

Detección de cambios por regresión de imágenes Landsat

S. López, F. González, J.M. Cuevas, y R. Llop

Proyecto de Teledetección. Sección de Proceso de Datos. INIA.
Apartado 8111. 28080 Madrid.

1. Introducción.

El medio natural está constantemente sometido a cambios. Algunos de ellos manifiestan un carácter patológico que obligaría a un estudio y seguimiento continuo de los mismos, especialmente cuando pueden llegar a considerarse como fenómenos catastróficos. Es ese el caso de incendios, inundaciones, sequía o daños producidos por contaminantes (lluvia ácida, escapes...). La Teledetección se ofrece como una herramienta idónea para su cuantificación superficial y análisis multitemporal, facilitando la metodología necesaria para la evaluación del elevado flujo de datos enviados periódicamente por los sensores espaciales.

En este artículo se presenta un estudio piloto de detección de cambios mediante técnicas de regresión realizado sobre el Monte de El Pardo. El objetivo principal se centra en la comprobación de la eficacia de la técnica de regresión en los estudios multitemporales frente a otras técnicas más complejas y lentas como las de clasificación o componentes principales.

A priori se justifica el uso de la regresión, a pesar de su simplicidad, por el potencial que supone el trabajar con datos relativos a varias fechas. Este se acentúa si sólo perseguimos la estimación de un único fenómeno en particular como puede ser el incremento de superficie forestal afectada por el fuego o el inventario de los terrenos anegados en una inundación. La elección de la variable (banda o combinación de bandas) que explique su evolución de forma óptima supone

una fase importante en el proceso, tanto más cuanto menos drástico sea el cambio.

En el estudio piloto se persiguieron dos finalidades. Por una parte, la identificación y cuantificación de zonas anegadas al elevarse el nivel del Embalse de El Pardo, y por otra, estudiar el efecto que tuvo el fin de un periodo de sequía sobre la reflectancia de distintas agrupaciones vegetales (encinares, pastizales, dehesas, repoblaciones de coníferas, matorrales, vegetación de galería, cultivos y mosaicos con terrenos urbanos) .

Para ello se diseñó una metodología basada en tres puntos: extracción y corrección de ventanas, análisis de regresión y análisis de los resultados, originando el desarrollo informático usado en el tratamiento de los datos.

2. Metodología utilizada y desarrollo informático.

El sistema informático en el que se concreta la metodología consta de 5 fases: I. Selección y extracción de ventanas; II. Corrección de imágenes y reformato; III. Transformaciones radiométricas, análisis de regresión y cálculo de residuos; IV. Selección y tratamiento de las salidas y V. Análisis estadístico de los resultados.

Dependiendo de la configuración disponible pueden variar el número de programas necesarios, desde varios por cada fase hasta agrupar varias fases en uno. En principio sólo se necesita un ordenador de uso general y una pantalla con al menos un plano de memoria de 8 bits de profundidad, siendo necesario algún tipo de plottér, preferiblemente electrostático. En este trabajo se utilizó un CYBER-180 y un I2S-M70 conectado a un PDP-11/34, con un plotter electrostático CALCOMP 5100. Para la estimación de superficies sobre documentos auxiliares se empleó un tablero digitalizador CALCOMP 9000 controlado por un IBM-AT. Con excepción de los programas estadísticos de la serie BMDP, el resto del software ha sido desarrollado en la Sección de Proceso de Datos del I.N.I.A.

FASE I: Selección y extracción de ventanas. En esta fase se efectuó la elección de las ventanas de trabajo, su extracción de la CCT e impresión de las bandas en tonos de gris.

DIAGRAMA DE
FLUJO DEL
SISTEMA
INFORMATICO.

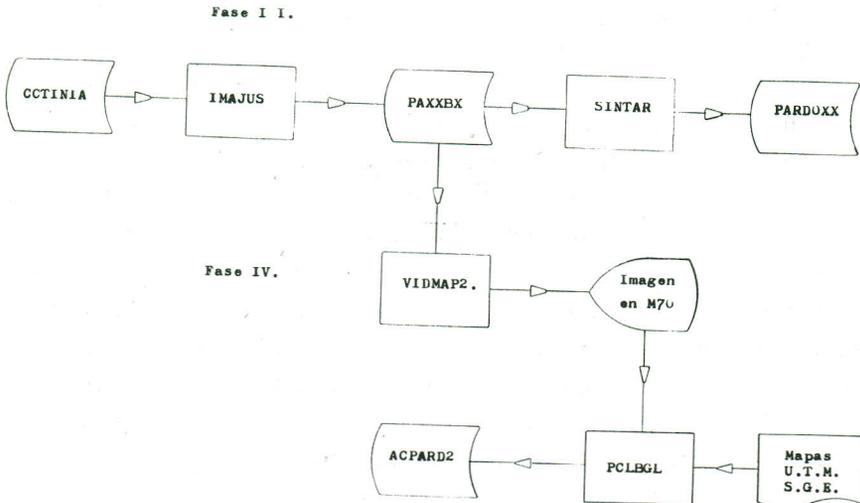
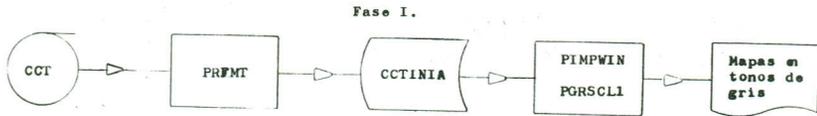
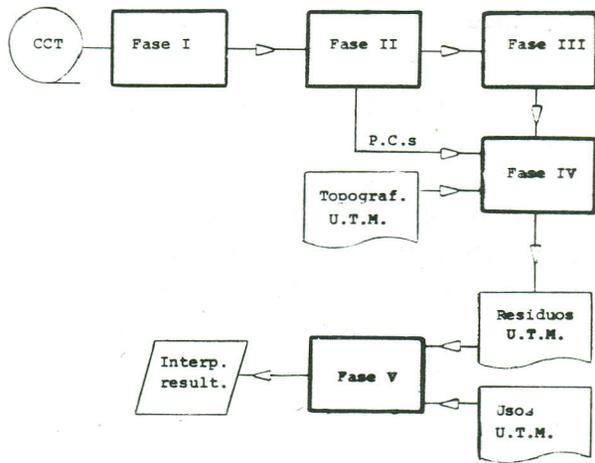
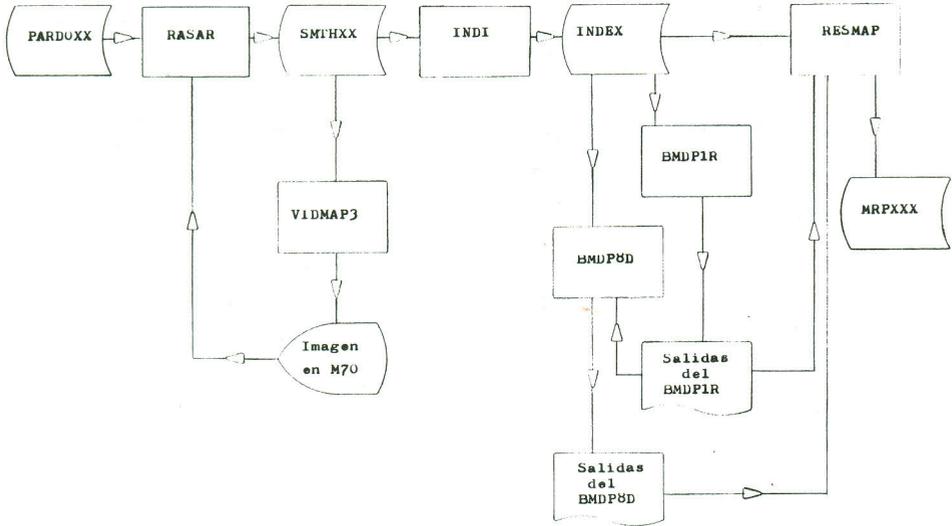


Figura 1a.

