará sus recursos técnicos y científicos junto con los recursos de otras agencias estatales y privadas.*

*Como función intrínseca, NOAA proveerá servicios a otras agencias gubernamentales, a la industria y a particulares que puedan necesitarlos para el buen funcionamiento de las comunicaciones, transportes, agricultura o seguridad.*

El Plan de Reorganización N° 4 también incluía la creación de una Agencia de Protección Medioambiental (EPA), con el fin de modificar las políticas medioambientales federales existentes hasta el momento. En síntesis, la función de NOAA en esta agencia era de asesoría científica, mientras que la EPA debería centrarse en aspectos legales reguladores del medioambiente. De todos modos, puesto que la EPA empezó a desarrollar un programa científico en 1970, NOAA decidió a su vez abordar funciones legales. El primer administrador de la NOAA, Dr. Robert White, empezó a dar forma al futuro de la agencia, otorgando la máxima importancia a las actuaciones de protección y conservación medioambiental.

El primer satélite de la serie NOAA se puso en órbita en octubre de 1978, con la denominación TIROS-N. La agencia NOAA asumió ya desde entonces el compromiso de mantener siempre en órbita al menos dos satélites de la serie, totalmente operativos, de manera que cualquier punto del globo pueda ser registrado al menos dos veces al día, gracias a la sincronización entre las pasadas diurnas y nocturnas. Los lanzamientos de naves NOAA han seguido el calendario mostrado a continuación:

SATELITE	DENOMINACIÓN LANZAMIENTO	FECHA LANZAMIENTO	FINAL SERVICIO OPERATIVO
TIROS N		13 Octubre 1978	30 Enero 1980
NOAA A	NOAA 6	27 Junio 1979 3 Julio 1984	5 Marzo 1983 16 Noviembre 1986
NOAA B	Fallo en lanzamiento	29 Mayo 1980	29 Mayo 1980
NOAA C	NOAA 7	23 Junio 1981	7 Junio 1986
NOAA E	NOAA 8	28 Marzo 1983 1 Julio 1985	12 Junio 1984 31 Octubre 1985
NOAA F	NOAA 9	12 Diciembre 1984	7 Noviembre 1988
NOAA G	NOAA 10	17 Septiembre 1986	Actividad parcial
NOAA H	NOAA 11	24 Septiembre 1988	11 Abril 1995
NOAA D	NOAA 12	14 Mayo 1991	Activo
NOAA I	NOAA 13	9 Agosto 1993	21 Agosto 1993
NOAA J	NOAA 14	30 Diciembre 1994	Activo
NOAA K	NOAA 15	13 Mayo 1998	Activo
NOAA L, M, N	En espera de lanzamiento según necesidades programa.		

Desde el punto de vista técnico de la agencia NOAA, se denomina “serie TIROS N” a las naves comprendidas entre TIROS N y NOAA D, mientras que la serie de naves entre NOAA E - N se denomina “serie TIROS ATN” o *Advanced TIROS N*.

## 4220 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SATÉLITES NOAA

### 4221 CARACTERÍSTICAS ORBITALES

Los satélites NOAA siguen una órbita casi polar: circunvalan la tierra de polo a polo cruzando el ecuador con un ángulo de 98.7° a 98.9°. La temporización orbital es heliosíncrona, lo que significa que hay una relación constante entre el satélite y el sol, de manera que el nodo descendente, o punto de cruce del ecuador, es atravesado siempre a la misma hora solar por la nave. El periodo de duración de una órbita es de 102 minutos, lo que suma un total de 14.158547865 órbitas completas al día; puesto que el número de órbitas por día no es entero, las secciones suborbitales no son idénticas de día en día, sino en ciclos de 11 días, aunque la hora solar de pasada del satélite es permanente para una misma latitud. El hecho de que el número diario de rotaciones sea un número racional y no entero deriva en que cada satélite pasa por un mismo punto a horas distintas en días consecutivos tal y como señala Price (1991), las órbitas se desplazan en el tiempo, lo que causa un cambio en las condiciones de iluminación y de hora local en la toma de imágenes. Esto supone un elemento de importantes alteraciones en las series multitemporales.

Manteniendo operativos al menos dos satélites de la serie en órbitas complementarias, se obtienen al menos dos observaciones al día sobre un mismo punto, con uno cruzando el ecuador a horas solares locales de aproximadamente 0730 y 1930, y el otro a las 0230 y 1430. Los NOAA pares realizan la órbita de mañana, excepto NOAA 14, que tras la pérdida de NOAA 13 en su lanzamiento, ha suplido a este. Los NOAA impares cubren la órbita de tarde. En la actualidad, el NOAA 12 cubre la pasada de mañana y NOAA 14 la de la tarde. Otras naves de la serie permanecen en órbita, con la funcionalidad de sus instrumentos parcialmente activa según el resumen de la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Estado de operatividad de los instrumentos de las naves NOAA

Satélite	HIRS	MSU	SSU	AVHRR	S&R		DCS	SBUV	SEM
					Global	Local			
NOAA 10	✓	✓	N/A	✗	FALLO	✓	✓	N/A	✗
NOAA 12	✓	✓	N/A	✓	✓	N/A	✓	N/A	✓
NOAA 14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗

✓ Funcionamiento correcto  
 ✗ Funcionamiento parcialmente alterado  
 N/A No aplica

Los satélites NOAA están equipados con dos radiómetros: **AVHRR** (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) y **TOVS** (*Tiros Operational Vertical Sounder*). El primero es especialmente apto para aplicaciones tales como la estimación de cubrimiento de nubes, cálculo de temperaturas del mar, alcance estacional de nieves y hielos polares, índices de clasificación de la vegetación, medición de albedo, etc. El segundo radiómetro es un sistema de cuatro sensores pasivos independientes para sondeos verticales de la atmósfera.

El satélite NOAA K, renombrado NOAA 15 a partir de su lanzamiento el 13 de mayo de 1998, está dotado con instrumentos nuevos para sondeo de microondas (AMSU-A y AMSU-B), una nueva versión del radiómetro AVHRR (versión 3) que mejora el registro de datos en los rangos visible e infrarrojo y una nueva sonda infrarroja (HIRS/3).

#### **4222 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES TRANSPORTADOS POR LAS NAVES NOAA**

La revisión de las características físicas y técnicas de los sensores que operan a bordo de los satélites NOAA tiene interés desde varios puntos de vista para la aplicación concreta de los datos de este estudio. Además, puesto que el diseño inicial de los sensores NOAA era para aplicaciones meteorológicas, debe tenerse un especial cuidado con el uso de estos datos para estudios del terreno. Los geousuarios de NOAA deberán tener una clara comprensión de las características internas del sistema y de cómo éstas afectan las mediciones radiométricas para la interpretación geográfica subsiguiente. Para el usuario es importante saber:

1. Qué tipo de datos, de entre los varios posibles, son los más aptos para una aplicación concreta; por ejemplo, estudios en tiempo real requieren datos de la señal HRPT y no de la señal LAC, cuyas características explicamos más adelante.
2. Las características internas de los datos, sus limitaciones y los procesos más adecuados de análisis; por ejemplo, deben tratarse adecuadamente las señales distorsionadas por ruidos, las correcciones geométricas o atmosféricas de los datos.

Ya apuntamos que las naves NOAA transportan dos grandes grupos de sensores electromagnéticos: el AVHRR y los TOVS. Puesto que las imágenes de nuestro estudio han sido registradas por el sensor AVHRR de los satélites NOAA 10, 11, 12 y 14, nos parece adecuada una descripción detallada de las características de este instrumento.

##### **4222 a) SENSOR AVHRR**

Las propiedades generales del AVHRR son:

- *Resolución espacial* de 1,1 km en el nadir de la observación.
- *Resolución espectral* de 5 bandas (visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico).

<b>Banda</b>	<b>Amplitud</b>	<b>Región espectral</b>
1	0.58 - 0.68	Rojo
2	0.72 - 1.10	Infrarrojo cercano
3	3.55 - 3.93	Infrarrojo medio
4	10.30 - 11.30	Infrarrojo térmico
5	11.50 - 12.50	Infrarrojo térmico

- *Resolución radiométrica* de 10 bits (1023 niveles distintos).
- *Resolución temporal* de aproximadamente 4 imágenes día/satélite (latitudes medias).

- *Anchura de las imágenes* 2700 km. (aproximadamente).
- *Altura nominal* de 854 Km, *Ángulo de visión*: 110,8°.

Hasta el momento, han existido dos generaciones de sensores AVHRR, de características radiométricas muy similares (Tabla 4.2). La Banda 5 del AVHRR/2 proporciona una mejora en la corrección atmosférica de temperaturas de mar y de tierra. El lanzamiento de NOAA 15 ha incorporado la tercera generación de este sensor, con importantes mejoras cualitativas. En el momento de redactar esta memoria, el acceso a los datos de NOAA 15 todavía es restringido, por encontrarse en periodo de validación.

Sensor	Resolución Espectral ( $\mu\text{M}$ )					Satellite
	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	
AVHRR 1	.55-.90	.72-1.0	3.55-3.93	10.5-11.5	n/a	NOAA 10
AVHRR 2	.58-.68	.72-1.0	3.55-3.93	10.3-11.3	11.5-12.5	NOAA 12, 14

Tabla 4.2 Características espectrales Sensores AVHRR 1 y 2

En nuestro estudio hemos operado con los datos de los canales 1 y 2 de NOAA 10, 11, 12 y 14. Las curvas de la respuesta espectral captada por cada uno de ellos se incluyen en las Figuras 4.1 a 4.8<sup>273</sup>.

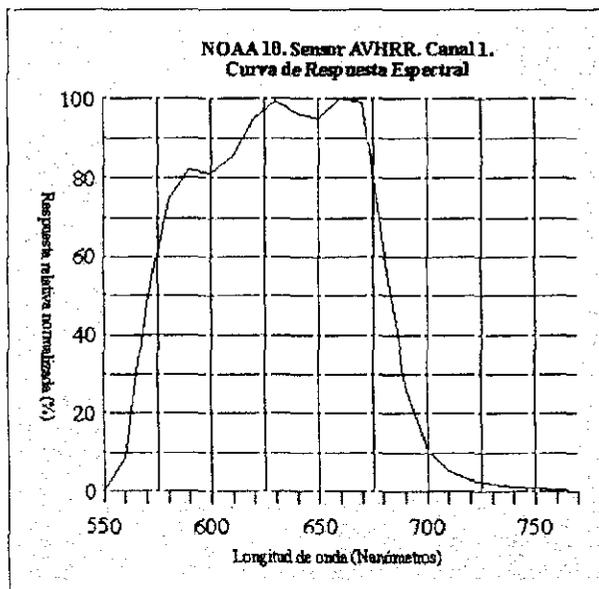


Figura 4.1 Respuesta espectral NOAA10. Canal 1.

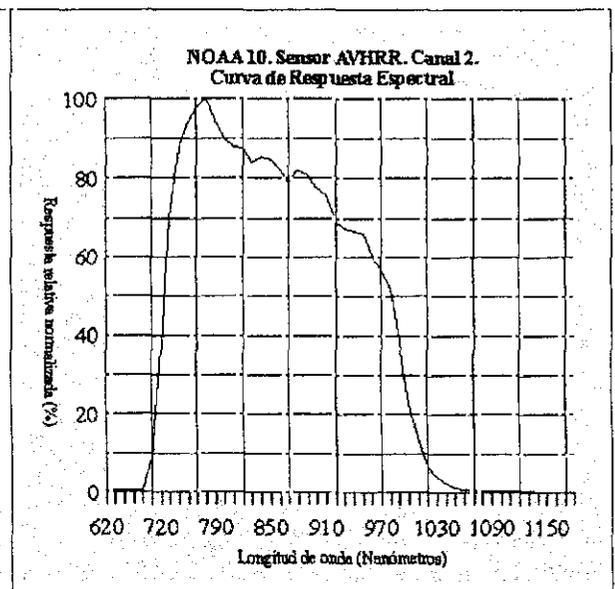


Figura 4.2 Respuesta espectral NOAA10. Canal 2.

273 <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/c1/sec1-46.htm>  
<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/c1/sec1-47.htm>  
<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/c1/sec1-48.htm>  
<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/c1/sec1-410.htm>

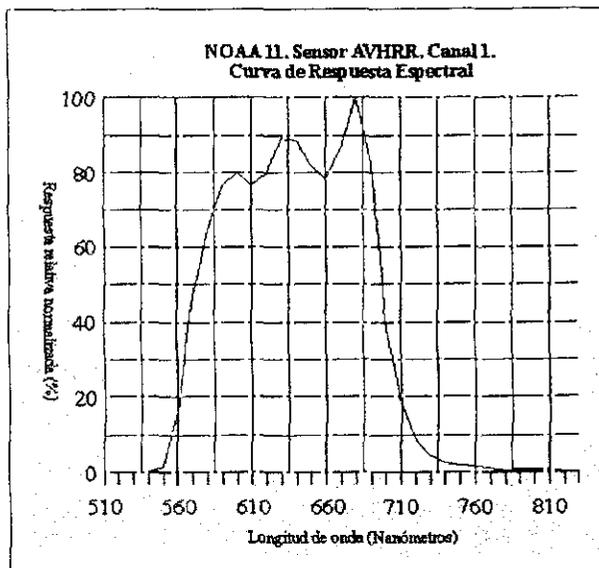


Figura 4.3 Respuesta espectral NOAA11. Canal 1.

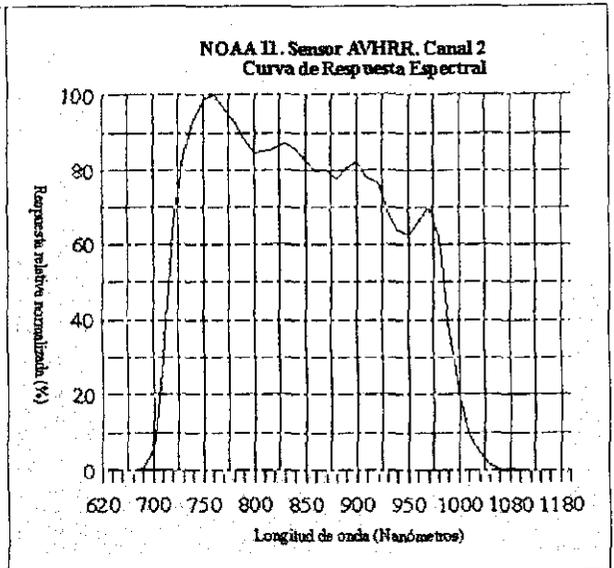


Figura 4.4 Respuesta espectral NOAA11. Canal 2.

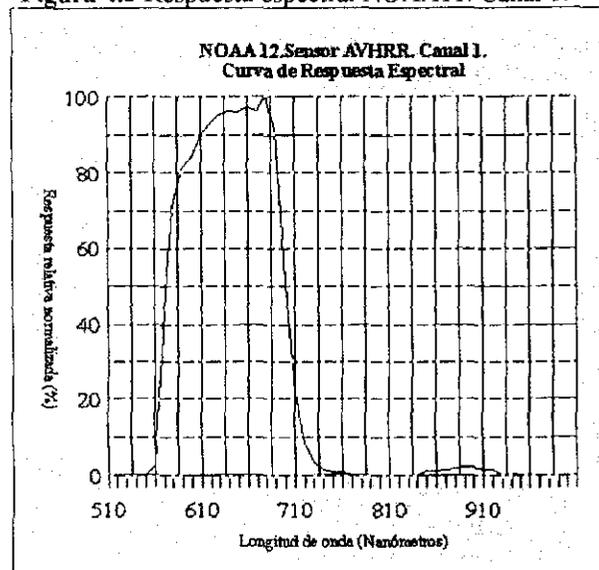


Figura 4.5 Respuesta espectral NOAA12. Canal 1.

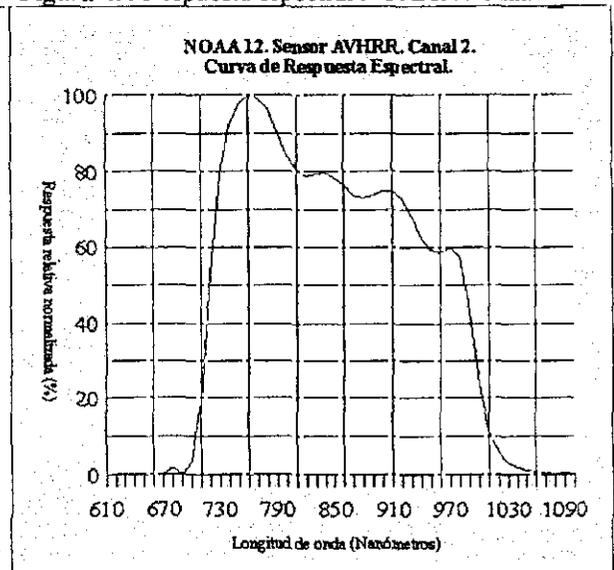


Figura 4.6 Respuesta espectral NOAA12. Canal 2.

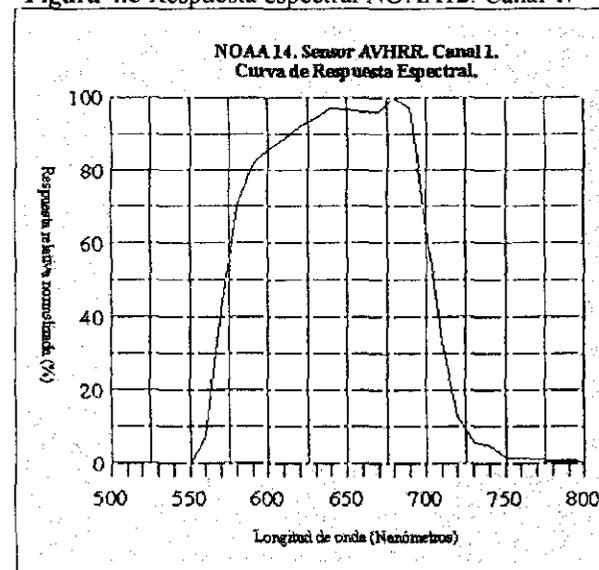


Figura 4.7 Respuesta espectral NOAA14. Canal 1.

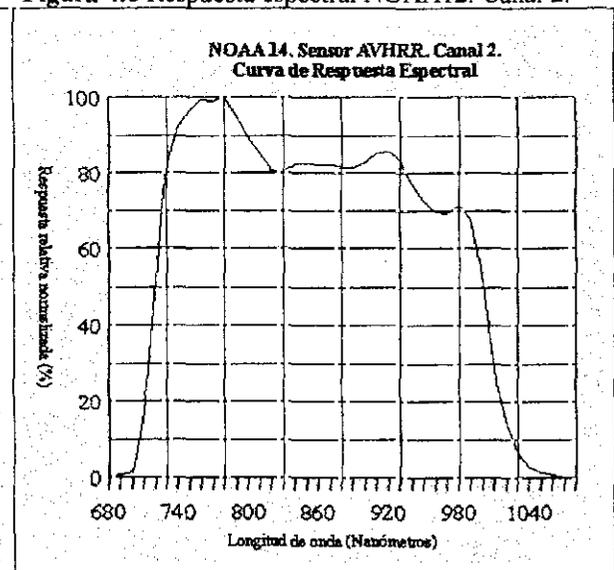


Figura 4.8 Respuesta espectral NOAA14. Canal 2.

#### 4222 b) SENSOR TOVS

El radiómetro TOVS (*Tiros Operational Vertical Sounder*), es un sistema de cuatro sensores pasivos independientes que realizan un sondeo vertical de la atmósfera. Los instrumentos que lo integran son:

- SSU (*Stratospheric Sounding Unit* o Unidad de Sondeo Estratosférico), es un radiómetro infrarrojo de presión modulada con tres para la observación de CO<sup>2</sup>.
- MSU (*Microwave Sounding Unit* o Unidad de Sondeo en las Microondas), es un radiómetro de 4 canales para mediciones en la zona de microondas: 3 para estudio de la temperatura atmosférica y 1 para estudio de la emisividad superficial
- HIRS/2 (*High Resolution Infrared Radiation Soudner* o Sonda Infrarroja de Alta Resolución), es un radiómetro con 19 canales en el IR y 1 en el visible, canales para el estudio de la absorción de CO<sup>2</sup>, detección de nubes, ozono, etc.
- SBUV/2 (Sonda de Radiación Solar Ultravioleta) ha sido incorporado posteriormente a las demás. Mide la radiación ultravioleta procedente del conjunto tierra atmósfera y se ha instalado con el fin de controlar la distribución de ozono en la atmósfera.

	<b>HIRS/2</b>	<b>SSU</b>	<b>MSU</b>	<b>SBUV/2</b>
Espectral	20 canales en total de 15 a 4.3 μ	3 canales de 15 μ	4 canales en la región de absorción de O <sub>2</sub> (5.5μ)	Escáner doble monocromo (12 canales de 252 a 339.8 manómetros) canales de 252 a 339.8
Radiométrica	13 bits	12 bits	12 bits	
Swath	2240 Km	1474 Km	2348 Km	
Espacial nadir	17.4 x 17.4 Km <sup>2</sup>	147.3 x 147.3 Km <sup>2</sup>	109.3 x 109.3 Km <sup>2</sup>	
Esp.extrema	29.4 x 58.5 Km <sup>2</sup>	186.1 x 244 Km <sup>2</sup>	178.8 x 323 Km <sup>2</sup>	
Observaciones	Cuando calcula los coeficientes de calibración, se interrumpe la toma de datos	Cuando calcula los coeficientes de calibración, se interrumpe la toma de datos	Cuando calcula los coeficientes de calibración no se interrumpe la toma de datos	
Utilización	12 canales para toma de t <sup>a</sup> atmosférica, 3 para el cálculo de t <sup>a</sup> de superficie, 3 para el cálculo de t <sup>a</sup> de vapor de agua en perfiles verticales, 1 para medidas de O <sub>3</sub> en atmósfera	Todos los canales son sensibles a la misma λ, pero a diferente presión. Se utiliza para medidas de T <sup>a</sup> estratosférica en 3 niveles diferentes mediante técnicas de modulación de presión	3 canales para la medición de T <sup>a</sup> atmosférica en la vertical y un canal para el cálculo de la emisividad superficial	Medición de contenido total de O <sub>3</sub> en perfiles verticales. Medición de reflectividad y mediciones periódicas de flujo solar

#### 4223 FORMATO DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR

##### 4223 a) FORMATO NOAA-HRPT (*High Resolution Picture Transmission*)

El radiómetro AVHRR tiene **dos formatos de transmisión** de la señal HRPT (*High Resolution Picture Transmission*): el primero es analógico y se denomina APT (*Automatic Picture Transmission*), con una resolución de **4x4 Km<sup>2</sup>** por la degradación de datos efectuada para maximizar las capacidades de almacenamiento del sensor. Este

formato también se conoce como **GAC** (*Global Area Coverage*), y es apropiado para estudios continentales. El segundo formato de transmisión es de tipo digital, codificado a 10 bits, lo que implica que su capacidad de codificación espectral es de 1024 valores; la resolución espacial en el nadir de la observación es de  $1.1 \times 1.1 \text{ Km}^2$ . La amplitud de barrido es de 2600 Km. Este formato se conoce también como **LAC** (*Local Area Coverage*) y es apropiado para estudios regionales. Las imágenes utilizadas en nuestro estudio son de este tipo.

La señal HRPT se registra y transmite con una precisión de 10 bit. Cada pasada permite una transmisión máxima de datos HRPT de 10 minutos, aunque en nuestro estudio el tiempo medio de registro de las imágenes ha sido de 4 minutos. Cada línea de barrido se ordena cronológicamente en dos registros. La estructura de los registros es binaria y contienen 7400 bytes con la estructura de información resumida en la Tabla 4.3.

Registro	Byte	Nº de Bytes	Contenido
1	1-2	2	Nº de línea de barrido
	3-8	6	Código horario
	9-12	4	Indicadores de calidad
	13-52	40	Coefficientes de calibración
	53	1	Nº de ángulos cenitales significativos y puntos de referencia terrestre
	54-104	51	Ángulos cenitales solares
	105-308	204	Localización terrestre
	309-448	140	Datos telemétricos (cabecera)
449-7400	6952	Registro datos HRPT/LAC	
2	1-6704	6704	Registro datos HRPT/LAC
	6705-6724	20	Porciones decimales adicionales de 51 ángulos solares cenitales
	6725-6726	2	Valor delta de la desviación horaria del reloj interno, en milisegundos x 2 + indicador (0 – 1): 0 = desajuste horario 1 = ajuste horario
	6727-7400	674	bytes libres.

**Tabla 4.3:** Estructura del formato LAC/HRPT de los datos NOAA-AVHRR

Fuente: NOAA POD Guide (1997)<sup>274</sup>, <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/c3/sec3-2.htm>

Cada línea de barrido LAC/HRPT tiene 2048 puntos de registro; a lo largo de cada línea, el ángulo cenital solar y la localización de puntos de control sobre la superficie de la tierra (latitud y longitud) se toman a intervalos de 40 puntos, comenzando por el punto 25 (25, 65, 105, ..., 1945, 1985, 2025). En otras palabras, cada línea de barrido tiene 51 valores posibles de ángulos cenitales solares y puntos de control. Cada valor de ángulo requiere un byte y se registra en grados de ángulo x 2. Los valores de latitud – longitud quedan registrados en dos campos de dos bytes cada uno, en fracciones de

274 NOAA Polar Orbiter Data User's Guide (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-13 AND NOAA-14), (1997). U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Environmental Satellite, Data, and Information Service. National Climatic Data Centre. Climate Services Division. Satellite Services Branch.. August 1997 revision. Compiled and Edited by: Katherine B. Kidwell. FOB3, Room G233, E/CC33. 4700 Suitland Road. Suitland, MD 20746. <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/cover.htm>

grados (0 – 180E valores positivos, 0 – 180W valores negativos). Estas especificaciones resultan esenciales para la corrección geométrica de la imagen.

El formato descomprimido de la señal LAC/HRPT para las 5 bandas es el siguiente:

Punto	Registro	Byte	Bit	Contenido
1	1	449 - 450	1 - 6	lleno de 0
			7 - 16	Primer valor de la banda 1
		451 - 452	1 - 6	lleno de 0
			7 - 16	Primer valor de la banda 2
		453 - 454	7 - 16	Primer valor de la banda 3
		455 - 456	7 - 16	Primer valor de la banda 4
457 - 458	7 - 16	Primer valor de la banda 4		
2		459 - 460	7 - 16	Segundo valor de la banda 1
1002	1	10463 - 10464	7 - 16	Valor 1002 de la banda 3
1002	2	1 - 2	7 - 16	Valor 1002 de la banda 4
2048	2	10463 - 10464	7 - 16	valor 2048 de la banda 5

#### 4223 b) FORMATO NOAA 1B

Los datos NOAA-AVHRR 1B son valores originales (*raw*), estandarizados según los niveles de control de calidad del *First Global Atmospheric Research Program Experiment* (FGGE) y agrupados en lotes discretos de información, a los que se les añade la información de calibración y los puntos de control (parámetros de calibración radiométrica y geométrica).G

El reloj interno de los satélites NOAA que computa la marca horaria sufre un pequeño desfase respecto a la hora GTM (*Greenwich Mean Time*) de un segundo y medio. Este desfase horario implica errores de georreferenciación de unos 4 kilómetros; la agencia NOAA subsana este problema aplicando correctores horarios al satélite desde el centro de control de operaciones de satélites (*SOCC Satellite Operations Control Center*).

Cada grabación orbital NOAA queda individualizada en el formato estándar 1B por un *nombre de grabación*, de 42 caracteres binarios, seguido de varios bloques de información o *calificadores*, de estructura alfanumérica. La nomenclatura completa de fichero NOAA 1B incluye:

Nomenclatura de ficheros NOAA-1B	
1. Nombre de la grabación (NSS)	
2. Calificadores (Ejemplos)	
• Tipo de datos	HRPT= HRPT (Lectura directa. Resolución completa AVHRR) GHRR= GAC (Resolución reducida AVHRR) LHRR= LAC (grabaciones HRPT AVHRR) HIRX= HIRS/2 MSUX= MSU SSUX= SSU HIRS= HIRS/2 MSUS= MSU SSUS= SSU
• Identificador único de nave NOAA	TIROS-N = TN NOAA-A = NA = NOAA-6 NOAA-B = NB NOAA-C = NC = NOAA-7 NOAA-D = ND = NOAA-12 NOAA-E = NE = NOAA-8 NOAA-F = NF = NOAA-9 NOAA-G = NG = NOAA-10 NOAA-H = NH = NOAA-11 NOAA-I = NI = NOAA-13 NOAA-J = NJ = NOAA-14
• Año - día	D76104 “D”, identificador de día Juliano “76”, año de grabación de datos “104”, día Juliano de la grabación
• Hora comienzo grabación	S1355 “S”, identificador de comienzo de hora de la grabación “1355”, 13 horas y 55 minutos GMT, hora de comienzo de la grabación
• Hora terminación grabación	E1403 “E”, identificador de terminación de hora de la grabación “1403”, 14 horas y 03 minutos, hora de terminación de la grabación.
• N° identificador de bloque de datos	B0016465 “B” identificador del bloque de proceso de datos “0016465” 7 dígitos identificadores de las revoluciones del satélite en las que comenzó (5 primeros números) y terminó (2 últimos números) la grabación.

La estructura de datos de la imagen queda registrada, de modo binario, en los datos de cabecera. Lógicamente, cada imagen contiene dos bloques de datos de cabecera, uno correspondiente a TOVS y el otro al AVHRR. En nuestro caso, la estructura de datos de cabecera de una imagen NOAA-AVHRR 1B es la siguiente:

<b>Estructura de los datos de cabecera de una imagen NOAA-AVHRR 1B</b>		
Byte	Nº de Bytes	Contenidos
1	1	Identificador de la nave
2	1	Tipo de datos
3-8	6	Hora de comienzo
9-10	2	Número de líneas de barrido
11-16	6	Hora de conclusión
17-23	7	Identificador del bloque de proceso (ASCII)
24	1	Calibración Ramp/Auto
25-26	2	Nº de datos ausentes
27-32	6	Parámetros de control de adquisición de datos
33-34	2	Identificación de parámetros de calibración
35	1	Estado de los parámetros de control de adquisición de datos
36-40	5	Valores nulos
41-84	44	Nombre de la grabación
85-86	2	Año
87-88	2	Día juliano
89-92	4	Milisegundos GTM de la hora de grabación
<b>Elementos de la órbita Kepleriana.</b>		
93-96	4	Semi-eje mayor en kilómetros
97-100	4	Excentricidad
101-104	4	Inclinación, en grados
105-108	4	Perigeo, en grados
109-112	4	Nodo ascendente, en grados
113-116	4	Anomalía media, en grados.
<b>Valores de inercia cartesiana de los elementos de fecha</b>		
117-120	4	Valor X de la posición de la órbita, en kilómetros
121-124	4	Valor Y de la posición de la órbita, en kilómetros
125-128	4	Valor Z de la posición de la órbita, en kilómetros
129-132	4	Valor X del punto orbital, en kilómetros/segundos
133-136	4	Valor Y del punto orbital, en kilómetros/segundos
137-140	4	Valor Z del punto orbital, en kilómetros/segundos
141-final	Variable	Previsión de usos futuros.

#### **4224 IMÁGENES NOAA-AVHRR UTILIZADAS EN EL ESTUDIO**

El origen de las imágenes NOAA-AVHRR utilizadas en este estudio es doble: la serie comprendida entre el enero de 1990 y diciembre de 1994 proviene de los archivos del centro alemán de observaciones espaciales (DLR-DFD)<sup>275</sup>. La segunda mitad de la serie, enero 1995 – febrero 1997, se obtuvo mediante la programación directa de la estación de recepción de Infocarto, S.A.

La búsqueda de imágenes para cubrir el periodo 1990-94 fue laboriosa y con numerosos problemas técnicos. Se consultaron los archivos de imágenes de las instituciones

<sup>275</sup> Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt e. V. (DLR) Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD). 82234 Oberepfaffenhofen. Germany.

listadas más adelante en este mismo epígrafe, y sobre las que se resumen las causas que obligaron a desestimar su uso.

