

Influencia de la alta resolución espacial de las imágenes SPOT en la separabilidad de clases espectrales

J.F. MORENO, S. GANDIA y J. DE LA RUBIA

RESUMEN

Cuando en las aplicaciones agronómicas de la Teledetección trabajamos con zonas de estudio en las que las parcelas tienen tamaños muy reducidos y existe una gran diversidad de cultivos entre parcelas contiguas, como es el caso de las zonas hortícolas de la Comunidad Valenciana, el trabajar con la máxima resolución espacial posible es un requerimiento necesario. En este momento, la máxima resolución espacial posible en imágenes de satélites es proporcionada por SPOT en su modo de funcionamiento doble, y simultáneo, pancromático y multiespectral, lo que permite trabajar con un nivel de resolución de 10 metros, a efectos de discriminación de clases espectrales y clasificación de cultivos y usos del suelo. Dado el modo de toma de las imágenes (3 bandas espectrales (XS) con 20 metros de resolución y una única banda ancha (P) con 10 metros de resolución, espectralmente superpuesta a las bandas XS1 y XS2), la combinación de las imágenes de diferente resolución ofrece una serie de alternativas diversas desde el punto de vista de su tratamiento. Nuestro objetivo es determinar el método más conveniente de transformación global de los datos a un nivel de resolución de 10 metros en todas las bandas, en función de cuál sea el que dé mejores resultados en términos de la posterior aplicación en estudios de discriminación y clasificación. En este trabajo tratamos de analizar si el aumento en la resolución espacial proporciona realmente una mayor separabilidad de las clases espectrales al disminuir el número de pixels mezcla.

1.-"Necesidad" de trabajar con alta resolución espacial

Evidentemente, el trabajar con la más alta resolución espacial disponible con imágenes de Teledetección proporcionadas por satélites artificiales en el momento presente no es una mera obsesión por intentar llegar a distinguir hasta los menores detalles. En el caso de la zona

de estudio considerada, la alta resolución espacial representa una auténtica necesidad dado el reducido tamaño medio de las parcelas y la gran diversidad de cultivos de las mismas.

La experiencia de trabajo en la zona de estudio con imágenes LANDSAT nos hacía sospechar que la resolución de 20-10 metros de SPOT podía ser de notable ayuda, en vista de los resultados que con 30 metros de resolución se

obtenían. Las imágenes multiespectrales del satélite SPOT (20 metros de resolución), en combinación con la banda pancromática de 10 metros de resolución, representan la máxima resolución espacial disponible en este momento. El limitado número de bandas de medida del satélite no parece ser una dificultad notable, pues, dado el objetivo del estudio, las disponibles pueden ser suficientes (aunque lógicamente este limitado número de bandas condiciona bastante las posibilidades de discriminación y clasificación, en particular si se compara con la abundante información proporcionada por las bandas de los satélites LANDSAT).

2.- Diferentes formas de trabajar con los 10 metros de resolución a partir de las imágenes SPOT

Como es sabido, la alta resolución espacial de las imágenes SPOT (10 metros) solo se consigue en las llamadas imágenes pancromáticas (1 sola banda), mientras que las imágenes multiespectrales (3 bandas), que son las que permiten la discriminación entre las diferentes clases espectrales, y por lo tanto su posible clasificación, se toman con una resolución de 20 metros.

Así pues, el trabajar con 10 metros de resolución a partir de las imágenes SPOT supone trabajar a la vez con imágenes multiespectrales y pancromáticas de la zona de estudio. En principio, el satélite suele tomar las imágenes en modo XS, es decir, con 20 metros de resolución, o bien en modo P, pero no en modo doble simultáneo, salvo que así sea expresamente solicitado por algún usuario. Por lo tanto, lo más simple sería adquirir imágenes XS y P de la zona (aunque si no se ha solicitado toma simultánea XS-P, tales imágenes, de existir en catálogo, serán de fechas diferentes) e intentar combinarlas. Ahora bien, como SPOT toma imágenes con ángulos de visión diferentes, la superposición de imágenes de fechas distintas con fines de clasificación (lo que requiere cuidar al máximo los niveles

radiométricos) llega a ser muy dificultosa. Lo más conveniente es, pues, cuando se desea trabajar con 10 metros de resolución, solicitar de SPOT IMAGE una programación específica del satélite.

En concreto, para este trabajo se solicitó una toma de imágenes en fechas y condiciones adecuadas para el estudio, de modo que la toma de ambas imágenes, multiespectral y pancromática, fue simultánea con un mismo instrumento de visión, para poder trabajar con ambas imágenes superponiéndolas sin dificultad. Por tratarse de una toma simultánea de dos imágenes con el mismo ángulo de visión, y puesto que el sistema de transmisión de datos a tierra solamente puede emitir simultáneamente dos imágenes, durante el tiempo de toma de la escena el otro instrumento de visión del satélite (HRV2) debió ser inutilizado. Estos problemas técnicos, además de los puramente atmosféricos o meteorológicos, dificultan y condicionan la selección de las fechas para la toma de imágenes en trabajos de este tipo. La imagen principal del estudio fue captada el 26 de Junio de 1987. Para la segunda parte del estudio la nueva imagen fue captada, en el mismo modo de funcionamiento, el 18 de Noviembre de 1987, pero aún no disponemos de ella.

Aún tratándose de una toma simultánea pancromática-multiespectral la combinación XS-P es problemática, pues la superposición no es trivial. En efecto, la toma de imágenes XS y P no es estrictamente "simultánea" ni con exactamente el mismo ángulo de visión, lo que hace que, por ejemplo, la correspondencia geográfica de los 4 puntos que determinan los límites de la escena no es la misma para las bandas XS que para la banda P. Además, el número de líneas y de pixels por línea no es tampoco el adecuado en todas las bandas. Tal como recibimos el producto, una vez realizadas las correcciones geométricas de tipo sistemático debido al modo de captación, las bandas XS constan de 3000 líneas de 3045 pixels, mientras que la banda P consta de 5999 líneas de 6093 pixels, cuando en principio la banda P debería tener justo el doble número de

líneas y de pixels por línea que las bandas XS. Este tipo de problemas hace que la combinación XS-P de SPOT no sea un mero trámite previo a los trabajos de clasificación.