Fase III.



Fase IV.

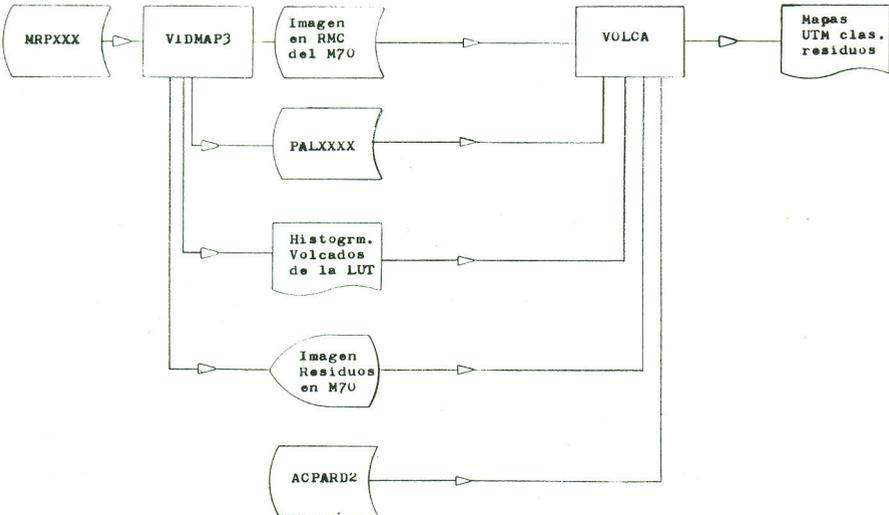
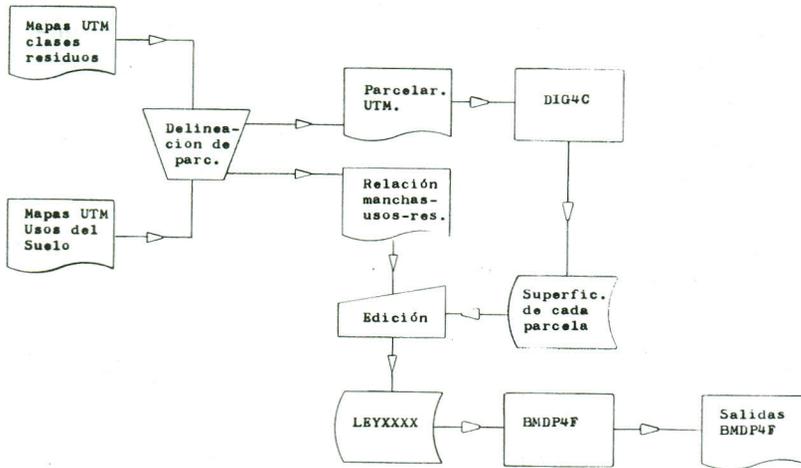


Figura 1b.

Fase V.



FASE I: PRFMT (*): Lectura, reformato y extracción de ventanas de la CCT.

PIMPWIN (*) y PGRSCL1 (*) : Generación de mapas en tonos de gris.

FASE II: IMAJUS: Corregistro entre imágenes.

SINTAR: Gestión de archivos de trabajo.

FASE III: RASAR: Transformaciones radiométricas.

INDI: Creación archivo multitemporal.

BMDPXX: Análisis de regresión.

RESMAP: Cálculo de residuos.

FASE IV: VIDMAP2 y VIDMAP3: Gestión del procesador de imágenes.

VOLCA: Volcado de los residuos en coordenadas UTM.

PCLBGL (*): Cálculo de coeficientes registro UTM.

FASE V: DIG4C: Digitalización de parcelas.

BMDP4F: Análisis de dependencia. Test chi-cuadrado.

(*): Programas utilizados también en el sistema ERAFIS (MORO, 1984).

Figura 1c.

FASE II: Corregistro de imágenes y reformato.

IIa- Para el corregistro entre las imágenes correspondientes a distintas fechas se eligió un método de regresión por subventanas en el que no se necesita conocer "a priori" con exactitud la posición relativa de dos píxeles homólogos que representen a una misma parcela del terreno. Si se considerase aconsejable una precisión menor del pixel puede remuestrearse la imagen, tomando cada pixel la reflectancia correspondiente a su nueva posición.

IIb- Se ejecuta un reformato de las ventanas, creándose varios archivos de trabajo en formato directamente mapeable por el plotter.

FASE III: Transformaciones radiométricas, análisis de regresión y cálculo de residuos.

IIIa- Transformaciones radiométricas. En los estudios multitemporales resulta especialmente interesante trabajar con valores con un sentido físico claro y constante. Los datos proporcionados por la CCT son simples cifras que deben sufrir ciertas transformaciones para convertirse en radianzas y reflectancias. En el caso del sensor MSS existe bibliografía (ROBINOVE, 1982; FRANK, 1984; NELSON 1985) coincidente en el uso de las siguientes fórmulas:

$$RAD(k) = (dn(k) * (Lmax(k) - Lmin(k)) / dmax(k)) + Lmin(k)$$

Donde: RAD(k) es la radianza medida por el sensor, en mW cm⁻² sr⁻¹, en la banda k.

dn(k) es el valor digital del pixel en la banda k.

dmax(k) es el máximo valor digital que se puede alcanzar en la banda k. Depende de como se reescalen los datos originales.

Lmax(k) radianza medida en el umbral de saturación del sensor, en la banda k (en mW cm⁻² sr⁻¹).

Lmin(k) es la radianza mínima capaz de ser medida por el sensor en la banda k, en mW cm⁻² sr⁻¹.

Todos los valores de Lmax y Lmin para los Landsat 4 y 5 pueden encontrarse en el documento "Landsat 4/5 to Ground

Station Interface Description, Apendix B: MSS Data Processing Constans", NASA Goddard Space Flight Center, 1984.

Con las transformaciones a radianzas se homogeinizan los datos tomados por distintos sensores de distintos satélites. En nuestro caso concreto, la imagen de 1983 fue captada por el Landsat 4 y la de 1984 por el Landsat 5.

El paso a reflectancias permite la corrección de la variación del ángulo cenital producida entre dos imágenes sucesivas. Podemos definir la reflectancia como el ratio entre la radiación incidente y la reflejada, para una banda k determinada.

Se asumen una serie de supuestos en los cálculos de reflectancia que, si bien no se dan en nuestra zona de estudio con rigurosidad, se ajustan suficientemente en la práctica:

- 1- La superficie del terreno es un reflector lambertiano.
- 2- La pendiente media del terreno es cero.
- 3- Las perturbaciones atmosféricas sólo tienen un efecto aditivo y
- 4- El ángulo del Sol bajo el que se desarrolla la escena es el mismo para toda ella (ROBINOVE et al., 1981).

La fórmula empleada es:

$$\text{REF}(k) = \text{RAD}(k) * \pi / (E(k) * \text{sen}(a))$$

Donde: REF(k) es la reflectancia de un pixel en la banda k.

RAD(k) es la radianza calculada anteriormente.

