

**DELIMITACION DE UNIDADES HOMOGENEAS DEL
RELIEVE A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL
DE ELEVACIONES**

POR

JOSÉ IGNACIO BARREDO CANO
y JOAQUÍN BOSQUE-SENDRA

Introducción

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) se han integrado en el mundo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofreciendo una serie de aplicaciones y diferentes opciones de utilización, una de estas opciones es la generación de nuevos datos espaciales a partir de los MDE, datos tales como pendientes, orientaciones, efectos de iluminación, representaciones en 2,5D y otros, son frecuentemente desarrollados a partir de los MDE. Dentro de este conjunto de posibilidades que ofrecen los MDE, planteamos aquí la implementación de un modelo de unidades homogéneas del relieve a partir de un MDE, partiendo para su desarrollo desde la obtención inicial del MDE.

El modelo de unidades homogéneas del relieve a desarrollar corresponde a la cuenca del lago de Valencia, en Venezuela, la cual ofrece diferentes formas fisiográficas que nos permitirán verificar así la capacidad del procedimiento planteado para la definición de dichas unidades.

José Ignacio Barredo Cano, Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares.

Joaquín Bosque Sendra, Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares; su labor se encuadra dentro del proyecto AMB94-1017, financiado por la CICYT.

Estudios Geográficos
Tomo LVII, n.º 225, octubre-diciembre 1996

Aspectos generales de los Modelos Digitales de Elevación

Un MDE o modelo topográfico digital (MTD), «es cualquier representación en soporte informático (digital) de una superficie topográfica» (Sircar y Cebrián, 1990:13). Considerando esta definición, se entienden los MDE como un caso específico de un tipo de modelo más general, como es el modelo digital del terreno (MDT), el cual en la actualidad se utiliza «para aludir a los SIG, que incluyen, además de la topografía, otras propiedades del terreno: tipos de suelos, vegetación, hidrografía, red vial, etc.» (Cebrián y Mark, 1986: 293). Bosque (1992), indica en relación a las variables susceptibles de ser representadas a través de un MDT, que pueden incluirse aquellas que cumplan ciertas características, como mantener una continuidad espacial de la variación sin que existan saltos bruscos en el eje z, así, elementos como las precipitaciones, las temperaturas, la acidez o basicidad de los suelos, el número de habitantes, la densidad de población, etc., pueden ser representadas y analizadas en un MDT.

Nosotros nos centraremos en este apartado en los MDE, ya que a este grupo pertenece el modelo que desarrollaremos inicialmente, el cual únicamente representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994), es decir, las coordenadas x, y, z; en donde z es la altitud.

El campo de aplicaciones de los MDE es extenso, siendo además en la actualidad una herramienta que se incorpora con facilidad a distintos fines, tanto de carácter ambiental como otros múltiples; Sircar y Cebrián (1990) y Cebrián y Mark (1986), realizaron una revisión de las principales aplicaciones de los MDE, entre las que destacan:

1. Producción de mapas base a partir de levantamientos topográficos, o mediante procedimientos fotogramétricos.
2. Ciencias de la tierra: los MDE facilitan datos para el estudio del relieve, pendientes, geoformas, definición de cuencas fluviales y redes de drenaje.
3. Ingeniería de montes: cálculo de áreas de intervisibilidad, correlación entre técnicas de explotación en la erosión del suelo, en la contaminación de las aguas y en repoblación forestal.

4. Planificación urbana y regional: planificación de la red de abastecimiento de aguas y de conducción de aguas residuales de una ciudad (para este caso ver Barredo, 1996).

5. Ingeniería civil y minas: cálculo de capacidad de pantanos, movimientos de tierras para trazado de autopistas, etc.

6. Aplicaciones militares: desde elaboración de mapas topográficos, hasta la determinación de rutas óptimas y análisis de intervisibilidad.

Weibel y Heller (1991), por otra parte, destacan la importancia de los MDE para la realización de estudios de impacto ambiental, localización industrial y estudios de capacidad de cultivos.

La representación de un MDE en un soporte informático, puede realizarse básicamente a través de dos estructuras de datos: la matriz regular de elevaciones (modelo *raster*) y la red de triángulos irregulares (TIN, *triangulated irregular network*, en el modelo vectorial) (Weibel y Heller, 1991), sin embargo, otras estructuras menos usuales también son utilizadas, como las matrices jerárquicas escalables (*quadtree* en modelo *raster*), contornos (vectorial) y otras (Felicísimo, 1994).

Como hemos comentado, las estructuras de datos más extendidas en su utilización son la TIN y la matriz regular de elevaciones. La estructura TIN se representa en el modelo de datos vectorial, en este caso una serie de puntos irregularmente distribuidos y líneas que unen dichos puntos, forman una red triangular de altitudes, ya que cada punto contiene el atributo de su altitud (z), de igual forma que cada línea, o punto que forma parte de una línea (Felicísimo, 1994); aquí el MDE queda conformado por una serie de triángulos adyacentes que describen la superficie del terreno con diferente grado de detalle, dependiendo de la complejidad del mismo; esta estructura de datos mantiene los aspectos generales del modelo de datos vectorial en lo referente a las relaciones topológicas de los elementos espaciales contenidos en ella.

La representación de la matriz regular puede considerarse como una capa *raster* con todas sus propiedades, con la característica de representar una variable continua, a partir de la cual se pueden desarrollar una serie de procedimientos aritméticos con el fin de obtener nueva información a partir del MDE original.