El coste de la búsqueda y selección de las imágenes de este periodo fue asumido por la partida presupuestaria destinada a imágenes de satélite del Proyecto de Investigación y Desarrollo financiado por la DG12 (Ciencia, Investigación y Desarrollo) y DG1 (Relaciones Internacionales) de la Unión Europea, dentro del Programa Avicena de colaboración con países no Comunitarios del ámbito mediterráneo. Más concretamente nos referimos al proyecto 93AVI0126 titulado *Development of a methodology based on NOAA satellites observations for the control of fresh water resources and their evolution*, cuyo coordinador científico ha sido Infocarto, S.A.

La búsqueda de imágenes se realizó entre los meses de febrero de 1995 y febrero de 1996. En aquel momento, muchas de las instituciones consultadas todavía no tenían los archivos de imágenes informatizados, con visualización rápida de imágenes para su selección. Esto limitó enormemente la rápida selección de imágenes; por regla general, los archivos registraban las grabaciones de pasadas NOAA en una fecha determinada, pero no se podía acceder a una vista preliminar de las características de la imagen tales como el cubrimiento de nubes, el encuadre de la zona de interés o el ángulo de visión. En el mejor de los casos, algunas instituciones hacían públicos, y fácilmente consultables, los fondos de sus archivos de imágenes por medio de grabaciones de vistas rápidas en CD-ROM. En la mayoría de los casos el archivo consistía en un listado sobre papel, con las coordenadas de encuadre de la imagen y complejos códigos de descripción del cubrimiento de nubes, inclinación de la observación, etc.

Por fortuna esta situación ha cambiado drásticamente entre 1996 y 1999, de manera que en la actualidad, casi la totalidad de los archivos de imágenes de satélite (NOAA y otros) se pueden consultar directamente, en tiempo real, por medio de la red mundial de comunicaciones (www). Varios factores han propiciado este cambio:

1. El mayor conocimiento de la riqueza de información encerrada en las series históricas de NOAA y su aplicación a diversas ciencias de la tierra.
2. La presión ejercida por usuarios científicos, gubernamentales y privados para acceder a los archivos de imágenes antes de que la rápida evolución de sistemas informáticos se desfasara aún más de aquellos con los que fueron registrados y archivados las imágenes en su origen.
3. La necesidad de rentabilizar económicamente los sistemas de recepción y los materiales de soporte de grabación de imágenes, así como el coste de mantenimiento de archivos.
4. El incremento de programas internacionales de investigación y desarrollo por medio de técnicas de observación remota de la tierra en temas de clima y medio ambiente, conservación de los océanos, controles atmosféricos y estratosféricos, seguimiento de desastres naturales, etc.
5. La globalización de la www. La difusión generalizada y mejora de calidad de las comunicaciones a través de la red de Internet.

6. La mejora de los lenguajes informáticos y su creciente potencia de compactación de datos y rapidez de transmisión de los mismos.

Las instituciones consultadas en nuestro proceso de búsqueda, así como el estado de acceso a archivos de imágenes NOAA-AVHRR para el periodo 1990-94 en el transcurso del año 1995 fueron las siguientes:

1. *Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial* (INTA), Madrid, España. Archivo incompleto. Las peticiones para el periodo de interés eran remitidas al archivo de la Agencia Espacial Europea en Eurimage.
2. *Observatorio Astronómico Nacional*. Centro de observación de Maspalomas. Gran Canaria. España. Peticiones remitidas al archivo de la Agencia Espacial Europea en Eurimage.
3. *Universidad de Córdoba*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agrícola y Montes. Servicio Centralizado de Información del Territorio. España. El registro de imágenes comienza en 1994.
4. *Universidad Libre de Berlín*. Instituto Meteorológico de Berlín, Alemania. Petición de imágenes vía Internet. Archivo de consulta con vistas rápidas de imágenes en construcción. Suspensión temporal de suministro de pedidos.
5. *Meteo France*. Francia. Existe registro 1990-94. Solo suministra pedidos más voluminosos que el requerido, por lo costoso de acceso a las imágenes grabadas en esos años. En proceso de actualización.
6. *Universidad de Lisboa*. Instituto de Oceanografía. Portugal. Existe archivo de imágenes 1990-94. Soporte: cintas sin registros de acceso sistematizados. Suministran imágenes procesadas para aplicaciones marinas más que imágenes originales.
7. *Real Instituto Meteorológico Neerlandés*. Holanda. Existe registro 1990-94. En proceso de actualización de formatos de grabaciones antiguas y generación de vistas rápidas de imágenes de archivo.
8. *Universidad de Berna*. Departamento de Geografía. Suiza. Archivo actualizado y de rápido acceso. Visualizaciones rápidas de las imágenes en proceso de construcción para consultas por la red de Internet. Rápido suministro de ejemplos de imagen en cintas por mensajería urgente para pruebas. Muy buena calidad de grabación, sin ruidos ni otras pérdidas de líneas. Falla con cierta frecuencia el cubrimiento completo de la Península Ibérica.
9. *Universidad de Dundee*. Estación de recepción de imágenes. Escocia. Reino Unido. Acceso vía Internet al archivo de imágenes. Actualización diaria y excelente mantenimiento. Política de precios poco popular. Suministro de imágenes de prueba en cintas por correo urgente. La red todavía no admite transmisión del volumen de datos originales. Formato 1B Dundee, no internacional, lo que hace estas imágenes singulares. Necesitan algoritmos de cálculo con parámetros propios.
10. *Eurimage*. Archivo de imágenes de la Agencia Espacial Europea. Frascati. Italia. Archivo muy completo. Difícil de acceder y consultar. Comienza la búsqueda con suministro de listados informáticos sobre papel de las coordenadas de localización

de las imágenes (de 2000 registros, solo el 8% coincidía con el área de la Península). Una vez seleccionadas las localizaciones, Eurimage proporciona vistas rápidas de las imágenes impresas, que permiten apreciar el cubrimiento de nubes. Para otros satélites distintos de NOAA, existían en ese momento bases de datos en CD-ROM. Los envíos se realizaban por correo ordinario, ralentizando el proceso de selección. Eurimage desestima un gran porcentaje de *píxeles* de los extremos de las imágenes captadas como criterio de control de calidad interno, para evitar distorsiones posteriores en la georreferenciación de la imagen o en sus valores radiométricos.

11. **NOAA-NESDIS**. *National Environmental Satellite Data and Information Service*. Washington. USA. Consultas sin respuesta. Acceso vía Internet al catálogo de productos NOAA con valor añadido, como por ejemplo mosaicos del NDVI de 4Km de pixel. Falta de control propio de estos algoritmos. Dificultad en acceder al catálogo e imágenes en formato *raw*.

En resumen, los problemas para la selección de imágenes del periodo 1990-94 fueron dos: primero, muchos de los laboratorios consultados, que previsiblemente cubrían nuestra zona de interés, no operaban con NOAA en 1990; este era el caso del laboratorio de teledetección de la facultad de ciencias físicas de la Universidad de Valladolid, operativo desde 1993. Segundo, los laboratorios que sí registraban imágenes NOAA desde 1990, o con anterioridad a esa fecha, se encontraban inmersos en un proceso de modernización de acceso y operación con las imágenes archivadas desde el inicio de sus actividades.

El hecho de que, en el momento de redactar y concluir esa memoria de tesis, los archivos NOAA de difícil acceso en 1995 ya sean consultables en tiempo real a través de la red de Internet, es una prueba del gran avance habido en este campo, en un espacio de tiempo relativamente corto. En el mes de enero de 1999, todos los archivos consultados inicialmente ya eran accesibles vía Internet.

#### **4224 a) SERIE DE IMÁGENES NOAA PROCEDENTES DEL CENTRO ALEMAN DE OBSERVACIONES ESPACIALES (DLR-DFD)**

Ante las dificultades planteadas en las instituciones consultadas, se decidió seleccionar las imágenes en los fondos del DLR-DFD, consultando las vistas (*quick looks*) impresas en papel de las imágenes del periodo deseado.

El estado de transición en que se encontraban los archivos "históricos" de NOAA en el año 1995 queda de manifiesto en el caso del DLR. El registro de imágenes NOAA-HRPT en esta institución se remonta a 1982; el catálogo impreso de *quick looks* se mantiene hasta junio de 1993. Desde esta fecha, el catálogo se comienza a guardar en formato digital, en cintas Exabyte, pero solo será accesible en tiempo real desde enero de 1995. Esto significa que, para la selección de imágenes entre julio de 1993 y diciembre de 1994 la consulta debiera efectuarse volcando las cintas del archivo en sistemas de visualización de los *quick looks* con suficiente capacidad de gestión (1-2

Gb). En resumen, parte de la selección se hizo sobre el archivo en papel (1990-julio 1993), y el resto volcando los quick looks almacenados en cintas que en aquel momento no tenían acceso directo.

Para este trabajo nos desplazamos a la sede del DLR en Oberpfaffenhofen, Munich, del 18 al 21 de octubre de 1995. Se emplearon 30 horas para seleccionar un total de 360 imágenes: 6 imágenes por mes para el periodo de 60 meses comprendidos entre enero de 1990 y diciembre de 1994. Las especificaciones técnicas de las imágenes y el control de calidad de proceso y archivo pueden encontrarse en el documento D-AVHRR.text depositado en el servidor Telnet (usrer: dlrpid) isis.dfd.dlr.de.

#### **4224 b) SERIE DE IMÁGENES PROCEDENTES DE INFOCARTO, S.A.**

Las imágenes NOAA procedentes de Infocarto, S.A. han sido programadas y adquiridas en tiempo real, sin agencias intermediarias, con una antena de recepción de señales HRPT *SMARTrack* propiedad de la empresa; la unidad de recepción permanece activa hasta la actualidad. En nuestro estudio hemos utilizado las imágenes capturadas entre enero de 1995 y marzo de 1997. La gestión directa de la antena de recepción aporta un elemento de control y gestión técnica muy valioso en un estudio de estas características.

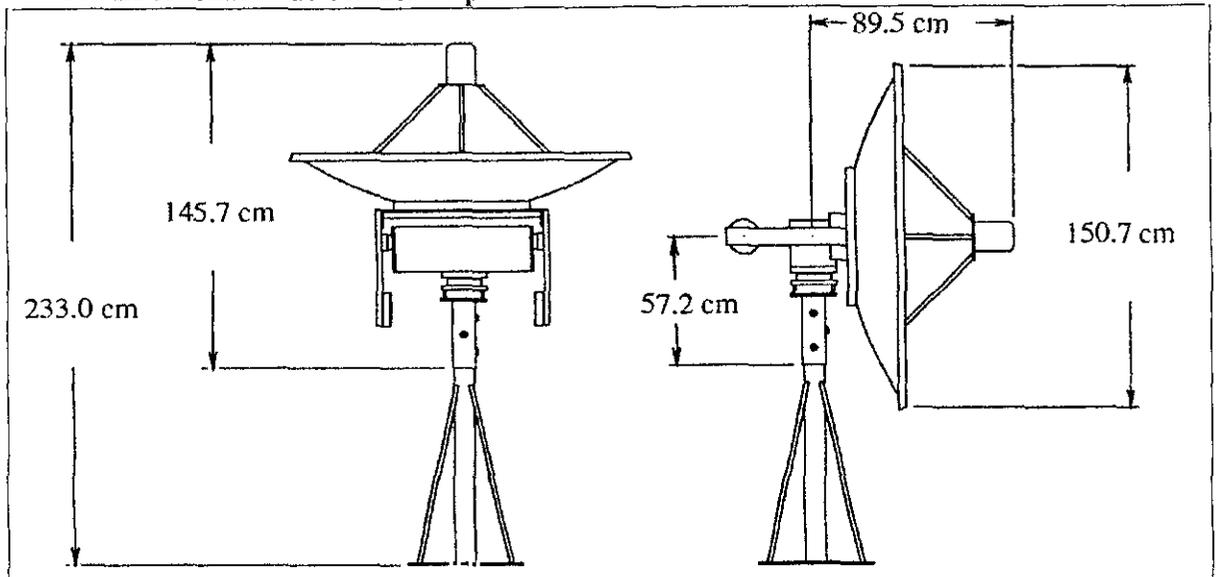
El control diario de la estación de recepción proporciona una experiencia inmediata de la naturaleza de las imágenes, de las similitudes y diferencias específicas de cada uno de los satélites de la serie, de la calidad de las imágenes en función de las condiciones atmosféricas e inclinación del ángulo de visión, frecuencia de distorsión por ruidos, etc. *Por la importancia que ha tenido la actividad de registro directo de imágenes NOAA en nuestro estudio, creemos necesario incluir las especificaciones técnicas de la unidad de recepción, así como el proceso seguido en la transformación de la señal HRPT al formato estandarizado 1B.*

#### **4224 c) ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA ANTENA DE RECEPCIÓN NOAA-AVHRR.**

La antena de recepción de imágenes NOAA AVHRR utilizada en este estudio ha sido el modelo *Professional* de la marca *SMARTech*. La programación, registro y proceso de imágenes utilizadas en el estudio comenzó el 01.01.95 y se desarrolló ininterrumpidamente hasta el 30.03.97. Durante este periodo, la antena se encontraba instalada en el punto culminante del edificio de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid. Con posterioridad, la antena ha sido reubicada en La Florida, con el fin de subsanar deficiencias en la calidad de recepción de las imágenes NOAA 14, distorsionadas por interferencias de instalaciones adyacentes (Instituto Nacional de Meteorología). La descripción de características técnicas la centramos en los siguientes componentes exteriores del conjunto:

1. La antena
2. El alimentador LNA y el convertidor

3. El receptor de señal HRPT
4. El sincronizador combinado BIT/FRAME
5. El ordenador de control de procesamiento.



**Figura 4.9** Esquema del trazado y dimensiones de la antena de recepción *SMARTech Professional* utilizada para la captura de imágenes en tiempo real.

### 1. La Antena

La antena consiste esencialmente en una parábola y un motor rotor. Obviamente, cuanto mayor sea el radio del círculo exterior de esta parábola, mayores serán sus posibilidades. Este componente, en las antenas de calidad está construido de aluminio (otro tipo de material puede inducir campos que producen ruido en la señal). Una característica también determinante relativa a la antena será el *BEAMWITH*, un ángulo relacionado con la curvatura de la parábola.

La calidad del motor de una antena estará en función de tres elementos:

1. El rango de azimuth y elevación, que define la capacidad de movimiento de la antena.
2. La fuerza del motor rotor, que define su capacidad de movimiento en condiciones climáticas adversas.
3. La velocidad de sus movimientos de azimuth y elevación, que define su precisión en el seguimiento de los satélites.

En concreto, las características de la antena utilizada son las siguientes:

- Tipo: Parábola sólida de aluminio
- Diámetro: 1.5 m
- Ganancia: 24.7 dBi a 1700 MHz
- Anchura de banda: 8.2 grados de media
- Elevación mínima de captura (10 - 6 BER): 1.0 grados
- Rango de movimiento en Azimuth: 720 grados
- Rango de movimiento en elevación: 180 grados
- Azimuth y Elevación del motor rotor: 170 Nm
- Retroceso (en ambos ejes): 0.15 grados

- Precisión del posicionamiento en cualquier punto: 0.3 grados
- Velocidad en Azimuth y Elevación: 15°/seg
- Posición de reposo: Automática en vertical
- Peso: 82 Kg.
- Resistencia a vientos (posición estática): 200 km./h
- Resistencia a vientos (activa): 100 km./h
- Control del movimiento de la antena: Microprocesador interno con modelo orbital SGP4
- Interfaces de la antena: Vía RS-422

Las características de la antena y del motor determinarán a su vez la calidad y posibilidades de adquisición de datos; en otras palabras, las características de la antena determinarán la capacidad de toma de datos procedentes de satélites cercanos al horizonte y la capacidad de toma de datos en condiciones climáticas adversas.

Hay un elemento que ha demostrado ser vital para asegurar la correcta captura y calidad de los datos: se trata del sistema GPS (*Ground Positioning System* o Sistema de Posicionamiento Global). Dada la importancia que tiene la referencia horaria exacta, este parámetro se obtiene con la máxima precisión a partir de un sistema GPS externo e independiente del sincronizador temporal interno del satélite. La precisión de correlación tiempo-espacio proporciona la exactitud de ajustes geográficos de las imágenes una vez georreferenciadas.

## **2. El alimentador LNA y el convertidor**

- Frecuencia de entrada RF: 1690-1710 MHz
- Amplitud de banda de entrada RF: 35 MHz
- Rechazo de imagen: 60 dB media
- Ganancia del convertidor: 45 dB media
- Valor de ruido del convertidor: 0.8 dB (60 K) media
- Frecuencia de salida IF: 125 - 145 MHz
- Requerimientos de potencia: +12 +16 VDC 500 mA max
- Polarización: RHCP (Dual RHCP/LHCP opcional)
- Estabilidad de la Frecuencia: +/- 2 KHz media
- Conector de salida IF: Tipo "N" Hembra
- Temperatura de funcionamiento: -30 + 60 grados C
- Longitud del cable: hasta 100 m.

## **3. El receptor de la señal HRPT**

Es un componente más situado en el exterior, en la parte central de la parábola, y se denomina FEED-HORNE. En él convergen las ondas electromagnéticas procedentes de los satélites (señales analógicas), para ser convertidas a baja frecuencia antes de ser demoduladas. La demodulación de la frecuencia original de la señal hace posible la transmisión de los datos a través de cableado coaxial standard. Una vez realizada la captación y demodulación de la señal analógica, esta queda reconvertida en un fichero de datos digitales *raw*.

- Frecuencia de entrada IF: 120-170 MHz
- Conector de entrada IF: BNC Hembra
- Bit Rate: DC 2.5 Mbps
- Amplitud repetidora: 0.003% - 3.0% sobre el centro de frecuencia
- Rango de captura: 3 x amplitud repetidora
- Rechazo de imagen: 60 dB media
- Rechazo IF: 60 dB media
- Rechazo señal portadora adyacente: Degradación máxima BER 1 dB
- Rechazo por interferencia de parasitarios: 60 dB media
- Nivel de entrada: -10 a -30 dBm
- Impedancia de entrada: 50 ohms
- Pérdidas de implementación:  $\leq 1$  dB
- Tipo de demodulador: PSK y BPSK-PLL
- Salida: Reloj y datos RS-422 (NRZ y Manchester)

#### 4. El sincronizador combinado BIT/FRAME

- Serie entrada, TTL, RS-422: NRZ o Manchester
- Secuencia de bit: 5 bps - 2.5 Mbps
- Recuperación del reloj: DPLL con correlador en tiempo real
- Inserción de decipción/grabación: Vía interfaces de 5 canales de decipción
- Selección de trayectoria de datos: Automática vía software a través de Bus
- Rango automático de seguimiento: + 12% de secuencia de bit específica
- Amplitud repetidora: 1.0 % Standard
- Error en la secuencia de bit: + 1.5 dB Teóricos
- Nivel de corte: SNR > 6 dB Bitter: > 1 dB para amplitudes jitter < 1.0% de la secuencia del bit
- Salida: Protocolo de conexión al PC de 8 a 64-bit
- Bus Interface: 64-bit BUS PCI

#### 5. El ordenador de control y procesamiento

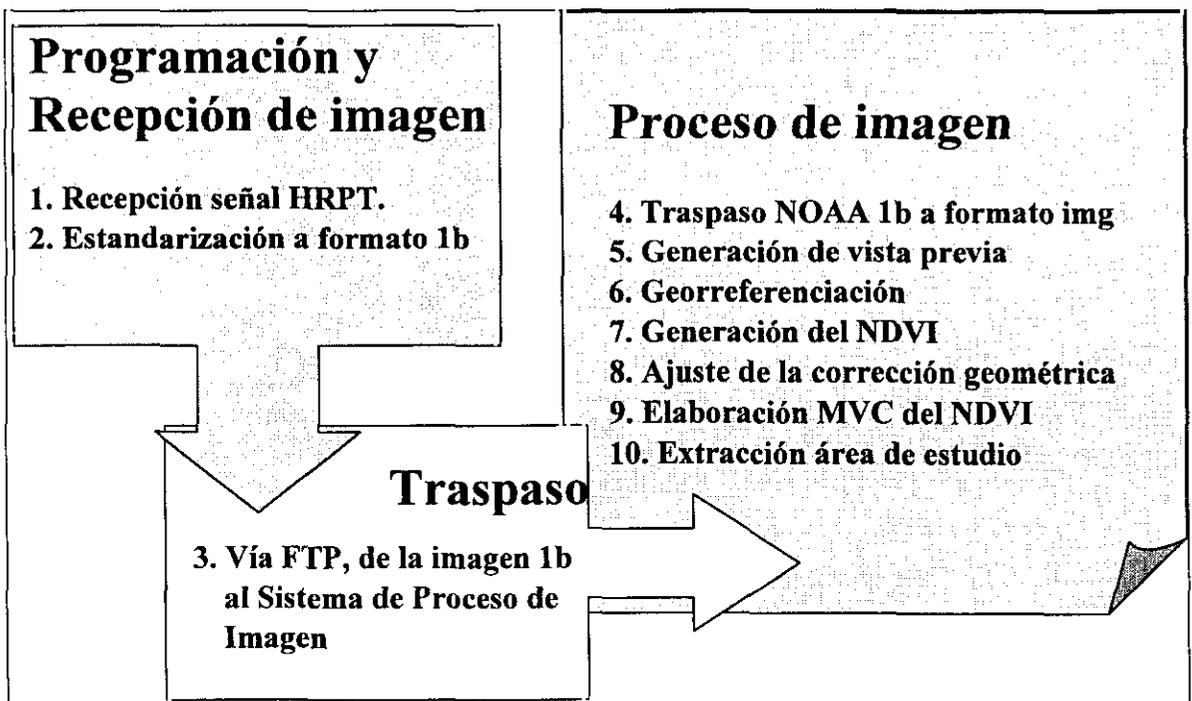
Desde el ordenador, y con el software adecuado descrito más adelante, se gestiona la movilidad de la antena para captura manual de imágenes o su posición de reposo, así como el tratamiento de la señal recibida en sus tres fases: demodulación, conversión analógico-digital y extracción de la información.

- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| • Pentium 200 MHz              | • Adaptador de vídeo 4 MB, SVGA, 24 bit |
| • Cache 256 KB                 | • Monitor 17" SVGA                      |
| • BUS PCI & EISA               | • Módem 33.6 Kbps interno               |
| • 64 MB RAM                    | • Tarjeta Ethernet: PCI 64-bit          |
| • Disco duro: 2 GB Fast SCSI   | • Sistema operativo Windows NT y NFS    |
| • Disquetera 3.5, 1.44 MB      | • DiskShare para Windows NT             |
| • Cinta 4mm 4/8 GB SCSI        | • UPS 1000 VA (US o Internacional)      |
| • CD-ROM 660 MB 12 velocidades |   |

## 4300 PROCESO DE IMÁGENES NOAA-AVHRR

En esta sección se describen los procesos seguidos en la fase de acceso y gestión de los datos, lo cual encierra una rutina muy precisa de actuaciones desde la obtención de las imágenes hasta la extracción de las diferentes respuestas espectrales de los elementos a estudiar. En nuestro caso se trataba de obtener el valor del NDVI y para lograrlo ha sido precisa la captura de imágenes atendiendo a criterios espaciales y temporales concretos. El registro de imágenes se ha centrado sobre toda la península Ibérica, en horas que aseguraban un flujo de energía incidente similar. Por tanto, la fase de programación y registro de datos ha estado fuertemente controlada para evitar errores primarios de bulto en cálculos posteriores. La secuencia del proceso seguido ha sido la siguiente:

1. Programación de capturas de imágenes NOAA-AVHRR
2. Transformación señal HRPT a formato 1B mediante el software *SMARTrack*
3. Transformación formato 1B a formato .img para proceso de la imagen con el software *Erdas Imagine*
4. Georreferenciación de la imagen a proyección estándar y extracción área estudio.
5. Cálculo del índice de vegetación



## 4310 PROGRAMACIÓN DE CAPTURAS DE IMÁGENES NOAA-AVHRR

Durante el periodo de captura de imágenes en tiempo real (01.01.95 - 30.03.97) han tenido especial importancia las posibilidades de programación de la antena. De este modo no se requería la presencia física ante el ordenador para capturas directas y manuales de las pasadas del satélite sobre el horizonte de interés. Además, la programación ha permitido la adquisición de todas las pasadas posibles, aun cuando

algunas tuvieran una geometría de observación muy limitada por el escaso ángulo de elevación en la observación. Hemos actuado de este modo previendo que en algunos casos la imagen de características más deseables no estaría disponible a causa de:

1. posibles pérdidas de energía, y por tanto de imagen,
2. distorsión de bandas por ruidos,
3. cubrimiento de nubes, parcialmente subsanable con imágenes inmediatamente anteriores o posteriores.

El software *SMARTrack* controla la antena de recepción y permite la siguiente rutina de programación y captura de imágenes:

1. Seguimiento en tiempo real de uno o varios satélites NOAA.
2. Presentación de posición de satélites y horizonte.
3. Visualización futura de la posición del satélite.
4. Actualización automática del sistema vía GPS.
5. Localización de la estación y del área de recepción activa.
6. Creación y modificación interactiva de programaciones.
7. Función de captura al instante.
8. Presentación de la imagen durante la adquisición.
9. Control de seguimiento de antena:
  - Interface con la antena vía RS-422
  - Movimiento manual y presentación de posición de antena
  - Realización de diagnósticos de antena y de electrónica de radio

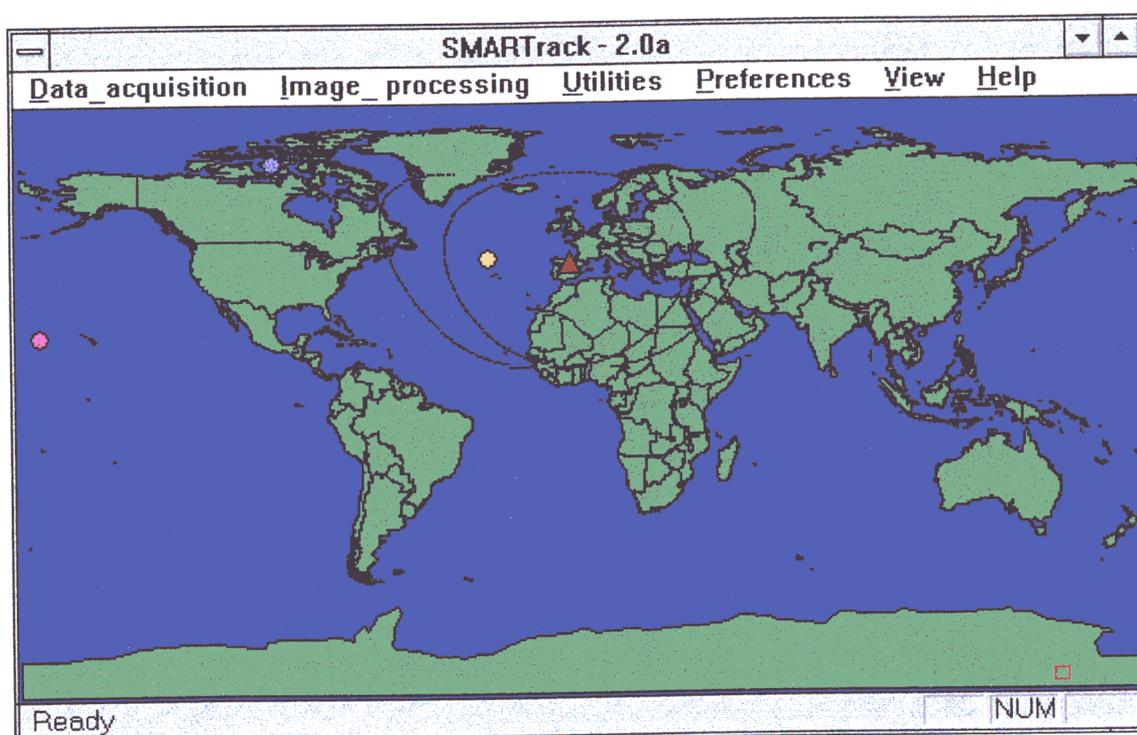


Figura 4.10 Vista del panel de control de la antena de recepción del software *SMARTrack*.

La predicción de pasadas orbitales es especialmente importante en la captura de datos. Para realizar predicciones, primero hay que definir las ecuaciones de las órbitas que siguen los satélites. A partir de ahí, y teniendo en cuenta la posición de la estación, se puede saber la orientación y hora de las pasadas. La ecuación previsoría del movimiento de un satélite a lo largo de una órbita queda determinada por una serie de elementos físicos denominados parámetros orbitales. En el caso de los satélites NOAA son los siguientes:

- **Apogeo:** Punto de la órbita más lejano al centro de la Tierra.
- **Perigeo:** Punto de la órbita más cercano al centro de la Tierra.
- **Plano del ecuador:** Plano imaginario en el que quedaría englobado el ecuador.
- **Ejes mayor y menor:** Ejes de la órbita.
- **Excentricidad:** Grado de similitud de una órbita a un círculo. Es una relación establecida entre los ejes mayor y menor.
- **Inclinación:** ángulo medido en el sentido de las agujas del reloj, en la dirección de rotación de la Tierra, entre el plano del ecuador y la órbita.
- **Nodo ascendente:** Longitud del punto en el cual la órbita atraviesa el plano del ecuador en su trayectoria del hemisferio Sur al hemisferio Norte.
- **Nodo descendente:** Longitud del punto en el cual la órbita atraviesa el plano del ecuador en su trayectoria del hemisferio Norte al hemisferio Sur.
- **Tiempo UTC (o GMT):** Hora local en el meridiano cero (observatorio de Greenwich). En la práctica, este dato se refiere al sistema de referencia horario.
- **Periodo nodal:** Tiempo que tarda un satélite en completar una órbita.
- **Incremento:** Distancia angular recorrida por la Tierra durante un recorrido completo de un satélite a su órbita.

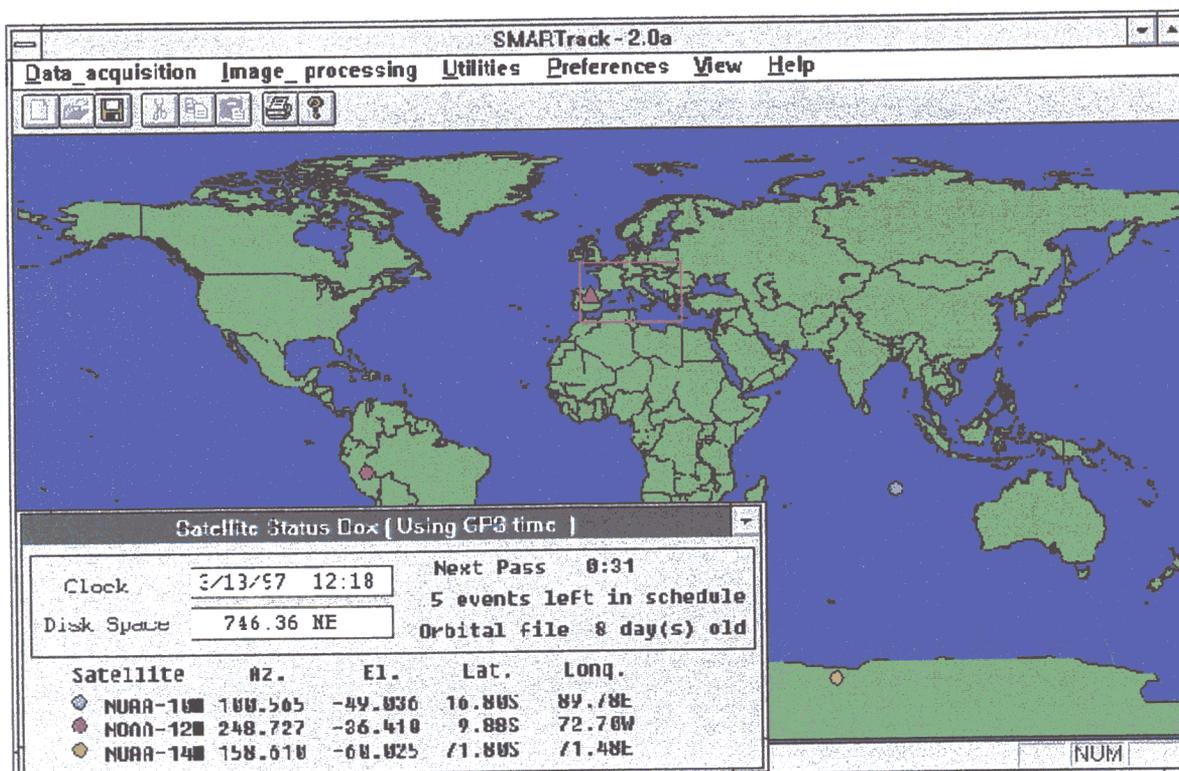


Figura 4.11 Vista del seguimiento de posiciones de satélites con el software SMARTTrack.