E(k) es la constante solar en la alta atmósfera en mW cm⁻² para la banda k.

a es el ángulo de elevación solar.

Trabajando con reflectancias podemos comparar imágenes de distintos sensores y bajo distintos ángulos cenitales, y al mismo tiempo, comparar los valores obtenidos con otros referenciados previamente en la bibliografía especializada.

En este apartado se incluyó un módulo para generar una imagen derivada a partir de un filtro pasa-bajos, determinado por el usuario. Este "smoothing" supone una pérdida de detalle, poco importante para la detección de cambios en grandes superficies, facilitando una homogeinización de los datos y una mejora en el nivel de ruido.

El usuario gradua la intensidad del "smoothing" asignando pesos (A,B,C) en una matriz 3*3 que definirá la nueva reflectancia del pixel (i,j) como una media ponderada de la reflectancia de los píxeles vecinos:

INPUT: A, B, C---> Define la matriz SMT:

$$\text{SMT} = \begin{matrix} A & B & A \\ B & C & B \\ A & B & A \end{matrix}$$

La nueva reflectancia será:

$$\begin{aligned} \text{nr}(i,j) = & (A*(r(i-1,j-1)+r(i+1,j-1)+r(i+1,j+1)+r(i-1,j+1)) \\ & +B*(r(i+1,j)+r(i-1,j)+r(i,j+1)+r(i,j-1))+ \\ & C*r(i,j))/(C+4*B+4*A) \end{aligned}$$

IIIb- Análisis de regresión. La aplicación de la técnica de regresión permite tener en cuenta, y eliminar, efectos ambientales que actúen sobre toda la imagen, sobre toda la ventana de trabajo en realidad, como variaciones en el ángulo cenital o en el grado de contaminación atmosférica, que no aportan información sobre el cambio producido en el terreno.

Las imágenes residuales nos indicarán el cambio relativo respecto al modelo lineal calculado por la regresión, tomando cada pixel la diferencia entre el valor observado en la última fecha y el valor esperado o predicho por el modelo:

$$\text{RES}(i,j,k) = y(i,j,k) - \text{yesp}(i,j,k)$$

Donde:

RES(i,j,k) es el residuo del pixel (i,j) en la banda o variable derivada k.

y(i,j,k) es el valor observado del pixel (i,j) en la variable k para la última fecha.

yesp(i,j,k) es el valor esperado, calculado por regresión, para el pixel (i,j) y en la variable k:

$$y_{esp}(i,j,k) = A(k) + B(k) * x(i,j,k)$$

Donde:

A(k) y B(k) son los coeficientes de regresión para la variable k.

x(i,j,k) es el valor del pixel (i,j), valor observado, en la variable k durante la primera fecha.

Este tipo de cálculo se puede extender a las 4 bandas y a variables construidas por combinaciones de dos o más de las mismas.

Según sea el problema que se desee tratar, se elegirá la variable o conjunto de variables que reflejen mejor su evolución. En un estudio preliminar puede disponerse una tabla en la que aparezcan las bandas, ratios o combinaciones que más se ajusten, por su significado biofísico, a dicho problema, y a continuación, evaluar estadísticamente las óptimas, que serán empleadas sistemáticamente en los sucesivos cálculos de residuos.

En nuestro caso particular, creamos una batería de 13 variables, incluyendo diversos ratios, índices de vegetación, índices de vegetación transformados y el albedo euclidiano.

Deseábamos determinar el incremento de superficie ocupada por las aguas del embalse (algo relativamente sencillo por el fuerte cambio producido en el uso del suelo) y la posible respuesta diferencial en la reflectancia de distintas agrupaciones vegetales al producirse entre las fechas dadas unas fuertes precipitaciones que pusieron fin a un largo periodo de sequía.

Se generó un archivo multitemporal en el que se sitúan las reflectancias detectadas para cada banda y año, en un formato que permitiese su uso como INPUT para el programa BMDP1R. Dentro de sus instrucciones de control se definieron cada una de las variables en función de las reflectancias de las bandas, ejecutándose las regresiones lineales correspondientes, los cálculos de las matrices de covarianza y de correlación, y unas gráficas con los valores observados y esperados.

El conjunto de variables empleado fue el siguiente:

RD4: Radianza de la banda 4 MSS.

RD5: Radianza de la banda 5 MSS

RD6: Radianza de la banda 6 MSS.

RD7: Radianza de la banda 7 MSS.

R54: Ratio entre la banda 5 y la banda 4.

R65: Ratio entre la banda 6 y la banda 5.

R75: Ratio entre la banda 7 y la banda 5.

R64: Ratio entre la banda 6 y la banda 4.

R74: Ratio entre la banda 7 y la banda 4.

R76: Ratio entre la banda 7 y la banda 6.

T6 : Indice de vegetación transformado TVI6:

$$T6 = \text{SQRT}(\text{RD6} - \text{RD5}) / (\text{RD6} + \text{RD5}) + 0.5$$

T7: Indice de vegetación transformado TVI7:

$$T7 = \text{SQRT}(\text{RD7} - \text{RD5}) / (\text{RD7} + \text{RD5}) + 0.5$$

ALB: Albedo euclidiano:

$$\text{ALB} = \text{SQRT}(\text{RD4}^{**2} + \text{RD5}^{**2} + \text{RD6}^{**2} + \text{RD7}^{**2})$$

Se realizó un segundo cálculo de las matrices de correlación y covarianza, pero esta vez sobre los residuos de las regresiones anteriores, a través del programa BMDP4D. Con toda esta información estadística se decidió seleccionar para el cálculo de las imágenes residuales y para las siguientes fases al ratio 7/5, al ratio 5/4 y al albedo euclidiano. Algunas de las gráficas con los valores observados y esperados aparecen en la figura 2.

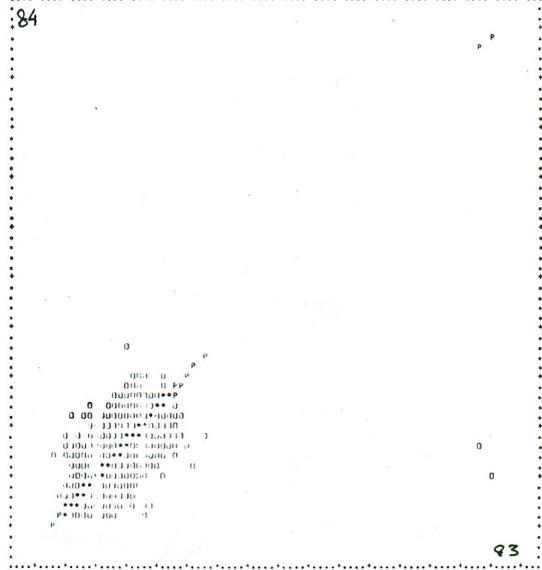
IIIc. Cálculo de los residuos

Si tenemos ya decididas las variables de trabajo, la fase IIIb se reduce considerablemente, obviando gran parte del análisis y calculando únicamente los coeficientes de regresión A(k) y B(k) y sólo para esas variables k. El siguiente paso consiste en la generación de las imágenes residuales partiendo de los coeficientes A(k) y B(k), de las definiciones de las variables y de las reflectancias para cada banda y fecha.