3.- Métodos de interpolación utilizados para combinar imágenes de diferente resolución

La combinación de imágenes de diferente resolución requiere técnicas de interpolación distintas de las habituales, ya que éstas normalmente se emplean para la redefinición de las posiciones de los centros de los pixels en las correcciones geométricas o rectificaciones de las propias imágenes sin variar el tamaño de cada pixel. Aquí, en cambio, se trata de redefinir, a partir de una imagen original, una imagen de mayor resolución aparente, simplemente variando el tamaño de los pixels. Esto es algo también bastante usual en fotointerpretación, y el empleo de tales técnicas de aumento de resolución aparente es muy corriente en las presentaciones fotográficas de los productos o en general en formatos destinados a la interpretación visual de las imágenes. La peculiaridad que presentan las imágenes SPOT es el hecho de que junto con las 3 bandas multiespectrales de 20 metros de resolución, que son las que pretendemos interpolar, contamos con una imagen simultánea de 10 metros de resolución de la misma escena, la cual debe tenerse en cuenta a la hora de redefinir las otras 3 bandas a una resolución de 10 metros, tanto desde el punto de vista estrictamente espacial (consideraciones puramente geométricas o geográficas), como desde el punto de vista radiométrico (pues la banda pancromática representa, en términos espectrales, una banda ancha que se superpone a las bandas multiespectrales XS1 y XS2). Todas estas consideraciones hacen que la combinación pancromática-multiespectral de las imágenes SPOT se convierta en algo no trivial, con múltiples consideraciones posibles a la hora de tratar dicha combinación, lo que constituye todo un campo de estudio en el

tratamiento de imágenes de satélite de alta resolución.

El estudio de tales técnicas de combinación de imágenes aplicadas a los datos de SPOT fue abordado en las simulaciones previas al lanzamiento del satélite, y existen trabajos realizados específicamente sobre esta cuestión (el más reciente, J.C.Price,1987), pero siempre con simulaciones utilizando avión en lugar de satélite, y estimando las resoluciones "de satélite" a partir de las reales. El problema es bastante diferente, tanto desde el punto de vista espacial como radiométrico, en el caso de imágenes reales del satélite SPOT.

Existen básicamente dos métodos de abordar el trabajo con una resolución de 10 metros a partir de las imágenes SPOT: la más simple consistiría en interpolar las 3 bandas multiespectrales, pasandolas a una resolución de 10 metros, mediante cualquier método convencional de interpolación (por ejemplo, algún polinomio cúbico), sin tener en cuenta para nada la banda pancromática, de modo que tenemos en total 3 bandas con 10 metros de resolución aparente: $XS1_{10}$, $XS2_{10}$, $XS3_{10}$, y una (P) con 10 metros de resolución real. Lógicamente, estas 4 bandas no darán una información complementaria, pues las bandas $XS1_{10}$ y $XS2_{10}$ están muy correlacionadas con la banda P dada su superposición espectral, de modo que habría que aplicar técnicas matemáticas para reducir la información redundante (por ejemplo, técnicas de componentes principales).

Un segundo método, que en principio parece más coherente, se basa precisamente en el hecho de la superposición espectral de las bandas XS1, XS2 y P, lo que supone una fuerte correlación entre ellas (en la zona de estudio, $R_{XS1-P}=0.950$, $R_{XS2-P}=0.949$) y por lo tanto la existencia de un modelo funcional lineal de relación entre ambos pares de bandas, de modo que

$$X_i^n = a_m^n X_i^m + b_{(m)}^n \quad \begin{matrix} n=1,2 \\ m=0 \end{matrix}$$

donde X_i^n representa el valor radiométrico del pixel i original (20 m) de la banda n . (Para n y m se emplea la notación: 1=XS1, 2=XS2, 3=XS3, 0=P).

Los coeficientes a_m^n y $b_{(m)}^n$ pueden determinarse fácilmente mediante técnicas convencionales, sin más que tener en cuenta que la banda P debe ser reducida a una resolución de 20 metros para igualar el tamaño de los pixels a los de las bandas XS en tales cálculos de análisis de correlaciones entre bandas.

Evidentemente, tal relación lineal no es perfecta. Así, al determinar cada uno de los 4 subpixels (10 m.) derivados del pixel original (20 m) existirá un error residual $\delta_{(k)}^n$ que da cuenta de dicha variación de la relación lineal

$$x_{ik}^n = a_m^n x_{ik}^m + b_{(m)}^n + \delta_{ik(m)}^n$$

$$(k=1,2,3,4)$$

(k representa cada uno de los 4 subpixels 10 m. derivados del pixel i (20 m))

Tal error residual puede expresarse como un coeficiente corrector a la hora de determinar el valor radiométrico del pixel de cada banda XS1 ó XS2 a partir de P, de modo que en realidad el valor de cada pixel 10 m vendría dado, con un alto grado de exactitud, por

$$x_{ik}^n = (1 + \alpha_{ik(m)}^n)(a_m^n x_{ik}^m + b_{(m)}^n) =$$

$$= K_{ik(m)}^n (a_m^n x_{ik}^m + b_{(m)}^n)$$

Dicho factor corrector puede determinarse teniendo en cuenta que el promedio de los 4 nuevos pixels 10x10 resultantes debe ser igual al valor radiométrico del pixel 20x20 original en cada banda. Así, imponiendo esta condición resulta un método unívoco de determinar el valor de cada pixel en las nuevas bandas XS1₁₀, XS2₁₀ aprovechando la banda P.

El factor corrector resulta ser:

$$K_{ik(m)}^n = \frac{X_i^n}{0.25 \sum_{j=1}^4 (a_{oj}^n x_{ij}^o + b_{(o)}^n)}$$

Por tanto, el valor de cada pixel viene dado por

$$x_{ik}^n = X_i^n \frac{a_o^n x_{ik}^o + b_{(o)}^n}{0.25 \sum_{j=1}^4 (a_{oj}^n x_{ij}^o + b_{(o)}^n)}$$

Para la banda XS3 este método no es aplicable, pues la correlación es muy baja ($R_{XS3-P} = -0.118$) y el modelo lineal no es válido. Para la redefinición de los pixels de dicha banda XS3 aplicamos diversos métodos standard de interpolación. De todos los ensayados, el que mejores resultados proporciona es aquel que, utilizando como función de interpolación un polinomio cúbico adecuado, tiene en cuenta además el promediar los 4 nuevos pixels resultantes 10x10 al valor del pixel original 20x20, para de este modo no variar sensiblemente los niveles radiométricos globales y poder seguir aplicando índices de vegetación usuales en Teledetección manteniendo su significado físico.