En este último modelo de datos, los valores o códigos, representan el valor medio de altitud de los *píxeles*¹, o unidades básicas de superficie, que «teselan» el terreno con una distribución regular (Felicísimo, 1994: 31); con lo cual se establece la consecuencia de que el tratamiento de este tipo de estructura de datos, es similar al de cualquier capa en modelo *raster*.

Esta estructura presenta las ventajas de la simplificación de los algoritmos de cálculo (Cebrián y Mark, 1986), lo que repercute positivamente en la velocidad de aplicación de diferentes procesos de obtención de nuevos datos, ahorrando esfuerzos en horas/hombre/equipos, sin embargo, su principal inconveniente ha sido señalado como la artificialidad en la representación de la variable concreta representada (Cebrián y Mark, 1986), lo que puede ocasionar grandes volúmenes de información redundante (en áreas planas) o ciertas insuficiencias en zonas accidentadas; sin embargo, esta circunstancia está en estrecha relación con la resolución espacial² de la capa, siendo ésta fijada por el ente generador del MDE, la cual en caso de ser alta puede subsanar esta deficiencia, aunque generando un mayor volumen de datos, lo que produce consecuencias como la necesidad de mayor volumen de almacenamiento y mayor consumo de tiempo para la ejecución de ciertos algoritmos de cálculo.

Podemos ver que las dos principales estructuras de representación de MDE en un entorno SIG, presentan características notablemente diferentes en la forma de organizar y estructurar los datos de altitudes de la superficie del terreno, lo cual ocasiona asimismo distintos procedimientos de análisis para cada una de estas dos estructuras de datos.

Considerando lo anterior, debemos analizar una serie de elementos antes de elegir la estructura de datos para el MDE a implementar, de los cuales no escapan las limitaciones de los equipos y *software* de que dispongamos para este trabajo.

¹ El término *pixel* está formado a partir de la contracción de las palabras *picture element*, este representa la unidad más pequeña de información en una capa *raster* o una imagen proveniente de un *scanner* (Burrough, 1986: 181), los *píxeles* representan cada una de las celdas que pueblan este tipo de capas.

² El término resolución espacial es frecuentemente utilizado en el campo de la tele-detección, sin embargo, es aplicable en el entorno de los SIG como el objeto más pequeño que puede ser representado en una capa *raster*, estando estrechamente relacionada con el tamaño de *pixel*, el cual fija finalmente la resolución espacial de una capa.

Un aspecto fundamental en la diferencia entre ambos modelos de datos, estriba en la forma «de estructurar los datos, en la complejidad de la referenciación interna o topología de los objetos representados y en los procesos de tratamiento que estas circunstancias permiten o exigen» (Felicísimo, 1994: 35).

Sin embargo, existen ciertos elementos que nos avocan al uso de una estructura matricial para la implementación del MDE en el presente trabajo, tales como la descripción de una variable continua, para las cuales las representaciones *raster* se adaptan mejor (Berry, 1988), la mayor facilidad de implementación y análisis del MDE en esta estructura de datos (Dolton y Dueker, 1986) y la adecuada representación de las zonas de relieve accidentado, a pesar de perder definición de detalles en zonas planas (Carter, 1988); asimismo, Sircar y Cebrián (1990:15) plantean el uso de la matriz regular por considerarla «la estructura más genérica y operativa». Por otra parte, el *software* de que disponemos para la realización de este trabajo únicamente soporta capas en modelo *raster*, este es el programa de SIG *raster* IDRISI (Eastman, 1992).

En este sentido, importantes entes de carácter nacional como el *United States Geological Survey* (USGS) en su proyecto de generación de MDE de gran calidad, utilizan el modelo de datos *raster* para la representación de los mismos, de igual manera que los MDE comercializados actualmente aquí por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Caracterización fisiográfica de la cuenca del lago de Valencia

La cuenca del lago de Valencia se localiza fisiográficamente en la Cordillera del Caribe, en esta cuenca, la planicie del lago de Valencia se ubica entre las Serranías del Litoral y del Interior, constituyéndose así una cuenca endorreica que desagua en dicho lago, esta cuenta con una superficie de unos 3.000 Km².

En la cuenca del lago de Valencia se presentan tres paisajes fisiográficos bien diferenciados: la Serranía del Litoral, la planicie del lago de Valencia y la Serranía del Interior; los tres tienen un sentido paralelo con dirección este-oeste, ubicándose las tres formas fisiográficas de norte a sur en el orden mencionado.

La Serranía del Litoral es un bloque tectónico con orientación este-oeste, controlado por la falla del Caribe al norte y la falla de la Victoria al sur. La zona comprendida por la Serranía del Litoral cuenta con altitudes que alcanzan los 2.400 m, con un promedio en la divisoria de aguas de unos 1.800 a 2.000 m (Guevara, 1983), fuertes pendientes y en general un paisaje con un relieve muy abrupto, esta serranía tiene según Guevara (1983: 44) características de juventud fisiográfica «manifestadas por sus altos picos, fuertes pendientes y valles en forma de V», lo que produce un relieve que presenta entalles profundos y crestas elevadas, con pendientes que en ciertas zonas superan el 80%.

La zona correspondiente a la Serranía del Interior tiene una altura media entre 1000 y 1200 m, mucho más uniforme que la Serranía del Litoral (Guevara, 1983: 46) y con un relieve menos accidentado, lo que genera un paisaje menos abrupto. Esta serranía se diferencia asimismo de la Serranía del Litoral por tener varias filas en sentido paralelo en vez de una sola.