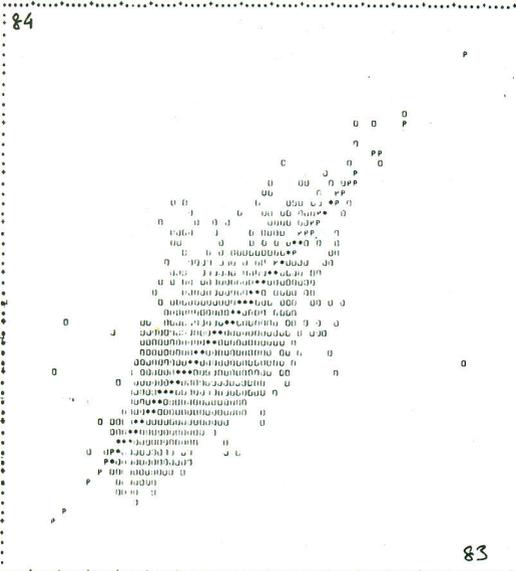
Las imágenes residuales revelan cambios relativos respecto



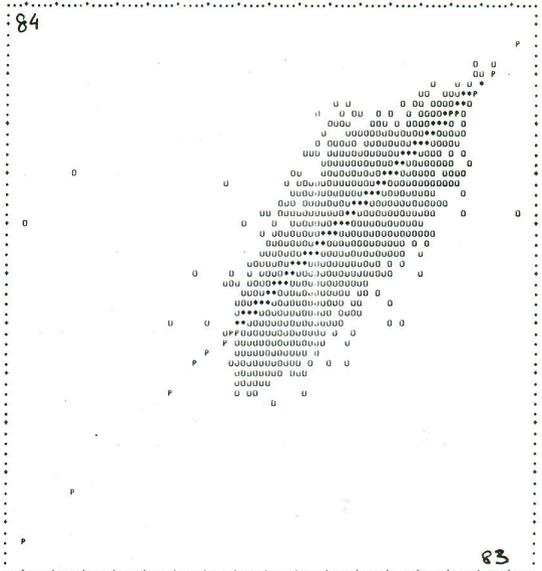
Regresión ALB.



Regresión R54.



Regresión R75.



Regresión T7.

Figura 2.

to a la línea $y_{sp}(i,j,k)=A(k)+B(k)+x(i,j,k)$, mientras que las imágenes obtenidas por simple diferencia entre las correspondientes a dos fechas dadas representan unos cambios absolutos.

FRANK (1984) indica que puede ser efectiva la simple diferencia en aquellos ambientes que muestren incrementos y decrementos de la reflectancia asociados con cambios radicales en las características del suelo (en nuestro caso, podría ser la superficie inundada), teniendo las imágenes de residuos un potencial mayor en la detección de cambios en medios semiáridos, donde los cambios se suceden en la vegetación de una forma gradual, provocando incrementos en la reflectancia no tan marcados.

Los cambios drásticos, no obstante, pueden venir reflejados claramente en las imágenes de residuos, al generar unos residuos cuyo valor absoluto se sitúa muy por encima de la media.

En el sistema desarrollado, es el programa RESMAP el encargado de la creación y edición de las imágenes de los residuos del albedo, del ratio 7/5 y del ratio 5/4, en un formato tratable por el procesador M70 y el PDP11, pasando así a la Fase IV.

FASE IV: Selección y tratamiento de las salidas.

El objetivo principal de esta fase es elaborar unos mapas de clases de cambio compatibles con los recursos disponibles para la mapificación de usos del suelo.

Las clases de cambio se determinan independientemente para cada variable, de forma interactiva con el procesador y apoyándose en la información estadística generada en el CYBER y en los histogramas producidos por el programa VIDMAP3. El mismo programa proporciona volcados de la LUT (Lock Up Table) del M70 y del vector PALXXXX donde se almacenan las clases para cada imagen residual XXXX, (MR75, MR54 y MALB). Para posteriores imágenes de la misma variable puede obtenerse una agrupación automática por intervalos espectrales de los residuos.

El programa VOLCA recibe el vector de clasificación y

realiza la lectura de la imágen situada en la memoria del procesador. Se permite seleccionar las clases que se editarán a través del plotter y el símbolo que las representará. Así pueden generarse mapas separados para las clases que se considera que manifiestan un cambio significativo.

La transformación a coordenadas U.T.M. es posible gracias a un archivo de coeficientes de calibración creado por el programa PCLBGL que tiene como entrada los valores fila y columna de cada punto de control tomados de las imágenes de la Fase II (sin "smoothing") y sus coordenadas U.T.M. tomadas de mapas a escala 1:25.000 del S.G.E.

El formato final de los datos radiométricos fueron unos mapas a escala 1:50.000, en coordenadas U.T.M., de 1 Km de lado, sobre la zona de estudio. Los residuos se agruparon en pocas clases de cambio significativo, facilitando el posterior análisis estadístico de la Fase V.

La imagen residual del ratio 5/4 (fig 5) presentaba un elevado nivel de ruido que desaconsejó su inclusión en el citado análisis. En general, se pueden apreciar unas zonas de resíduos positivos coincidentes con pastos o dehesas muy claras y zonas de residuos negativos coincidentes con los encinares más densos, definiendo prácticamente el límite del Monte de El Pardo. El incremento relativo respecto a toda la imagen del ratio 5/4 indica un viraje, también relativo, lo cual parece intuible al considerar al ratio 5/4 como un índice de senescencia.

Las imágenes residuales del ratio 7/5 (fig.4) y del albedo euclidiano (fig.3) serán examinados en la Fase V.

FASE V: Análisis estadístico de los resultados. La detección de cambios acaba en realidad en la Fase IV. La finalidad que esta fase persigue es analizar la relación que puede existir entre zonas con residuos significativos y los usos del suelo sobre los que se producen en especial con el tipo de agrupación vegetal predominante.