4.- Influencia de la mayor resolución espacial en la separabilidad de clases espectrales

Evidentemente, una mayor resolución espacial no tiene por qué suponer, a priori, una mayor separabilidad de las clases espectrales y por lo tanto un mayor poder de discriminación. Como es lógico, esto depende de la zona de estudio en la que se trabaje. Si la zona de estudio tiene parcelas de tamaño comparable —o incluso menor— al propio tamaño del pixel, y

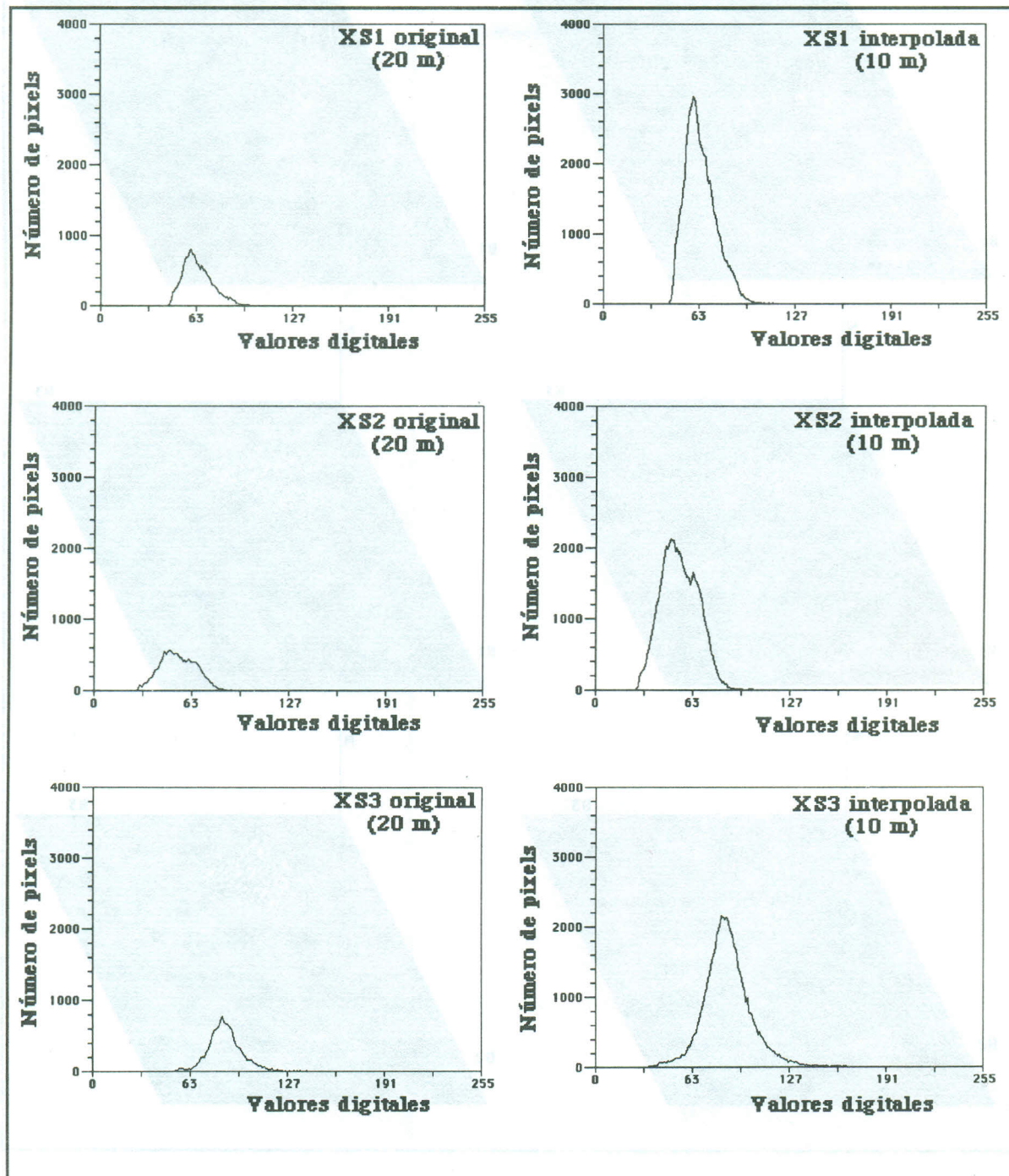


Fig. 1.- Histogramas de cada una de las 3 bandas originales (20 m) y de las 3 bandas interpoladas resultantes (10 m) correspondientes a la imagen de la zona de estudio