Teniendo en cuenta que la señal emitida por cada satélite puede ser capturada en un diámetro de unos 3100 Km, mediante un programa que maneje los parámetros orbitales mencionados, se pueden determinar las coordenadas de localización de cada satélite en cada momento. Del mismo modo, conociendo los parámetros de ubicación de la estación de recepción (latitud, longitud y cota), se pueden predecir las futuras pasadas y cual será la geometría de éstas relativas a la base, cual será su altura máxima (medida desde la base) y su duración.

Las labores de predicción y seguimiento de los satélites por la antena durante la captura dependen ante todo de la sincronización horaria entre el satélite y la estación de recepción. La mayor duración de una pasada (suponiendo que el satélite pase a 90° de altura sobre la estación) es de 14 minutos. Un desfase en el reloj de la estación de 30sg. provoca no solo un error en la predicción, sino también en el movimiento que el plato realiza en la captura, apuntando para recibir a un lugar en el que en realidad no se encuentra el satélite.

El sistema horario de referencia utilizado tanto por los satélites como por los usuarios es el UTC. Para poder obtener este tiempo con precisión, la mejor solución es conseguir la hora mediante el sistema GPS (*Global Positioning System*). En este sistema, la variable a medir es el tiempo, y se hace con precisión de nanosegundos. A la medida obtenida, no será necesario aplicarle corrección diferencial, pues si ésta presenta imprevisiones tales como la disponibilidad selectiva, retrasos atmosféricos, error multisenada, longitud del cable entre antena y receptor, que tienen incidencia a la hora de correlacionar dos códigos (los generados en los satélites GPS y en el receptor), no desvirtúa la medida tanto como para tener un reloj con precisión de milésimas de segundo. De esta forma, se tiene la seguridad que el satélite y la estación están utilizando la misma escala temporal.

Aunque una vez definida la órbita de un satélite, se supone que éste la seguirá sin modificación alguna, en la realidad se producen desacuerdos entre la órbita teórica y la real debido, por ejemplo, a efectos gravitacionales de la luna, planetas, etc. Cabe incluso la posibilidad de que las variaciones sean inducidas de forma intencionada. Por esto, es imprescindible que los **parámetros orbitales se actualicen** con periodicidad. La forma más común de actualización es mediante la recepción directa de los mismos desde el Departamento de Comercio de EEUU en un boletín. Dichos datos se incluirán en el programa destinado a realización de predicciones. Otro modo de actualización de parámetros orbitales es mediante los ficheros binarios que la NASA hace disponibles periódicamente a través de la red mundial de comunicaciones. En este fichero figuran los parámetros necesarios para la actualización de órbitas de todos los satélites accesibles por los usuarios comunes (Meteosat, GPS, NOAA, etc.). Las actualizaciones se realizan cada 14 días, y puede observarse que los datos de diferentes fuentes tienen siempre la misma naturaleza, sí bien en diferente formato. Ej.: En los boletines de predicción de datos realizados por el Departamento de Comercio el periodo nodal viene

en minutos, mientras que en los ficheros que la NASA emite, viene expresado en vueltas completas que da el satélite en un día.

Durante el periodo de captura de datos en tiempo real, los parámetros orbitales se han actualizado automáticamente desde *SMARTrack* accediendo por la *www* a una base de datos donde se encuentran ficheros con los últimos parámetros actualizados por la NASA referentes a los satélites NOAA.

Respecto a las características horarias de las imágenes, se han capturado y procesado imágenes diurnas de todos los satélites NOAA disponibles: NOAA 10, 12, 11 y 14. Obviamente el uso exclusivo de imágenes diurnas quedaba impuesto desde el principio por la necesidad de obtener el NDVI.

En cuanto a las características espaciales de las imágenes, la previsión de capturas ha tenido en cuenta dos aspectos determinantes: primero, el registro de la misma área de interés, previendo las oscilaciones espaciales inherentes a las variaciones geométricas de cada pasada; segundo, la necesidad de eliminar las secciones de la imagen con una geometría altamente distorsionada que acrecentaría errores de cálculo y desvirtuaría las conclusiones.

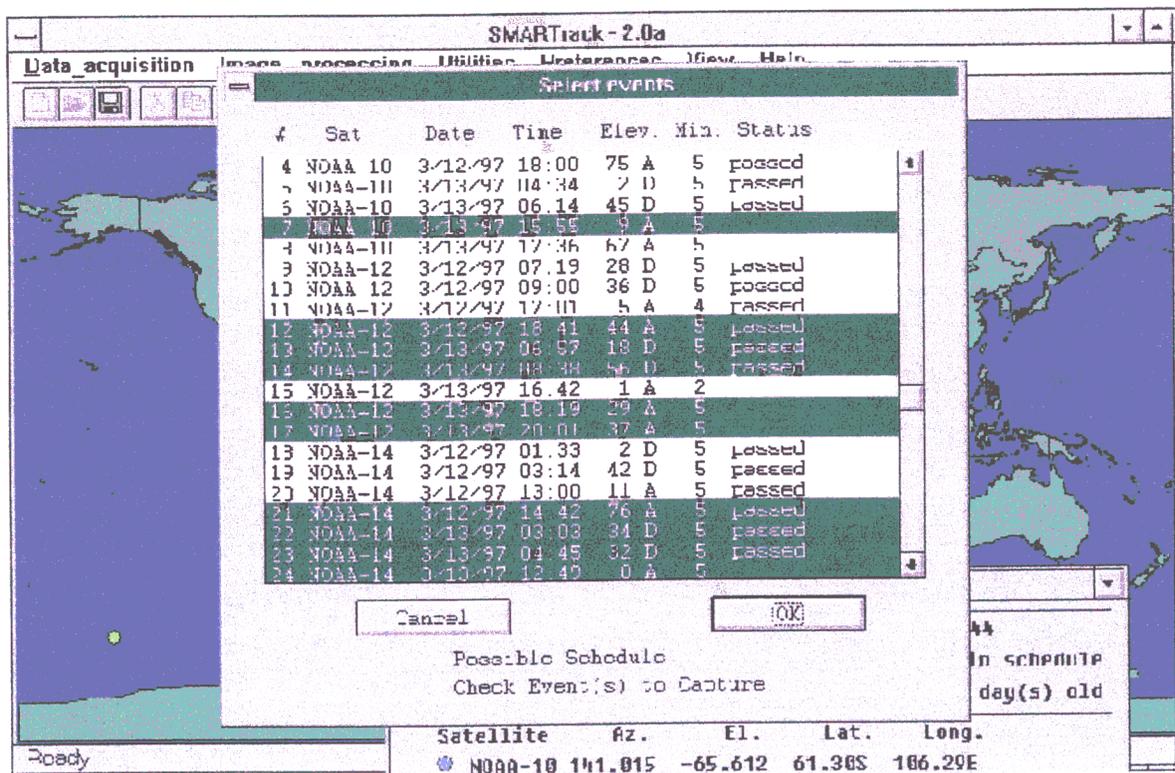


Figura 4.12 Listado de imágenes programadas para registro con el software *SMARTack*.

La elección del área de interés adecuada también es importante para el buen aprovechamiento del espacio en disco. El tamaño habitual de las imágenes en formato HRPT oscila entre 1700-1900 líneas por 2048 columnas (promedio), con un volumen promedio de 35 a 40 Mb .

Con el proceso seguido para la captura automatizada de datos, sistemáticamente se eliminan 300 píxeles de cada extremo de la imagen: aquellos que presentan mayor deformación geométrica (la resolución espacial del pixel pasa de 1×1Km a 2.4×6.4 Km), y errores radiométricos (el haz de energía procedente del terreno que llega al sensor tiene que atravesar una capa más ancha de atmósfera al hacerlo oblicuamente).

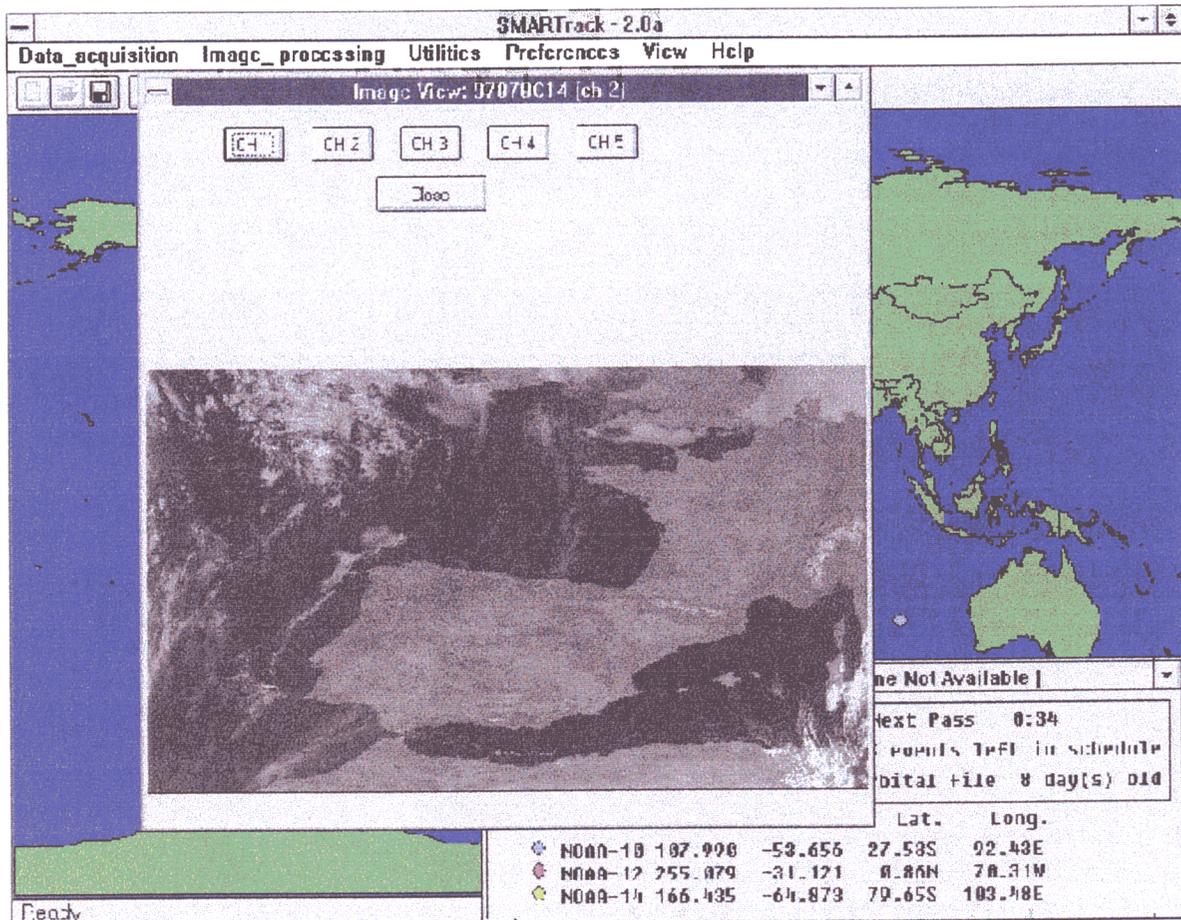


Figura 4.13 Canal 2 de una imagen NOAA-AVHRR en proceso de grabación con SMARTTrack

#### 4320. TRANSFORMACIÓN DE LA SEÑAL HRPT A FORMATO STANDARD NOAA 1B

Como se ha dicho, la señal HRPT tiene un formato de 10 bites en estructura bipartita: por una parte, el cabecero y, por otra, el resto de la imagen. El software gestor de la captura de las imágenes permite la exportación de los datos del sensor AVHRR a formato estandarizado 1b. Las características fundamentales de los ficheros 1b son:

- Sólo contiene la información del sensor AVHRR, y no aparecen ya los datos TOVS.
- El tamaño de ficheros disminuye. La relación es de 41Mb (HRPT) a 27 Mb (1b), para nuestra área de interés.
- Los puntos de localización de la tierra y los datos de calibración son añadidos en el proceso de conversión de señal HRPT a fichero 1b; pero siguen siendo imágenes sin calibrar, aunque en cada una de sus líneas aparecen definidos los parámetros de calibración, al igual que los puntos de control.



Las opciones de importación de la imagen son particularmente interesantes (Figuras 4.17, 4.18 y 4.19), ya que permiten extraer el área de interés de trabajo y reducir el tamaño de los ficheros; entre nuestras imágenes, el tamaño medio de los ficheros según el formato ha sido el siguiente:

- Formato HRPT: 40 Mb,
- Transferido a formato 1b: se reduce a 30 Mb,
- Importando las bandas 1 y 2 a formato .img de Erdas: 18 Mb.

Otras especificaciones necesarias para la correcta importación de la imagen son: el fichero de puntos de control para la georreferenciación (fichero GCP, *Ground Control Point*), la corrección de la distorsión panorámica, la especificación de las bandas de interés, las coordenadas del área, etc. (Figuras 4.18 y 4.19).

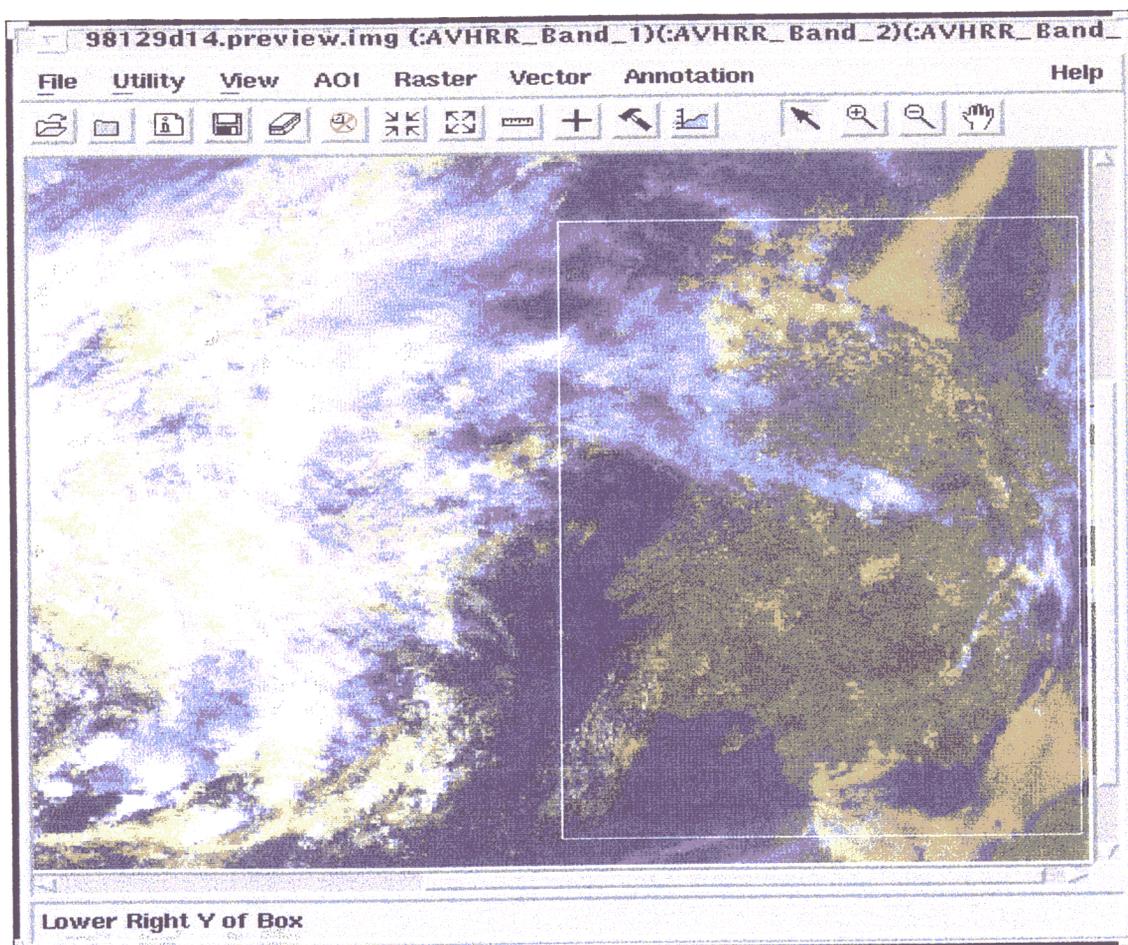


Figura 4.17 Visualización del área de interés de la imagen 1b antes de su importación a .img.

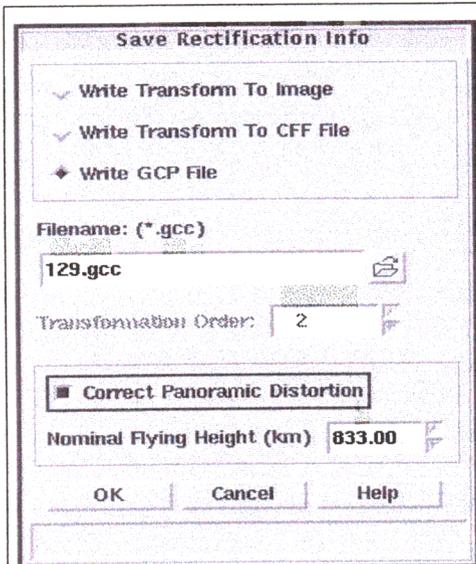


Figura 4.18 Importación puntos de control para georreferenciación de la imagen.

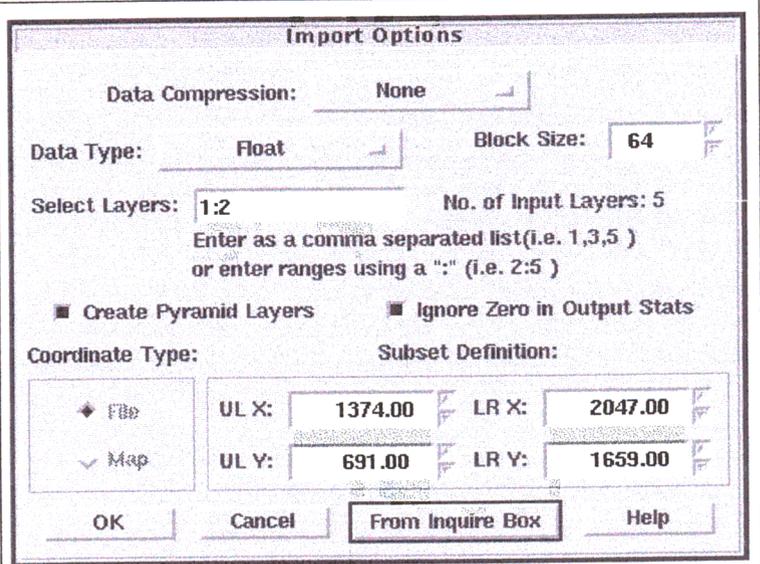


Figura 4.19 Opciones de importación de la imagen: bandas, área.

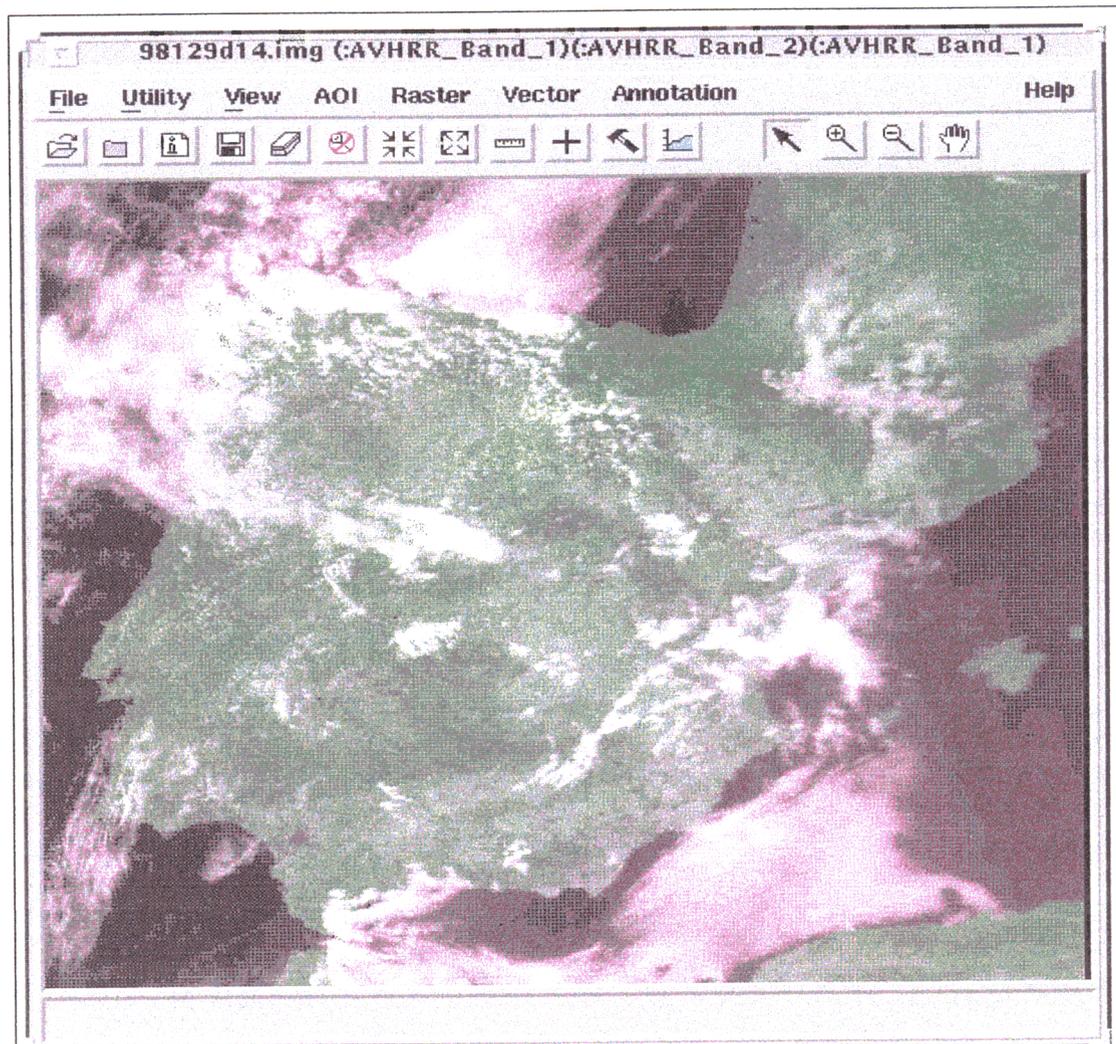


Figura 4.20 Imagen NOAA 1b importada a formato .img de Erdas Imagine. Bandas 1 & 2.

## 4340 CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE LA IMAGEN

Las imágenes de satélite están distorsionadas en su geometría: el tamaño de los píxeles no es uniforme, incrementándose desde el nadir hacia los bordes de la imagen. Las causas de las alteraciones geométricas son múltiples: variaciones en la altitud, posición o velocidad del satélite, distorsiones panorámicas provocadas por el propio sistema de barrido, desviaciones por el movimiento de rotación de la tierra durante la toma de la imagen, irregularidades topográficas o la misma curvatura de la tierra.

Si todos los procesos de manipulación de una imagen de satélite son importantes, la georreferenciación es el proceso que empieza a dar verdadero sentido, valor y utilidad geográfica a los datos manipulados hasta el momento. A partir de la georreferenciación, cada punto de la imagen tendrá una localización no solo implícita sino explícita en el espacio geográfico, al quedar representados en una proyección cartográfica normalizada los valores registrados por el sensor. La corrección geométrica implica una transformación en la posición que ocupan los *píxeles* de la imagen; el formato digital de la imagen permite que esas transformaciones estén basadas en funciones numéricas.

¿Por qué es necesaria la georreferenciación de las imágenes?: apuntamos los siguientes argumentos, entre muchos otros posibles:

- Para comparar la misma escena en diferentes fechas.
- Para desarrollar bases de datos, soporte de Sistemas de Información Geográfica.
- Para identificar muestras espectrales para una clasificación temática de la escena.
- Para crear foto-mapas a pequeña escala.
- Para combinar datos en formatos *ráster* y vectorial.
- Para comparar imágenes que están originalmente a distintas escalas.
- Para extraer medidas tanto de áreas como de distancias.
- Para realizar mosaicos sobre áreas que rebasan la anchura de barrido del satélite.

El objetivo del proceso de georreferenciación o corrección geométrica es solucionar estos problemas, construyendo una nueva imagen a partir de la original.

Los procedimientos de corrección geométrica son, básicamente, de dos tipos: por aplicación modelos orbitales o por asignación directa de puntos de control. Los *modelos orbitales* gestionan la corrección de la imagen a partir del estudio de las deformaciones que se producen en la imagen debido a los diferentes parámetros de la órbita del satélite, la esfericidad de la tierra, su movimiento de rotación, etc. En este modelo se aplican unas matrices de deformación que permiten averiguar las posiciones de un punto de la imagen corregida  $(x, y)$  a partir de las coordenadas de ese mismo punto en la imagen original. Los métodos de corrección basados en *puntos de control* averiguan de forma analítica las funciones de corrección a partir de los puntos comunes entre la imagen de referencia  $(x, y)$  y las de la imagen a transformar  $(p, q)$ . En nuestro estudio, hemos corregido todas las imágenes NOAA-AVHRR por el modelo orbital SG4, mientras que

las imágenes Landsat TM (201-31 y mosaico) han sido ortocorregidas, asignando puntos de control directamente mediante teclado, tableta digitalizadora o estableciendo correspondencias entre los píxeles de la imagen a corregir y otra ya rectificadas.

En proceso de corrección geométrica hay que diferenciar varios conceptos estrechamente relacionados, pero que encierran matices únicos. Para favorecer la claridad de términos, definimos escuetamente los siguientes conceptos:

**Georreferenciación** es el proceso de asignación de coordenadas de mapa a una imagen. Cualquier imagen, aunque haya sido proyectada en un plano, no tiene asociada todavía un sistema de coordenadas. La georreferenciación por sí misma, incluye cambios sólo en las coordenadas de los píxeles, la estructura geométrica de la imagen no cambia.

**Rectificación** es la transformación de los datos desde un sistema de proyección (generalmente no estándar) a otro sistema (generalmente, estandarizado) a partir de un polinomio de grado  $n$ . Los píxeles del nuevo sistema deben de ser remuestreados a continuación. La rectificación, por definición, incluye la georreferenciación. En ocasiones, las imágenes pueden rectificarse a una proyección particular estandarizada y con un tamaño de pixel concreto; en estos casos se habla de datos **geocodificados**.

**Remuestreo** de una imagen es el proceso de interpolación de los valores digitales y la reubicación de los píxeles en un nuevo sistema de proyección, a partir de los valores de la imagen original

**Los sistemas de proyección** de mapas sirven para representar la superficie de la esfera o de un esferoide sobre un plano. **El sistema de coordenadas** asociado para localizar un punto en una imagen se expresa en pares de números (x, y) que corresponden a columnas y filas. Cada sistema de proyección lleva asociado un tipo de coordenadas.

Para determinar y seleccionar el tipo de proyección más adecuado según una aplicación o tipo determinado de datos, debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Área de la imagen: el tamaño exigirá un tipo de proyección u otro.
- Área de estudio: en función de la zona del globo, deberá variarse la proyección.
- Forma del mapa: circular, Norte-Sur, Este - Oeste.

**Latitud/Longitud** es el sistema de coordenadas esféricas no asociadas a una proyección y que expresan una localización referida a un esferoide, no a un plano.

**La ortorrectificación** toma en cuenta la topografía del terreno en la rectificación geométrica de la imagen. Este proceso es especialmente importante en áreas montañosas, con datos de gran precisión (fotografía aérea, SPOT PAN, IRS,...) o para aplicaciones de gran detalle (ingeniería, telefonía, etc.). Esta ha sido la aplicada a las imágenes Landsat TM en nuestro estudio.

*La geocodificación* es la inserción de la información de mapa (coordenadas correspondientes a la esquina superior izquierda de la escena) en una imagen que ya está proyectada y no necesita ser corregida (no tiene distorsión).

Durante la rectificación geométrica, los valores de fichero son remuestreados de un sistema de filas y columnas a un nuevo sistema. Dicho proceso se realiza a través de un algoritmo que calcula estos valores finales a partir de los datos de fichero contenidos en la imagen original; durante el proceso pueden perderse algunos valores espectrales, por lo que una imagen no rectificadas es espectralmente más correcta que una imagen rectificadas. Por esto, algunos analistas recomiendan que se clasifique antes de rectificar, ya que la clasificación estará basada en los niveles digitales originales. En nuestro estudio no hemos procedido con este criterio por tratarse de una serie multitemporal y no de una sola imagen aislada. En cierta medida, el dato espectral que pueda perderse en la reestructuración debida a la geocorrección, se recupera en la repetitividad de la serie multitemporal.

En resumen, las fases de la corrección geométrica de las imágenes son tres:

1. Asignación de los puntos de control (modelo orbital o asignación directa).
2. Cálculo del polinomio de transformación.
3. Remuestreo de la nueva imagen.

Explicamos los contenidos y variantes de cada una de estas fases, resaltando las opciones aplicadas en la corrección de las imágenes NOAA-AVHRR, todo ello según las directrices conceptuales y técnicas señaladas por Erdas®, Inc. (1997)<sup>276</sup>.

#### **4340 a) LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL (GCP's)**

Los GCP's (*ground control points*) o puntos de control son dos pares de coordenadas de un pixel de la imagen: las *Coordenadas de origen* (normalmente coordenadas de fichero de la imagen que está siendo rectificadas) y las *Coordenadas de referencia* (coordenadas de mapa o de salida). En este apartado nos referimos a la asignación de GCP's de las imágenes NOAA-AVHRR. La correspondencia entre los GCP y los valores de las coordenadas de salida se obtienen por medio de los cálculos de precisión efectuados por el Modelo Orbital SG4 (Figura 4.21).

---

276 Erdas®, Inc. (1997). Erdas Imagine Field Guide. Fourth Edition Revised and Expanded. Atlanta Georgia

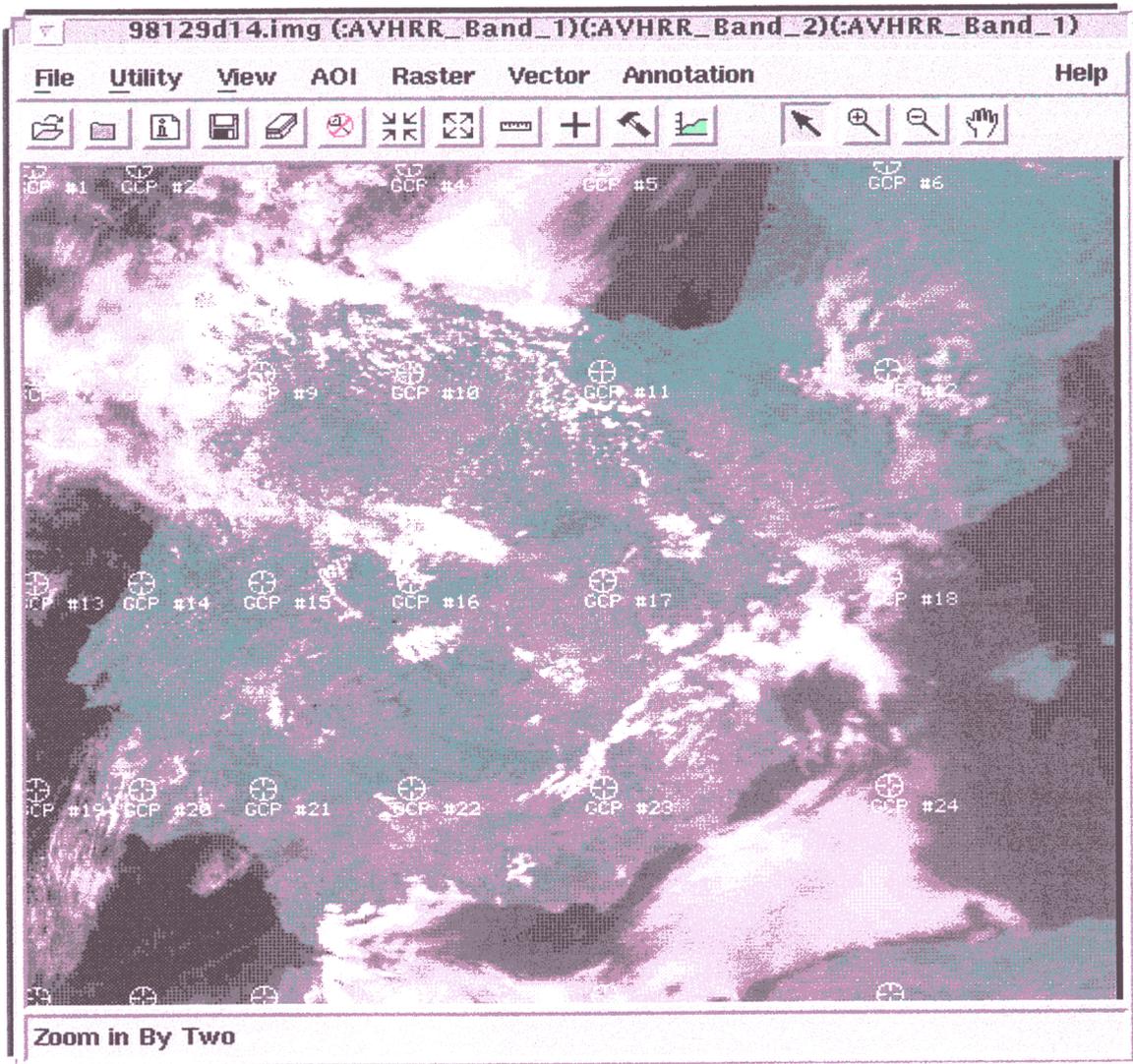


Figura 4.21 Distribución de los GCP sobre la imagen (Fichero .gcp aportado por el mismo satélite).