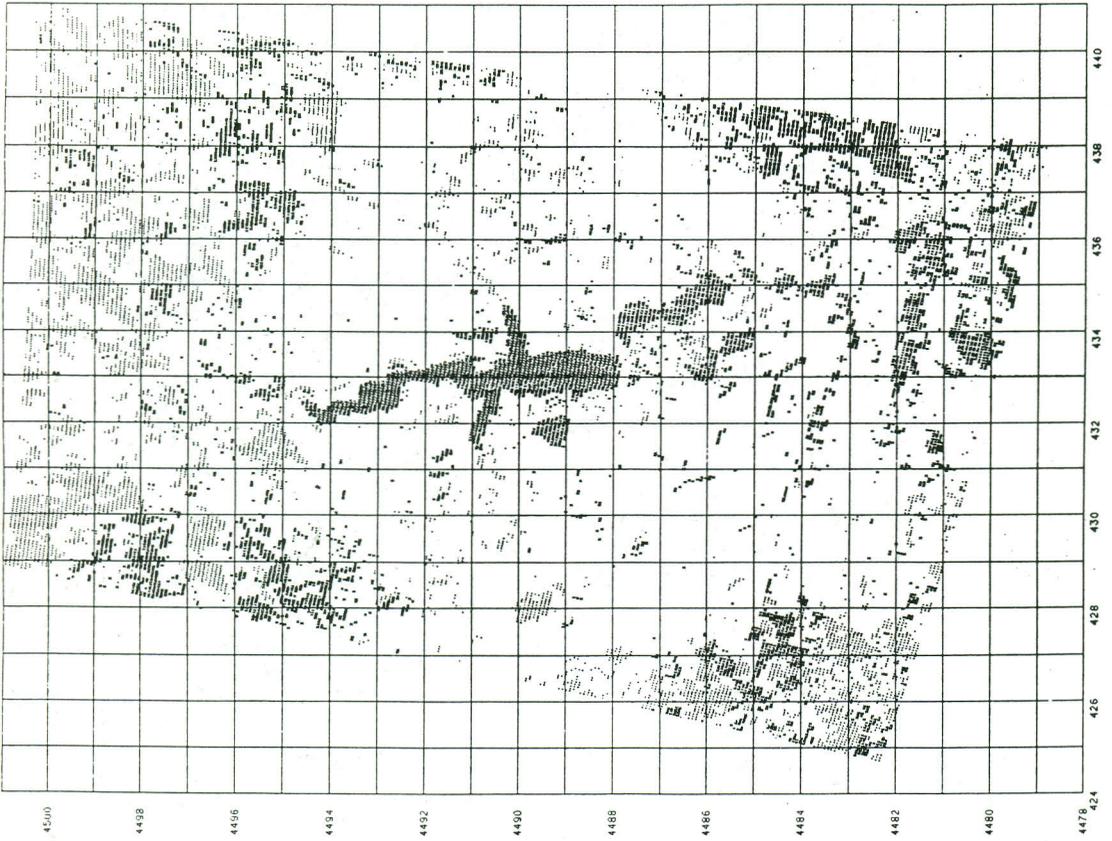


IMAGEN UTM DE RESIDUOS ALBEDO.
 ARCHIVO: MRPALB/PALALB2, F-IV
 PERIODO: SEP83-JUL84.
 CLASE 2: -0.26 A -0.09
 CLASE 3: -0.08 A -0.02
 CLASE 9: 0.02 A 0.11

CLASE 1: MAXIMO RESIDUO NEGATIVO
 CLASE 11: MAXIMO RESIDUO POSITIVO

Figura 3.

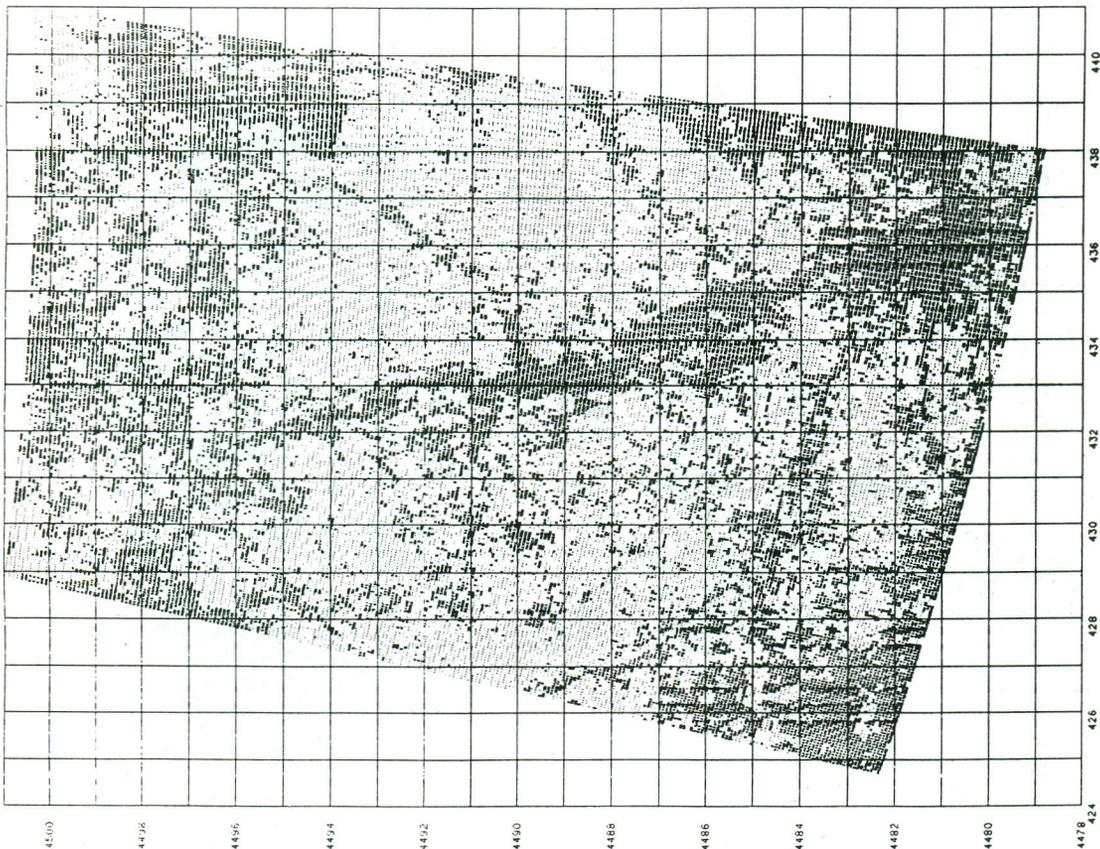


IMAGEN UTM RESIDUOS RAITU 72.
 ARCHIVOS: MPR75/PALUR75. F-IV
 CLASE 2: -2.21 A -1.32
 CLASE 3: -1.31 A -0.05
 CLASE 8: 0.05 A 1.31
 PERIODO: SEP83-JUL84.

CLASE 1: MAXIMO RESIDUO NEGATIVO
 CLASE 11: MAXIMO RESIDUO POSITIVO

Z CLASE 2
 * CLASE 3
 : CLASE 8

Figura 4.

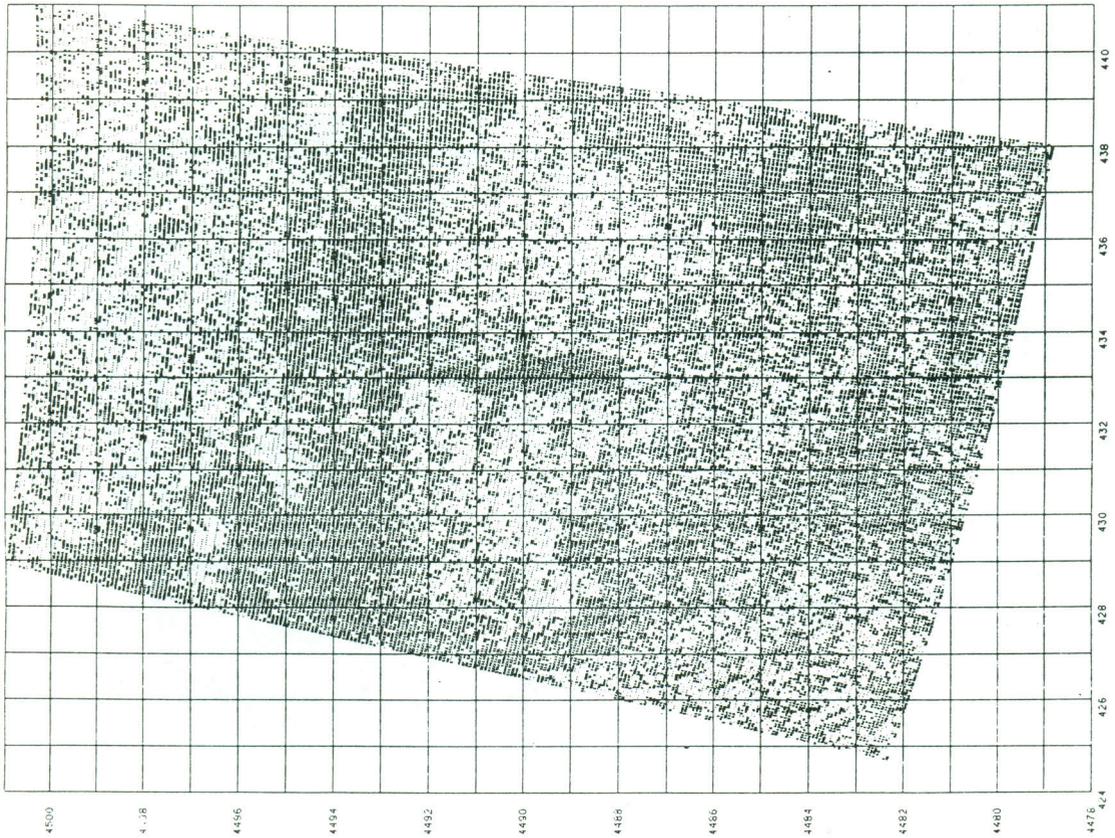


IMAGEN UTM RESIDUOS RATIO 5/4.
 MRPR54/PALUR54, PDP 11 / M70.
 PERIODO: SEP83-JUL84.
 CLASE 2: -1.52 A -0.34
 CLASE 3: -0.33 A -0.01
 CLASE 8: 0.01 A 0.33