La porción de la cuenca perteneciente a la planicie del lago de Valencia cuenta con una superficie de unos 2000 Km² alrededor del lago, su altitud oscila desde los 403 m a orillas de este cuerpo de agua, hasta los 427 m. La planicie entra en contacto con las serranías que la delimitan en los valles de los ríos que fluyen hacia el lago, estos valles entran en la planicie con distintas orientaciones a una altitud promedio de 440 m, constituyendo así los valles una extensión de la planicie aluvio-lacustrina, en esta zona las pendientes son suaves, encontrándose en un rango de 0 a 3 %.

Implementación del Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca del lago de Valencia

Para la implementación del MDE hemos desarrollado varias fases que resumiremos seguidamente, en primer lugar cabe destacar la fuente de datos empleada para el MDE.

Hemos definido aquí a los MDE, como una representación digital de una superficie topográfica, en nuestro caso en forma de matriz de elevaciones; sin embargo, para la obtención de dicha matriz, se requiere conocer *a priori* un conjunto lo suficientemente representativo

de datos (x, y, z) de la porción de la superficie a representar en el MDE, para calcular posteriormente por procedimientos aritméticos de interpolación el valor z de los *píxeles* de la matriz no muestreados. En base a esto podemos comprender la profunda trascendencia tanto de la elección de la fuente de datos como del proceso de captura de los mismos en la implementación de un MDE, ya que los datos iniciales de entrada serán la base para el cálculo del resto de las altitudes.

En este trabajo utilizamos como fuente de datos nueve mapas topográficos a escala 1:100.000, correspondientes a la zona de la cuenca del lago de Valencia, dichos mapas fueron producidos por el instituto de Cartografía Nacional de Venezuela, los mapas utilizados son los núms. 6547, 6647, 6747, 6546, 6646, 6746, 6545, 6645 y 6745. Estos documentos presentan las curvas de nivel maestras a intervalos de 200 m, teniendo las suplementarias un intervalo de 40 m.

La fuente de datos a utilizar se relaciona estrechamente con la captura de los datos, así es de uso frecuente (Felicísimo, 1994; Sircar y Cebrián, 1990) la captura de datos por digitalización de documentos cartográficos existentes, debido a su facilidad y al relativo bajo costo de obtención de los datos. En el presente trabajo utilizaremos dicho procedimiento de captura de datos, digitalizando las curvas de nivel correspondientes a la zona en estudio, a partir de los mapas topográficos a escala 1:100.000.

Por otra parte, cabe destacar el muestreo de datos como otro aspecto trascendental en la construcción de un buen conjunto de datos para la posterior interpolación de altitudes, aquí existen varias posibilidades para tal fin, sin embargo, en nuestro caso, dada la fuente de datos que utilizaremos, el procedimiento más operativo es el muestreo de datos a partir de curvas de nivel. Siendo éste, asimismo, ampliamente utilizado en el desarrollo de MDE (ver Sircar y Cebrián, 1990; Bosque *et al.*, 1990, Felicísimo, 1994; Bosque, 1992). Este procedimiento puede considerarse asimismo como selectivo (Sircar y Cebrián, 1990), ya que los elementos más representativos del terreno estarían bien representados muestralmente. Así, cumbres, líneas de ruptura de pendiente, divisorias, cauces y otros elementos importantes del terreno son «implícita o explícitamente» registrados en el trazado de las curvas de nivel, Clarke *et al.* (1982) coincide en que este procedimiento incorpora características muy deseables del terreno. Sircar y Cebrián (1990) también definen este procedimiento como

homogéneo, ya que se toma en cuenta regularmente toda la extensión superficial que cubrirá el MDE, asimismo, el procedimiento es progresivo, ya que a medida que el terreno se hace más accidentado, aumenta el número de curvas de nivel registradas en el muestreo, con lo cual el intervalo de altitudes a interpolar se hace constante, reduciéndose así el intervalo de altitudes no registradas al intervalo fijado entre curvas de nivel.

Bosque (1992: 372) caracteriza las curvas de nivel como «una fuente especialmente conveniente» para generar un MDE, ya que los cambios de densidad de muestreo ocurren con los cambios de pendiente del terreno, siendo esta la forma más adecuada de representar el fenómeno estudiado, es decir, mayor densidad de muestreo en las zonas de mayor variación espacial y menor densidad de muestreo en las zonas menos variables espacialmente.

Una vez definidos tales aspectos, la fase siguiente corresponde a la digitalización de las curvas de nivel, la que llevaremos a cabo mediante digitalización manual, sin embargo, previamente a la digitalización, a partir de los nueve documentos cartográficos antes citados, elaboramos un documento en una base estable (*mylar*³), en el cual dibujamos las curvas de nivel maestras desde los 600 a 2.400 m, aunque en las zonas de menor pendiente, donde las curvas se presentan con mayor separación (menor densidad), incluimos las suplementarias para así aumentar la densidad de puntos muestrales para el posterior proceso de interpolación.

Sobre este documento dibujamos inicialmente, antes del trazado de las curvas, cuatro puntos de referencia (*tics*) con coordenadas del mundo real conocidas (UTM), el contorno del área de estudio y los cuerpos de agua de la zona, los cuales fueron utilizados como puntos de referencia añadidos a los *tics* para el dibujo de las curvas sobre dicho documento, estos elementos fueron digitalizados en una capa en el programa SIG PC-ARC/INFO (ESRI, 1992), siendo posteriormente dibujados sobre la base estable (*mylar*) a través de un *plotter* (tamaño din A0), logrando así una correcta georreferenciación de las curvas a digitalizar y del MDE a obtener posteriormente.

³ En este tipo de documento base, se evitan los problemas comunes de distorsiones físicas de los mapas en soportes convencionales, debidos a cambios de temperatura y humedad durante el proceso de digitalización.