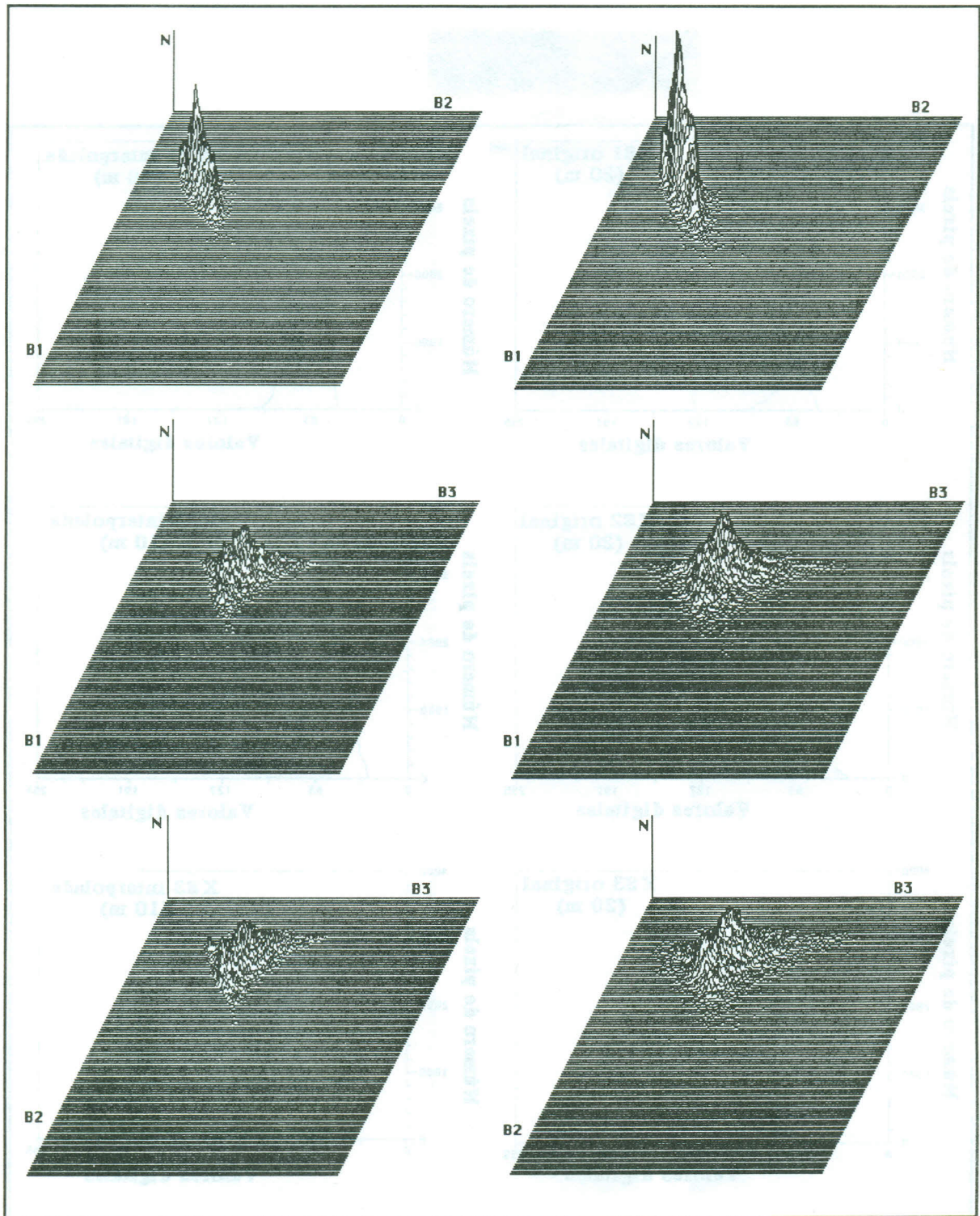


Fig. 2.-Histogramas bidimensionales para cada par de bandas originales (20 m) y cada par de bandas interpoladas resultantes (10 m) correspondientes a la imagen de la zona de estudio. Se aprecia el mayor poder de separabilidad que tienen las bandas con 10 metros de resolución frente a las de 20 metros.

si, además, entre parcelas contiguas hay diversidad de cultivos, entonces habrá una gran cantidad de pixels no puros en la imagen, y no ya pixels de borde entre dos clases, sino pixels mezcla de varias clases. En tales casos, el aumento de la resolución espacial supone un tamaño de pixel más pequeño y por lo tanto una disminución del número de pixels no puros, lo que mejora el poder de discriminación, para lo cual debe ser siempre el tamaño del pixel menor que el tamaño de los objetos básicos (parcelas) de la escena estudiada. Si por el contrario la escena estudiada tuviese una estructura de cultivos con clases espacialmente extensas y homogéneas, la alta resolución no sólo no aporta nada sino que aumenta generalmente los problemas al introducir una mayor dispersión (variabilidad interna) dentro de cada clase.

Este tipo de problemas fue ya planteado en las simulaciones previas al lanzamiento de SPOT (J.L.Cushnie, 1987), y así se encuentran en la literatura abundantes trabajos sobre la conveniencia o no de una alta resolución.

En nuestra opinión, el debate carece de sentido. En nuestra zona de estudio tenemos dos claros ejemplos de la influencia de la alta resolución en la separabilidad de clases espectrales. En la zona hortícola al suroeste de la Albufera valenciana (término municipal de Sollana), en una zona-test considerada de 400 pixels de 20 m. (1600 pixels de 10 m.), de trabajar con 20 metros de resolución tendríamos 140 pixels no puros (35%), mientras que al trabajar con 10 metros de resolución tenemos sólo 258 (16%) pixels no puros. Este factor de la disminución de pixels mezcla contribuye notablemente a mejorar la clasificación, y así, en esta zona hortícola se están obteniendo mejores resultados con los datos de 10 metros de resolución. En cambio, en la zona arrocera al sur de la Albufera, caracterizada por ser espacialmente extensa y relativamente homogénea, y contigua a la zona hortícola, la aplicación de la alta resolución no sólo no mejora los resultados sino que llegan a distinguirse elementos que dificultan la clasificación de algunos pixels en una zona que sabemos es homogénea.

Así, dependiendo de la zona en que estemos, la alta resolución será útil o no. En el caso de la zona hortícola es indispensable. Además, una resolución de 10 metros parece ser "suficiente", en términos espaciales, dadas las características de la zona.

Más problemática parece ser la cuestión radiométrica. En efecto, SPOT sólo cuenta con 3 bandas espectrales, y para el objetivo propuesto en la zona de estudio tales bandas parecen ser suficientes, pero lógicamente el poder de discriminación está bastante limitado con tan reducido número de bandas. Los métodos de interpolación empleados han procurado cuidar al máximo los niveles radiométricos, y así, como se aprecia en las gráficas que se muestran en la figura 1, las bandas 10 m resultantes conservan los niveles radiométricos de las bandas 20 m originales, y además, como puede verse en los histogramas bidimensionales de la figura 2, la dispersión aumenta al aumentar la resolución, y por lo tanto aumenta el poder de separabilidad y discriminación. Ahora hay que comprobar que tal mayor separabilidad en los histogramas se traduce realmente en unos mejores resultados de clasificación.

5.- Disponibilidad de datos de campo para estudios de discriminación y clasificación

La realización de este tipo de estudios requiere disponer de abundantes datos de campo (parcelas de ensayo y parcelas-test), actualizados a la fecha de la imagen del satélite, y absolutamente fiables y completos, es decir, datos tomados por personal especializado sobre el propio campo, y conocimiento, no sólo del tipo de cultivo, sino también de otros datos de interés (edad, estado,...). Afortunadamente, contamos con los datos suministrados por un exhaustivo trabajo de campo llevado a cabo por los servicios de la Consellería de Agricultura, justamente en las fechas a las que corresponden las dos imágenes SPOT objeto de estudio.

De este modo, tenemos un número suficiente de parcelas de ensayo para poder hacer un tratamiento estadísticamente válido en cuanto a la metodología de clasificación, y además contamos con abundantes parcelas-test para validar significativamente el método.

6.- Resultados de clasificación

Nuestro trabajo sigue fundamentalmente 2 líneas paralelas:

En primer lugar, hacemos un estudio detallado y minucioso de una zona limitada de la imagen (cuadrado de 256 x 256 pixels), analizando prácticamente todas las parcelas de la misma, pues disponemos de información. La elección de la zona se ha realizado de modo que sea una zona-test adecuada, por sus características de cultivos, para ensayar metodología de trabajo.