CLASE 1: MAXIMO RESIDUO NEGATIVO
 CLASE 11: MAXIMO RESIDUO POSITIVO

Z CLASE 2
 X CLASE 3
 CLASE 8

Figura 5.

Los terrenos inundados no entran dentro del análisis, al ser su respuesta evidente, tanto en el albedo como en el ratio 7/5. En ambas variables sus píxeles ocupan la clases de máximo residuo negativo, debido a la fuerte absorción que presentan las bandas infrarrojas en las masas de agua.

El método utilizado para evaluar esas relaciones es simple: ejecución de unos test X²-Pearson sobre unas tablas de contingencia en las que figuran, para cada variable espectral (ALB y R75), la superficie ocupada por un uso del suelo y un residuo dado.

A partir de los mapas U.T.M. de residuos y de unos mapas U.T.M. actualizados de usos del suelo (hojas 533, 534, 558, y 559 del Mapa de Vegetación y Usos del Suelo de la Provincia de Madrid, escala 1:50.000, Consejería de Agricultura y Ganadería y Cátedra de Planificación de la E.T.S.I. Montes, Madrid, 1982) se delinearán unos mapas en los que cada parcela está caracterizada por un sólo uso y un único tipo de residuo.

Ese parcelario se digitaliza para conocer con cierta exactitud cada superficie. Junto con esta información se edita un archivo en el que aparecen su clase residual y su uso. Las tablas o cuadros de contingencia se generan automáticamente a partir de ese archivo.

El programa BMDP4F se ocupa del cálculo de los test de dependencia. Se le instruye con dos series de instrucciones de control, tomando en ambos casos como datos las tablas de contingencia ya mencionadas. En la primera serie se le indica que compruebe la independencia o dependencia entre todas las filas y columnas de la tabla.

Para ello, el programa calcula el estadístico T:

$$T = \sum_{i=1}^f \left(\sum_{j=1}^c \frac{((O(i,j) - E(i,j))^2) / E(i,j)}{E(i,j)} \right)$$

Donde: O(i,j) es el área observada para el uso "i" y la clase residual "j".

E(i,j) es el área esperada para el uso "i" y la clase residual "j" en el caso de que fuese correcta la hipótesis de independencia.

f es el número total de usos considerados.

c es el número de clases residuales.

Si el estadístico T supera el valor de una variable aleatoria X^2 -cuadrado con $(f-1)*(c-1)$ grados de libertad, en su 1-a cuantil, se rechazaría la hipótesis de independencia, aceptando la existencia de una dependencia entre los usos del suelo y el tipo de residuo que le afecta. Esta comprobación se realizaría con una probabilidad de confianza 1-a, siendo a el nivel de significación.

Para el albedo, el estadístico T alcanzó un valor de 1578.49, y para el ratio 7/5 el valor fue de 6938.89. En ambos casos con 22 grados de libertad se descartó la hipótesis de independencia con un a menor que 0.001.

Más interesante es la segunda serie de instrucciones de control. Se genera aquí un conjunto de tablas 2*2 del tipo:

	CLASE_j	NO_CLASE_j
USO_i		
NO_USO_i		

De esta forma podemos calcular el estadístico T para cada agrupación vegetal por separado. Si en vez del estadístico T empleamos la desviación estándar (DS):

$$DS = (FOBS - FESP) / \sqrt{FESP}$$

Donde: FOBS es el área observada.

FESP es el área esperada en el caso de independencia.

Es posible, para un determinado nivel de significación a, deducir no sólo la independencia o dependencia, sino además, si la dependencia tiende hacia la asociación o hacia la incompatibilidad (por ejemplo: que exista una fuerte dependencia entre encinares y residuos negativos tendiente hacia la

incompatibilidad y hacia la asociación entre pastos y residuos negativos, para el ratio 7/5).

La decisión para rechazar o aceptar la hipótesis de dependencia se tomará de nuevo en función del valor de una variable aleatoria chi-cuadrado, esta vez con un grado de libertad, y que para un nivel de significación de 0.005 es 7.88. Si DS es mayor, en valor absoluto, que la raíz cuadrada de 7.88 (2.807) podremos concluir que existe una dependencia, teniendo hacia la incompatibilidad si DS es negativo y hacia la asociación si DS es positivo.

Los usos del suelo reflejados por los mapas de vegetación para el Monte de El Pardo se agruparon hasta reducirlos a 25 clases de usos del suelo:

- E.....Zonas con actividades extractivas (canteras, gravas...).
- U.....Urbanizado.
- 0A....Pastos. Sedimentos detríticos silíceos.
- 0B....Pastos sobre gneis, micacitas y granito.
- 1CG...Vegetación ripícola arbórea.
- 1E....Bosques en galería.
- 2C....Secanos exclusivamente.
- 2D....Secanos a eriales suburbanos.
- 3F....Mosaico de cultivos de secano con eriales y retamares.
- 4D....Retamares.
- 4F....Jarales. Encinares dispersos.
- 4LI...Cantuesares y tomillares con encinas dispersas.
- 4LW...Cantuesares y tomillares sobre pastos.
- 5I....Encinares adhesados sobre pastos. Matorrales.
- 5J....Encinares arbóreos poco degradados.
- 5K....Encinar claro. Estratos arbustivos y subarbustivos.
- 5L....Encinar claro en mosaico con matorral y pasto.
- 5M....Encinar muy claro con labiadas y cistáceas.
- 8L....Enebral sobre roquedo. Matorral de jaras y labiadas.
- 9ABC..Repoblaciones de carrasco con encinas dispersas.
- 9ABO..Repoblaciones de carrasco con cedros, cipreses y otras coníferas ornamentales.

- 9CB...Replantaciones de piñonero sobre arcosas.
- 9CBA..Replantaciones de piñonero monoespecíficas de el
vada cubierta.
- 9CBC..Replantaciones de piñonero con encinas dispersas.
- 9CE...Pinar de piñonero de baja espesura con matorral.

Los parcelarios delineados para el albedo, junto con su codificación, aparecen en la figura 6 y los del ratio 7/5 en la figura 7.

En las tablas siguientes se resumen los valores de DS para cada uso, calculados en cada una de las tablas 2*2 generadas, tanto para el albedo como para el ratio 7/5.