Las figuras 4.22 a 4.26 muestran el proceso seguido por el sistema de corrección de la imagen en el reconocimiento de las coordenadas de entrada y en las opciones de proyección de salida. En nuestro caso, las características de proyección de las imágenes han sido: Proyección: UTM; Esferoide: Internacional 1909; Huso: 30; Datum: Europeo 1950 (España y Portugal).

Point #	Point ID	X Source	Y Source	X Dest.	Y Dest.	X Residual	Y Residual	RMS Error
1	GCP #1	8.739	0.000	-11.641	44.438			
2	GCP #2	114.566	0.000	-10.172	44.609			
3	GCP #3	236.733	0.000	-8.461	44.789			
4	GCP #4	385.336	0.000	-6.375	44.969			
5	GCP #5	579.494	0.000	-3.641	45.148			

Figura 4.22 Vista del editor de puntos de control con los pares de columnas de coordenadas de origen y destino.

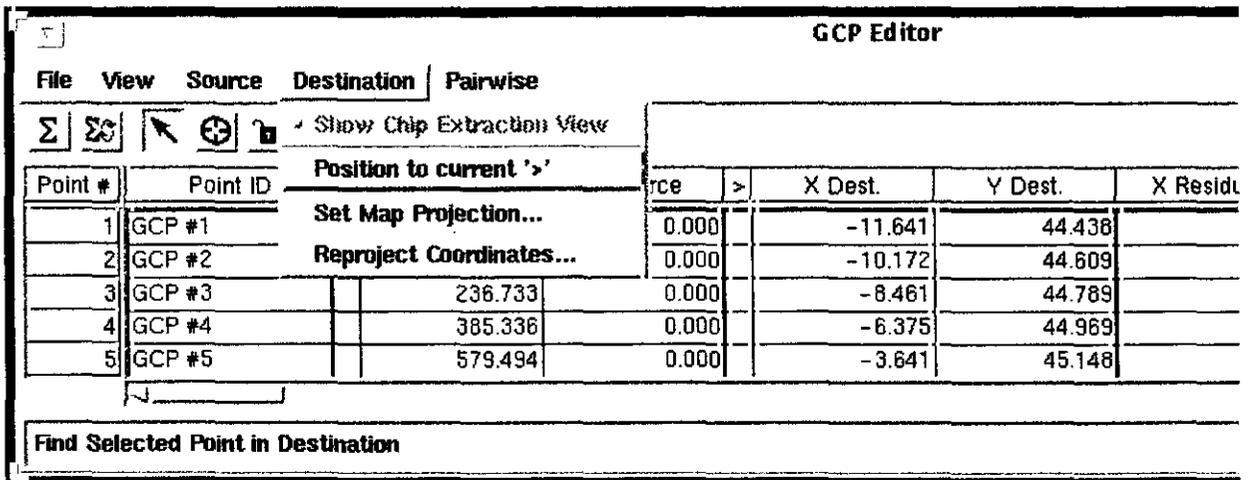


Figura 4.23 Acceso a la proyección y reproyección de coordenadas.

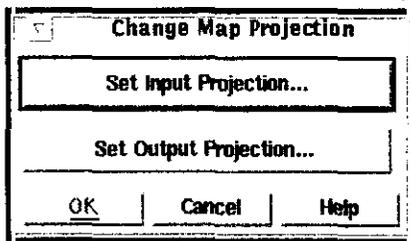


Figura 4.24 Acceso a las proyecciones de origen y destino.

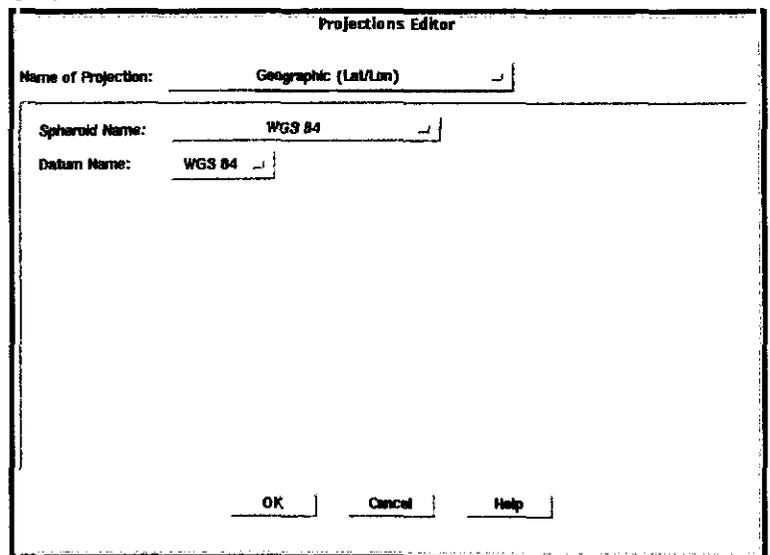


Figura 4.25 Parámetros de proyección de origen.

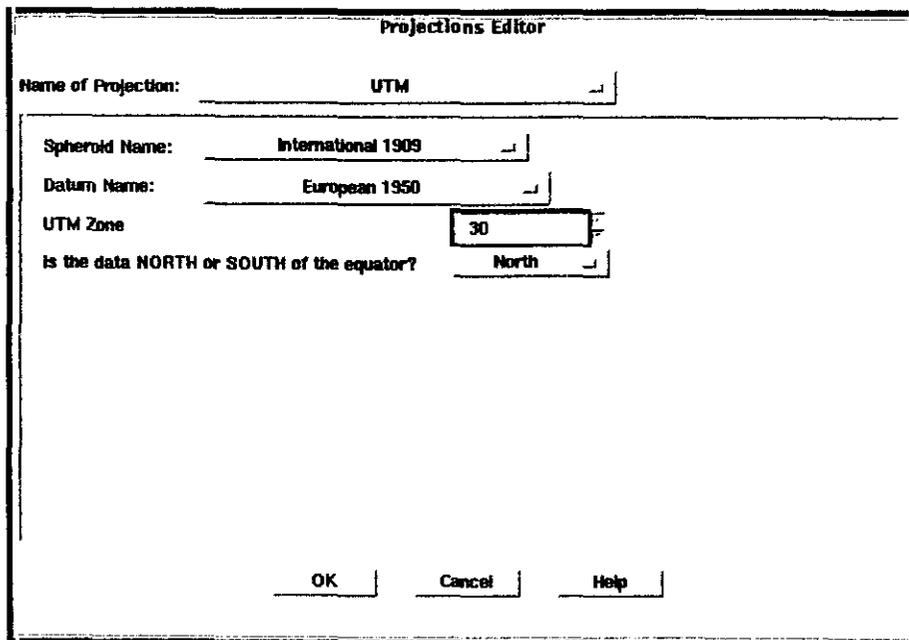


Figura 4.26 Parámetros de proyección de destino.

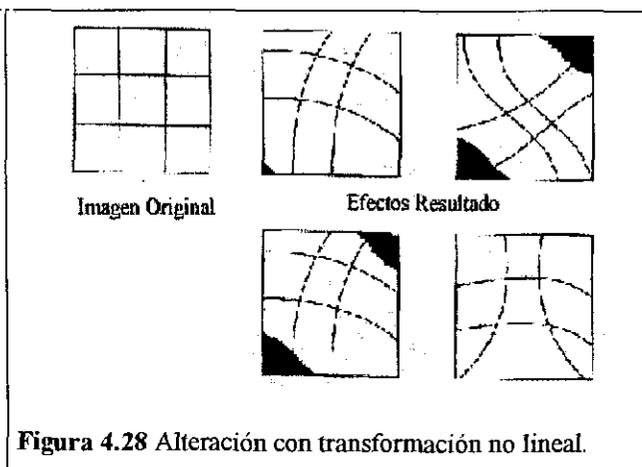
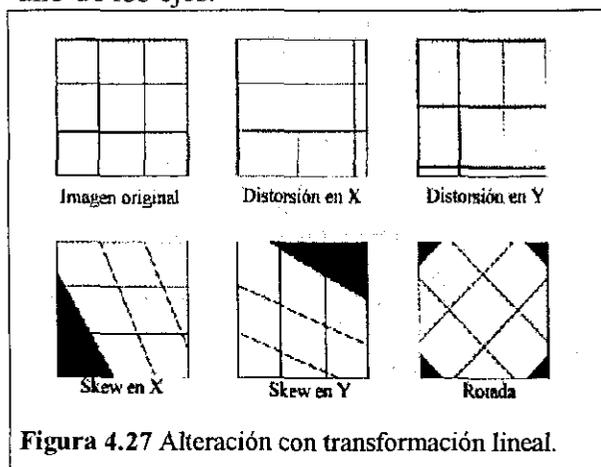
## 4340 b) CÁLCULO DEL POLINOMIO DE TRANSFORMACIÓN

Los polinomios de transformación se utilizan para convertir los ficheros de origen de coordenadas en ficheros rectificados de acuerdo a una proyección predeterminada. El software utilizado estructura los coeficientes de esos polinomios en matrices, por lo que hablamos indistintamente de polinomio o matriz de transformación. El grado de complejidad del polinomio se expresa como el orden del polinomio. Este orden es el mayor exponente utilizado en el polinomio introducido en la matriz de transformación.

Una matriz de transformación se calcula a partir de una serie de puntos de control mediante un ajuste de mínimos cuadrados. Dicho polinomio convertirá las coordenadas de entrada (de fichero) en otras de salida (de mapa) con un error mínimo. En nuestra serie de imágenes hemos aplicado transformaciones lineales (matrices de primer orden) y transformaciones no lineales (matrices de segundo orden). La matriz de transformación de 1<sup>er</sup> orden tiene 6 coeficientes

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$X_0 = b_1 + b_2 x_i + b_3 y_i$
$b_1$	$b_2$	$b_3$	$Y_0 = a_1 + a_2 x_i + a_3 y_i$
$x_i, y_i$ son las coordenadas fuente ( <i>input</i> )			
$x_0, y_0$ son las coordenadas rectificadas ( <i>output</i> )			

La figura 4.27 muestra como se ven modificados los datos originales de la imagen aplicando una transformación lineal, de modo homogéneo o con mayor incidencia sobre uno de los ejes.



Las transformaciones de segundo orden o superior se denominan no lineales. Los procesos de corrección no lineales también se conocen como *efecto de láminas de goma*, por la sensación de movilidad que proporcionan al conjunto de los datos. La figura 4.28 ilustra los efectos de algunas transformaciones no lineales. Los polinomios de orden 2 son apropiados para georreferenciar imágenes que cubren un área extensa, estando por tanto afectados por la curvatura de la tierra. Esto resulta adecuado, por ejemplo, en la corrección de imágenes NOAA sobre la península ibérica o sobre la

cuenca mediterránea. Los polinomios de órdenes superiores (3 y 4) se recomiendan en la literatura para la georreferenciación de fotografía aérea y radar.

Los polinomios de orden mayor se calculan según:

$$X_0 = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + \dots + Qx^i y^j + \dots + \Omega y^t$$

Donde,  $A, B, C, D, E, F, \dots, \Omega$  son coeficientes

$t$  es el orden del polinomio

$i$  y  $j$  son exponentes

La ecuación  $Y_0$  toma el mismo formato con diferentes coeficientes.

En general, el número de coeficientes necesarios para plantear un polinomio de grado  $t$  viene dado por:  $(t+1) \times (t+2)$ .

Un ejemplo de ecuación de tercer orden sería el siguiente, donde se utiliza un total de 20 coeficientes,  $(3 + 1) \times (3 + 2)$ :

$X_0 = 5 + 4x - 6y + 10x^2 - 5xy + 1y^2 + 3x^3 + 7x^2y - 11xy^2 + 4y^3$
$Y_0 = 13 + 12x + 4y + 1x^2 - 21xy + 11y^2 - 1x^3 + 2x^2y + dxy^2 + 12y^3$

Una de las funciones de la matriz de transformación es el cálculo del **Error Cuadrático Medio** (RMS, *Root Mean Square*). A partir de la función inversa de la matriz de transformación, los GCP fuente son retransformados partiendo de los GCP de destino recién calculados. El error RMS es el valor de la distancia entre el GCP fuente y el retransformado. Su fórmula de cálculo es:

$$RMSError = \sqrt{(x_r - x_f)^2 + (y_r - y_f)^2}$$

Donde,  
 $(x_i, y_i)$  son las coordenadas fuente  
 $(x_r, y_r)$  son las coordenadas fuente retransformadas.

El error RMS se expresa como distancia en el sistema de coordenadas fuente. Si la imagen fuente tiene coordenadas de fichero, entonces el error RMS está medido en píxeles. Por ejemplo, un error RMS de 2, hace referencia a dos píxeles desde el GCP retransformado.

Aunque el cálculo del error RMS está totalmente automatizado por el software, hay una serie de conceptos, cálculos y resultados intermedios que deben tenerse muy en cuenta para controlar en todo momento la precisión geométrica o el distanciamiento al que nos conducen los GCP's. Concretamente nos referimos a los residuales, al error RMS por GCP, al error RMS total y a la contribución de cada punto al error.

Los valores **residuales** en el cálculo del error RMS son las distancias entre las coordenadas fuente y las retransformadas en una dirección ( $x$  o  $y$ ). El software utilizado permite editar los valores residuales de  $X$  e  $Y$ .

Del mismo modo, se puede obtener la contribución al **error de cada GCP**. Esta contribución se calcula a partir de la ecuación:

$$R_i = \sqrt{XR_i^2 + YR_i^2}$$

Donde,

$R_i$  es el *error RMS* del GCP<sub>i</sub>

$XR_i$  es la X residual del GCP<sub>i</sub>

$YR_i$  es la Y residual del GCP<sub>i</sub>

La relación entre el error RMS y los residuales en cada punto se muestra en la figura 4.29.

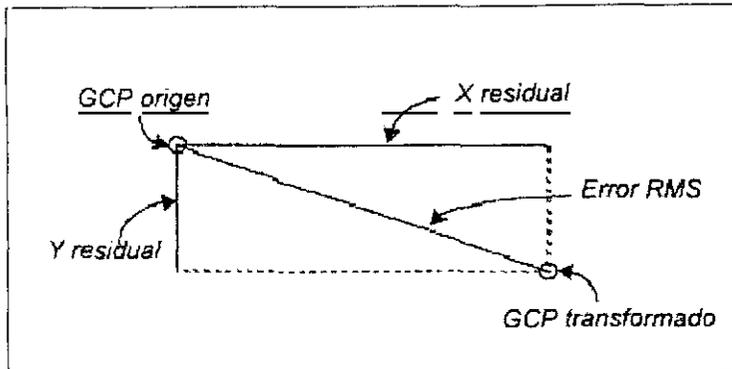


Figura 4.29 Error RMS y valores residuales por punto GCP.

El **error RMS total** se calcula a partir de los valores residuales de  $x$  y de  $y$ .

$$R_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n XR_i^2}$$

$$R_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n YR_i^2}$$

$$T = \sqrt{\frac{R_x^2 + R_y^2}{n}}$$

Donde,

$R_x$  = X RMS error

$R_y$  = Y RMS error

$T$  = total RMS

$n$  = número total de GCPs

$i$  = GCP-*i*ésimo

$XR_i$  = X residual del GCP<sub>i</sub>

$YR_i$  = Y residual del GCP<sub>i</sub>

La **contribución al error de cada GCP** es un valor normalizado ( $E_i$ ) que representa el error de cada punto en relación con el error total RMS.

$$E_i = \frac{R_i}{T}$$

Donde,

$E_i$  es la contribución al error del GCP<sub>i</sub>

$R_i$  es el *error RMS* para el GCP<sub>i</sub>

$T$  es el *error RMS* total

Para determinar el orden de transformación, se puede valorar la distorsión relativa desde la imagen al mapa. Si se desconoce con cual se debe trabajar, se debe empezar con el orden de transformación 1, repitiendo el cómputo de las matrices de transformación hasta obtener un *error RMS* aceptable.

La figura 4.30 muestra un resumen de valores de los errores RMS por punto de control, así como los valores residuales de X e Y. El valor total del error se ve en la figura 4.31.

Point #	Point ID	X Source	Y Source	X Dest.	Y Dest.	X Residual	Y Residual	RMS Error	Cont
1	GCP #1	8.739	0.000	-187594.835	4957124.317	-0.120	-0.185	0.220	
2	GCP #2	114.566	0.000	-69003.470	4964850.235	-0.224	0.000	0.224	
3	GCP #3	236.733	0.000	66111.441	4974255.766	0.166	-0.191	0.254	
4	GCP #4	365.336	0.000	233953.274	4965233.824	0.145	-0.030	0.148	
5	GCP #5	579.494	0.000	449741.366	4999851.701	-0.010	-0.073	0.073	

Figura 4.30 Muestra de valores del error cuadrático medio (RMS) y residuales de los GCP's.

	X'	Y'
Const.	-746.641319	4437.120569
X	0.000865	0.000195
Y	0.000268	-0.000878
X^2	0.000000	0.000000
X Y	0.000000	-0.000000
Y^2	-0.000000	-0.000000

Total Combined RMS Error

Figura 4.31 Valor total final del RMS.

Suele ser más apropiado tolerar ciertos niveles de error, en lugar de optar por órdenes de transformación altos. Los niveles aceptables de error RMS debe determinarlos el analista, según el tipo de datos, la precisión que necesite la aplicación, etc. Así, por ejemplo, la toma de un punto de control para restitución fotogramétrica requiere no menos de 30 tomas de dato, para terminar aceptando la media de los valores. Otro nivel de precisión es el que establece, por ejemplo, el servicio cartográfico de los Estados Unidos para cartografía de escala 1:24.000, con una precisión de 20 m.

El error RMS se expresa en píxeles. Por lo tanto, si al rectificar una imagen Landsat se desea una desviación máxima de 30 m, el error RMS no debe ser superior a 0.50. Si los datos que se están corrigiendo son de NOAA-AVHRR, un error RMS de 1.50 puede ser aceptable. En nuestro caso, el error aceptado ha sido siempre inferior a 1, con polinomios de transformación de grado 1 y 2.

#### 4340 c) REMUESTREO DE LA NUEVA IMAGEN

El remuestreo o interpolación de la imagen es el proceso final de corrección geométrica que permite obtener la nueva imagen georreferenciada, es decir, un nuevo fichero que contiene los datos originales proyectados con unas coordenadas de mapa determinadas.

El método de interpolación utilizado en nuestras imágenes NOAA ha sido el de *vecino más cercano*, aunque existen otros posibles; los criterios que sigue cada método para asignar valores a los nuevos píxeles interpolados son los siguientes:

- i. Interpolación por *vecino más cercano* (*Nearest Neighbour*): Utiliza el valor de los píxeles más cercanos para asignar el valor de pixel de salida.
- ii. Interpolación *bilineal* (*Bilinear Interpolation*): Utiliza los datos de 4 píxeles, de una ventana de 2 x 2, para calcular un valor de salida con una función bilineal.
- iii. *Convolución cúbica* (*Cubic Convolution*): Utiliza los datos de 16 píxeles, de una ventana de 4 x 4, para calcular el valor de salida con una función cúbica.

En los tres casos, el número de filas y columnas de la imagen de salida se calcula en función de las dimensiones del fichero de salida (con coordenadas de mapa), y estará determinada por el tamaño de celda y el orden de transformación.

i. **Interpolación de valores por el método de *vecino más cercano***

Este ha sido el método de interpolación de datos utilizado. Para determinar el pixel de salida por el método de *vecino más cercano*, las coordenadas rectificadas ( $x_0, y_0$ ) del pixel se retransforman a un sistema de coordenadas fuente, usando la inversa de la matriz de transformación. El pixel más cercano a las coordenadas retransformadas es el *vecino más cercano*. El valor del pixel que tenga estas coordenadas fuentes retransformadas será asignado al pixel de la imagen de salida.

<b>METODO DE INTERPOLACIÓN POR VECINO MÁS CERCANO</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los datos originales son transferidos sin realizar la media, como hacen los otros métodos; los valores extremos de los datos no se pierden. Es muy importante cuando se discrimina entre tipos de vegetación.</li> <li>• Recomendado para utilizar antes de una clasificación.</li> <li>• Método de cálculo más fácil y rápido.</li> <li>• Apropiado para ficheros temáticos, que pueden tener valores de fichero basados en un sistema cualitativo (nominal u ordinal) o cuantitativo (intervalo o ratio).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para imágenes grandes y con un tamaño de celda grande, normalmente hay efecto "escalera" alrededor de la diagonal.</li> <li>• El número de ciertos píxeles puede disminuir y el de otros aumentar.</li> <li>• Utilizando datos temáticos lineales (carreteras), puede dar lugar a rupturas.</li> </ul>

ii. **Interpolación de valores por el método *bilineal***

El valor del pixel rectificado está basado en los valores de los 4 píxeles más cercanos a las coordenadas retransformadas, tal y como se ilustra en la figura 4.32. El peso de cada uno de estos píxeles se calcula mediante una función bilineal:

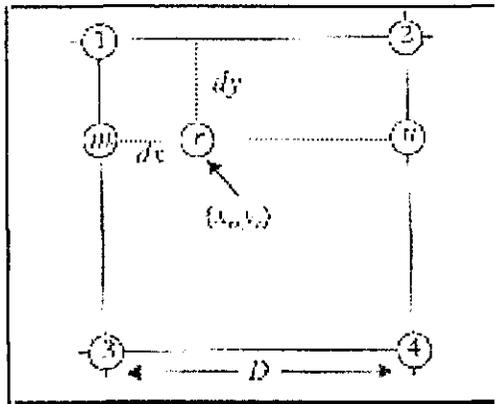


Figura 4.32 Localización de la coordenada retransformada  $r$  por interpolación bilineal.

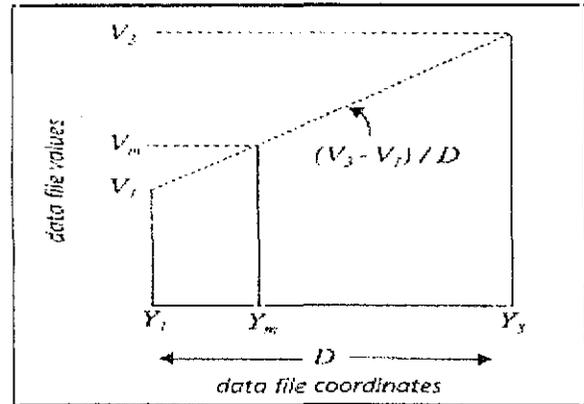


Figura 4.33 Interpolación lineal. Cálculo de los valores de salida como función de las distancias.

Para calcular  $V_r$ , es necesario primero conocer  $V_m$  y  $V_n$ . El valor de fichero de  $m$  ( $V_m$ ) es una función de cambio en el valor de fichero entre los píxeles 3 y 1 (que es  $V_3 - V_1$ ).

La ecuación para el cálculo  $V_m$  desde  $V_1$  y  $V_3$  es:

$$V_m = (V_3 - V_1) / D \cdot xdy + V_1$$

Donde,  $Y_1$  = la coordenada Y para el píxel  $i$

$V_i$  = el valor de dato para el píxel  $i$

$dy$  = la distancia entre  $Y_1$  y  $Y_m$  según el sistema de coordenadas fuente

$D$  = Distancia entre  $Y_1$  y  $Y_3$  según el sistema de coordenadas fuente.

Considerando que  $((V_3 - V_1) / D)$  es la pendiente de la línea en el gráfico, entonces esta ecuación se traslada a la ecuación de la recta según  $Y = mx + b$ .

De forma similar, la ecuación para el cálculo del valor de fichero para  $n$  ( $V_n$ ) en el sistema de píxeles se verifica mediante la siguiente expresión.

$$V_n = (V_4 - V_2) / D \cdot xdy + V_2$$

A partir de  $V_n$  y  $V_m$ , el valor de fichero para  $r$  (que es a la localización de las coordenadas retransformadas  $(x_r, Y_r)$ ) puede ser calculado de la misma manera.

$$V_r = (V_n - V_m) / D \cdot xdy + V_m$$

Algunas ecuaciones de interpolación bilineal expresan el valor de dato de salida como:

$$V_r = \sum w_i V_i$$

Donde,

$w_i$  = factor de peso en función de la distancia.

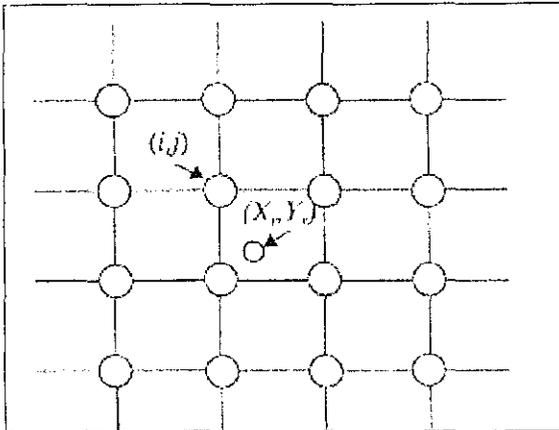
$V_i$  = el valor de fichero del píxel  $i$ .

<b>INTERPOLACIÓN BILINEAL</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La imagen de salida aparece con unos valores más uniformes, sin el "efecto escalera" que aparece en el método <i>Nearest Neighbour</i>.</li> <li>• Especialmente es un método más fiable que el <i>Nearest Neighbour</i>.</li> <li>• Utilizado para cambios en el tamaño de celda del píxel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debido a que los píxeles son promediados, la interpolación bilineal tiene el efecto de una convolución de baja frecuencia. Los cortes son suaves, y algunos extremos del valor de fichero son bajos.</li> </ul>

### iii. Interpolación de valores por el método de *convolución cúbica*

La convolución cúbica es muy similar a la interpolación bilineal; en este caso, el valor del pixel de salida se promedia a partir de los valores de un grupo de 16 píxeles, distribuidos en una ventana de 4x4. Por otra parte, la función de interpolación se aproxima más a una función cúbica que a una función bilineal.

La figura 4.34 ilustra gráficamente el criterio seguido para identificar los 16 píxeles que entran a formar parte del cálculo de interpolación, en relación con las coordenadas retransformadas ( $x_r, y_r$ ).



Se utiliza una función cúbica para ponderar los 16 píxeles de entrada; los píxeles más distantes de ( $X_r, Y_r$ ) tienen menor peso exponencial que los más cercanos a ( $X_r, Y_r$ )

**Figura 4.34** Píxeles entrando a formar parte del cálculo de la convolución cúbica.

Existen varias versiones de la ecuación de la convolución cúbica. Según la ecuación utilizada, los efectos en la imagen de salida serán diferentes. Algunas pueden llegar a tener un efecto similar a un filtro de baja frecuencia, sirviendo para promediar y suavizar los valores. Otras ecuaciones tienden a resaltar la imagen, a modo de filtro de alta frecuencia. La convolución cúbica desarrollada por nuestro software es una solución intermedia entre la baja y la alta frecuencia, y la fórmula utilizada es la siguiente:

$$V_r = \sum_{n=1}^4 V(i-1, j+n-2)xf(d(i-1, j+n-2)+1) \\ +V(i, j+n-2)xf(d(i, j+n-2)) \\ +V((i+1, j+n-2)xf(d(i+1, j+n-2)-1) \\ +V(i+2, j+n-2)xf(d(i+2, j+n-2)-2)$$

Donde,

$$i = \text{int}(x_r) \quad i = \text{int}(y_r)$$

$d(i,j)$  = distancia entre un pixel con coordenadas  $(i,j)$  y  $(x_r, y_r)$

$V(i,j)$  = valor de fichero del pixel  $(i,j)$

$V_r$  = valor de fichero de salida

$a = -0.5$  (constante que difiere en tipos de convoluciones cúbicas)

$f(x)$  = siguiente función (Atkinson, 1985)<sup>277</sup>:

277 Atkinson, P. (1985). Preliminary results of the effects of resampling on Thematic Mapper imagery. ACSM-ASPRS Fall convention technical papers. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing and American Congress on Surveying and Mapping.

$(a + 2)|x|^3 - (a - 3)|x|^2 + 1$  ..... si  $|x| < 1$   
 $a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a$  ..... si  $1 - |x| < 2$   
 0..... en cualquier otro caso

En la mayoría de los casos, un valor  $a = -0.5$  tiende a producir capas de salida con una media y una desviación estándar menor que los datos originales.

CONVOLUCION CÚBICA	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza un remuestreo de 4x4. En la mayoría de los casos, la media y desviación estándar de los píxeles de salida se equiparan a los píxeles de entrada más fielmente que por otros métodos de remuestreo.</li> <li>• El efecto del incremento de la curva cúbica puede corregir el ruido (Atkinson, 1985. <i>Cit. supra</i>).</li> <li>• Este método es recomendado cuando es necesario cambiar drásticamente el tamaño de celda de los datos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los valores de los datos pueden resultar alterados.</li> <li>• Es el método de remuestreo de mayor y más intensivo cálculo, y es también el más lento.</li> </ul>

Para especificar las distintas opciones de un fichero de salida de una imagen rectificada se selecciona un método de remuestreo y otros parámetros de la nueva imagen georreferenciada, y así comienza a generarse la nueva imagen.

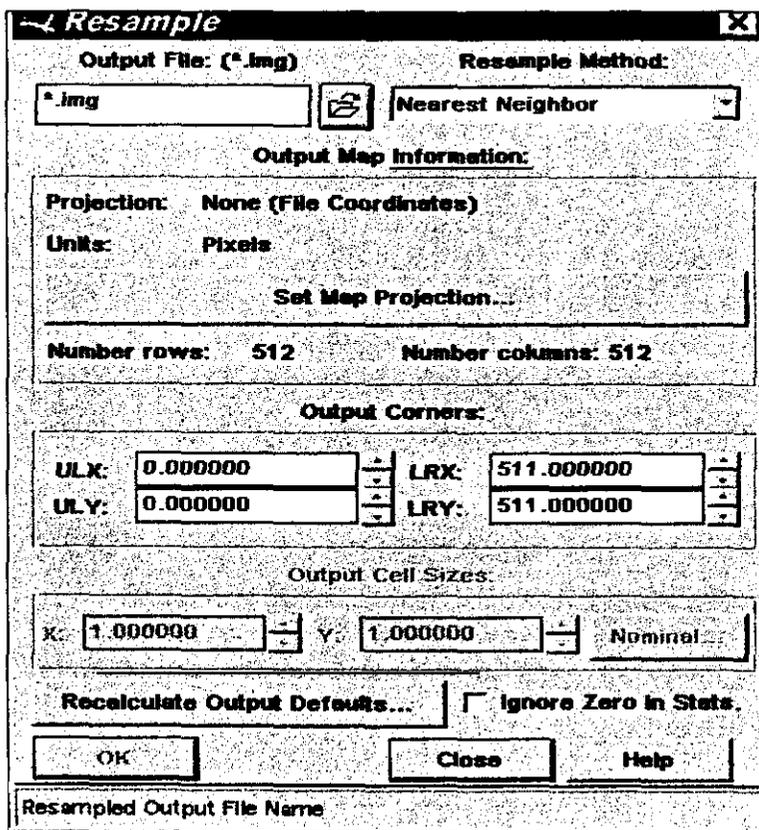


Figura 4.35 Diálogo para el remuestreo de la imagen.