Una vez dibujadas las curvas de nivel en el documento correspondiente, éste puede utilizarse en la digitalización manual. Para la digitalización de las curvas de nivel utilizamos el módulo ADS de PC-ARC/INFO, dispusimos asimismo de una tableta digitalizadora din A0. Así iniciamos el proceso de digitalización manual de las curvas de nivel, introduciendo el atributo de la altitud de las mismas en el momento de la digitalización de cada una de las curvas.

Ya digitalizadas las curvas de nivel y editada la capa, ésta fue rasterizada (comando LINEGRID de PC-ARC/INFO), con un tamaño de *pixel* de 100 x 100 m, optando por dicha resolución espacial al considerar el requerimiento de resolución final del MDE, el cual corresponde a dicho tamaño de *pixel*, dado que éste debe ser una cuarta parte de la unidad mínima cartografiada de la capa a representar, o bien, la mitad de la longitud más pequeña representada (Star y Estes, 1990); siendo esta de 0,25 Km² a la escala de trabajo, entonces la resolución espacial adecuada para su representación en modelo *raster* debe ser inferior a 250 x 250 m, optando por una resolución aún más precisa de 100 x 100 m, para lograr una representación más «real» de las altitudes en las zonas de relieve más accidentado, lo cual generará un mayor volumen de cálculo en la aplicación de los procedimientos y algoritmos sobre el MDE, sin embargo, esto redundará en una mejor representación espacial de la variable altitud.

Una vez obtenida la capa raster con los *píxeles* muestrales de altitudes, en este caso a partir de las curvas de nivel rasterizadas, el paso siguiente a desarrollar es la interpolación de altitudes para el resto de los *píxeles* de la capa.

Por interpolación espacial se entiende «un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral, con un valor estimado), conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales con valores reales)» (Bosque, 1992: 375).

Dados el modelo de datos que utilizamos para nuestro MDE, el cual se estableció en modelo *raster* y el tipo de muestreo utilizado de curvas de nivel, existen varios procedimientos de interpolación factibles de ser empleados (ver Sircar y Cebrián, 1990; Cebrián y Mark, 1986), sin embargo, del conjunto de procedimientos de interpolación, el de interpolación lineal entre dos puntos, en la dirección de la pendiente más pronunciada en el punto a interpolar, es el que ofrece me-

jores resultados (Bosque, 1992; Chuvieco *et al.*, 1991; Sircar y Cebrián, 1990; Cebrián y Mark, 1986; Clarke *et al.*, 1982; Yoeli, 1975). Este procedimiento de interpolación es el que realiza de manera más correcta la lectura habitual de un mapa de curvas de nivel (Bosque, 1992: 386), realizando dicha lectura de modo similar al que cualquier lector determinaría la altitud en un mapa de curvas de nivel (Sircar y Cebrián, 1990: 29).

El procedimiento de interpolación comentado, calcula la altitud (z) de un punto entre dos puntos muestrales, en la dirección de la pendiente máxima, a través de un procedimiento de interpolación lineal, asignando así a dicho punto el valor calculado por el procedimiento, este proceso se repite para cada uno de los *píxeles* de la matriz, obviamente exceptuando los muestrales, hasta que se hayan asignado los valores de altitud (z) a todos los *píxeles* de la capa.

Para el MDE que implementaremos en este trabajo, utilizamos la interpolación lineal en la orientación de la pendiente más pronunciada, este proceso lo llevamos a cabo a partir de la capa de curvas de nivel rasterizadas en el programa IDRISI, con el comando INTERCON, de esta manera obtuvimos el MDE del área de estudio con las altitudes asignadas a todos los *píxeles* de la capa.

El proceso siguiente a la interpolación de altitudes es la detección de errores, éste lo hemos iniciado en el momento de la edición de la capa de curvas de nivel en PC-ARC/INFO, en el cual, errores comunes como, por ejemplo, identificadores de altitudes erróneas, han sido corregidos, sin embargo, a pesar de dicha revisión inicial es factible que se detecten algunos fallos después de la interpolación.

Para la detección inicial de errores después de la interpolación, el procedimiento más común es la inspección visual del MDE (Weibel y Heller, 1991), varias posibilidades de visualización del MDE son ofrecidas por el programa IDRISI, tales como visualización tridimensional y visualización según rangos de altitudes, asimismo, es posible la visualización de sombreados, aspecto ⁴ y pendiente del MDE, obtenidas luego de la aplicación de los algoritmos correspondientes para estas nuevas capas a partir del MDE.

⁴ La capa de aspecto se produce obteniendo para cada *pixel* la dirección de la pendiente máxima, esta capa se puede entender como un mapa de orientaciones de la vertiente, expresado en grados azimutales (0-360).

Con las mencionadas opciones de visualización y de cálculo de ciertos elementos conexos con el MDE, es factible detectar errores asociados a curvas de nivel con identificadores de altitudes erróneas y problemas por baja densidad de curvas de nivel en algunas zonas específicas del MDE, lo que ocasiona errores en la representación final de las altitudes en los *píxeles* de dichas zonas, así como efectos de «estrella» y de «terraceado» en el MDE. También en las zonas de valles encajados y en las cumbres, donde las curvas forman ángulos agudos, detectamos errores por la falta de altitudes muestrales en el procedimiento de interpolación.