USO	CLASE_3	CLASE_9		USO	CLASE_2	CLASE_8	
---	-----	-----		---	-----	-----	
URBANIZADO	6.2	-6.0		EXTRC-E.	5.4	-5.9	
PASTO-0A	-5.6	5.4		URBANIZ.	23.7	-26.0	
PASTO-0B	13.6	13.2		PASTO-0A	10.9	-12.0	
RIPI-1CG	-5.6	5.4		PASTO-0B	12.8	-14.0	
SECAN-2C	8.4	-8.2		RIPI-1CG	7.8	-8.5	
SECEC-2D	7.1	-6.9		GALER-1E	4.3	-4.7	
MOSAI-3F	-2.2	2.1	*	SECAN-2C	6.8	-7.4	
RETAM-4D	-3.3	3.2		SECEC-2D	8.4	-9.2	
JARAL-4F	-2	.1	***	MOSAI-3F	10.9	-12.0	
CANT-4LI	-6.0	5.9		RETAM-4D	8.7	-9.5	
CANT-4LW	3.7	-3.6		JARAL-4F	-4.2	4.6	
QUERQ-5I	-3.1	3.0		CANT-4LI	4.8	-5.2	
QUERQ-5J	5.6	-5.5		QUERQ-5I	-16.2	17.7	
QUERQ-5K	8.7	-8.4		QUERQ-5J	-36.9	40.5	
QUERQ-5L	-4.2	4.1		QUERQ-5K	7.8	-8.5	
QUERQ-5N	5.4	-5.3		QUERQ-5L	1.8	-2.0	*
ENEBR-8L	-2.1	2.0	*	QUERQ-5M	-9	1.0	*
PIN-9ABC	3.1	-3.1		QUERQ-5N	4.1	-4.5	
PIN-9ABO	4.6	-4.5		ENEBR-8L	6.4	-7.0	
PIN-9CB	7.2	-7.0		PIN-9ABO	3.4	-3.7	
PIN-9CBA	5.2	-5.1		PIN-9CB	5.8	-6.3	
PIN-9CBC	7.5	-7.3		PIN-9CBA	3.8	-4.2	
PIN-9CE	2.0	-1.9	*	PIN-9CBC	6.3	-6.9	

Albedo

Ratio 7/5

Las agrupaciones marcadas con asteriscos tienen valores de DS por debajo del especificado con anterioridad, aceptándose para ellas la hipótesis de independencia entre clases residuales y usos del suelo.

Si nos centramos en el parcelario del albedo, las man-

chas números 60, 61, 62, 63, 64 y 65, correspondientes a repoblaciones de coníferas, vemos que presentan una clara tendencia a asociarse con residuos **negativos** (clase residual 3, que varía entre un -0.02 y un -0.08), al igual que los pastos sobre gneis y granitos. La mancha número 54, correspondiente a secanos puros, se destaca claramente de su entorno, mostrando un decremento del albedo más pronunciado.

Los pastos sobre sedimentos detríticos (0A) muestran una tendencia hacia la asociación con residuos positivos (incremento de la relación radiación total recibida / radiación total emitida o reflejada, y limitando el calificativo de total al espectro cubierto por el sensor MSS), presentándose generalmente en los terrenos situados al norte de la tapia del Monte. La vegetación ripícola presenta, también, aumentos en el albedo (manchas 50 y 52), al igual que los cantuesares con encinas dispersas (uso 4LI) y los encinares con matorrales.

Los jarales toman los valores más bajos del estadístico DS (se favorece la hipótesis de independencia para ellos). Los pequeños valores de enebrales y de pinares de piñonero de baja espesura (9CE) pueden explicarse por el reducido número de observaciones (superficie) de cada uso.

No es ese el caso del uso 3F (mosaico de cultivos de secano con eriales y retamares), que sí tiene suficiente superficie. Puede explicarse su DS por la misma definición que aparece en los mapas de vegetación, al ser un grupo muy heterogéneo donde coexisten cultivos y matorrales.

El ratio 7/5 es uno de los índices de vegetación más utilizados. El cociente entre el infrarrojo cercano y la región roja del espectro visible da una medida de la actividad vegetativa. WALL et al. (1984) comprobaron que las superficies dedicadas a la agricultura intensiva, con riego abundante, tienen el ratio 7/5 bastante más elevado que la vegetación natural circundante. TUCKER (1979) indica como el ratio 7/5 y su derivado el TVI7 (normalizado y transformado) pueden ser empleados en el seguimiento de la biomasa de pastos y cultivos de cereales.

En el parcelario del ratio 7/5 de la zona de estudio, prácticamente todas las agrupaciones vegetales muestran una

PARCELARIO DEL ALBEDO.
ARCHIVOS : MRPAL87/PALALB2.
PERIODO : SEP83-JUL 84
FASE V.

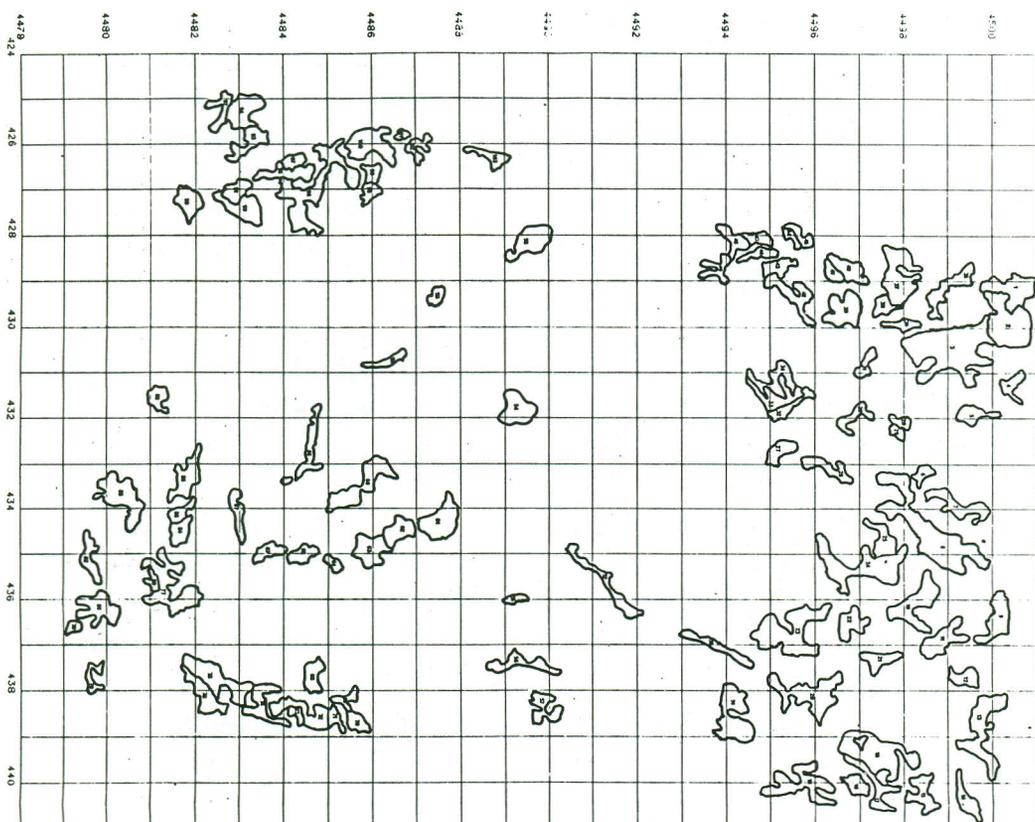


Figura 6.

PARCELARIO DEL RATIO 7/5.
PERIODO: SEP83-JUL84.
ARCHIVOS: MRPR75/PALUR75.
FASE V.