Además, puesto que el objetivo final es el poder clasificar zonas extensas —ya que es en estas zonas extensas donde los métodos de teledetección pueden competir y superar en eficacia a las técnicas de censado tradicionales—, aplicamos lo desarrollado en la zona-test elegida a toda la escena SPOT (60x60 Km). Como el objetivo es dar el resultado en unidades de superficie, para calcular la equivalencia número de pixels-superficie en una escena completa hay que hacer correcciones geométricas de la imagen un tanto complejas, sobre todo teniendo en cuenta el enorme volumen de datos que supone trabajar con escenas enteras en imágenes de tan alta resolución y los problemas informáticos que esto conlleva en cuanto a memoria de almacenamiento y tiempo de cálculo, además de las dificultades que introduce la toma oblicua (fuera de la vertical) de imágenes por el satélite SPOT. Todo ello hace que haya que desarrollar métodos de trabajo específicos para el estudio de zonas extensas que pueden no tenerse en cuenta en zonas pequeñas.

Los resultados obtenidos hasta el momento deben considerarse como preliminares, y se basan fundamentalmente en la

aplicación de 3 métodos diferentes: clasificación no estadística (supervisada), basada en el método de tabla de consulta, (conjuntamente con la utilización de máscaras definidas a partir de índices de vegetación), clasificación estadística supervisada aplicando técnicas de análisis discriminante, con funciones discriminantes lineales, y clasificación estadística automática no supervisada (clustering).

El método que mejores resultados ha proporcionado ha sido el basado en las técnicas de análisis discriminante. Las funciones discriminantes canónicas más adecuadas para la clasificación de las 11 clases consideradas, después del tratamiento estadístico efectuado, resultan ser las siguientes:

$$\text{Función 1} = 0.021 \text{ BANDA1} + 0.195 \text{ BANDA2} + 0.087 \text{ BANDA3} - 19.116$$

$$\text{Función 2} = 0.162 \text{ BANDA1} - 0.162 \text{ BANDA2} + 0.060 \text{ BANDA3} - 7.733$$

$$\text{Función 3} = -0.293 \text{ BANDA1} + 0.243 \text{ BANDA2} + 0.052 \text{ BANDA3} + 2.235$$

De las 3 funciones consideradas en el análisis discriminante, la más significativa es la primera, con un 90.67 % de la varianza (valor propio 7.54), mientras que la segunda función supone un 7.44 % de la varianza (valor propio 0.62), y la tercera función supone un 1.89 % de la varianza (valor propio 0.16).

Sobre la base del establecimiento de 5 clases espectrales a discriminar (arroz, cítricos, suelo no cultivado-zona urbana, frutales (no cítricos) y herbáceos) los resultados son bastante aceptables, si bien la discriminación entre diferentes cultivos herbáceos parece problemática, y si se pretende llegar a discriminar un número importante de clases los resultados son inaceptables desde el punto de vista de la operatividad del uso de la Teledetección en aplicaciones de este tipo, (pues se alcanzan precisiones por debajo del 60%). No obstante, hay que tener en cuenta que el trabajo con alta resolución requiere aplicar técnicas más avanzadas de clasificación para poder sacarle todo el potencial partido a los

datos, tanto desde el punto de vista de técnicas de clasificación en el sentido puramente estadístico, como la consideración de aspectos espaciales de contexto y textura adicionalmente a los radiométricos o espectrales. Las técnicas de filtrado resultan también interesantes, pero sólo si se pretenden discriminar pocas clases genéricas. Además, los métodos de separación de pixels puros y pixels mezcla pueden ayudar a refinar la clasificación.

Con todo, nos encontramos en una fase del trabajo en la que aún no hemos explotado al máximo las posibilidades de la alta resolución y por lo tanto no podemos valorar hasta qué punto se puede llegar en la precisión de las clasificaciones.

7.- Conclusiones

En vista de los resultados obtenidos, parece evidente que el método que mejores resultados proporciona es la interpolación de las bandas XS1 y XS2 con ayuda de la banda pancromática (BP) aprovechando su superposición espectral, y la interpolación de la banda XS3 mediante la aproximación de polinomio cúbico con la consideración adicional de promediar el valor de los 4 pixels resultantes al valor del pixel original, con el fin

de no variar sensiblemente los valores radiométricos globales.

El mantenimiento de los niveles radiométricos hace que sea posible seguir utilizando índices de vegetación usuales en Teledetección (como el clásico XS3-XS2 (IRP-R)), manteniendo tal índice su significado físico, y por lo tanto la validez de su aplicación.

8.- Bibliografía

Cushnie, J.L., 1987, The interactive effect of spatial resolution and degree of internal variability within land-cover types on classification accuracies, *Int. J. Remote Sensing*, **8**, 15.

Price, J.C., 1987, Combining Panchromatic and Multispectral Imagery from Dual Resolution Satellite Instruments, *Remote Sensing of Environment*, **21**, 119.

AGRADECIMIENTO

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la Consellería de Agricultura y Pesca de la Generalitat Valenciana por su colaboración y financiación del proyecto.