Una vez detectados los errores en el MDE, hemos editado los cambios sobre la capa original de curvas de nivel en modelo vectorial (módulos ARCEDIT y ADS de PC-ARC/INFO), introduciendo los identificadores correctos para las curvas con errores, así como también añadimos una serie de curvas suplementarias en las zonas de baja densidad de curvas maestras, principalmente en la zona de planicie, donde hemos introducido todas las curvas suplementarias desde los 420 m hasta los 600 m, en intervalos de 40 m, además incluimos algunas curvas auxiliares a las suplementarias, en las zonas donde la densidad seguía siendo baja, para lograr resultados acordes al relieve en las zonas de poca pendiente, donde el efecto «estrella» había ocurrido en la primera interpolación, también en las zonas de valles encajados incluimos curvas suplementarias para lograr una interpolación de altitudes final más acorde a la topografía real de estas zonas, así como puntos acotados en las zonas de cumbres donde la interpolación inicial había descrito un relieve plano.

Una vez introducidas las nuevas curvas de nivel en la capa correspondiente, llevamos a cabo nuevamente el proceso de rasterización de curvas y de interpolación, obteniendo así una nueva versión del MDE, en la cual los problemas descritos habían sido solventados, ya que en las diferentes opciones de visualización no se aprecian errores de dichos tipos.

Al MDE resultante de la segunda interpolación, le aplicamos un filtro de paso bajo (*low pass*), el cual «suaviza» la representación final de la topografía, produciéndose así una representación más realista de la topografía de la zona de estudio.

El filtro de paso bajo utilizado, fue el del programa IDRISI, consistente en una matriz móvil (*kernel*) de 3×3 *píxeles*, que va prome-

diando el valor del *pixel* central en función de su propio valor y el de los ocho circundantes, asignando finalmente el valor promedio al *pixel* central, este proceso continúa hasta haber filtrado todos los *píxeles* de la capa. Obteniendo así el MDE final, en el cual con el filtrado, se han mejorado los aspectos de representación visual y de descripción del relieve del área. Siendo sobre este MDE, donde podemos realizar la siguiente fase de verificación cuantitativa del error general del modelo (ver figura 1).

Una vez resueltos los errores antes comentados en el MDE, la fase de verificación nos permitirá conocer el error medio general del MDE, el cual será un indicador de la precisión en la representación de las altitudes en la extensión global del modelo.

El cálculo de dicho parámetro se puede establecer realizando una comparación entre una serie de puntos (x, y) con altitudes «reales» conocidas, los cuales pueden ser verificados con sus homólogos en el MDE.

Comúnmente el parámetro establecido para describir la precisión de este tipo de modelos es el error medio cuadrático (*Root Mean Square*, RMS)(Weibel y Heller, 1991: 285; Felicísimo, 1994: 66; Cebrián y Mark, 1986: 301), el cual describe la variación global entre una serie de puntos medidos en el «mundo real» y sus correspondientes en el MDE, este parámetro se establece de la manera siguiente:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ZT_i - ZMDE_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Donde:

- ZT_i : altitud medida sobre el terreno con gran precisión en el punto i
- $ZMDE_i$: altitud medida sobre MDE en el punto i
- n : número de puntos muestrales

Se han establecido una serie de rangos de exactitud o de aceptación para los MDE por entes de carácter nacional, así, el *United States Geological Survey* (USGS) instituto pionero en estas actividades, establece un RMS entre 7 y 65 m para escalas de 1:24.000 y 1:250.000 respectivamente (Elassal y Caruso, 1983), con errores má-