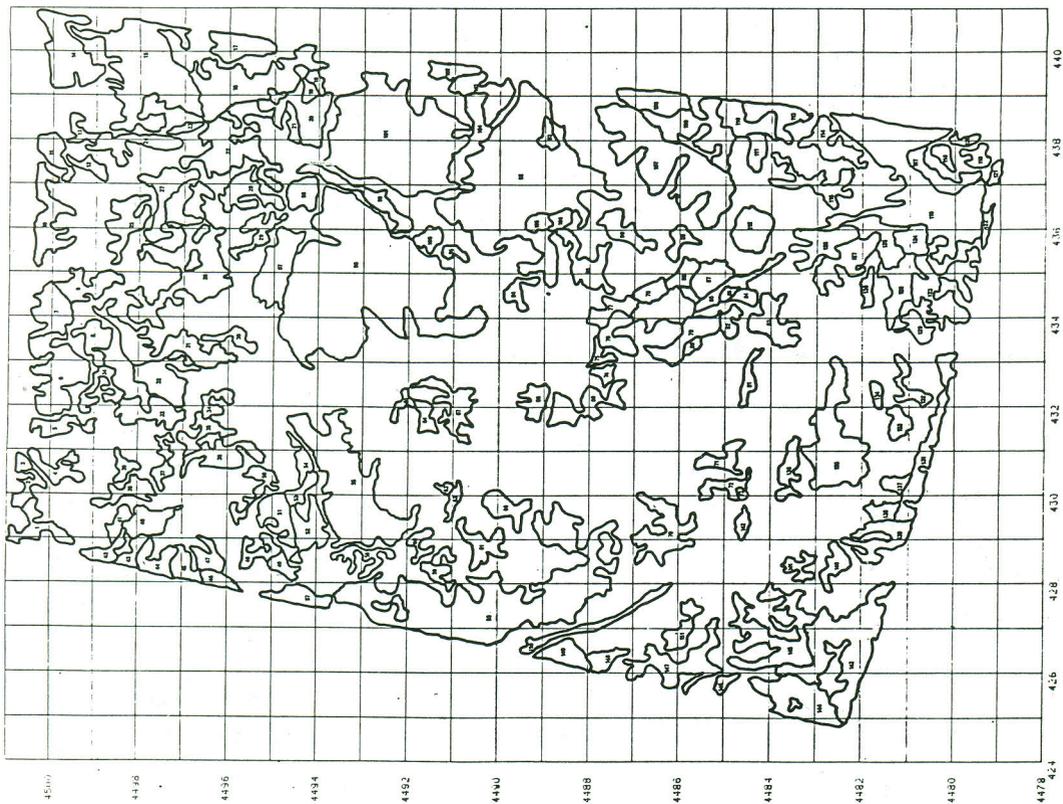


Figura 7.

tendencia hacia la asociación con la clase 3 de residuos negativos (situados entre -0.05 y -1.31), en especial, los pastos (0A y 0B), los mosaicos de cultivos y matorrales (ahora ambos presentan una respuesta espectral similar) y los retamares.

Los encinares arbóreos poco degradados (5J) ofrecen unos valores excepcionalmente altos en el estadístico DS, denotando una marcada tendencia hacia la incompatibilidad con los residuos negativos. Algo parecido ocurre con los encinares adeshados sobre pastos con matorrales (5I), prevaleciendo la influencia de las encinas (*Quercus rotundifoliae*) sobre pastos y matorrales.

Los encinares muy claros (5L y 5M) no cumplen la condición de rechazo de la hipótesis de independencia, teniendo unas cifras de DS por debajo de lo indicado para $\alpha=0.005$. La respuesta espectral del pasto debe influir decisivamente en esos usos 5L y 5M, contraponiendo su tendencia hacia la asociación con la clase 3 a la tendencia del encinar hacia la incompatibilidad con dicha clase 3.

3. Conclusiones.

1.- La técnica de regresión es un medio válido para realizar estudios multitemporales, sobre todo cuando se pretende analizar únicamente un determinado fenómeno (incremento de su superficie forestal afectada por el fuego, variación en la vegetación de zonas semiáridas,...).

El número de operaciones con coma flotante a realizar por pixel es pequeño en comparación con los distintos métodos de clasificación, por lo que se gana en rapidez de ejecución y en costo de tiempo de CPU, pudiéndose implementar en cualquier ordenador de uso general. La utilización de un procesador de imágenes incrementaría notablemente la velocidad del proceso, además de aprovechar las ventajas de la interactividad en cada una de las fases.

2.- Los cambios drásticos, en nuestro caso el incremento de superficie del embalse, se detectan fácilmente con los residuos. Las zonas incendiadas en el Monte de El Pardo durante 1985 se pondrían igualmente de manifiesto si se trataran las imágenes necesarias.

3.- Se produjeron unos cambios en la respuesta espectral de las distintas agrupaciones vegetales entre las fechas que limitan el estudio. Estos cambios se traducen en unas clases de residuos que informan de la magnitud relativa de la variación detectada. Se ha verificado la existencia de una relación de dependencia (hacia la asociación o hacia la incompatibilidad) entre residuos y usos del suelo. Las escasas excepciones que indican independencia generalmente se deben a mezclas de usos con tendencias opuestas sobre un tipo de residuos.

4.- El paso de esta fase descriptiva a una posterior que intentara investigar el porqué de esas relaciones entre residuos y usos del suelo necesitaría de un fuerte apoyo de verdad de campo, desde vuelos detallados en falso color hasta medidas de evapotranspiración "in situ".

4. Bibliografía.

-DIXON, W. J. et al. ; 1983.

BMDP Statistical Software. University of California Press.

-FRANK, T. D. ; 1984.

Assessing Change in the Surficial Character of a Semiarid Environment with Landsat Residual Images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (P.E. and R.S.), vol. 50, núm. 4, pp. 471-480.

-GONZALEZ ALONSO, F. ; 1982.

El tratamiento de los datos en los inventarios de planificación física. Tesis doctoral. E.T.S.I. Montes, Universidad Politécnica de Madrid.

-LOPEZ SORIA, S. ; 1986.

Detección de cambios en el Monte de El Pardo por regresión de imágenes de satélite Landsat. P.F.C., E.T.S.I. Montes, Universidad Politécnica de Madrid.

-MORO, J.; GONZALEZ ALONSO, F.; CUEVAS GOZALO, J. M.; 1984.

Sistema E.R.A.F.I.S. -Estimación de Recursos Agrícolas y Forestales mediante Imágenes de Satélite- Documentación técnica. Proyecto de Teledetección. Sección de Proceso de Datos. I.N.I.A., Madrid.

-NELSON, R. ; 1985.

Reducing Landsat MSS Scene Variability. P.E. and R.S.,

- vol. 51, núm. 5, pp. 583-593.
- ROBINOVE, C. J. et al. ; 1981.
Arid Land Monitoring Using Landsat Albedo Difference Images. Remote Sensing of Environment, 11, pp. 133-156.
- ROBINOVE, C. J. ; 1982.
Computation with Physical Values from Landsat Digital Data. P.E. and R.S., vol. 48, pp. 781-784.
- TUCKER, C. ; 1979.
Red and Phtographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. Remote Sensing of Environment, 8, pp. 127-150.
- WALL, S. L. et al. ; 1984.
Landsat-Based Inventory System for Agriculture in California. Remote Sensing of Environment, 14, pp. 267-278.
-