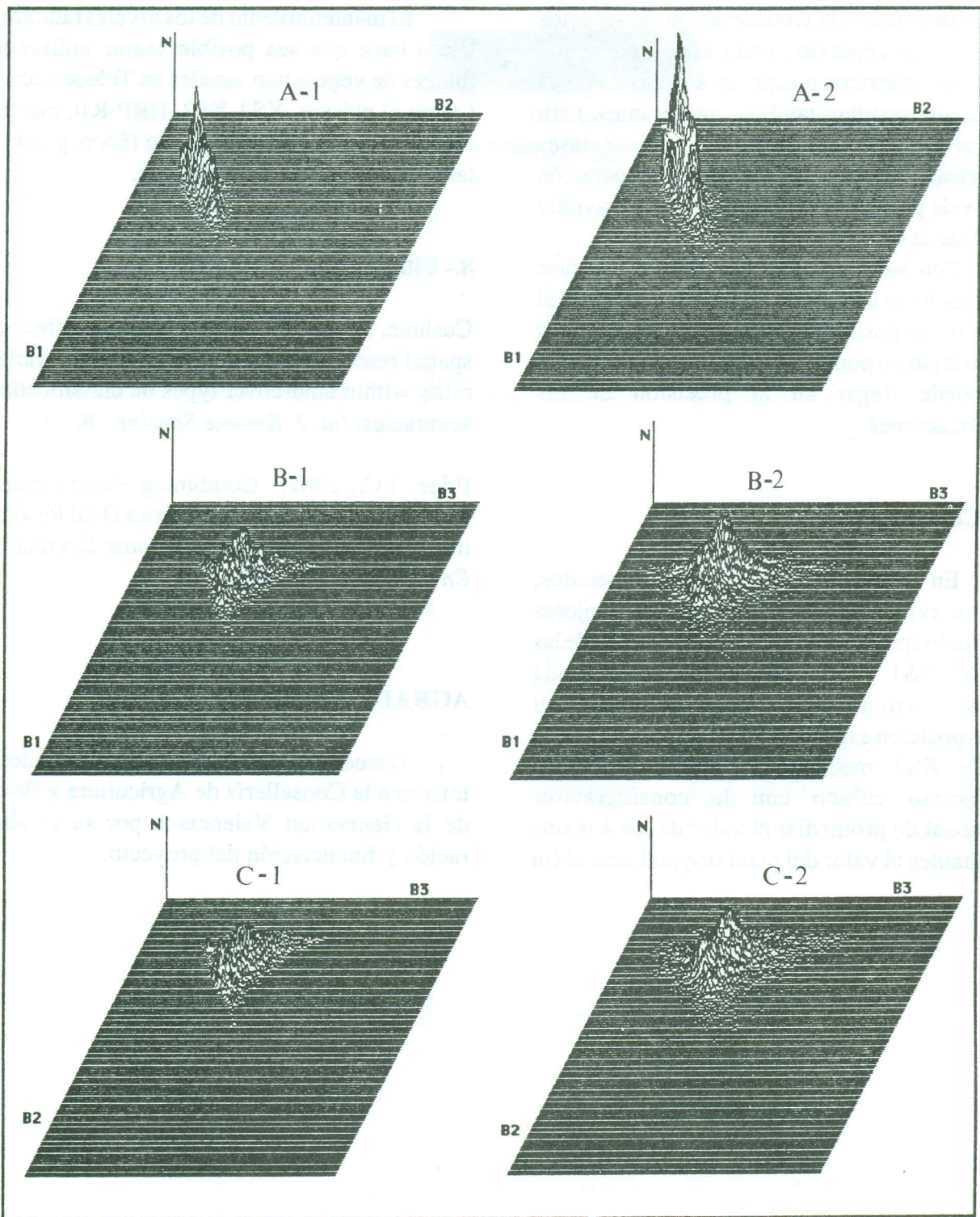


Fig. 2.-Histogramas bidimensionales para cada par de bandas originales (20 m) y cada par de bandas interpoladas resultantes (10 m) correspondientes a la imagen de la zona de estudio. Se aprecia el mayor poder de separabilidad que tienen las bandas con 10 metros de resolución frente a las de 20 metros.