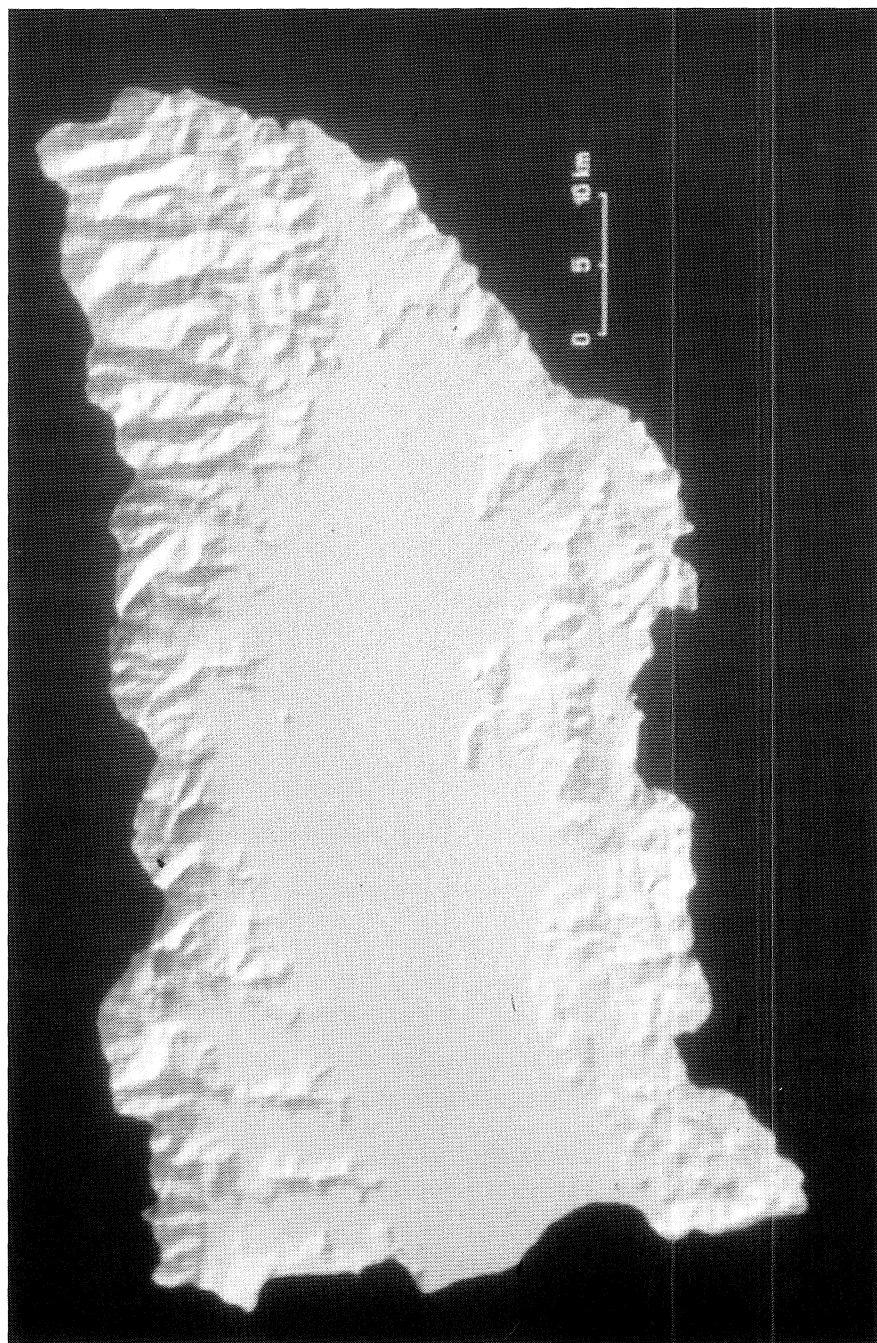


FIGURA 1 - Representación de iluminación del MDE de la cuenca del lago de Valencia.

ximos admisibles que varían asimismo según la escala y el intervalo entre curvas de nivel del mapa fuente. De esta manera para la escala 1:100.000, podemos establecer un RMS máximo aceptable de unos 28 m, considerando los RMS establecidos por el USGS para las escalas antes citadas.

Ciertos aspectos que deben ser tenidos en cuenta para establecer el RMS, son el número de puntos muestrales (n , en la ecuación 1) y el tipo de muestreo a emplear para la toma de los datos de altitudes.

El tamaño de la muestra está en función de el valor del RMS esperado de los datos, el nivel de confianza y el de precisión deseados para el cálculo del RMS final; sin embargo, estos valores no se conocen *a priori*, debiendo realizar una primera aproximación de los mismos. Los parámetros citados son referidos en la ecuación siguiente (Eastman *et al.*, 1993: 38-39):

$$n = \frac{z^2 \text{RMS}^2}{2e^2} \quad (2)$$

Donde:

- n : tamaño de la muestra
- z : nivel de confianza asumiendo una distribución normal de los datos, este se expresa como la probabilidad deseada de que el cálculo del RMS sea correcto
- RMS : error medio cuadrático máximo esperado sobre el conjunto de datos
- e : intervalo de precisión del RMS, al nivel de confianza establecido, este se expresa como un intervalo de variación (confianza) alrededor del valor calculado (por ejemplo, 60 m \pm 5 m)

Considerando la ecuación anterior hemos establecido los siguientes parámetros para el cálculo del tamaño de la muestra a emplear: un nivel de confianza (z) del 90 %, el cual bajo la curva normal establece una desviación de 1,645, un RMS máximo esperado de 60 m, el cual debe estar por encima del RMS final, para asegurar un tamaño de muestra suficientemente representativo de la variable estudiada y un intervalo de confianza de ± 5 m para el RMS final calculado; obteniendo así un valor n de 195, el cual será el tamaño de la muestra de altitudes para la verificación y obtención del RMS del MDE.

El tipo de muestreo espacial que utilizaremos es el aleatorio simple, en el cual los *píxeles* a verificar se «eligen de tal forma que todos

cuentan con la misma probabilidad de ser seleccionados» (Chuvieco, 1990: 383), asimismo debido a este carácter aleatorio, Chuvieco (1990: 383) indica que este procedimiento «es el más sólido estadísticamente». Por lo que consideramos oportuna su aplicación en el ámbito de la toma de muestras para un MDE.

A partir de los 195 puntos muestrales de altitudes, llevamos a cabo el cálculo del RMS (ver ecuación 1), obteniendo un valor de 25,13 m, con un error máximo de 64 m, de esta manera podemos establecer que la fiabilidad del MDE es aceptable según los parámetros de RMS y error máximo admisibles establecidos por el USGS.

Una representación del MDE obtenido puede observarse en la figura 1, ésta fue desarrollada a partir del MDE con el comando RELIEF del programa ERDAS (1991), en ella se simula el efecto de iluminación solar, indicando el ángulo de inclinación del Sol a una determinada hora del día, obteniendo de esta manera un efecto del relieve de la cuenca del lago de Valencia.

Desarrollo del modelo de unidades homogéneas del relieve

Podemos entender el relieve como «el conjunto de formas de una superficie» (Sagredo, 1972), en base a esta definición se pueden destacar varios elementos que caracterizan el relieve, entre los cuales están la altitud, la pendiente y la «rugosidad», cuyas propiedades pueden definir en buena medida diferentes unidades de relieve.

Como comentábamos anteriormente, los MDE tienen diversas aplicaciones, entre las cuales la elaboración de otras capas, como por ejemplo de pendiente, son de uso frecuente. Asimismo la clasificación de «formas de relieve» (Felicísimo, 1994: 115-122) o «regiones de características homogéneas del terreno» (Weibel y Heller, 1991: 283), es actualmente implementable disponiendo de un MDE y un programa SIG que permita la ejecución de ciertos algoritmos.