En la figura 4.35 mostramos el diálogo de control que ofrece el software Erdas Imagine 8.3 para el remuestreo final de la imagen en el proceso de georreferenciación.

Desglosamos cada uno de sus elementos puesto que son los que controlan el último paso del proceso de georreferenciación.

**Output File:** Especifica un nuevo fichero de salida. La extensión del fichero img será automáticamente añadido. Si ya existe el fichero, aparecerá una nueva caja que preguntará si se quiere reemplazar. Aparece además un diálogo "File Open Dialog" para introducir el nombre y el lugar del fichero

**Resample method:** Selecciona el método de resampling que va a utilizarse: *Nearest Neighbor*, *Bilinear Interpolation*, *Cubic Convolution*. En todas las imágenes del estudio se ha utilizado el primer método

**Out map information:** Muestra algunos de los parámetros del fichero de salida, de acuerdo con la transformación especificada.

**Projection:** Especifica la proyección del fichero de salida. Ésta ha sido ya seleccionada en el *Transform Type* o bien en el *Projection Editor* al pulsar el botón *Set Map Projection*

**Number Rows, Number Columns:** Número de filas y columnas de píxeles que aparecerán en el fichero de salida, determinado por la matriz de transformación y el tamaño de celda señalado en el *Output Cell Sizes*.

**Output Corners:** Se pueden cambiar, si es necesario, las coordenadas de la esquina superior izquierda y la esquina inferior derecha. Están expresadas en las coordenadas y unidades especificadas en *out map information*. Por defecto se calculan a partir de los datos del fichero fuente, si se está rectificando de imagen a imagen (lo trataremos al hablar de la georreferenciación de las imágenes Landsat). ULX, LJLY: son las coordenadas de la esquina superior izquierda; LPX, LRY: son las coordenadas de la esquina inferior derecha.

**Output cell sizes:** *x*, *y* especifica el tamaño de celda tanto en el eje de las X como en el las Y. Las unidades en las que se expresan arriba. Por defecto son calculados por la matriz de transformación. Si no hay proyección de salida, entonces este campo no será editable.

**Nominal:** Aparece cuando la proyección es geográfica (latitud / longitud). Entonces, el tamaño de pixel de salida puede expresarse en metros, o convertirse a grados decimales.

**Recalculate output defaults:** Estima por defecto las esquinas de salida y el tamaño de celda de salida.

**Skip Factor y:** El factor de salto especifica el número de puntos para el muestreo de datos para el cálculo de la opciones vistas anteriormente. Por ejemplo, un factor de salto de 10, tomará todos los décimos píxeles para el muestreo. Si el salto es más pequeño, el tiempo de cómputo sería considerablemente mayor. Después de los cambios, del factor de salto, se recalcula.

**Recalculate:** Recalcula todos los parámetros.

## 4350 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN Y DEL MVC

En esta sección presentamos el proceso técnico al que se han sometido las imágenes NOAA para obtener los valores del índice de vegetación normalizado NDVI, de cada una de las imágenes en particular, así como de los compuestos mensuales del valor máximo del índice de vegetación (MVC). En el capítulo 3 hicimos una revisión del estado del arte relativo a los índices de vegetación más comúnmente utilizados y las aplicaciones que de los mismos se hacen así como la opinión crítica y científica que su uso suscita entre la comunidad científica. Aquí solo apuntamos la definición de índices de vegetación, enunciada ya por Colwell (1974)<sup>278</sup> o Tucker (1979)<sup>279</sup>, y que Gilabert, M. (1991, p.284)<sup>280</sup> formula con las siguientes palabras: "Los índices de vegetación son combinaciones de bandas espectrales cuya función es la de realzar la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de una superficie y la de atenuar la de otros factores como el suelo, las condiciones de la iluminación y de la atmósfera".

El índice de vegetación aplicado a las imágenes de este estudio ha sido el NDVI, (Rouse *et al*, 1974<sup>281</sup>) que, como hemos indicado, establece la diferencia normalizada de los datos de las bandas del infrarrojo cercano y del rojo, según la expresión:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

La aplicación de éste cálculo a cada imagen se llevó a cabo mediante el proceso ilustrado gráficamente en la figura 4.36. La imagen de entrada consta de las bandas infrarroja cercana y roja. Los elementos encapsulados en un círculo (○) corresponden a funciones de cálculo de imagen, mientras que los elementos encapsulados en los rombos (◇) son imágenes de entrada, de salida o temporales. En nuestro caso, la fórmula de cálculo introducida en el elemento *either if* es la correspondiente al NDVI. El algoritmo da un paso más, de manera que los valores de los *píxeles* de la imagen de salida son reescalados a 8 bits, por lo que los valores del NDVI de nuestras imágenes no oscilan entre +1 y -1, sino en sus equivalencias entre 0 y 255.

278 Colwell, J.E., (1974). Vegetation canopy reflectance, *Remote Sensing of the Environment*, 3:175-183.

279 Tucker, C.J., Elgin, J.H., McMurtrey, J.E., (1979). *Temporal spectral measurements of corn and soybean crops*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45: 643-653.

280 Gilabert, M.A. Índices de vegetación. En *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales*. Recursos renovables. Agricultura. Curso de Postgrado. Coord.: Gandía, S. y Meliá, J. Universitat de València. Estudi General. Unidad de Teledetección. Departament de Termodinàmica. pp 285-293.

281 Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C. (1974). *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD*, pp: 371

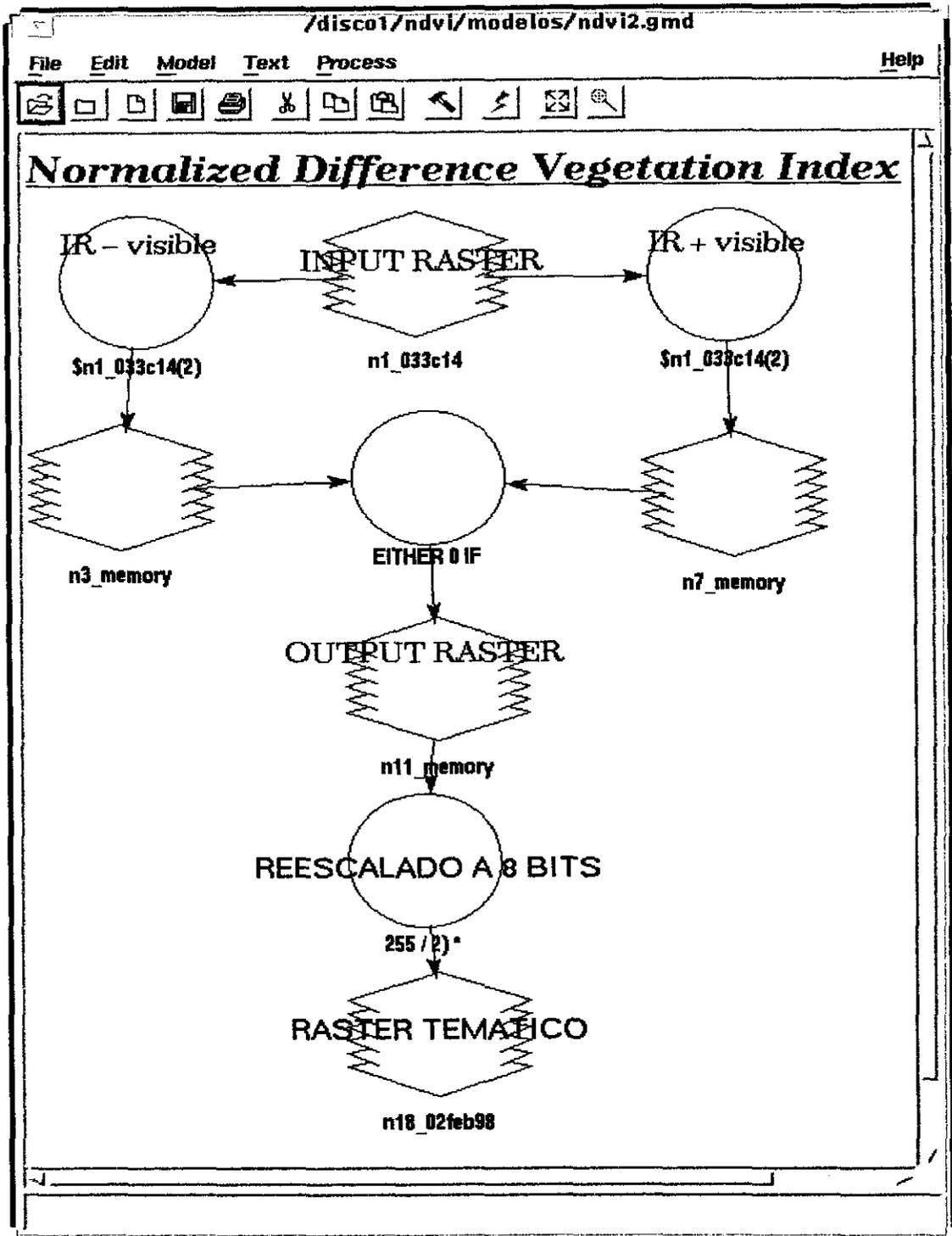


Figura 4.36 Algoritmo de cálculo del NDVI para una imagen NOAA-AVHRR.

A continuación, se comprueba el ajuste geométrico de la imagen, superponiendo el vector de los límites peninsulares (Figura 4.37), con el fin de corroborar la exactitud del proceso o para subsanar las deficiencias que hayan podido ocurrir en alguno de los pasos del proceso.

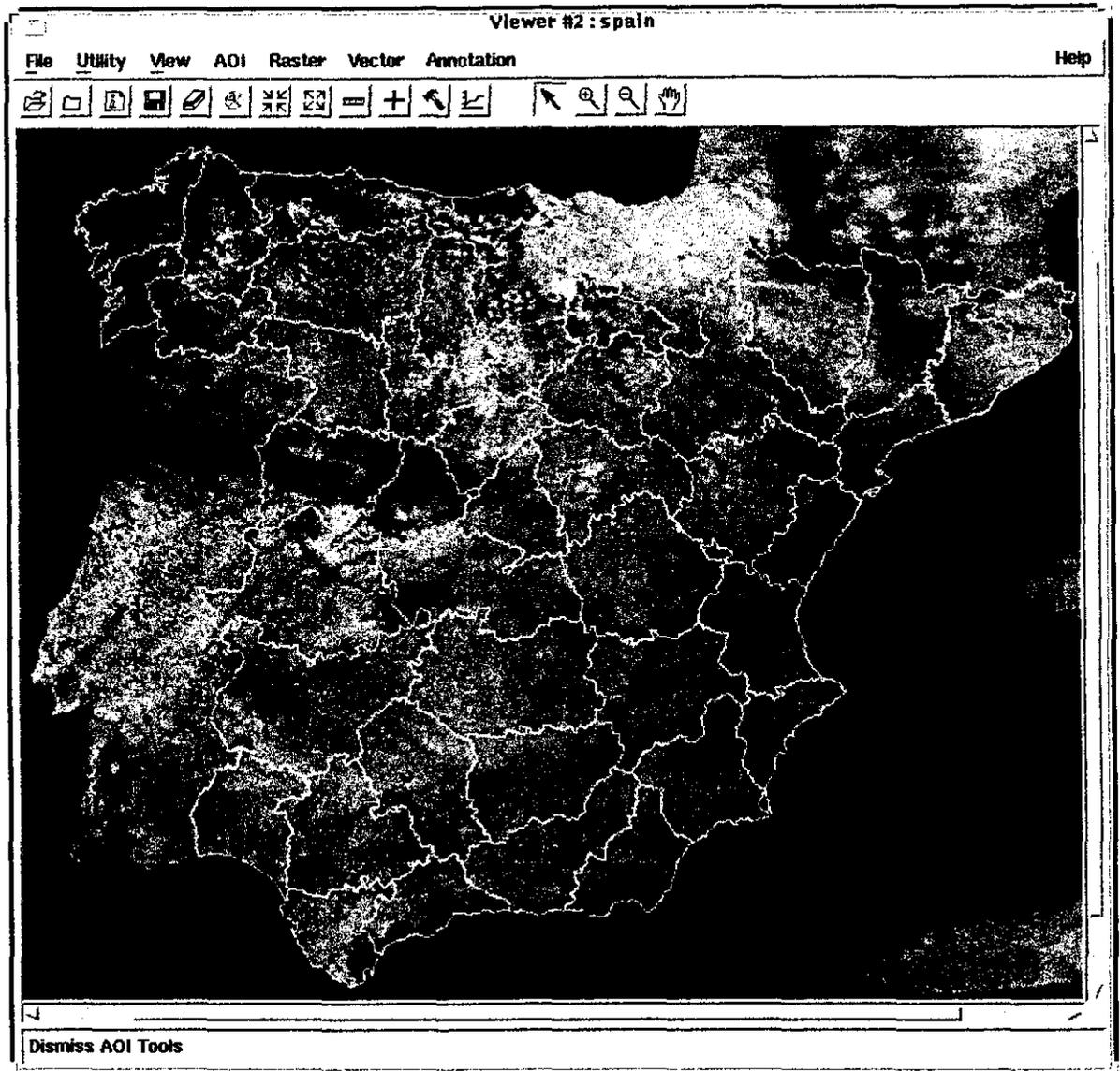
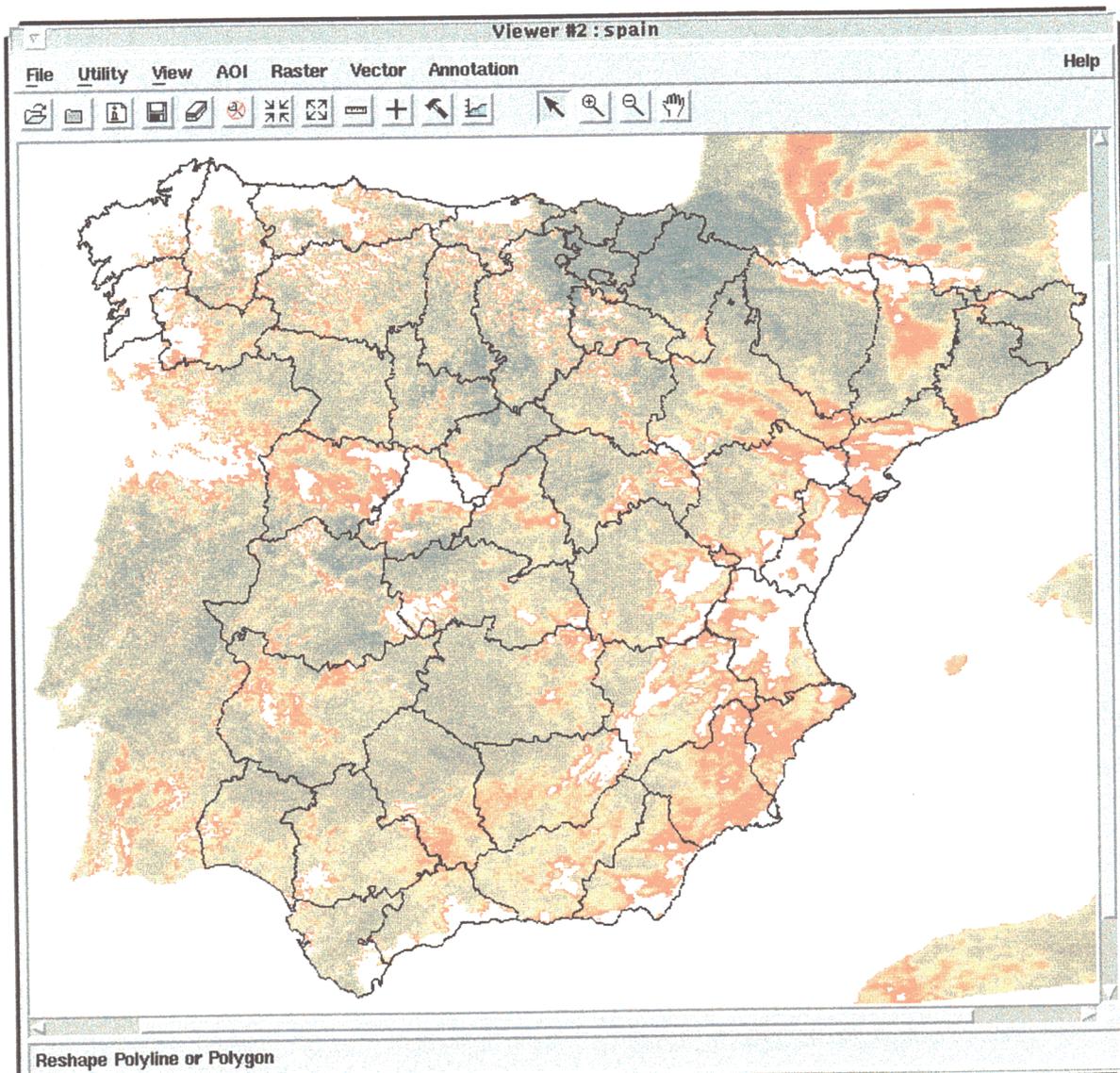


Figura 4.37 Comprobación de ajuste de la georreferenciación de la imagen NDVI a los límites territoriales.

Quando el ajuste geométrico resulta satisfactorio, se aplica una paleta de color a los valores del NDVI (Figura 4.38), con el fin de relacionar plásticamente los valores de NDVI con niveles de color que faciliten una comprensión inmediata del estado y vigor de la vegetación. Los niveles críticos (inferiores a 140) se distribuyen en la gama de rojos y naranjas; las tonalidades verdes se aplican con creciente intensidad para los valores de mayor vigor.



**Figura 4.38** Aplicación de la paleta de color a los valores del NDVI.

El segundo modelo de cálculo (Figura 4.39) corresponde al MVC. El ejemplo representado en esta figura corresponde al cálculo de un máximo semanal para toda la Península Ibérica (4-9 mayo 1998, ejemplo posterior a la serie NDVI87m). De acuerdo con el tratamiento de datos seguido en nuestro estudio, la composición de valores máximos del índice de vegetación ha sido mensual. El número de imágenes de entrada a la función de cálculo del MVC ha variado en cada mes, según la disponibilidad de observaciones indicadas en el Anexo 1.

Como resultado de este proceso se han obtenido 87 imágenes mensuales del MVC del NDVI sobre la Península Ibérica, una por cada mes comprendido entre enero de 1990 y marzo de 1997. Además la operación condicional de extracción de la Península, en nuestra serie hemos incluido otro condicional para la extracción del MVC del área de estudio de Castilla y León.

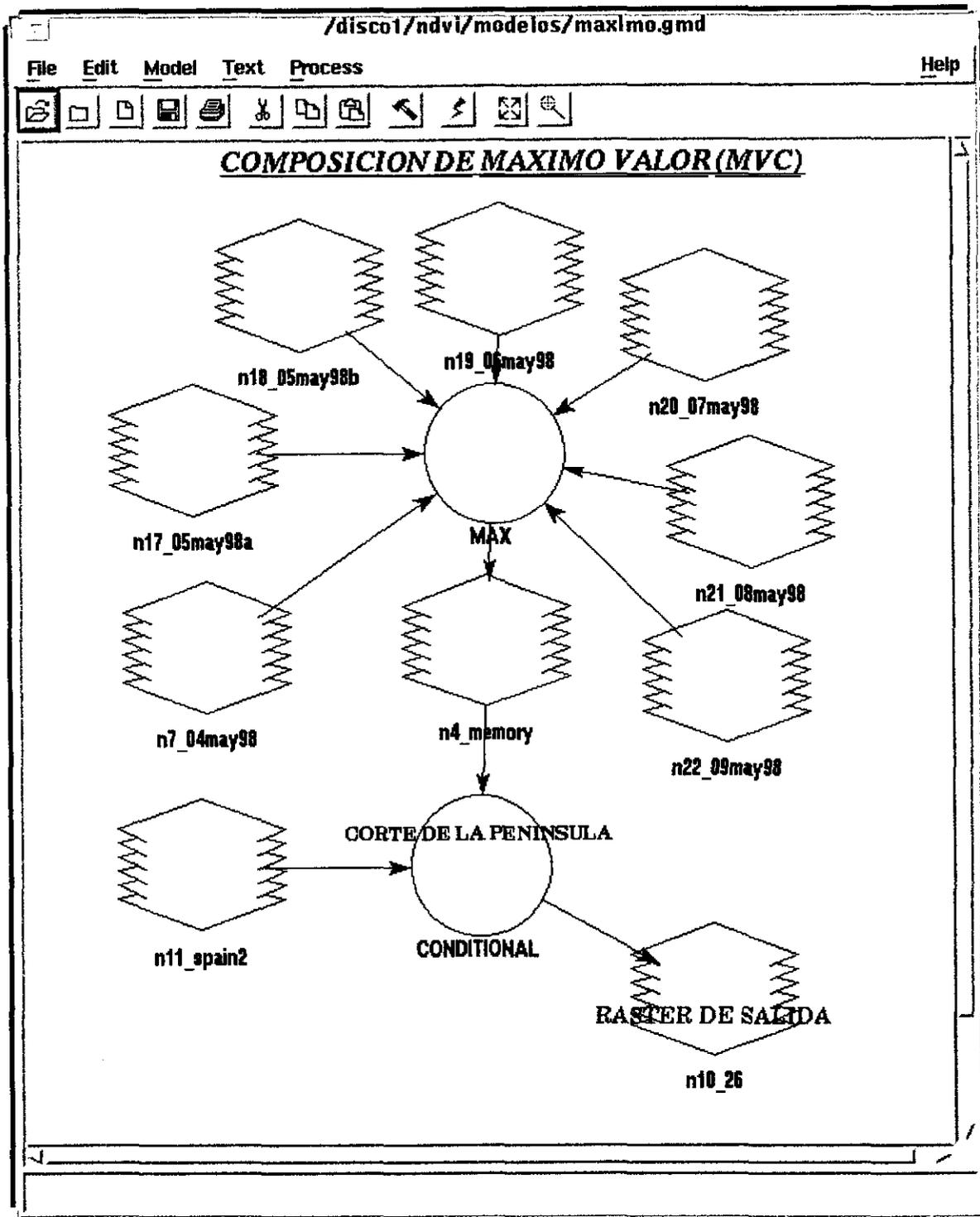


Figura 4.39 Algoritmo de cálculo del MVC del NDVI.

La figura 4.40 es el resultado de este cálculo para las imágenes diarias de la semana del 4 al 9 de mayo de 1998.

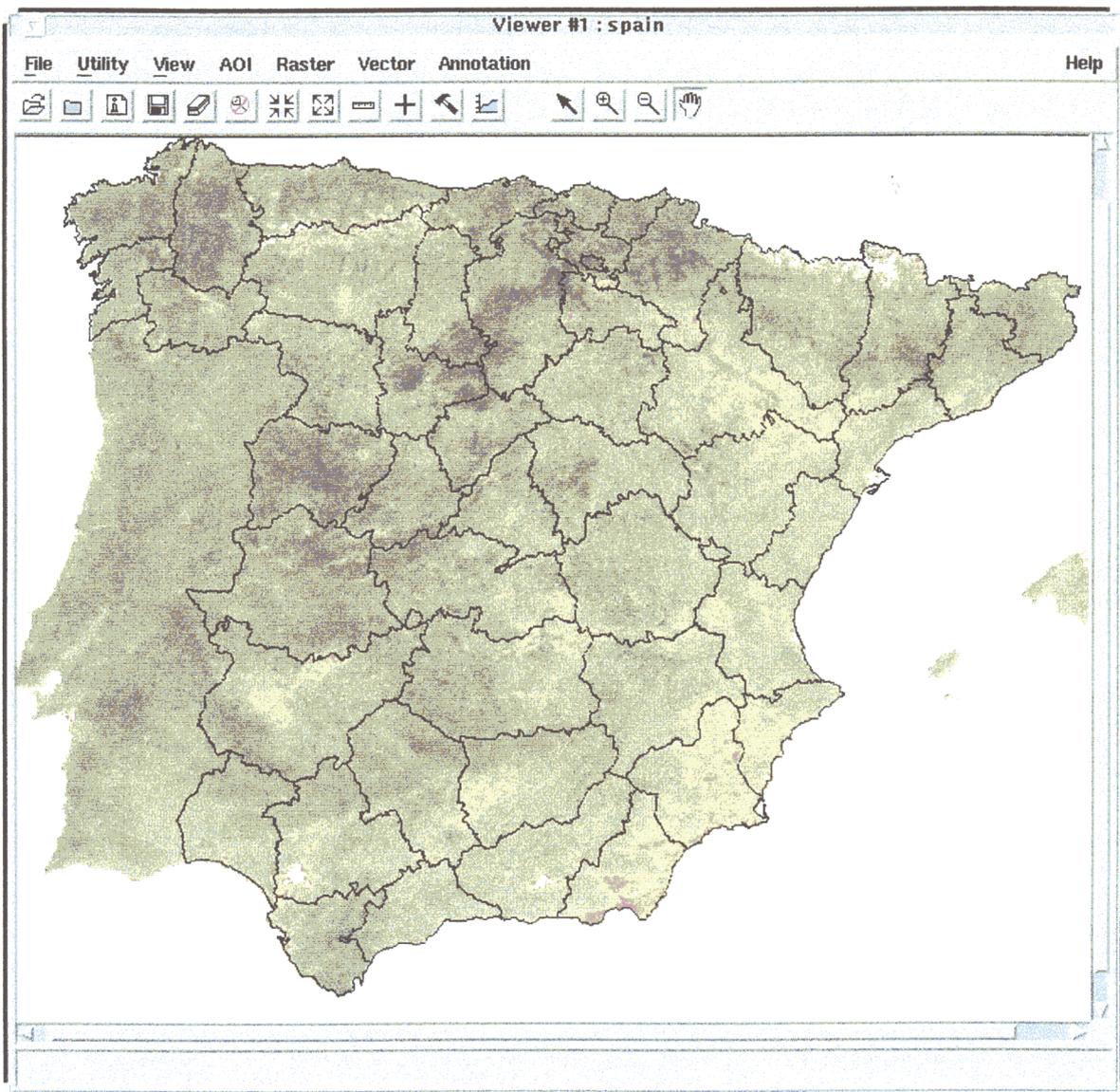


Figura 4.40 Imagen resultado del MVC del NDVI (4-9 mayo 1998).

La última actuación sobre las imágenes del MVC es la extracción de nuestra zona de interés. El volumen de los ficheros se reduce a 2,5 Mb (valor medio), tamaño que resulta muy manejable para cálculos posteriores y para archivo y acceso.

Los tiempos empleados para el proceso de las imágenes así como los volúmenes informáticos generados, se desglosan a continuación (Tabla 4.4). Debe tenerse en cuenta que el resultado de tiempos de cálculo y proceso están en directa dependencia de las características internas de los procesadores y ordenadores utilizados; en nuestro caso, los tiempos se han medido sobre una estación de trabajo *Sun Sparkc 4*. En cuanto a los volúmenes, mientras el espacio de memoria de una imagen final (MVC) del área de estudio no ocupa más que 2 ó 3 Mb, los volúmenes de datos gestionados en los procesos intermedios superan los 100 Mb por imagen.

<b>PROCESO (1 imagen sobre Península Ibérica)</b>	<b>TIEMPO PROCESO (min.)</b>	<b>VOLUMEN MEDIO (Mb)</b>
1. Recepción señal HRPT	5	40
2. Estandarización a formato 1b	2	30
3. Traspaso vía FTP de imagen 1b a sistema análisis de imagen	1,5	
4. Traspaso NOAA 1b a formato .img	3	18
5. Generación de vista previa	2	2
6. Georreferenciación		24
• Ajuste parámetros por operador	4	
• Proceso de máquina	3	
7. Generación del NDVI	3	12
8. Ajuste de la corrección geométrica	6	
9. Elaboración MVC del NDVI	8	(12)
10. Extracción área de estudio	3	2
<b>TOTAL POR IMAGEN</b>	<b>40 min.</b>	<b>128 Mb</b>
<b>TOTAL 1012 IMÁGENES</b>	<b>40480 min. 675 horas 17 sem (40 hrs/s) 4,5 meses</b>	<b>129.536 Mb 129.5 Gb</b>

**Tabla 4.4** Resumen de tiempos y volúmenes de procesamiento de las imágenes NOAA-AVHRR para la imagen serie NDVI87m.

Como resultado de todo este proceso de cálculo del NDVI-MVC llegamos a la construcción de la imagen serie NDVI87m, “apilando” los 87 compuestos mensuales del valor máximo del NDVI en una sola imagen de 87 canales. La herramienta utilizada para tal composición fue la de unión de bandas (*layer stack*) de Erdas Imagine; la corrección geométrica de todas las imágenes parciales con los mismos parámetros es lo que permite apilarlas en bandas independientes dentro de una misma imagen.

Cada banda es, pues, secuencial en el tiempo. La banda 1 (B1) se corresponde con el NDVI-MVC de enero de 1990; la banda 87 (B87) cierra la serie que hemos construido, en marzo de 1997. La correspondencia completa entre bandas y meses la ofrecemos en la tabla 4.5.

Estructura de bandas de la imagen NDVI87m							
Banda	1990	Banda	1991	Banda	1992	Banda	1993
1	enero	13	enero	25	enero	37	enero
2	febrero	14	febrero	26	febrero	38	febrero
3	marzo	15	marzo	27	marzo	39	marzo
4	abril	16	abril	28	abril	40	abril
5	mayo	17	mayo	29	mayo	41	mayo
6	junio	18	junio	30	junio	42	junio
7	julio	19	julio	31	julio	43	julio
8	agosto	20	agosto	32	agosto	44	agosto
9	septiembre	21	septiembre	33	septiembre	45	septiembre
10	octubre	22	octubre	34	octubre	46	octubre
11	noviembre	23	noviembre	35	noviembre	47	noviembre
12	diciembre	24	diciembre	36	diciembre	48	diciembre
Banda	1994	Banda	1995	Banda	1996	Banda	1997
49	enero	61	enero	73	enero	85	enero
50	febrero	62	febrero	74	febrero	86	febrero
51	marzo	63	marzo	75	marzo	87	marzo
52	abril	64	abril	76	abril		
53	mayo	65	mayo	77	mayo		
54	junio	66	junio	78	junio		
55	julio	67	julio	79	julio		
56	agosto	68	agosto	80	agosto		
57	septiembre	69	septiembre	81	septiembre		
58	octubre	70	octubre	82	octubre		
59	noviembre	71	noviembre	83	noviembre		
60	diciembre	72	diciembre	84	diciembre		

Tabla 4.5 Estructura de bandas de la imagen NDVI87m. Relación banda/mes de la serie.

#### 4400 IMÁGENES LANDSAT TM. DESCRIPCIÓN Y PROCESO

Otras fuentes de datos incorporadas al estudio han sido la imagen Landsat TM 201-31 del 23 de septiembre de 1992, y un mosaico de imágenes Landsat TM sobre Castilla y León. Antes de describir la estructura y el tratamiento seguido, nos parece apropiado plantear las siguientes cuestiones: dado el enorme volumen de datos que encierran las series NOAA87m y NDVI87m ¿por qué, además, hemos incorporado imágenes de alta resolución espacial?; ¿qué relación puede establecerse entre imágenes de características tan dispares como son NOAA-AVHRR y Landsat TM?.