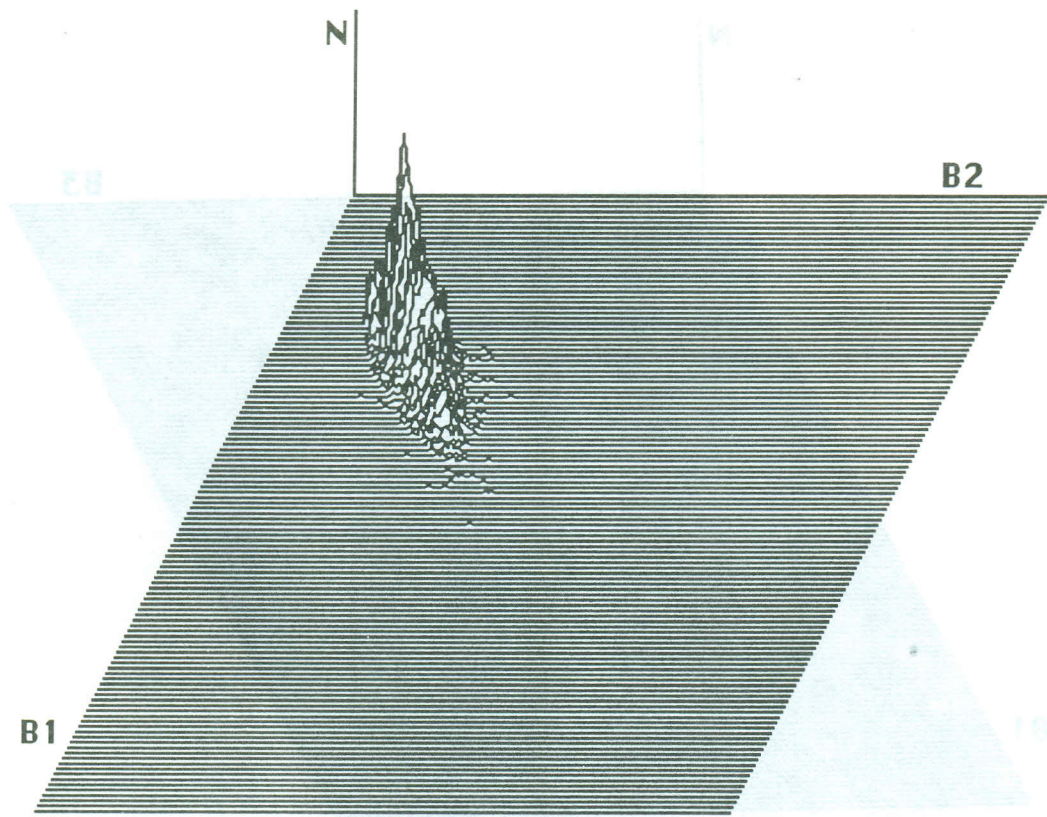


Fig.: A-1

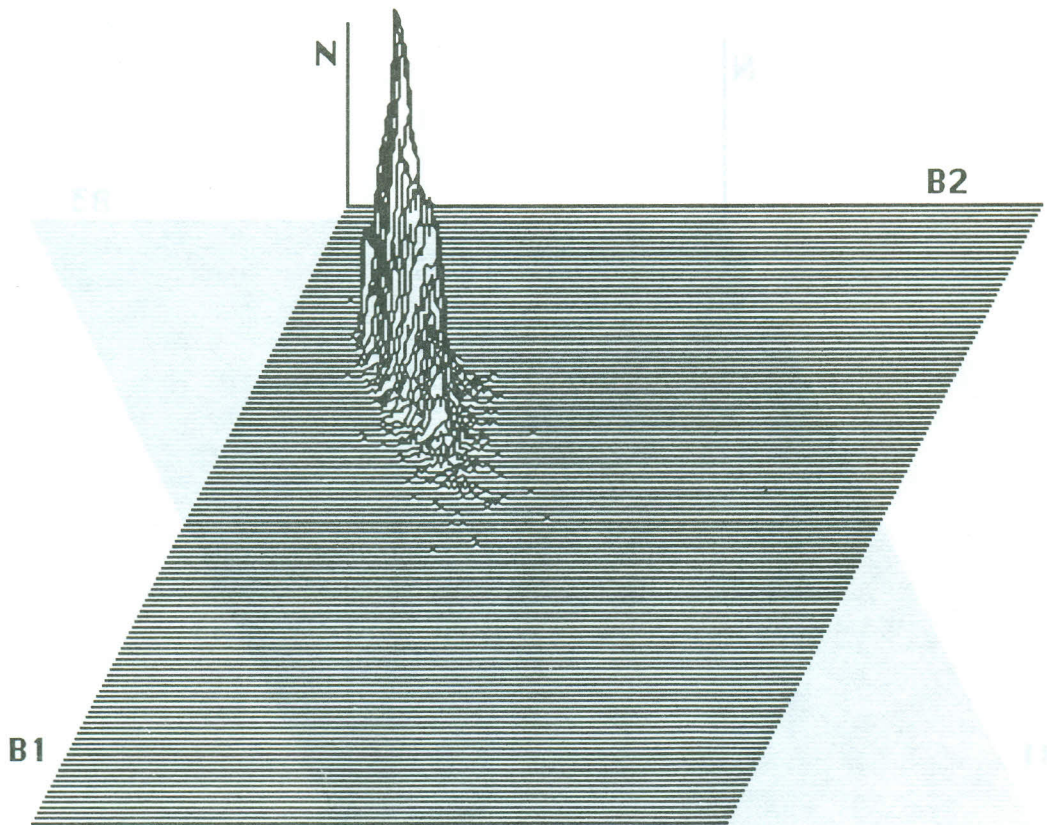


Fig.: A-2

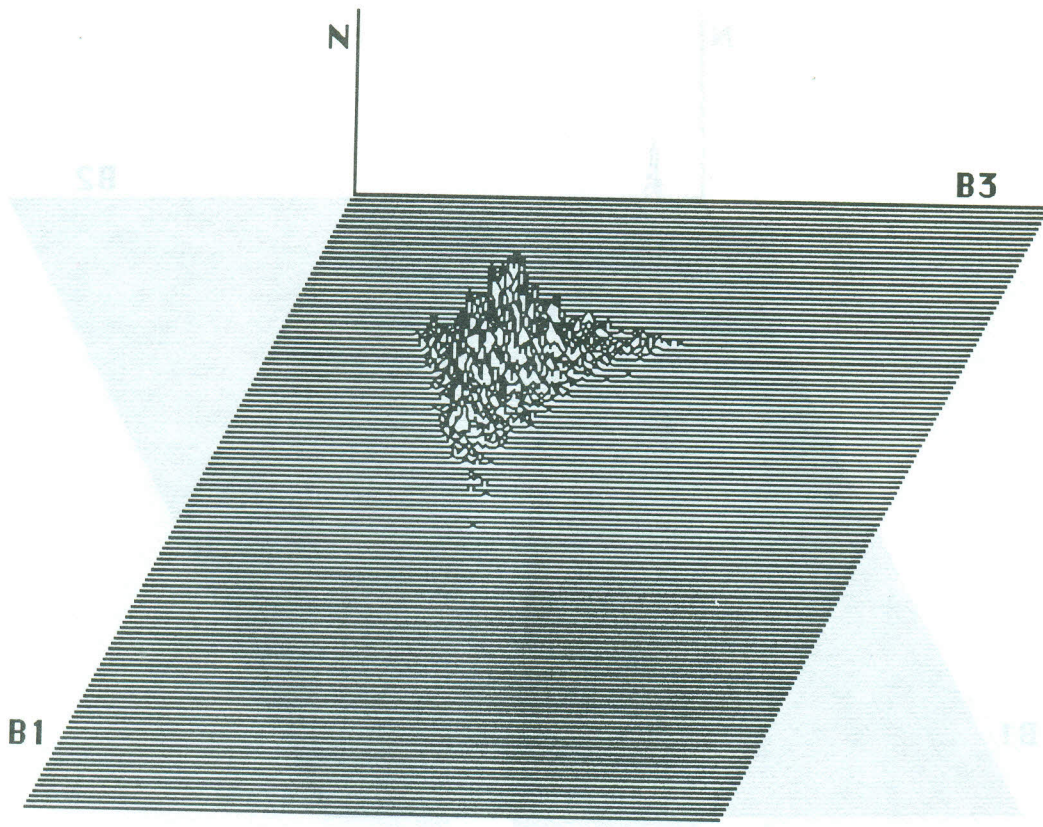


Fig.:B-1