Describiremos aquí el desarrollo de un modelo de unidades homogéneas del relieve generado a partir del MDE de la cuenca del lago de Valencia. Así, en este sentido, podemos indicar que todo proceso de agrupación de clases parte de unas variables iniciales y un procedimiento de agrupación para obtener las correspondientes cla-

ses, que describirán a la postre cierta homogeneidad intrínseca en relación a las variables de partida.

En el caso que nos concierne se plantea la clasificación del relieve en varias unidades homogéneas, esta clasificación se «integra en los métodos de análisis cuantitativo, y puede definirse como el conjunto de procesos que permite realizar el agrupamiento de los elementos en clases (grupos) con propiedades significativamente diferentes entre sí» (Felicísimo, 1994: 115).

Partiendo de este postulado inicial, el primer aspecto a plantear es la selección y definición de las capas (variables) que se integrarán en el proceso de clasificación para obtener las unidades homogéneas del relieve. Hemos considerado en este caso tres capas que definen en buena medida las características del relieve de la zona de la cuenca del lago de Valencia, estas son: altitud, pendiente y rugosidad del terreno.

La capa de altitudes representa los datos de altitud existentes en el MDE, por otra parte, la capa de pendiente se obtuvo a partir del MDE, con el comando SURFACE de IDRISI; mientras que la capa de rugosidad del terreno fue desarrollada en el programa ERDAS, ya que IDRISI no ofrece las prestaciones necesarias para su implementación.

En relación con la definición y los procedimientos para la obtención de la rugosidad del terreno no parece existir un consenso general, en este sentido, diversos autores plantean diferentes procedimientos, por ejemplo, Balce (1987) utiliza la pendiente media como indicador de un valor de rugosidad; Evans (1972) plantea varios procedimientos: desde rangos de altitud hasta la desviación estándar de la elevación, Felicísimo (1994) comenta el uso de la varianza de la pendiente y describe un algoritmo que se desarrolla considerando la pendiente y la orientación como insumos; por otra parte Weibel y Heller (1991) desarrollan una capa de «regiones de características homogéneas del terreno», considerando rangos de altitud.

Para nuestro caso en concreto, desarrollaremos la capa de rugosidad a partir de los rangos de altitud para cada *pixel* de la capa, esto se llevará a cabo a partir de una ventana móvil (*kernel*) de 13×13 *píxeles*, asignando así al *pixel* central de la ventana un valor en metros, correspondiente a la diferencia entre el valor máximo y mínimo de altitud de los *píxeles* de dicha ventana. Así, en las zonas planas la

rugosidad será baja, incrementándose ésta en las zonas montañosas o con diferencias entre los valores mínimo y máximo en el entorno de la ventana móvil. Sin embargo, antes de implementar dicha capa, utilizamos otro enfoque a partir de aplicar un algoritmo de textura (desviación estándar) a la capa de pendiente, obteniendo una capa de rugosidad del relieve muy pobre en relación a los valores que reflejaba, dado que reescalada entre 0 y 255, la mayor parte de los valores se ubicaban en los extremos de dicha escala, es decir cercanos a 0 o a 255, lo que obviamente limitaría la capacidad de separabilidad de clases en la posterior clasificación, por lo cual optamos por la capa de rangos de altitud como reflejo de la textura del relieve, la cual ofreció una distribución de los datos más homogénea a lo largo de su histograma.

Una vez desarrolladas la capas para llevar a cabo la clasificación: altitud, pendiente y rugosidad, es necesario evaluar su correlación, ya que no se considera conveniente en un proceso de clasificación multivariante (análisis de cluster) que las variables de entrada sean interdependientes (Felicísimo, 1994: 119; Weibel y Delotto, 1988: 623), calculando así el coeficiente de correlación r a través del comando REGRESS de IDRISI, para cada par de capas, obteniendo así el cuadro I.

CUADRO I
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN r PARA LAS CAPAS DE ALTITUD,
PENDIENTE Y RUGOSIDAD

Capas	Altitud	Pendiente	Rugosidad
Altitud	1		
Pendiente	0,77	1	
Rugosidad	0,85	0,91	1

Observando los coeficientes resultantes en el cuadro I, podemos considerar a las tres capas como altamente correlacionadas, lo cual plantea un inconveniente para la clasificación, la cual sería desarrollada a partir de datos poco diferenciadores de clases, es decir, la se-

parabilidad ofrecida por datos correlacionados es baja para la formación de clases.

Tomando en cuenta este factor, optamos por llevar a cabo un análisis de componentes principales (ACP) a partir de las capas definidas, para así obtener unos componentes que representen la misma información de las tres capas disponibles, siendo asimismo muy poco correlacionados entre sí.

El ACP es una técnica que permite «resumir un amplio grupo de variables en un nuevo conjunto más pequeño (ocasionalmente), sin perder una parte significativa de la información original» (Chuvieco, 1990: 310). Obteniendo con este procedimiento unos componentes poco correlacionados entre sí, ya que a través del ACP se produce una transformación matemática de los datos originales (Cortizo, 1986: 159), generando así unos componentes resultantes con la misma información de las variables iniciales, pero expresadas de distinta manera.

La base del ACP es su capacidad de síntesis (Chuvieco, 1990: 311), ya que con su aplicación a un conjunto de capas, o bandas de imágenes satelitales en el campo de la teledetección, se pueden obtener componentes que resuman el número de capas necesarias para una clasificación. Asimismo, el proceso general del ACP parte de una rotación de los ejes en los cuales se ubican los datos de las capas de entrada (ver Chuvieco, 1990 y Jensen, 1986), produciendo esto una redistribución de los datos y no una transformación estadística, lo que además de reducir la dimensionalidad de los datos iniciales, produce unos componentes poco correlacionados entre sí (Jensen, 1986: 151), ya que en líneas generales se obtienen de tal modo que «cada componente sucesivo explique la máxima varianza (posible) restante después de la extracción de los componentes precedentes» (Mather, 1981: 146), es decir, la varianza decrece a partir del primer componente (Batista, 1984). Asimismo, el hecho de que los componentes se obtengan a partir de una transformación matemática produce que la información original no disminuya y obviamente no aumente, sino que se presente bajo una nueva forma (Ciceri *et al.*, 1977: 15).