Como en el caso de las imágenes NOAA, la posibilidad de trabajar con imágenes de alta resolución espacial vino dada por su disponibilidad en los archivos de la empresa en la que desarrollamos el acuerdo de colaboración *Universidad-Empresa*. Reconocemos y

agradecemos de nuevo los recursos a los que hemos tenido acceso. Además, otras dos razones nos llevaron a procesar imágenes Landsat: la primera (i) está en relación con el conocimiento general de las fuentes y procesos de la teledetección, mientras que la segunda (ii) tiene un interés particular: la comparación de experiencias de proceso para uso como herramienta de seguimiento del medio, clasificación de imágenes y resultados.

- (i) En la introducción apuntamos que la teledetección es solo una técnica mediática para fines concretos de análisis del terreno; esa técnica ofrece numerosas fuentes y métodos, por lo que no nos parece adecuado polarizarnos en una sola (NOAA-AVHRR). Deseábamos conocer de primera mano las diferencias de la estructura física de distintos tipos de imágenes, los métodos de pre-tratamiento, tiempos de procesado y espacios informáticos requeridos; en una palabra, las ventajas y desventajas técnicas y de aplicación que encierran distintas fuentes de datos remotos. Además, la industria espacial sigue manteniendo el concepto y la técnica de las dos modalidades de observación de la tierra, global y local, para los próximos lanzamientos. Así, seguiremos contando con satélites de cobertura global, con resoluciones espaciales algo menores que la de NOAA, entre 500 y 800 m. de *pixel*, como *MODIS* o *ROCSAT*. En el extremo opuesto, los satélites de alta resolución alcanzan mayor precisión; resoluciones de 1 m de *pixel* serán realidad con el satélite M-7 del ERIM, mientras que el CARTOSAT 2 (NRSA-India) superará ese nivel de detalle.
- (ii) Aunque los estados de pre-proceso de imagen sean conceptualmente los mismos para imágenes de alta y baja resolución espacial, las características internas de las imágenes hacen que, de hecho, se den numerosas diferencias de orden práctico a la hora del tratamiento. ¿Es adecuada y posible la comparación de observaciones tan diferentes como NOAA y Landsat?: hablamos de comparación y no de integración de datos de distintos satélites, lo que llevaría la discusión hacia otros aspectos más complicados: limitaciones espaciales, temporales, espectrales o radiométricas de las posibles integraciones por sustitución, complementariedad o combinación geométrica de imágenes de diferente resolución espacial mediante modelos geométricos basados en la dinámica orbital de cada satélite. La comparación siempre resulta menos arriesgada pues solo requiere un control del criterio de degradación del dato de mayor detalle.

Así, en este apartado nos ocuparemos de los siguientes temas:

1. Aproximación a la misión EROS-Landsat de observación de la tierra.
2. Descripción de la estructura interna y características de las imágenes Landsat TM.
3. Descripción y pre-tratamiento de la imagen Landsat TM 201-31 (23.09.92).
4. Descripción y pre-tratamiento de un mosaico de imágenes Landsat TM sobre Castilla y León.

## 4410 MISIÓN LANDSAT DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA

La gestación de los satélites Landsat fue lo que, en la década de los 60, dio el impulso definitivo a las observaciones remotas para su aplicación al ámbito de los recursos naturales. En 1966 la NASA estableció el programa EROS (*Earth Resources Observation System Program*), que desarrollaría el satélite ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*) y los subsiguientes de la serie, denominados Landsat. Atendiendo a las características orbitales y de los sensores, se habla de dos generaciones de Landsat. La primera la forman las naves ERTS-1 (ó Landsat 1), Landsat 2 y 3; la segunda, Landsat 4 y 5. Todos ellos están situados en una órbita circular, casi polar y heliosíncrona. Las tablas 4.6. y 4.7 sintetizan algunas de sus características.

	Lanzamiento	Fin Operación	RTemporal	Sensores	R. Espacial	Barrido	Orbita
Landsat 1	Julio 1972	Enero 1978		MSS	82 m.	185 km.	913 km
Landsat 2	Enero 1975	Febrero 1982	18 días	RBV en L1/2	82 m.	185 km.	
Landsat 3	Marzo 1978	Marzo 1983		RBV L3	24 m.	98 km.	
Landsat 4	Marzo 1982	Julio 1995	16 días	TM	30 m.	185 km.	705 km
Landsat 5	Marzo 1984	Activo		MSS	82 m.		

Tabla 4.6 Algunas características de los satélites Landsat. Fuente: Logicon, 1996 (*Cit. supra*).

Nos parece interesante apuntar que, en su origen, el equipo técnico de NASA que debía perfilar las características de los sensores, trabajó en colaboración con los intereses de otras dos agencias: el Servicio Geológico (*USGS*) y el Dpto. de Agricultura (*USDA*). El *USGS* prefería un sistema de cámaras de filmación en tres bandas espectrales (*RBV*, *Return Beam Vidicon*) con resolución espacial de unos 80 m. Las cámaras *RBV* no resultaban adecuadas para las necesidades de aplicación del *USDA*, por lo que se propuso un sistema de barrido multiespectral (*MSS*, *Multiespectral Scanner System*) con cuatro bandas de registro en las regiones visible e infrarroja de espectro: banda 4 (0,5-0,6  $\mu\text{m}$ ), banda 5 (0,6-0,7 $\mu\text{m}$ ), banda 6 (0,7-0,8 $\mu\text{m}$ ) y banda 7 (0,8-1,1 $\mu\text{m}$ ).

La primera generación de Landsat incorporó ambos sistemas de detección, con escaso éxito técnico para el conjunto de cámaras de vídeo *Vidicom* en los dos primeros, hasta su modificación en Landsat 3; por el contrario, el sensor *MSS* resultó un éxito, por lo que se mantuvo en la segunda serie de satélites Landsat, junto con el nuevo sensor para esta serie, el *TM* (*Thematic Mapper*). Freden y Gordon (1983)<sup>282</sup> hacen una buena revisión de las características técnicas de cada uno de los sensores, así como del volumen de cobertura territorial proporcionada por las estaciones de recepción norteamericanas (350.000 imágenes en 1980) y las registradas por estaciones de otros continentes (557.816 escenas hasta la misma fecha, en las estaciones de Canadá, Brasil, ESA, Irán, Japón, India, Australia, Argentina y África del Sur).

282 Freden, S., Gordon, F. (1983). *Landsat Satellites*. En Colwell, R., *Manual of Remote Sensing*, Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry. Vol I. Cap 12, pp 517-571.

La órbita de los Landsat 1, 2 y 3 se situó a una altitud de 913 km., con una inclinación de 99°. Necesitaban 103 minutos para efectuar una órbita completa, y el periodo entre observaciones consecutivas sobre un mismo punto de la tierra era de 18 días; la anchura de barrido (*swath*) de cada órbita era de 185×185 km., con una resolución espacial (*pixel*) de 79 m. En cuanto a los sensores, Landsat 1 y 2 transportaban el MSS y el RBV. Los sensores de Landsat 3 incorporaron las siguientes variantes: además de las 4 bandas del MSS ya citadas, se incluía una banda térmica (10,4-12,6µm), y un sistema RBV con alta resolución espacial (24 m) que trabajaba en el rango espectral de 0,505 a 0,75µm. En todos los casos, la radiación recibida se registraba en 64 niveles de intensidad para la banda 7 y 127 para las bandas 4, 5 y 6.

Propiedades espectrales. Sensores MSS y RBV. Primera generación Landsat			
Nº Banda	MSS	Nº Banda	RBV
4	0,5-0,6 µm	1	0,475-0,575 µm
5	0,6-0,7 µm	2	0,580-0,680 µm
6	0,7-0,8 µm	3	0,690-0,830 µm
7	0,8-1,1 µm	1	0,505-0,750 µm (Landsat 3)
8	10,4-12,6 µm (Landsat 3)		

**Tabla 4.7** Propiedades espectrales. Sensores MSS y RBV. Primera generación. Fuente: Logicon, 1996 (*Cit. supra*).

Las modificaciones introducidas en la segunda generación de satélites Landsat (4 y 5) son: altitud orbital de 705 km, “con una inclinación de 98,2°; tardan 98,9 minutos en efectuar una órbita completa cruzando el Ecuador a las 9,45 h y barriendo la superficie terrestre cada 16 días. Este barrido es tal que, hacia el oeste, se dan pasadas sucesivas cada 7 días, con una superposición del 7,6 % y como consecuencia, hay algunas zonas que aparecen repetidas en dos órbitas sucesivas, por lo que tendremos imágenes cada 7 y 9 días. Debido a fallos en el sensor, del Landsat 4 sólo se disponen algunas escenas de diciembre de 1982 y enero-febrero de 1983. Es, por tanto, el Landsat 5 (TM) el que ha proporcionado y proporciona mayor información” (López y Caselles, 1991, *Cit. supra*, p.30). A este último satélite y sensor pertenecen las imágenes que hemos procesado.

En cuanto a los sensores, el MSS permaneció para dar continuidad a los datos de la primera generación, con pequeñas modificaciones: resolución espacial de 82 m y denominación consecutiva de sus bandas (1, 2, 3 y 4). La novedad en esta serie es el sensor TM (Blanchard y Weinstein, 1979)<sup>283</sup>, que registra la radiación en siete bandas (Tabla 4.9); las mejoras respecto al MSS son que el TM incorpora información de cuatro nuevas bandas del espectro (una en el rango del azul, otra en el rango del infrarrojo térmico y dos más en el rango del infrarrojo cercano) y fusiona las antiguas bandas 6 y 7 (IRC) en una sola. El número de detectores también aumenta de 24 a 100.

283 Blanchard, L., Weinstein, O., (1979). Design challenges of the thematic mapper; Machine Proceedings Remote Sensing Data Symposium, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

<b>Propiedades espectrales. Sensores MSS y TM. Segunda generación Landsat</b>			
<b>Nº Banda</b>	<b>MSS</b>	<b>Nº Banda</b>	<b>TM</b>
1	0,5-0,6 $\mu\text{m}$	1	0,45-0,52 $\mu\text{m}$
2	0,6-0,7 $\mu\text{m}$	2	0,52-0,60 $\mu\text{m}$
3	0,7-0,8 $\mu\text{m}$	3	0,63-0,69 $\mu\text{m}$
4	0,8-1,1 $\mu\text{m}$	4	0,76-0,90 $\mu\text{m}$
		5	1,55-1,75 $\mu\text{m}$
		6	10,40-12,50 $\mu\text{m}$
		7	2,08-2,35 $\mu\text{m}$

**Tabla 4.8** Propiedades espectrales. Sensores MSS y RBV. Segunda generación. Fuente: Freden y Gordon (1983, *Cit. supra*, p. 549).

<b>Aplicaciones más comunes de las bandas del sensor TM</b>		
<b>Banda</b>	<b>TM</b>	<b>Aplicaciones</b>
1	0,45-0,52 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartografía aguas costeras</li> <li>• Discriminación suelo/vegetación</li> <li>• Discriminación caducifolias/pináceas</li> </ul>
2	0,52-0,60 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reflectancia en la banda verde del vigor de la vegetación</li> </ul>
3	0,63-0,69 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Discriminación de especies vegetales por la variación de niveles de absorción clorofílica</li> </ul>
4	0,76-0,90 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinación de biomásas</li> <li>• Discriminación de masas de agua</li> </ul>
5	1,55-1,75 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medida del contenido de humedad en la vegetación</li> <li>• Medida del contenido de humedad en suelo</li> <li>• Discriminación entre nubes y nieve</li> </ul>
6	10,40-12,50 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartografía de fenómenos térmicos</li> <li>• Medida del estrés hídrico en la vegetación</li> <li>• Propiedades termo-geológicas</li> </ul>
7	2,08-2,35 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartografía hidrotérmica</li> </ul>

**Tabla 4.9** Propiedades espectrales. Sensores MSS y RBV. Aplicaciones. Fuente: Freden y Gordon (1983, *Cit. supra*, p. 548).

López y Caselles (1991, *Cit. supra*) enumeran las mejoras del sensor TM en el orden espectral, espacial y radiométrico. La información **espectral** queda distribuida en una zona más amplia del espectro y en bandas más estrechas que permiten una mejor definición y posterior análisis de las respuestas espectrales. La resolución **espacial** mejora en 2,6 veces la del MSS al alcanzar un tamaño de pixel de 30X30 m. en todas las bandas menos en la térmica (120X120 m). Los datos **radiométricos** quedan clasificados en 256 niveles de intensidad permitiendo detectar pequeños cambios en las magnitudes radiométricas.

Junto con los aspectos positivos, también se deben tener en cuenta las desventajas. Se trata, principalmente, del volumen de datos que genera cada escena y de su coste. En este sentido, Chuvieco (1996, *Cit. supra*, p. 127) apunta: “a modo de referencia baste

indicar que una escena completa del sensor TM septuplica el coste de una adquirida por el sensor MSS (sobre el mismo territorio), mientras que el volumen de datos que incluye alcanza los 231 millones de *píxeles* frente a los 28 millones de una imagen MSS". Los costes de nuestras imágenes Landsat TM pueden consultarse en la sección 4900 de este capítulo. En España puede consultarse la disponibilidad de productos y los precios de las escenas Landsat en <http://www.inta.es/>

El acceso a imágenes Landsat es el opuesto al caso de las NOAA-AVHRR. Se trata de señales digitales codificadas que reciben ciertas estaciones distribuidas por todo el globo y que forman parte del *segmento tierra* del programa Landsat. La recepción y procesado de las imágenes Landsat europeas tiene lugar en Fucino (Italia) y en Canarias (Maspalomas), desde donde se inicia la distribución en formatos estandarizados con distinto grado de pre-procesado de la imagen. La oficina central de distribución para Europa se encuentra en Frascati (Italia) y desde ella se atienden las peticiones de las diferentes oficinas de contacto (NPOC, *National Points of Contact*) de los países miembros de la Agencia Espacial Europea. Durante los años de desarrollo de nuestro trabajo (1995-98) hemos vivido importantes avances técnicos agilizadores de la distribución y comercialización de las imágenes Landsat gracias a la Internet. Actualmente se puede consultar el catálogo de imágenes nuevas e históricas archivadas en la mayoría de las estaciones de recepción del mundo de manera directa e interactiva por la Internet.

Lo mismo ocurre con las consultas de especificaciones o con las órdenes de pedido, lo cual agiliza los procesos de compra. En cuanto al suministro de las imágenes, el volumen de datos todavía no puede ser transferido por la red sin serios problemas debido a las limitaciones intrínsecas de los anchos de banda. Por esto, la ralentización en la entrega de los datos al usuario impuesta por los sistemas de correo ordinario o mensajería, sigue siendo un cuello de botella. También resulta interesante apuntar los avances experimentados en tan corto tiempo respecto a los soportes físicos en los que se albergan y suministran las imágenes: en menos de cinco años se han dejado de utilizar las voluminosas cintas CCT (una cinta por banda) y las cintas Exabyte de 8 o 4 mm., a favor de la grabación en CD-ROM. Los soportes anteriores requerían además costosos elementos periféricos al ordenador para poder leer y convertir la imagen. En la actualidad, los programas de proceso de imagen acceden directamente a los formatos estandarizados de las imágenes Landsat grabadas en CD-ROM.

Cuando se desea adquirir una imagen Landsat, o nos encontramos ante ella para empezar a trabajar, no se debe olvidar que estos datos son bienes comerciales, por lo que podrán ser *brutos* o haber sido implementados con procesos de valor añadido, por ejemplo incluyendo puntos de control para la georreferenciación. Esto es importante a la hora de la georreferenciación y cambiará sustancialmente el precio de la imagen así como las horas de trabajo a invertir en ella.

El formato original de las imágenes Landsat se denomina BSQ (*Band Sequential*). Este formato almacena la información de cada banda en ficheros independientes, lo que facilita el trabajo con un número determinado de bandas si se desea o si existen limitaciones de espacio. Además, el formato BSQ permite gestionar las bandas del satélite en orden distinto al registrado. La guía de trabajo de Erdas (1997, *cit. supra*, p. 57), desglosa la estructura y los modos de gestión de los formatos propios de Landsat.

Fichero Cabecera	
Fichero Imagen Banda 1	Línea 1, Banda 1 Línea 2, Banda 1 Línea 3, Banda 1 • Línea n, Banda 1
Final de Fichero	
Fichero Imagen Banda 2	Línea 1, Banda 2 Línea 2, Banda 2 Línea 3, Banda 2 • Línea n, Banda 2
Final de Fichero	
Fichero Imagen Banda X	Línea 1, Banda x Línea 2, Banda x Línea 3, Banda x • Línea n, Banda x
Fichero de cola	

Estos formatos se han simplificado notablemente con las grabaciones en soportes ópticos con capacidad suficiente para albergar toda la información de una escena Landsat TM (350 Mb, volumen medio) sin necesidad de recurrir a varios soportes.

#### 4420 PRETRATAMIENTO IMAGEN LANDSAT TM 201-31

La designación de las imágenes Landsat se realiza mediante dos códigos numéricos que determinan el número de órbita (*path*) y la fila (*row*). Este criterio establece una cuadrícula o sistema de coordenadas (exclusivo de las imágenes Landsat) del punto central de los segmentos de imagen de 185×185 km., sobre toda la tierra. La escena completa utilizada en nuestro estudio es la TM 201-31, centrada sobre Aranda de Duero, del 23 de septiembre de 1992. Se procesaron todas las bandas.

Los datos se encontraban en cintas CCT, por lo que hubo que leer cada una de las bandas por separado con una unidad de cinta lectora periférica, hasta disponer de todas las bandas simultáneamente para su georreferenciación y proceso de análisis. El volumen total de la imagen (7 bandas) sin georreferenciar es de 327 Mb.

El objetivo de la georreferenciación es, como con las imágenes NOAA, corregir los errores geométricos inherentes a la toma de datos del sensor. Estas alteraciones se dan

por variaciones en la altura orbital, en la velocidad o por movimientos de giro lateral de la nave, que producen variaciones del tamaño del pixel y que por tanto deforman la imagen. Los pasos necesarios para corregir la imagen Landsat son, conceptualmente hablando, los mismos que señalamos para las imágenes NOAA en la sección 4340 de este capítulo: **(i)** localización de los puntos de control, **(ii)** cálculo del polinomio de transformación y **(iii)** remuestreo de la imagen.

#### **(i) Localización de los puntos de control.**

Por contraste con el proceso de corrección de las NOAA, en el caso de Landsat no se ha utilizado un modelo orbital automático sino que se han asignado puntos de control (GCP's) manualmente; a partir de los cuales se averigua de forma analítica (funciones) la relación de localización entre los puntos de la imagen de referencia  $(x,y)$  y los de la imagen resultado  $(p,q)$ . Los GCP's son pares de coordenadas correspondientes a un *pixel* seleccionado en una imagen: en este proceso de asignación, normalmente se habla de *coordenadas fuente* (las de la imagen a rectificar) y *coordenadas de destino* (las de mapa o salida). La localización de los GCP's debe realizarse de forma cuidadosa, pues de ello depende la bondad de la corrección. La precisión en los puntos de control influirá en la precisión de la rectificación.

Con el software de corrección y análisis de imagen que hemos utilizado (Erdas Imagine 8.3) la introducción de los puntos de control, tanto *fuente* como *destino*, puede realizarse de tres modos: (a) manualmente desde el teclado, (b) seleccionando el pixel desde una imagen ya corregida, (c) asignando las coordenadas mediante tableta digitalizadora. En el caso de la imagen TM 201-31, hemos utilizado los procedimientos (a) y (c).

El **número de puntos de control** depende básicamente del tamaño de la imagen y de las características orográficas del terreno; como regla general, se aplican tantos más puntos de control cuanto mayor sea el grado de la función de ajuste de la corrección. Atendiendo a la estricta teoría matemática, deben darse tantos puntos como coeficientes tengan las funciones de transformación (3 puntos en una ecuación de primer grado, 6 si es de segundo, 10 para las de tercero); En realidad, la práctica demuestra que se necesitan de 120 a 150 puntos para corregir una escena Landsat TM. En nuestro caso hemos asignado 120 GCP's con la ayuda de los mapas topográficos de la zona a escalas 1:50.000 y 1:25.000. Esta tarea es muy minuciosa, requiere mucho tiempo y destreza en el reconocimiento de formas topográficas y cartográficas. La identificación de GCP's se hizo sobre formas no sujetas a cambios por dinámicas naturales, como por ejemplo: cruces de caminos, diques de contención de presas, edificaciones singulares o contornos permanentes de propiedad.

La **dispersión** proporcional de los GCP's sobre toda la imagen es otro factor a tener en cuenta para la rectificación satisfactoria, máxime sobre áreas con una orografía accidentada. La imagen TM 201-31 tiene tres áreas orográficas distintas:

1. Las zonas bajas y llanas del centro y oeste de la imagen, asociadas con el Duero y afluentes tanto de la margen derecha como izquierda.
2. Dos sectores de alturas medias al norte y sur del eje central del Duero, correspondientes a los páramos de Segovia (S) y El Cerrato (N);
3. Los extremos superior e inferior derecho de la imagen corresponden con las orografías montañosas de la Sierra de la Demanda y los Picos de Urbión (N) y las cumbres de Somosierra y Ayllón (S).

Aunque las especificaciones técnicas del software aseguran que no es necesaria tal cantidad de GCP's, los otorgamos para evitar problemas causados por las diferencias topográficas existentes en la imagen. Además se incluyó el Modelo Digital de Elevación del Terreno (MDT) para mayor ajuste de la corrección. De esta manera, la imagen queda ortorrectificada. Los MDT's son muy parecidos a las imágenes de satélite en su estructura, por cuanto se trata de matrices numéricas georreferenciadas. El valor numérico de cada pixel corresponde a la altura del terreno. De este modo la matriz de alturas puede también entrar a formar parte del polinomio de cálculo de la rectificación de la imagen. Se entiende que las resoluciones entre el MDT y la imagen tienen que ser similares.

En nuestro caso el MDT tenía un tamaño de pixel de 200 m mientras que el pixel Landsat es de 30 m. Ciertamente el paralelismo no se daba en nuestro caso puesto que la relación era de 1 a 6. A pesar de todo decidimos emplear el MDT en la corrección asumiendo que siempre sería mejor contar con un dato mediado de alturas para cada 6 *pixeles* Landsat que no aportar este dato pudiendo hacerlo. Aunque señalamos en este momento la inclusión del MDT en la rectificación de la imagen, en realidad los datos de esta matriz numérica entran a formar parte del cálculo en las operaciones de remuestreo de la imagen (fase iii), por lo que nos referiremos a ello más adelante.

#### **(ii) Cálculo del polinomio de transformación.**

Ya indicamos en la sección 4.3.4 b) cómo la **corrección geométrica** de una imagen se realiza estableciendo **funciones de relación** entre las **coordenadas** de la imagen y las de mapa o viceversa. Las funciones de relación consisten en **regresiones lineales múltiples** entre las variables independientes (coordenadas de mapa) y las dependientes (coordenadas de imagen). Por regla general, una función lineal será suficiente para transformar la imagen. ¿Cómo se calculan los **coeficientes de las funciones** de transformación?: aplicando un **ajuste de mínimos cuadrados** (cálculo de regresión múltiple) a las coordenadas de los GCP's seleccionados; el grado de ajuste obtenido lo determinan los valores **residuales** o diferencia entre los valores observados y estimados de los GCP's. Cuanto mayor sea el valor residual, menor ajuste se dará en la corrección.

La distancia entre valores observados y estimados se denomina error cuadrático medio (RMS), y se calcula mediante la raíz cuadrada de las desviaciones entre los valores observados y estimados por la regresión. El RMS puede calcularse tanto para el conjunto de los puntos como para cada uno en particular. Normalmente se determinan

niveles de tolerancia máxima del error RMS de cada punto, y así se controla la calidad de ajuste en todo el proceso intermedio. En nuestro caso, determinamos que el error RMS para cada punto debería ser menor de 0,9 mientras que el promedio de todos los residuales de los GCP's de la imagen no podría ser superior a 0,6. En otras palabras, la desviación media máxima que aceptamos fue de 18 m. Entendemos que para los objetivos de nuestro estudio resulta aceptable (corrección de una imagen de alta resolución; comparación con imágenes NOAA, con menor grado de ajuste geométrico).

**(iii) Remuestreo de la imagen.**

El remuestreo de la imagen supone la transferencia de los ND originales a su nueva posición georreferenciada. Ya nos referimos a los métodos de remuestreo de la imagen en la sección 4.3.4 c), por lo que aquí solo mencionaremos las opciones tomadas para la imagen TM 201-31. El método seleccionado también fue el denominado *vecino más cercano*, ya que es el más simple y necesita menor cantidad de espacio y tiempo de cálculo y no buscábamos los efectos de filtrado que imponen los métodos bilineal y de convolución cúbica. La operación específica introducida en el remuestreo de la imagen fue la introducción de los valores del MDT, como hemos indicado más arriba. Siguiendo el parecer de Palá y Pons (1995)<sup>284</sup> y Novak (1992)<sup>285</sup>, Chuvieco (1996, *Cit. supra*, pp. 277) indica que “la introducción de los MDT en la corrección geométrica implica habitualmente realizar una rectificación diferencial, en donde cada ND se transfiera separadamente desde la imagen original a la resultante a partir de corregir la posición del pixel en función del desplazamiento debido al relieve. Cada coordenada X, Y, Z, del MDT se transforma a la imagen mediante ecuaciones colineales, interpolando el ND de la imagen a partir de uno de los métodos antes comentados”, en nuestro caso por *vecino más cercano*.

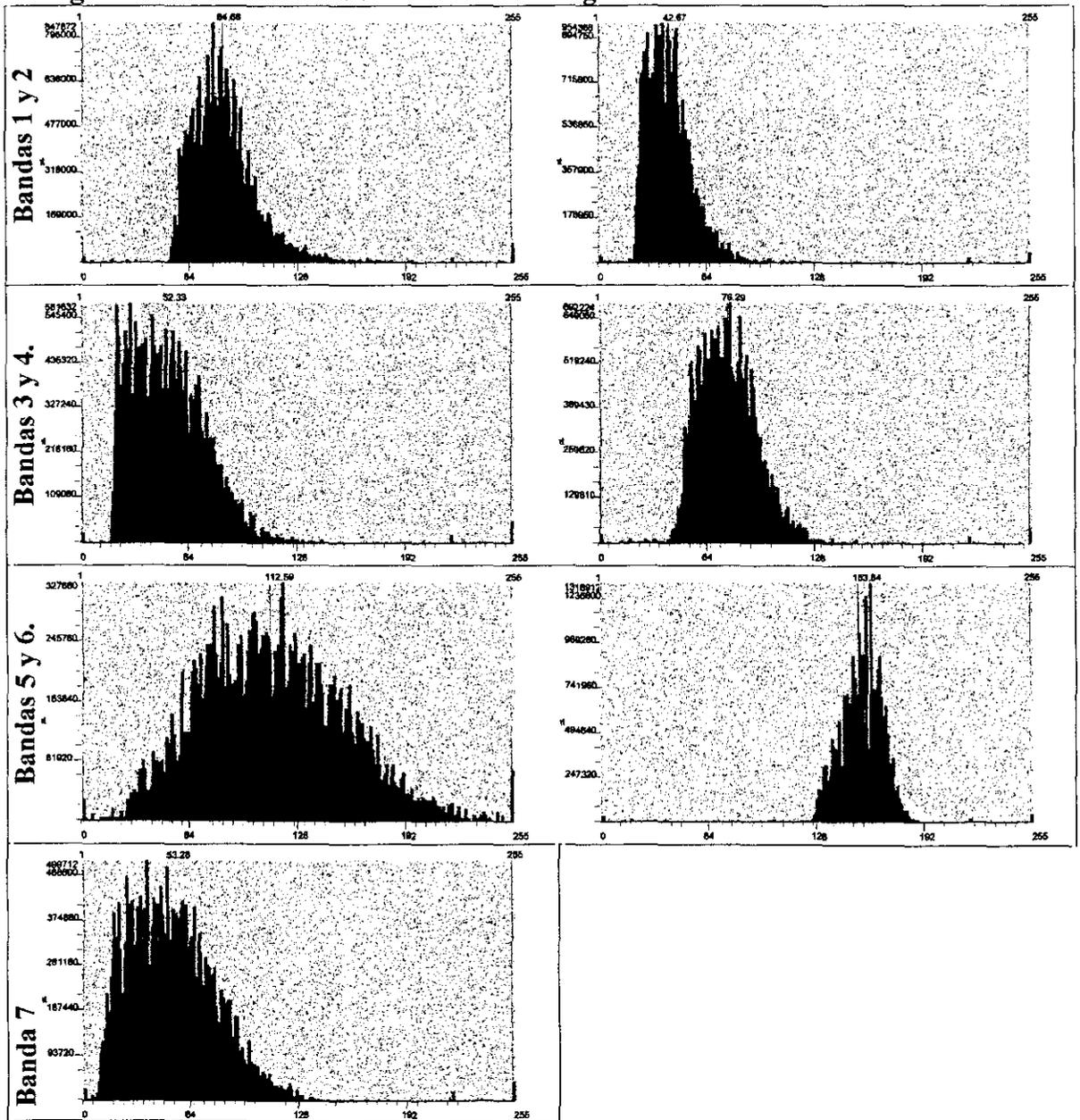
Las características de la imagen Landsat TM 201-31 ortorrectificada (Figura 4.41), son: Volumen: 395 Mb; Bandas, 7; Tamaño de pixel: 35 m. Datos de corrección y proyección: UTM, Huso 30, esferoide internacional 1909, *datum* Europeo 1950. Pixel: 35 m. MDT incorporado en la ortorrectificación, 200 m de pixel. Las estadísticas e histogramas de las bandas son las siguientes:

<b>Estadísticas imagen Landsat TM 201-31</b>				
	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desviación Est.</b>
<b>Banda 1</b>	84.67	82	78	21.9
<b>Banda 2</b>	42.67	41	38	17.6
<b>Banda 3</b>	52.37	50	29	24.3
<b>Banda 4</b>	76.28	75	77	20.1
<b>Banda 5</b>	112.58	110	119	41.8
<b>Banda 6</b>	153.84	154	160	15.5
<b>Banda 7</b>	53.28	50	38	27.1

284 Palá, V., Pons, X. (1995). Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 61, pp. 935-944.

285 Novak, K. (1992). Rectification of digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 58, pp. 339-344.

# Histogramas de valores de las bandas de la imagen Landsat TM 201-31



367479

408310

449141

489972

530803

571634

4695565



4695565

**Figura 4.41**

**Imagen Landsat TM 201-31  
RGB, 4.3.2.  
Aranda de Duero, 23.09.92  
Ortorrectificada. Pixel 35 m.**

4654734



**Palencia**



4654734

4613903



**Valladolid**



4613903

**Soria**

4573072



4573072

**Segovia**

4532241



4532241

231

367479

408310

449141

489972

530803

571634

**Proyección UTM. Zona 30  
Esferoide Internacional 1909  
Datum Europeo 1950**

**Escala**



## 4430 DESCRIPCIÓN Y PRETRATAMIENTO DE UN MOSAICO DE IMÁGENES LANDSAT TM SOBRE CASTILLA Y LEÓN

Sin perder de vista que el objetivo principal de análisis y resultados de nuestro trabajo se encuentra en las series NOAA-AVHRR87m y NDVI87m, incorporamos otra fuente de datos de teledetección de alta resolución: un mosaico de imágenes Landsat TM sobre la totalidad de Castilla y León, extraído de un mosaico de toda la Península Ibérica. El mosaico fue generado, en mayo de 1997, por la empresa francesa de productos de teledetección con valor añadido *Edisat*, con imágenes Landsat 5 TM de años y fechas diversas (entre 1992 y 1995). La diversidad de años y fechas en la composición es lógica por la resolución temporal y espacial de Landsat y por querer incluir imágenes sin cubrimiento de nubes. Pero los problemas de análisis simultáneo de las imágenes parciales del mosaico es casi irresoluble, puesto que las correcciones geométricas están uniendo en un mismo fichero de operaciones números digitales (ND's) de reflectancias afectados por condiciones atmosféricas y radiométricas singulares en cada imagen parcial, lo que hace prácticamente inviable un tratamiento de imagen global. Además, otra característica limita su uso: el mosaico incluye solo tres bandas del sensor TM: bandas 1, 2 y 3. Este dato también denuncia la falta de calidad del mosaico para su análisis y clasificación con un mínimo de purismo.

Entonces cabe preguntarse: ¿Por qué seguíamos teniendo interés en trabajar con tal cantidad de datos Landsat TM a pesar de las limitaciones que ofrecían?; en parte para tener la experiencia y la evidencia de la dificultad de trabajar con satélites de alta resolución espacial para estudios de globalidad regional.