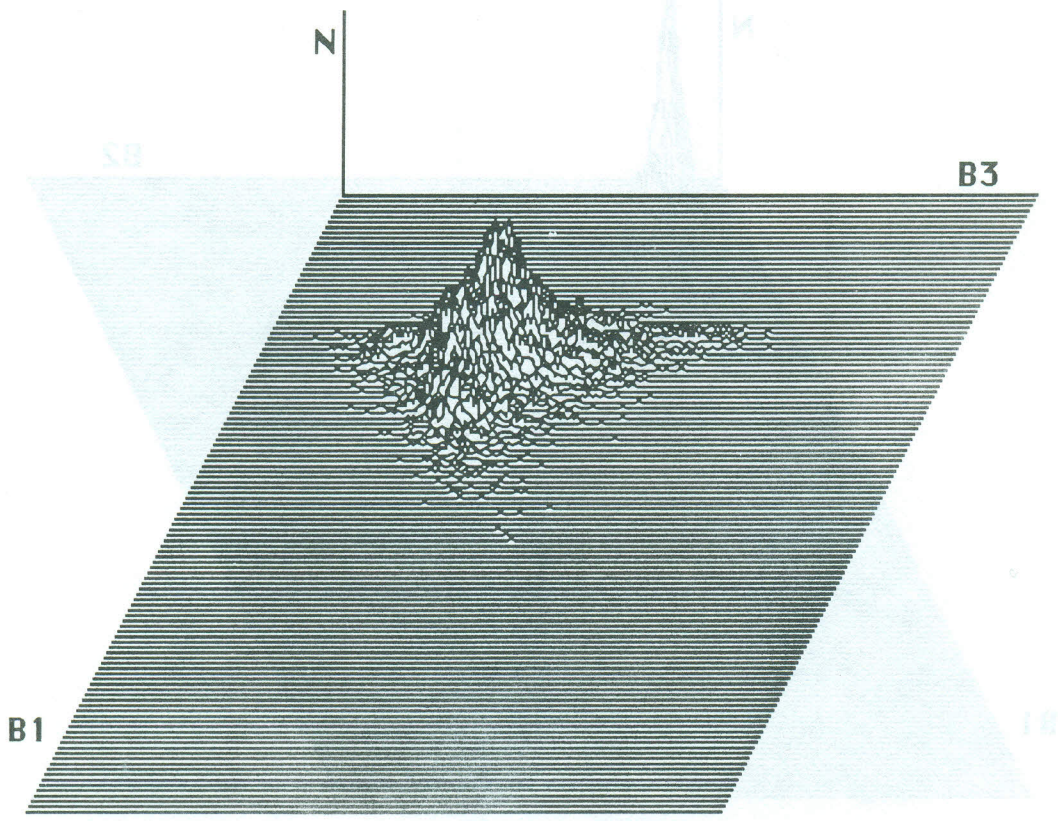


Fig.:B-2

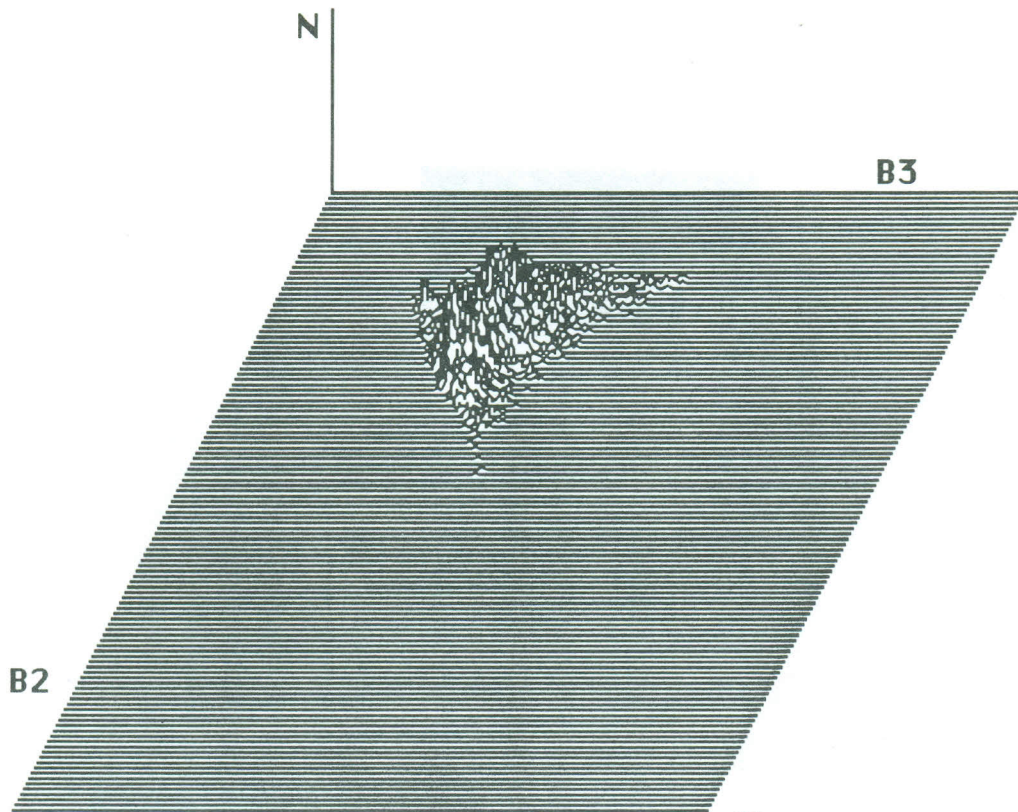


Fig.:C-1

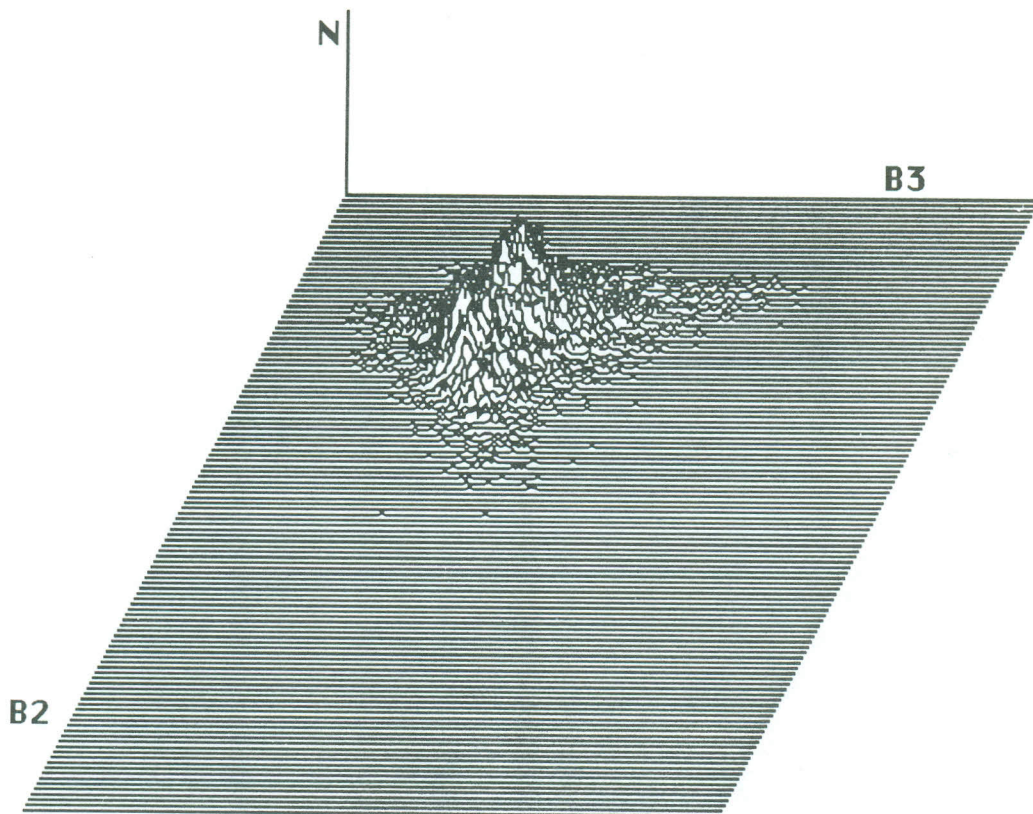


Fig.:C-2