¿Qué interés tiene, en nuestro caso, operar con el mosaico TM, máxime cuando la serie principal de análisis es la NDVI87m y, en si mismos, los datos del mosaico TM son iguales a los descritos en el apartado anterior para la imagen TM201-31?. Queremos justificar nuestro interés por el mosaico TM desde el punto de vista del método y tratamiento de las fuentes de teledetección. Al igual que con la imagen TM201-31, tiene una función comparativa frente a los resultados buscados en la serie NDVI87m.

### Pre-proceso de los datos del mosaico

A partir del cubrimiento completo de Landsat TM de la Península Ibérica, Edisat realizó una primera fusión de escenas, sin georreferenciar, por las áreas comunes de solapamiento. Posteriormente, el mosaico completo se subdividió en ficheros territoriales parciales, indicados en la Figura 4.42. La referencia de las escenas completas Landsat (*path* y *row*) que cubren el territorio de Castilla y León son las indicadas en la Tabla 4.10.

Path	200	201	202	203	204
Row	31 / 32	30 / 31 / 32	30 / 31 / 32	30 / 31 / 32	31

Tabla 4.10 Referencia de imágenes Landsat TM para cubrimiento de Castilla y León.

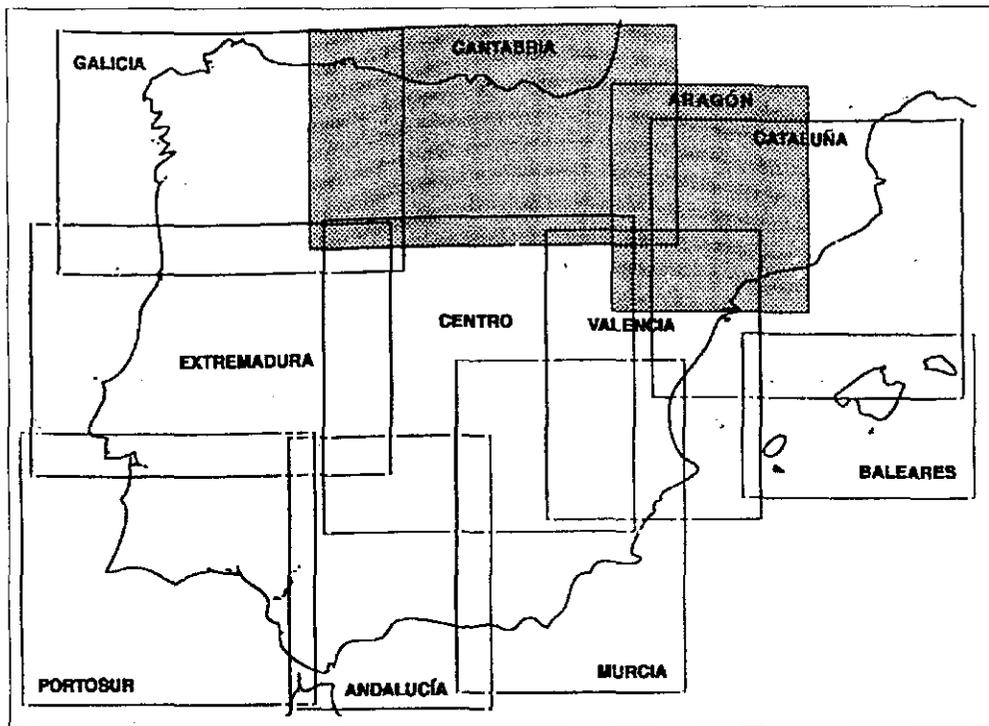


Figura 4.42. Esquema de ficheros parciales del mosaico peninsular Landsat Tm de Edisat.

Por la estructura de ficheros parciales del mosaico trabajamos simultáneamente con las secciones de Cantabria (219Mb), Centro (271Mb), Galicia (227Mb) y Extremadura (163Mb), ya que la Comunidad de Castilla y León se encontraba dividida en estos ficheros sectoriales. El volumen de **datos de partida** era de **880Mb** (total del mosaico 1.3Gb), del que debíamos extraer Castilla y León.

Los ficheros sectoriales contaban con áreas comunes de solapamiento entre ellas, que decidimos unir en una sola imagen, determinando puntos comunes y asignándoles las mismas coordenadas  $(x, y)$  de fichero. Así, actuamos sobre los ficheros de información de las imágenes otorgando a todos los mismos datos de modelo de mapa y el mismo tipo de proyección (UTM / internacional 1909 / Huso 30 / Datum Europeo 1950).

A continuación programamos un modelo de composición de una imagen final resultante de la unión de dos de ellas a partir de los píxeles comunes asignados. Para que las áreas comunes no contuvieran información redundante se introdujo una función de cálculo selectiva, de manera que de los píxeles de las áreas comunes solo permaneciera en la imagen final aquel que contara con el ND máximo. De este modo se unieron los ficheros parciales de dos en dos, eliminando información redundante. El tamaño final del **mosaico, sin georreferenciar**, era de **790 Mb**, es decir, eliminando las áreas comunes conseguimos eliminar 90 Mb de información, lo cual simplifica el trabajo.

El siguiente paso de preparación del mosaico era la georreferenciación. En este caso utilizamos el tercer modo de georreferenciación, citado anteriormente: estableciendo correspondencias *de imagen a imagen*, entre una georreferenciada y otra que no lo está.

En esta actuación se nos planteaba otro problema: el mosaico está compuesto, en su origen, por doce escenas Landsat (Tabla 4.10), por lo que, atendiendo a los criterios de dispersión proporcional de GCP's por toda la imagen necesitábamos varias imágenes Landsat de nuestra zona, ya georreferenciadas, para poder establecer los puntos paralelos de rectificación de imagen a imagen. Contábamos con las siguientes imágenes: TM 201-31 (Aranda de Duero), 201-32 (Madrid), 203-30 (León, Pola de Lena). Con estas tres imágenes de apoyo podíamos dar GCP's en el NW, NE y centro-S de nuestro mosaico; aunque quedaban zonas centrales vacías de GCP's decidimos seguir adelante con este método de georreferenciación por la rapidez del mismo; por otra parte, con esas imágenes de apoyo controlábamos las áreas con topografía más abrupta. En cualquier caso nos interesaba saber sí, a pesar de la distribución desequilibrada de GCP's, la corrección resultaba aceptable (Error cuadrático medio menor de 0.6). Los errores RMS finales fueron:  $y = 0.5523$ ;  $x = 0.5620$ ;  $Total = 0.7880$ . Aceptamos este valor de error RMS porque la desviación del límite deseado era muy pequeña y por no tratarse de una fuente de datos esencial en nuestro estudio. El procedimiento de remuestreo de la imagen fue el de *vecino más cercano*, y optamos por él en este caso porque es el proceso menos volumétrico y, puesto que la imagen se acercaba a los 800Mb, no podíamos duplicar o triplicar ese volumen en los procesos intermedios, como hubiera ocurrido en la interpolación bilineal o en la convolución cúbica. Al igual que con la imagen TM 201-31, e introdujo el MDT de todo Castilla y León, por lo que el mosaico TM también quedó ortocorregido.

A lo largo de este proceso verificamos la rapidez del método de georreferenciación de imagen a imagen. La necesidad de reparto proporcional de los GCP's a lo largo de la imagen no resultó tan determinante porque se asignaron un gran número de GCP's en las áreas de montaña, mientras que las áreas carentes de los mismos son las más llanas.

El verdadero problema del mosaico son las distintas radiometrías de las imágenes parciales, que obligarían a la clasificación individual de las mismas antes de su unión en el mosaico. En el siguiente capítulo expondremos las dificultades y resultados hallados en el proceso de clasificación. A partir de lo señalado hasta el momento para el mosaico Landsat TM, se advierte la dificultad de querer incorporar imágenes de alta resolución espacial para análisis territoriales regionales. Las carencias de esta fuente de datos son manifiestas y contábamos con ellas desde el comienzo, pero, aun cuando los datos hubieran estado completos (las 7 bandas), el problema de gestión de volúmenes se hubiera agravado mientras que el problema de la clasificación a partir de los ND originales sigue siendo irresoluble puesto que "la relación numérica de los ND está circunscrita a cada banda de la imagen, pero no sirve para comparar bandas entre sí ni imágenes de distintas fechas o áreas" (Chuvieco, 1996, *Cit. supra*, pp. 324).

Las características del Mosaico TM (Figura 4.42), son: Volumen: 589.544 Mb; Bandas: 3 (1,2,3); Tamaño de pixel: 35 m; . Datos de corrección y proyección: UTM, Huso 30, esferoide internacional 1909, *datum* Europeo 1950. Pixel: 35 m. MDT incorporado en la ortorrectificación, 200 m de pixel.

200000

300000

400000

500000

600000

### Castilla y León Mosaico TM. RGB, 1.2.3.

Imágenes:  
 Path Row  
 200 - 30/31  
 201 - 30/31/32  
 202 - 30/31/32  
 203 - 30/31/32  
 204 - 31

4700000

4700000

4600000

4600000

4500000

4500000

235

**Figura 4.42**

Proyección UTM. Zona 30.  
 Esferoide Internacional 1909.  
 Datum Europeo 1950.



200000

300000

400000

500000

600000

## 4500 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DEL TERRENO (MDE/MDT)

Hemos hecho referencia, varias veces, al Modelo Digital de Elevación del Terreno, como un elemento incorporado en el cálculo de rectificación geométrica de las imágenes Landsat. En las secciones anteriores (4420) se ha dicho que es una matriz numérica, de estructura muy similar a las imágenes de satélite, cuyo valor de pixel expresa la elevación del terreno de esa unidad de observación. Algo más podemos apuntar sobre los MDT, aunque no sea una fuente esencial en nuestro estudio, pero sí para resaltar que se trata de una base de datos esencial, rica y versátil en cualquier SIG.

El término MDT fue acuñado en el Instituto de Tecnología de Massachussets en los años 50 (*Digital Terrain Model*). En realidad, la difusión de los SIG es la que ha facilitado el conocimiento de los MDT, al incorporar la información topográfica al manejo de cartografía digital. Cualquier modelo es una representación simplificada de algunas propiedades de la realidad. Los modelos se construyen estableciendo una *relación de correspondencia con las características que pretenden representar*. Así, se habla de tres tipos de modelos:

1. Icónicos: representan las propiedades morfológicas de la realidad (ej: una maqueta).
2. Análogos: son en parte similar y en parte distintos a la realidad (ej: un mapa).
3. Simbólicos: son una simbolización matemática de la realidad (ej: MDT).

El MDT es un conjunto de datos numéricos descriptivo de la distribución espacial de las alturas del terreno. El hecho de que los modelos digitales estén codificados en cifras permite someterlos a procesos informáticos. Los MDT son modelos estáticos, puesto que sus propiedades y valores son permanentes, pero su naturaleza digital permite su uso en procesos de simulación dinámica mediante el diseño de algoritmos numéricos.

Un tipo de MDT son los modelos digitales de elevación (MDE), que suelen ser la base numérica de otros modelos derivados, (i) de caracterización morfológica del terreno (orientación, pendiente, etc.), o (ii) de evaluación de incidencias dinámicas (incendios, reflectancias) mediante la combinación de la caracterización morfológica y la simulación numérica de tales procesos. Así pues, un MDE consiste en una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno; se puede definir matemáticamente según la expresión  $z = f(X, Y)$ , donde  $z$  es la altitud de un punto cualquiera,  $X$  e  $Y$  las coordenadas de dicho punto en un sistema de referencia determinando y  $f$  la función que relaciona la variable  $z$  con su localización geográfica.

En un MDE la variable continua  $z$  (altitud) está asociada a unas coordenadas  $X$  e  $Y$ , expresadas en un sistema de proyección geográfica que permite la referenciación espacial precisa. Estas unidades crean diferentes estructuras de relación de datos, dando lugar a dos grandes tipos de MDE: **vectoriales y ráster**. En los primeros, las entidades

$X$ ,  $Y$ ,  $z$ , quedan definidas por sus coordenadas en un punto preciso; en los segundos, los valores de  $X$ ,  $Y$ ,  $z$ , quedan promediados para la totalidad del pixel (no solo en un punto).

En los MDE vectoriales, los atributos del terreno se representan por líneas (vector: pares de coordenadas que definen segmentos) o puntos acotados ( $x,y$ ). Los MDE vectoriales más representativos son los contornos, vector que describe la curva de nivel, y los TIN (*Triangular Irregular Network*), conjunto de triángulos adosados que se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales y se adosan sobre el terreno formando un mosaico irregular que se puede adaptar a la superficie con el grado necesario en función de la complejidad del relieve

Los MDE ráster consisten en mallas regulares (i) o de resolución variable (ii), con datos de altitud

- (i) La malla regular consiste en una retícula regular, que se superpone al mapa; generalmente se da el valor de la cota de cada nodo de la malla, aunque lo más correcto es tomar el valor medio de cada cuadrícula.
- (ii) La malla de resolución variable consiste en una retícula de lado cuadrado y resolución espacial constante, puede ser modificada en zonas donde la resolución espacial haya de ser mayor, por la complejidad del relieve.

La elección de una u otra estructura depende del grado de detalle deseado, las características de los datos disponibles, la forma del relieve de la zona y la infraestructura informática.

¿Cómo se construye un MDE?. El registro de las cotas altimétricas del terreno puede realizarse por una toma de datos directa o indirecta. Mediante el procedimiento directo, siempre y cuando el terreno sea fácilmente accesible, el operador registra la altimetría con estaciones topográficas, altímetros y/o sistemas de posicionamiento global (*GPS Global Positioning System*). Con frecuencia estas unidades de medición son aerotransportadas, bien en aviones de vuelo rasante, bien en satélites como el ERS-1, dotado de un altímetro. Este método es muy apropiado para zonas inaccesibles pero muy costoso.

Los métodos indirectos de derivación del MDE recurren a la restitución fotogramétrica de imágenes SPOT (imágenes estereoscópicas) o de fotografía aérea. A partir de dos puntos homólogos en los pares estereoscópicos se deducen de su paralaje las cotas necesarias para reconstruir la topografía. Este método también es muy costoso, no solo por los precios comerciales de las imágenes SPOT sino también por los costes del hardware y software necesarios para la restitución y la alta especialización técnica necesaria. Otro método indirecto es la digitalización de mapas topográficos, por procedimiento manual o mediante escáner; este es el procedimiento más asequible, en términos económicos, y preciso si se adoptan las precauciones de un método controlado.

Cualquiera de los métodos apuntados genera una base de datos de tipo vectorial. En ocasiones, especialmente si se desea operar con imágenes de teledetección, el fichero

vectorial debe convertirse a formato ráster. Los métodos más comunes de interpolación de datos son tres:

**Inversa de la distancia:** En este método se asignan pesos a los datos en función de la inversa de la distancia que los separa del punto problema. La expresión matemática es:

$$Z_{x,y} = \frac{\sum z_i \times d_i^k}{\sum d_i^k}$$

donde  $k$  es un exponente que varía la ponderación. Por regla general se adopta  $k=2$ ; tendremos, por tanto, la interpolación en función de la inversa del cuadrado de la distancia. La ventaja del método es que es sencillo y rápido. La desventaja es que exige una distribución equilibrada de los datos originales para el tratamiento de las formas cóncavas y convexas.

**Superficies de tendencia:** El cálculo se hace a partir de un ajuste de mínimos cuadrados. La ecuación polinómica puede reducirse en el caso más simple a un plano:  $Z_{xy}=a_{00}+a_{01}x+a_0 y$ . Utilizando superficies de grado superior aumenta la complejidad del proceso pero se describe con mayor exactitud la superficie topográfica. El principal inconveniente de este método es que necesita un número muy alto de datos, los errores son importantes en la periferia del modelo, y debe tenerse una correcta distribución de los datos originales.

**Kriginig:** Este método estima el valor del punto en función de una media ponderada que depende de la distancia, según:

$$Z_{x,y} = \sum \lambda_i \times z_i$$

¿Qué uso puede hacerse de los MDE?. Los MDE constituyen una representación más o menos simplificada del relieve y por tanto pueden describirlo. Se pueden construir modelos derivados que representen variables del terreno relacionadas con la topografía: pendiente, orientación, curvatura (o convexidad) y rugosidad (o relieve).

**La pendiente** se mide en función de la variación de altura entre dos puntos en relación con la distancia que los separa. Se expresa en fracción, tantos por uno, tantos por cien, grados, etc. Para entender la pendiente ha de conocerse primero lo que es el gradiente topográfico en un punto. El gradiente del entorno topográfico de un punto se representa mediante un plano que contiene dos vectores ( $v, w$ ), si calculamos su producto vectorial obtendremos otro vector perpendicular al plano que incluye esos dos vectores  $P$ . Este último vector es el gradiente topográfico. Pues bien, la pendiente es el ángulo que existe entre el vector gradiente y un eje vertical  $z$ . Otras medidas relacionadas con la pendiente que pueden derivarse del MDE son (i) la convexidad local o curvatura (tasa de cambio de la superficie de pendiente, representada matemáticamente por la 2ª derivada de la altura), y (ii) la longitud de la pendiente (distancia entre dos puntos separados por un segmento convexo y otro cóncavo).

**Orientación de la topografía**, es el ángulo que forma el vector que señala el norte con la proyección sobre el plano horizontal del vector gradiente. Se mide en grados respecto al Norte.

**Análisis del terreno.** Hay varios elementos que pueden derivarse del MDE:

1. *Curva hipsométrica*: es la representación gráfica de la relación que existe entre cada nivel de altura y la extensión superficial que ocupa en el conjunto del área estudiada. Da una idea de la distribución superficial de las distintas alturas.
2. *Perfil topográfico*: muestra las altitudes de los puntos intermedios situados a lo largo de una línea transversal al MDE.
3. *Rugosidad*: la rugosidad topográfica mide la variación del relieve en un punto y su entorno inmediato. Se calcula en función de la heterogeneidad de la pendiente, medida mediante la varianza de la pendiente en una sección de varios píxeles.
4. *Perfil de alturas en un punto*: esta medida establece la relación de alturas entre un píxel y dos de sus vecinos contiguos; es útil para caracterizar en una superficie topográfica las líneas de cumbre o líneas de drenaje. Lógicamente la relación será diferente según la dirección en que observemos los tres píxeles.
5. *Puntos críticos del relieve*: esta medida trata de identificar cimas, pozos, pasos, líneas de cumbre y de cauces y medias laderas.

**Clasificación del relieve**: esta clasificación puede ser cualitativa (análisis visual) o cuantitativa, usando los valores numéricos para establecer relaciones, grupos y clases.

**Análisis de intervisibilidad**: se suele realizar entre dos puntos de interés; el resultado es un perfil topográfico que confirma o niega la relación visual entre ambos puntos.

**Identificación de cuencas visuales**: la cuenca visual de un punto es el conjunto de puntos de un modelo con los cuales este punto está conectado visualmente. La comprobación de cuencas visuales se realiza mediante perspectivas tridimensionales tomando como base el MDE.

**Sombreado del relieve**: este cálculo proporciona las variaciones del terreno por áreas que son iluminadas o ensombrecidas por una fuente de luz que simula al sol. La imagen resultante proporciona una ilustración de las variaciones de la elevación.

#### **4510 TRATAMIENTO DIGITAL DEL MDE DE CASTILLA Y LEÓN**

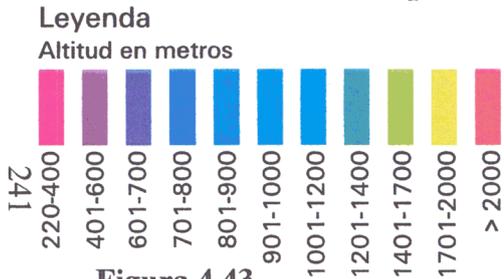
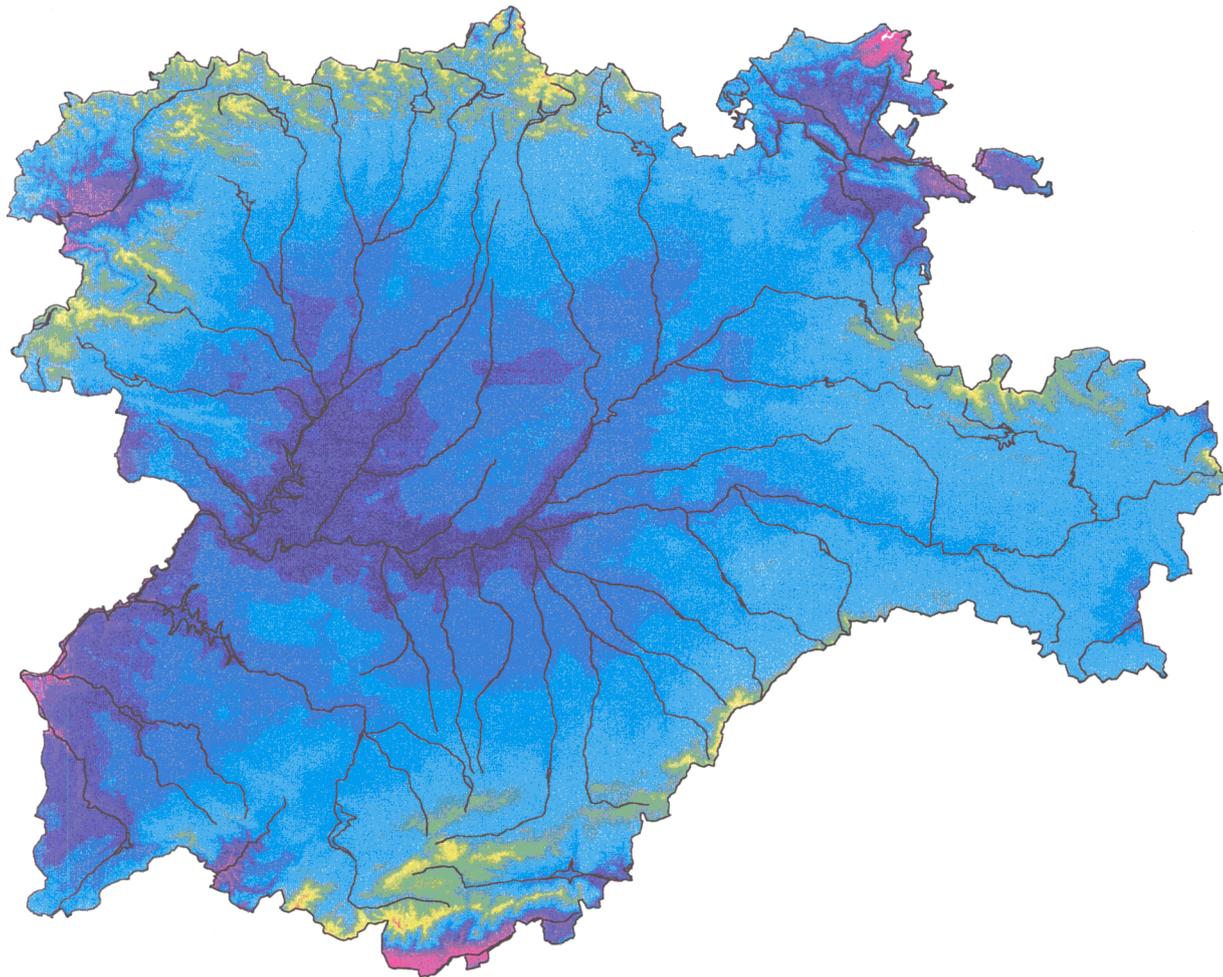
¿Qué tratamiento digital se ha seguido con el MDE empleado en nuestro estudio?, ¿Cuál es su origen?, ¿Cuáles sus características técnicas?; Nuestro MDE procede de la rasterización de la base de datos de las curvas de nivel proporcionada por el IGN. El tamaño del píxel es de 200m. El proceso de conversión no lo realizamos personalmente, sino que se encontraba ya incorporado a la base de datos cartográficos de la empresa. El uso que, en nuestro caso, hemos hecho del MDE ha sido su incorporación a las imágenes Landsat TM en los cálculos de remuestreo, dentro del proceso de corrección

geométrica de la imagen. Este mismo MDE también se ha incorporado a la imagen NOAA-AVHRR que ha servido para ilustrar las cartografías regionales parciales de Castilla y León del Capítulo 1.

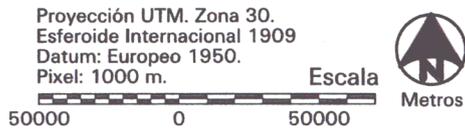
Otras experiencias de proceso del MDE nos han llevado a valorar la aplicación de los productos directos o derivados del MDE. Además de la aplicación directa, los datos del terreno pueden usarse como componentes complejos de un SIG o en rutinas de clasificación.

En nuestro caso el MDT se ha incluido en el proceso de ortocorrección de las imágenes Landsat TM. También se ha incluido en la imagen NOAA-AVHRR utilizada en el primer capítulo para ilustrar las grandes unidades de relieve.

Además, dentro del aprendizaje técnico de tratamiento geográfico de estos datos, se han procesado las cartografías de pendientes y orientación de laderas (Figura 4.43).

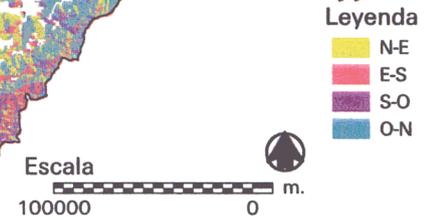
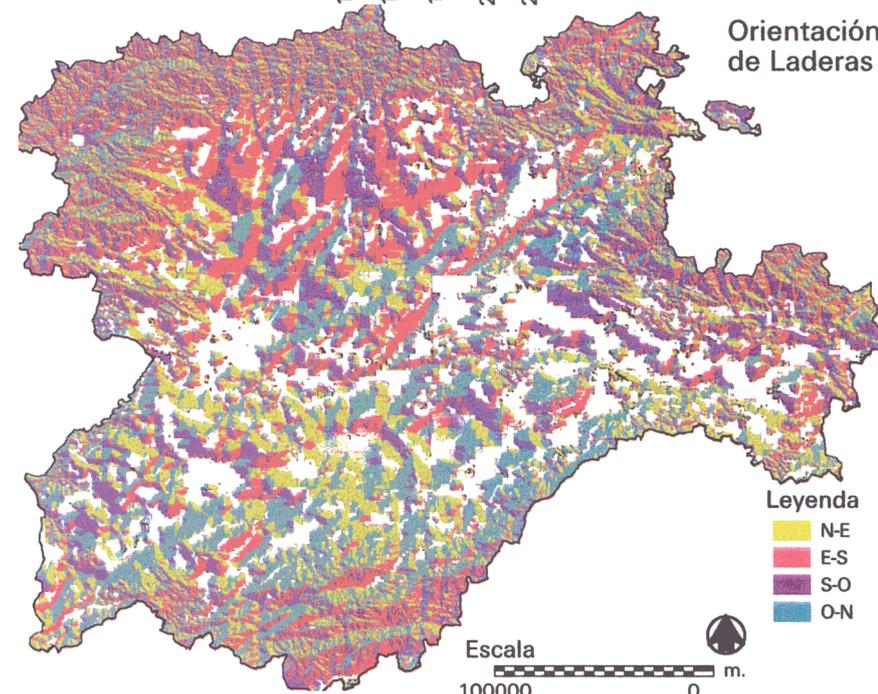
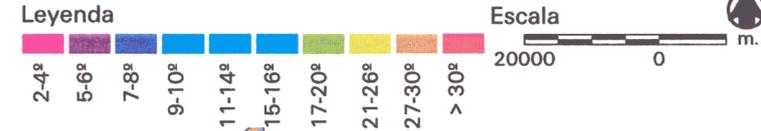
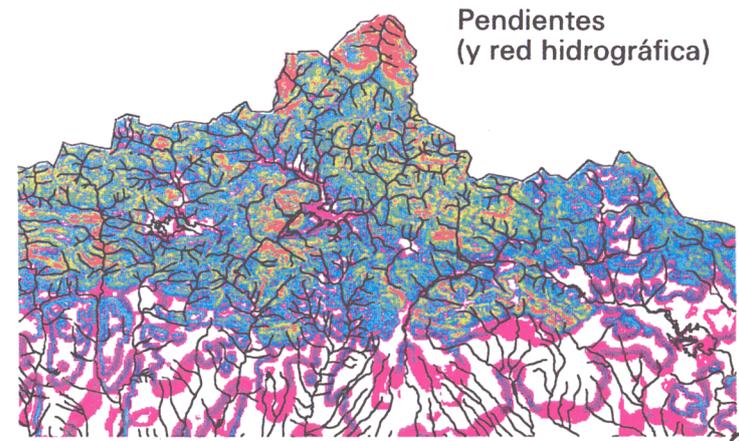


**Modelo Digital de Elevaciones  
(y Red Hidrográfica)**



**Figura 4.43**

241



## 4600 BASE CORINE DE OCUPACIÓN Y USOS DE SUELO (CLC, Corine Land Cover)

El marco legal por el que habría de discurrir el Programa CORINE quedó definido en la decisión del Consejo de las Comunidades Europeas de 27 de junio de 1985<sup>286</sup>, relativo a la adopción de un programa de trabajo de la Comisión para la recogida, coordinación y gestión de información sobre el medio ambiente y los recursos naturales en la Comunidad. Detalles sobre los logros del proyecto pueden verse en los informes de progreso CORINE (1986)<sup>287</sup>, en el informe de la Comisión Europea sobre los resultados del programa CORINE (1991)<sup>288</sup> o en los acuerdos adoptados en la Conferencia de Ministros de Medio Ambiente de la Unión, en el Castillo de Dobris, en junio de 1991. El programa engloba varios proyectos:

1. **CORINE Biotopos**<sup>289</sup>; Rodríguez-Marín, (1990)<sup>290</sup> proporciona un amplio desglose de objetivos; en resumen, este proyecto se ocupa del inventario y cartografía de los hábitats de la UE, tipificados por coherentes criterios de unidad medioambiental en su flora y fauna.
2. **CORINE Agua**, en el que se estandariza la información de 35 parámetros hidrológicos, tanto de aguas corrientes superficiales, humedales y aguas subterráneas<sup>291</sup>, tal y como especifica Hall (1988)<sup>292</sup>, en la metodología de trabajo seguida.
3. **CORINE Aire**, centrado en la elaboración de un inventario europeo de emisiones de contaminantes atmosféricos de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Partículas y VOC vertidas a la atmósfera por fuentes relevantes, "con el fin de contar con una base de datos

---

286 *European Commission* (1985). Council Decision of 27 June, 1985 on the adoption of the Commission Work Programme concerning an experimental project for gathering, co-ordinating and ensuring the consistency of information on the state of the environment and natural resources in the Community (95/338/EEC). Official Journal of the European Communities L 176/14, 6 July 1985, p. 4.

287 *CORINE* (1986). CORINE programme for gathering, co-ordinating and ensuring the consistency of information on the state of the environment and natural resources in the European Community: progress of work. CORINE-Exp (86)2 CCE. Brussels. 86 pp.

288 European Commission, (1991). Communication of the Commission to the Council and the European Parliament on the Results of the CORINE programme. SEC(91) 958 final. Brussels.

289 *Institute of Terrestrial Ecology* (1988). CORINE Biotopes Project. An Inventory of Sites of Importance for Nature Conservation in the European Community. Technical handbook, volume 1. The Standard Site Record: Specifications of Format and Data Content. CORINE/BIOTOPE/88-2. 1. Institute of Terrestrial Ecology, Bangor, United Kingdom.

290 Rodríguez Marín, F. M., (1990). El proyecto Biotopos en España. En: El programa CORINE de la CEE. Monografías de la secretaria General del Medio Ambiente. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo

291 CCE (1988). Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento europeo relativa al Programa CORINE: resultado a mitad de Programa y orientaciones. «Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas». COM (88) 420 final. 92 pp.

292 Hall, E. H. (1988). CORINE data transfer specification: final version 4.0. Birkbeck College, London. Realizado para el Proyecto CORINE. CCE. Bruselas. 32 pp.

coherente para el diseño de estrategias en relación con los problemas de la contaminación atmosférica local" (Rodríguez Picazo, A. 1990)<sup>293</sup>

4. **CORINE Erosión y Recursos** (Giordano, A. 1987<sup>294</sup>, 1988<sup>295</sup>), pretende equilibrar el potencial productivo del terreno -recursos- respecto al peligro de erosión del suelo.
5. **CORINE Erosión Costera**, cuyo objetivo es suministrar una base científica de información para apreciar, a escala de la Unión Europea, el problema del riesgo de erosión litoral; Quélenne, R. *et al.* (1987)<sup>296</sup>, proporcionan un amplio desglose de problemas y objetivos de este proyecto
6. **CORINE Ocupación y Usos del Suelo** (CLC: *Corine Land Cover*), "busca homologar clasificaciones y metodologías para facilitar las comparaciones internacionales e intertemporales referentes a las características y usos del territorio en los países de la UE" (Arozarena y Herrero, 1995)<sup>297</sup>. En otras palabras, CLC es una base de datos geográficos, a escala 1:100.000, estructurada en 44 clases, descriptiva de la vegetación y usos del suelo de los países de la Unión, con unidades cartográficas mínimas de 25 hectáreas. La actualización debe realizarse cada 5 o 10 años y la información de las cubiertas del terreno se deriva de imágenes de satélite e información geográfica analógica. En la actualidad la Agencia Europea Medioambiental (EEA) es el ente responsable del proyecto CLC. En 1995 la EEA creó un centro específico para la coordinación y dirección de actividades relacionadas con la cartografía de cubiertas del terreno en la UE. Este centro se denomina *European Topic Centre* (ETC) y se encuentra ubicado en las instalaciones de la Agencia Espacial Sueca en Kiruna.

En el caso de España, la dirección y coordinación del proyecto está a cargo del Instituto Geográfico Nacional, en cooperación con la Junta de Galicia, el Gobierno de Navarra, el Instituto Geográfico de Cataluña, la Universidad de Alcalá de Henares, la Universidad Complutense de Madrid y la Junta de Andalucía.

Hemos indicado que la nomenclatura CLC consta de 44 clases. Estas se agrupan en tres niveles jerárquicos, a los que cada país puede añadir hasta un quinto nivel, para

---

293 Rodríguez Picazo, A. (1990) inventario europeo de emisiones de contaminantes atmosféricos. Proyecto CORINAIRE de la CEE. En: El programa CORINE de la CEE. Monografías de la secretaría General del Medio Ambiente. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

294 Giordano, A. (1987). Soil erosion risk and important land resources in the land evaluation». EC Meeting on Land Evaluation from Mediterranean Regions - Sevilla 16-18 Sept. 1987.

295 Giordano A. (1988). «Evaluation and cartographic representation of the soil erosion risk in the Southern countries of the European Community». Proceedings of the EC Workshop Erosion assessment and modelling - Brussels 2-3 Dec. 1986.

296 Quélenne, R. E., Bouysse, P., Oliveros, C. (1987). Inventaire des problèmes d'érosion côtière dans les pays de la Communauté Européenne. Guide méthodologique. Rapport BRGM/CCE n.1 87 EUR 140 MAR.

297 Arozarena, A., Herrero, M., (1995). El programa CORINE. Proyecto Land Cover. Una metodología aplicada a las islas Canarias. Jornadas técnicas sobre sistemas de información geográfica y teledetección espacial aplicados a la ordenación del territorio y el medio ambiente. 21-24 Noviembre 1994. Centro de Estudios Ambientales. Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz.

clasificar de este modo particularidades de cubiertas o usos que se den en ese país. En el caso de España, se han discriminado 64 clases articuladas hasta el 5º orden, organizadas en los cinco capítulos comunes estipulados para todos los países: superficies artificiales, agrícolas, forestales, humedales y agua (Anexo 2). El territorio Nacional está cubierto por 297 hojas, en proyección UTM, de las que 67 cubren Castilla y León. La cartografía final se ha construido a escala 1:100.000, en un formato de hoja de 40º de paralelo por 20º de meridiano, correspondiéndose con la serie cartográfica C, a escala 1:100.000 del Servicio Geográfico del Ejército, pero con una numeración ordinal propia.

Los datos de CLC han sido utilizados e integrados en nuestro estudio como elemento cartográfico de soporte en el análisis de la serie NDVI87m y de las clasificaciones a las que hemos sometido dicha serie. Antes de exponer el tratamiento y aplicación que hemos hecho de los datos CLC en nuestro estudio, consideramos oportuna una breve descripción de los contenidos, estructura y proceso de obtención de tal base de usos de suelo para España.

La clasificación y cartografía de los usos del suelo no es tarea fácil; el proceso puede incurrir en simplificaciones extremas o ingenuas de la realidad, encubriendo complejas realidades humanas, económicas, ecológicas, etc. Por otra parte, una base de datos interactiva. Por otra parte, la importancia y necesidad de disponer de una buena cartografía de ocupación del suelo debidamente integrada en un sistema de información queda de manifiesto las palabras de R. Nuñez (1990, p. 205)<sup>298</sup>:

*"... es necesario disponer de una cartografía, actualizada e integrada, si es posible, en un sistema de información que dé a conocer la cobertura y la utilización del suelo, .... Este tipo de cartografía necesita revisarse con cierta frecuencia, .... El carácter temporal de la cartografía de ocupación del suelo es una de las causas por las que esta cartografía es escasa en todos los países, ... Todos estos mapas adolecen del defecto de falta de actualización, difícil de realizar por el esfuerzo humano que requieren y los elevados costes. La teledetección espacial nos facilita llevar a cabo de forma realista, la realización de mapas de ocupación del suelo de países enteros.*

*La información sobre el territorio en España adolece de un doble rasgo de signo negativo:*

- 1. Por una parte es notable la descoordinación entre los diversos sistemas de información existentes, en particular entre aquellas cartografías temáticas que se ocupan del medio inerte (geología, geomorfología, edafología) y aquellas que dan cuenta de la integración del suelo con los procesos biológicos y los usos agrarios. En este aspecto es también llamativa la disociación existente entre la información sobre cultivos y aprovechamientos*

---

298 Nuñez de las Cuevas, R. (1990). El mapa de ocupación del suelo de España a escala 1/100.000. IGN. MOPU. En: El programa CORINE de la CEE. Monografías de la secretaría General del Medio Ambiente. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

*sobre el valor agronómico y aquella que se refiere al valor económico del territorio las cuales en ocasiones presentan rasgos de abierta contradicción. Por otra parte debe señalarse que la información contenida en los mapas de base disponible corresponde a fechas muy dispares. Quizá la desconexión más importante es la que se produce entre informaciones numéricas e informaciones territoriales. En efecto, la gran mayoría de las estadísticas agrarias del país tienen escasa referencia territorial y nula referencia cartográfica.*

2. *Por otra parte, esa información sobre el territorio presenta notables lagunas o carencias:*
  - *falta de información sobre la calidad biológica del terreno,*
  - *también sobre los usos no agrarios. La importancia de esta carencia es grande ya que el territorio, por cumplir funciones de soporte, tanto de los procesos naturales como de la actividad humana, es un recurso limitado y no renovable que interesa gestionar colectivamente de forma racional, lo que sólo es posible si existe una información sistematizado y accesible sobre los usos del territorio y la dinámica de cambio que los afecta.*
  - *en cuanto a los usos agrarios, la información de que hoy en día se dispone, no corresponde a los requisitos de una planificación. Dicha información responde más a una tipología de suelos de cara a su conservación que a su potencialidad y valor agronómico."*

Las palabras de Nuñez resumen parte de la experiencia que hemos tenido al hacer uso de esta base de datos. Las ventajas de una fuente de información de las características de CLC son indiscutibles; no solo porque no hay otra base nacional digital sobre esa temática, sino también por la escala, que resulta muy adecuada para estudios regionales, por la calidad de la fuente de donde se ha derivado la clasificación (fotografía aérea, Landsat TM ) y la metodología de clasificación (estandarización de controles de campo y verificaciones). Así, podemos corroborar que la versión de CLC ha sido de gran utilidad como apoyo en la interpretación de la clasificación temática de la serie de NDVI87m.

Las carencias en CLC también son notables; señalamos tres:

- (i) El desfase con la dinámica real de la evolución de ocupación del suelo; si atendemos a su fecha de publicación en 1987, la base CLC omite cambios de ocupación del terreno impuestos por la PAC en el abandono de campos, cambio de actividades agrarias o reforestación (MAPA, 1996<sup>299</sup>; Ortega Sada, J.L., 1996<sup>300</sup>).
- (ii) La dificultad de actualización, a pesar de que el proyecto CORINE contempla la necesidad de actualización cada 5 o 10 años. La actualización supone una revisión de la totalidad para constatar los cambios o permanencias de usos. En otras palabras,

---

299 Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, (1996). La política Agraria Común en España. Campaña 1996-97. MAPA. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. Madrid.

300 Ortega Sada, J.L., (1996). La Unión Europea (UE), la Política Agraria Común (PAC), los Acuerdos del GATT y la reforma. MAPA. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. Madrid.

la revisión supone casi tanto como volver a empezar el trabajo de nuevo. Aunque la metodología de trabajo está definida y corregida, la aplicación no es automática; además, los costes de los datos (fotografía aérea, Landsat TM o SPOT) siguen siendo la partida más cuantiosa y el mayor escollo para la actualización. En este sentido lo contrario de lo señalado en el párrafo anterior sobre las ventajas de CLC también puede ser cierto: nos referimos a la posibilidad de las series multitemporales de NOAA NDVI para hacer una aproximación a los cambios de usos de suelo ocurridos en el transcurso de las actualizaciones de detalle. En la actualidad, el Ministerio de Agricultura y el Instituto Geográfico Nacional trabajan en la actualización CLC, y aunque la primera actualización ya debiera ser efectiva, por el momento no existe fecha concreta de publicación.

- (iii) Los errores en la estructura de la base de datos (errores de digitalización, polígonos abiertos, etc.). Hemos encontrado numerosos polígonos abiertos que han requerido un detallado trabajo de reconstrucción, consultando cartografías impresas, mapas de cultivos y aprovechamientos, fotografías aéreas e imágenes Landsat TM cuando se disponía de ellas. Afortunadamente, las zonas con deficiencias en la estructura de la base de datos han sido áreas marginales de usos forestales en las provincias de Soria y de León. Esto puede deberse a errores en el origen de la base de datos, a pesar de los controles de calidad A y B exigidos en la digitalización (Arozarena y Herrero, 1995, *Cit. supra*, pp. 96), o a las alteraciones que puedan sufrir los vectores y la base de datos asociada en su tratamiento parcial, al extraer el área de interés de la totalidad.

La Figura 4.44 muestra la base CLC (64 clases) de Castilla y León

#### **4610 TRATAMIENTO DIGITAL DE LA BASE CLC DE CASTILLA Y LEÓN**

Al hablar del tratamiento digital de la base CLC, previo a su rectificación y degradación para la eventual comparación con la serie NDVI87m, tenemos que referirnos a sus especificaciones técnicas y al tratamiento de datos vectoriales. Lo que digamos sobre este segundo aspecto es aplicable a la BCN 200, puesto que también consiste en una base vectorial.

La figura 4.45 muestra el esquema de secciones CLC a escala 1:100.000 sobre Castilla y León; en total, 67 hojas.

**Soporte:** los datos se encontraban grabados en cinta DAT de 8 mm (cfr. Archivo de imágenes, Infocarto, S.A.). Esto implica la utilización de una unidad lectora de cinta periférica, con el software y estructura de comandos adecuada que la relaciona con el ordenador de proceso.

**Formato:** los datos se encontraban en formato ARC/INFO (*Export Format*, e00). En términos de nuestro equipo de proceso esto quiere decir que pueden procesarse directamente con el software Erdas Imagine 8.3. (Módulo Vector).

**Estructura de los ficheros:** las 296 hojas CLC de la Península están organizadas en ficheros independientes, con un fichero de cabecera con los datos de identificación correspondientes a la hoja: (i) número de la hoja del mapa CLC y del mapa Topográfico del Servicio Topográfico del Ejército a escala 1:100.000, (ii) fecha de la fotointerpretación y digitalización de cada hoja y (iii) relación de las coordenadas UTM para las cuatro esquinas. Las hojas CLC del archivo de Infocarto, S.A. están subdivididas en 12 bloques zonales, y las correspondientes a Castilla y León se encontraban repartidas entre los bloques 1, 3, 4, 5 y 6; tal y como indica la figura 4.45. El volumen medio de los bloques zonales es de 18 Mb (total: 90 Mb). Esto significa que, en un principio tuviéramos que volcar y trabajar con muchas más hojas CLC que las estrictamente correspondientes a Castilla y León, para luego desestimarlas. Así, para el bloque COR 1 solo pasaron a formar parte de nuestra base de datos las hojas 5-4 a 5-7 y 6-3 a 6-7.

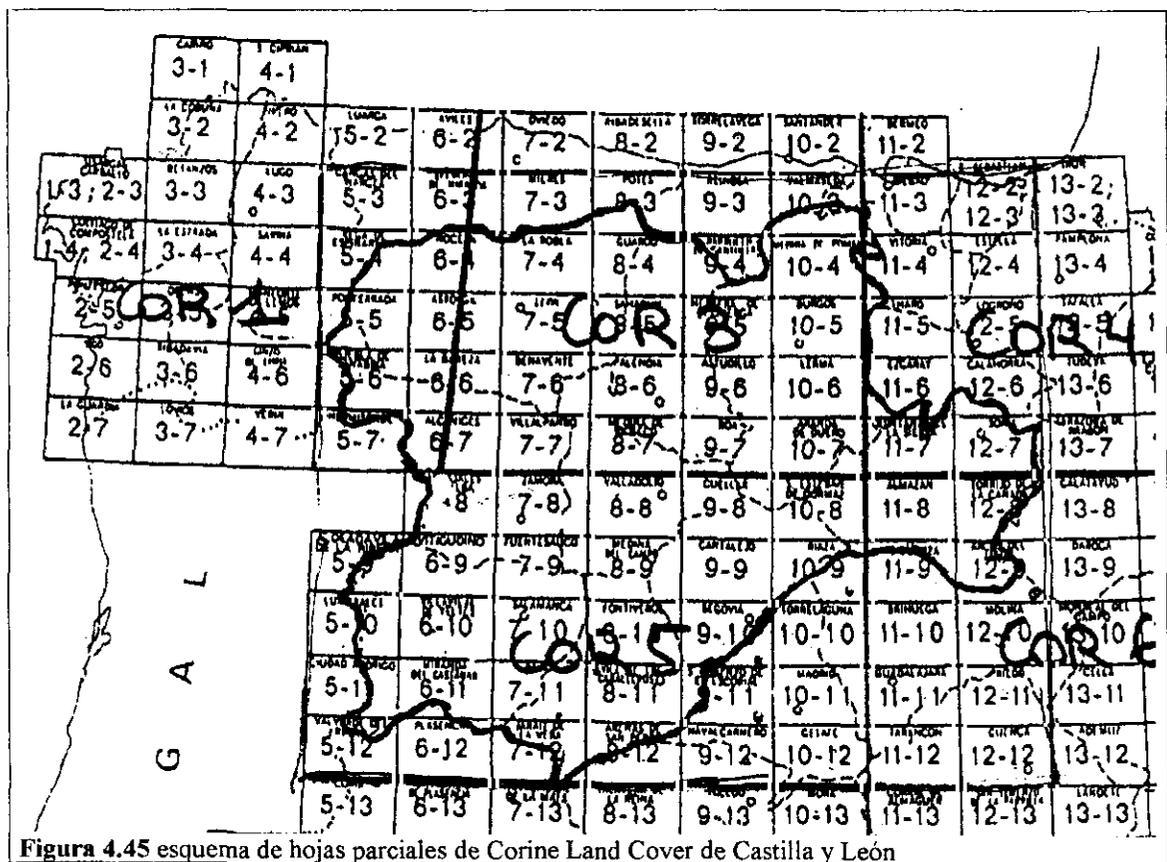


Figura 4.45 esquema de hojas parciales de Corine Land Cover de Castilla y León

Otras dos tareas realizadas a continuación fueron:

1. La revisión de polígonos y construcción de topología.
2. La recodificación de las 64 categorías CORINE entorno a 16 categorías en las que resaltarán suficientemente las tierras de secano y la variedad de fitoasociaciones de la orla montañosa. Era necesario homogeneizar CLC (pixel 200 m) con los datos de la serie NDVI87m (pixel 1100 m). Decidimos mantener el tamaño de píxel a 200 m e introducir la simplificación en el grado de reducción de categorías (a 16). Como fruto de esta recodificación llegamos a la figura 4.46. Los criterios de unificación de categorías para pasar de 64 a 16 han sido dos: singularizar las tierras de labor de

secano y resaltar el resto de fitoasociaciones naturales de la manera más individualizada posible. La integración de fuentes de distinta resolución plantea problemas de larga discusión. En el caso de CORINE y NOAA nos parece interesante el trabajo de Florez, Calle y Casanova (1997)<sup>301</sup>, metodología que hemos verificado para la totalidad de Castilla y León pero que desestimamos por somera ante el nivel de detalle que se alcanza con la multitemporalidad de la serie NOAA.

Las siguientes tablas resumen tres aspectos de las operaciones efectuadas con CLC:

- Tabla 4.11: Categorías y superficies de las 64 clases CLC en Castilla y León, según la base original (corresponde con la Figura 4.44).
- Tabla 4.12: Criterio de agrupación de clases para recodificar la base original de 64 categorías en 16.
- Tabla 4.13: Superficies de las 16 categorías CLC recodificadas (Figura 4.46).

Categorías y superficies de las 64 clases CLC en Castilla y León				
Nº Clase	Clase CLC	Nombre	Histograma	Superficie (ha.)
1	111	Tejido urbano continuo	747	18675
2	1121	Estructura urbana laxa	124	3100
3	1122	Urbanizaciones exentas o ajardinadas	110	2750
4	121	Zonas industriales o comerciales	192	4800
5	1221	Autopistas / Autovías	9	225
6	1222	Complejos ferroviarios	3	75
7	123	Zonas portuarias	2	50
8	124	Aeropuertos	94	2350
9	131	Extracción minera	252	6300
10	132	Escombreras y vertederos	31	775
11	133	Zonas en construcción	40	1000
12	141	Zonas verdes urbanas	3	75
13	142	Instalaciones deportivas	11	275
14	211	Tierras labor secano	133584	3339600
15	2121	Cultivos herbáceos en regadío	16537	413425
16	2122	Otras zonas irrigación	6	150
17	213	Arrozales	11	275
18	221	Vifederos	1282	32050
19	2221	Frutales en secano	24	600
20	22221	Cítricos	0	0
21	22222	Frutales tropicales	32	800
22	22223	Otros frutales en regadío	65	1625
23	223	Olivares	162	4050
24	231	Praderas	3176	79400
25	241	Cultivos anuales+Cult.permanentes	87	2175
26	2421	Mosaico cult. anuales, praderas	8161	204025
27	2422	Mosaico cultivos permanentes	225	5625
28	2423	Mosaico cult. anuales con cult.	3925	98125
29	243	Agrícola + veg. natural	18258	456450
30	244	Sistemas agroforestales	14114	352850
31	31111	Perennifolias esclerófilas y quejigal	11946	298650
32	31112	Laurisilva macaronésica.	1263	31575

301 Flores, M., Calle, A., Casanova, J.L. (1997). Integración de fuentes de distinta resolución espacial. Imágenes de satélite NOAA y mapa de ocupación CORINE. Mapping. Nº. 34. Ed. MAP & SIG Consulting.

33	3112	Caducifolias y rebollares.	15872	396800
34	3113	Otras frondosas de plantación	1294	32350
35	3121	Pináceas.	21627	540675
36	3122	Sabinars y enebrales	1432	35800
37	313	Bosque mixto	4365	109125
38	3211	Pastizales supraforestales	3247	81175
39	3212	Otros pastizales	28182	704550
40	3221	Landas y matorrales templado oceánicos	22151	553775
41	3222	Fayal-brezal macaronésico	0	0
42	3231	Matorral denso	8654	216350
43	3232	Matorral subarbustivo muy poco denso	21648	541200
44	3233	Matorrales xerófitos macaronésico	1	25
45	324	Matorral boscoso de transición	23432	585800
46	331	Playas, dunas y arenales	12	300
47	332	Roquedo	2966	74150
48	3331	Xeroestepa subdesértica	1879	46975
49	3332	Cárcavas y zonas erosión	297	7425
50	3333	Espacios orófilos altitudinales	3339	83475
51	334	Zonas quemadas	416	10400
52	335	Glaciares y nieves permanentes	0	0
53	411	Humedales y pantanos	42	1050
54	412	Turberas	0	0
55	421	Marismas	0	0
56	422	Salinas	0	0
57	423	Llanuras intermareales	7	175
58	5111	Ríos y cauces naturales	55	1375
59	5112	Canales artificiales	4	100
60	5121	Lagos y lagunas	36	900
61	5122	Embalses	1224	30600
62	521	Lagunas costeras	0	0
63	522	Estuarios	0	0
64	523	Mares y océanos	0	0

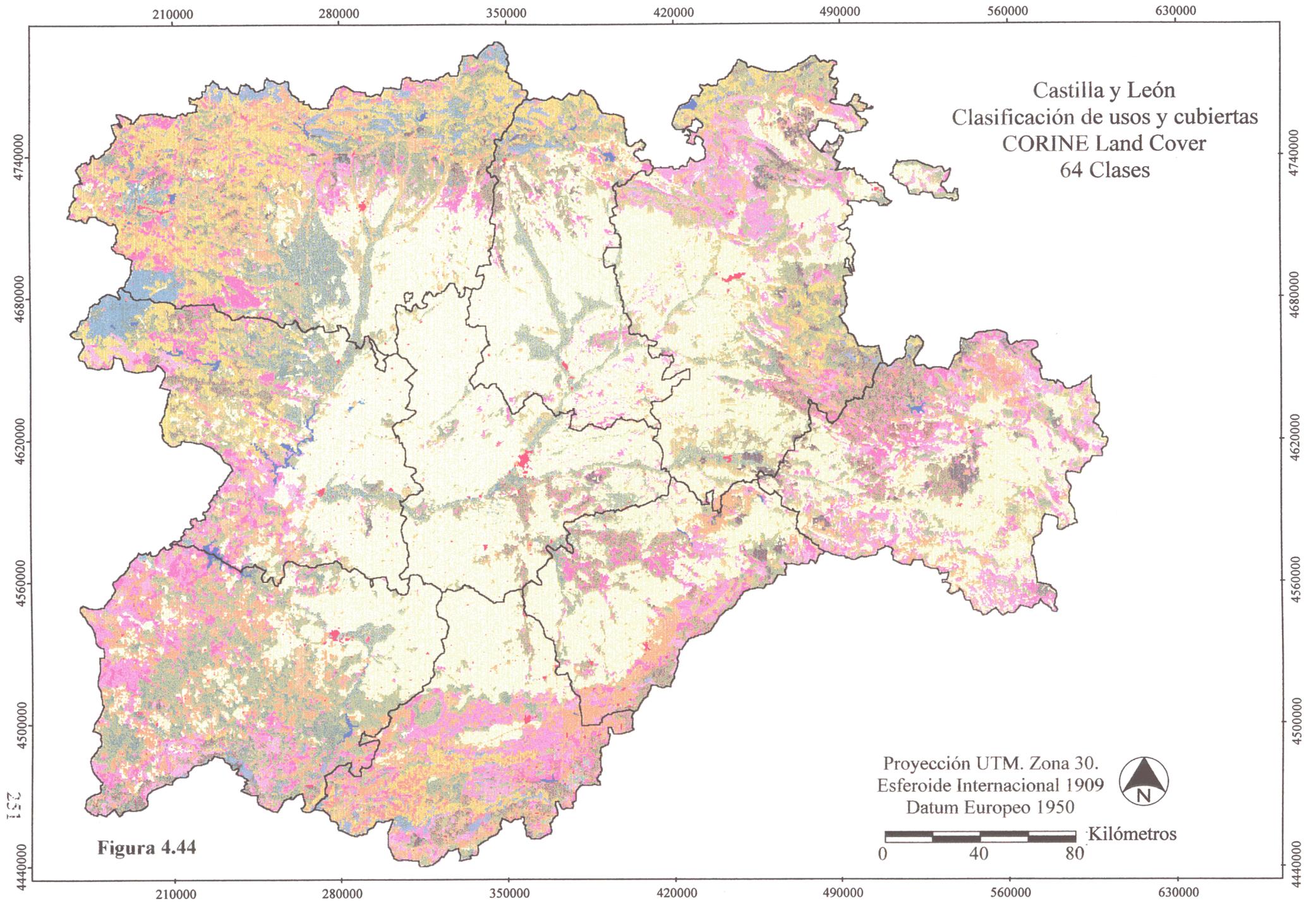
Tabla 4.11 Categorías y superficies de las 64 clases CLC en Castilla y León.

CORINE reclasificado a 16 clases	Clases CORINE agrupadas
1. Superficies Urbanas y artificiales	111 a 142
2. Tierras de albor de secano	211
3. Herbáceos y frutales en regadío	2121 a 213, 22221, 22222, 22223
4. Viñedos olivar y frutales de secano	221, 2221, 223
5. Praderas y mosaico de pastizales	231, 2421
6. Mosaico de cultivos asociados	241, 2423, 243
7. Agrícola y vegetación Natural	243
8. Sistemas Agroforestales	244
9. Forestal: perennifolias y frondosas	31111, 31112, 3112, 3113.
10. Forestal: pinar y sabinar	3121, 3122
11. Forestal: bosque mixto	313
12. Pastizal alpino y matorral	3211, 3212, 3221, 324.
13. Suelo desnudo	331, 332
14. Xeroestepa y cárcavas	3331, 3332
15. Cumbres con escasa vegetación	3333, 334, 335
16. Superficies de aguas y humedales	411, 412, 421, 422, 423, 5111, 5112, 5121, 5122, 521, 522, 523.

Tabla 4.12 Agrupación de clases para recodificación de 64 categorías CLC en 16.

<b>Nº Clase</b>	<b>Nombre</b>	<b>Histograma</b>	<b>Superficie (ha)</b>
1	Sup. Urbanas y artificiales	1618	40450
2	Tierras labor secano	133584	3339600
3	Herbáceos y frutales en regadío	16651	416275
4	Viñedo, olivar y frutales secano	1468	36700
5	Praderas y mosaico pastizales	11337	283425
6	Mosaico cultivos asociados	4237	105925
7	Agrícola + vegetación natural	18258	456450
8	Sistemas agroforestales	14114	352850
9	Forestal: perennifolias y frondosas	30375	759375
10	Forestal: pinar y sabinar	23059	576475
11	Forestal: bosque mixto	4365	109125
12	Pastizal alpino y matorral	107315	2682875
13	Suelo desnudo	2978	74450
14	Xeroestepa y cárcavas	2176	54400
15	Cumbres con escasa vegetación y	3755	93875
16	Superficies de aguas y humedales	1370	34250

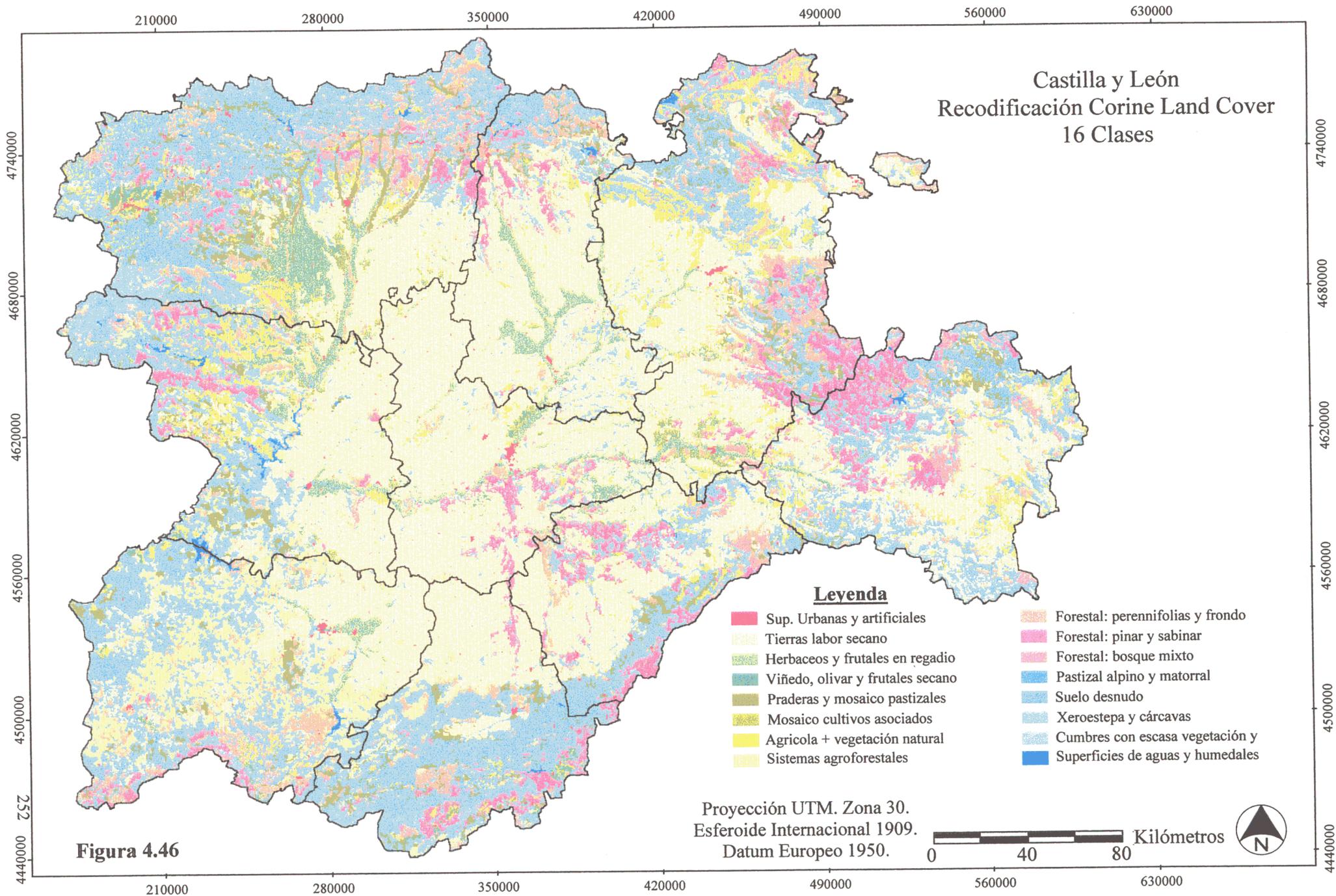
**Tabla 4.13** Superficies de las 16 categorías CLC recodificadas.



**Leyenda Clasificación CORINE Land Cover, 64 Clases (54 presentes)**

	Tejido urbano continuo		Sistemas agroforestales
	Estructura urbana laxa		Perennifolias esclerófilas y que
	Urbanizaciones exentas o ajardin		Laurisilva macaronésica
	Zonas industriales o comerciales		Caducifolia y rebollares
	Autopistas / Autovías		Otras frondosas de plantación
	Complejos ferroviarios		Pináceas
	Aeropuertos		Sabinares y enebrales
	Extracción minera		Bosque mixto
	Escombreras y vertederos		Pastizales supraforestales
	Zonas en construcción		Otros pastizales
	Zonas verdes urbanas		Landas y matorrales templado oceánico
	Instalaciones deportivas		Matorral denso
	Tierras labor secano		Matorral subarabustivo muy poco desarrollado
	Cultivos herbáceos en regadío		Matorrales xerófilos macaronésicos
	Otras zonas irrigación		Matorral boscoso de transición
	Arrozales		Dunas y arenales
	Viñedos		Roquedo
	Frutales en secano		Xeroestepa subdesértica
	Frutales tropicales		Cárcavas y zonas erosión
	Otros frutales en regadío		Espacios orófilos altitudinales
	Olivares		Zonas quemadas
	Praderas		Humedales y pantanos
	Cultivos anuales y cultivos permanentes		Llanuras intermareales
	Mosaico cultivos anuales y praderas		Ríos y cauces naturales
	Mosaico cultivos permanentes		Canales artificiales
	Mosaico cultivos anuales con cultivos asociados		Lagos y lagunas
	Agrícola y vegetación natural		Embalses

Figura 4.44



**Figura 4.46**

**ABRIR CAPÍTULO 4.**



**(CONTINUACIÓN)**