Con el comando PCA de IDRISI llevamos a cabo el ACP para las capas de altitud, pendiente y rugosidad, obteniendo así tres componentes que representan el 100% de la varianza de las capas originales (ver cuadro II).

DELIMITACIÓN DE UNIDADES HOMOGÉNEAS DEL RELIEVE

CUADRO II
RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL ACP A LAS CAPAS DE ALTITUD,
PENDIENTE Y RUGOSIDAD

Var/Covar	Altitud	Pendiente	Rugosidad
Altitud	1.265,56	730,93	1.085,43
Pendiente	730,93	714,97	879,33
Rugosidad	1.085,43	879,33	1.299,73
Correlación	Altitud	Pendiente	Rugosidad
Altitud	1,00	0,77	0,85
Pendiente	0,77	1,00	0,91
Rugosidad	0,85	0,91	1,00
Componentes	C1	C2	C3
% Var.	89,93	7,81	2,26
Eigenvalores	2.949,96	256,16	74,14
Eigenvector 1	0,6134	-0,7742	-0,1558
Eigenvector 2	0,4547	0,5075	-0,7319
Eigenvector 3	0,6458	0,3781	0,6634
Cargas	C1	C2	C3
Altitud	0,9365	-0,3883	-0,0377
Pendiente	0,9236	0,3037	-0,2357
Rugosidad	0,9728	0,1678	0,1584

Una vez desarrollado el ACP, obtuvimos tres componentes (componente 1, componente 2 y componente 3) que representan respectivamente el 89,93; 7,81 y 2,26% de la varianza de las capas originalmente consideradas, con lo cual la información ha sido transformada en su totalidad en estas tres nuevas capas representativas de los tres componentes, las cuales asimismo son muy poco correlacionadas, siendo así oportuna su integración en un proceso de clasificación multivariante (análisis de cluster).

La clasificación multivariante (análisis de cluster) se puede definir como un grupo de técnicas multivariantes cuyo principal propósi-

to es identificar entidades similares a partir de las características que ellas posean. Estas técnicas identifican y clasifican objetos, o casos, en clases (*clusters*), respecto a algún criterio de selección predeterminado, los grupos resultantes deberían tener alta homogeneidad interna (intracluster) y alta heterogeneidad externa (intercluster) (Hair *et al.*, 1984: 295).

En general el proceso de aplicación de la clasificación multivariante puede ser dividido en tres etapas principales: partición, interpretación y perfilado. La primera etapa consiste en el proceso para determinar si los grupos pueden ser desarrollados y cómo, la etapa de interpretación es el proceso de comprender las características de cada grupo, para finalmente explicar cómo difiere cada uno de ellos en dimensiones relevantes (Hair *et al.*, 1984: 297).

Para la obtención de la capa de unidades homogéneas del relieve llevamos a cabo un procedimiento de agrupación multivariante (*cluster*), en el cual las variables de entrada están representadas por los tres componentes del ACP, los grupos resultantes del proceso de clasificación deben ser homogéneos en cuanto a las unidades de relieve que representen, así como significativamente diferentes entre sí en base a las características de las unidades de relieve representadas, obteniendo de esta manera un conjunto de clases representativas de las tres variables originales de entrada: altitud, pendiente y rugosidad.

El método de agrupamiento que empleamos en la clasificación multivariante es el no supervisado, ya que no conocemos *a priori* el número ni la ubicación exacta de las posibles clases de unidades homogéneas de relieve existentes en el área, lo cual limita el uso de un procedimiento de clasificación supervisada, en el cual deben ubicarse los campos de entrenamiento, o zonas muestra, representativas de cada una de las clases existentes en el área.

El procedimiento de clasificación no supervisada requiere muy poca información del analista, únicamente deben introducirse el número de grupos deseados, con lo cual el procedimiento inicia la clasificación, en este proceso a través de una serie de operaciones numéricas se busca el agrupamiento «natural» de los casos a través de sus valores o propiedades (Jensen, 1986).

En la actualidad existen cientos de métodos de clasificación multivariante (Jensen, 1986), los cuales varían en menor o mayor grado el procedimiento de clasificación con un objetivo común.

Con el procedimiento no supervisado podemos implementar varios procesos de clasificación con distintos número de clases a ubicar, hasta lograr una asignación satisfactoria en cuanto al número de clases representativas de las unidades homogéneas del relieve del área de estudio.

Con el método no supervisado, la principal dificultad radica en reconocer o bien asignar un «nombre» o significado a las clases formadas que las caracterice, lo cual plantearemos finalmente.

El procedimiento de análisis multivariante que desarrollaremos en este trabajo es el de la técnica del pico del histograma (Eastman, 1992: 16), este procedimiento se desarrolla, por ejemplo en una sola capa, seleccionando los máximos relativos del histograma de frecuencias, una vez que estos han sido seleccionados el procedimiento asigna los valores vecinos a los máximos relativos seleccionados, localizando la división entre clases en el punto medio de cada par de máximos relativos. El procedimiento en nuestro caso se extiende a tres capas, es decir, se emplea un espacio tridimensional donde cada capa representa un eje, para la formación de las clases.

El proceso comentado será abordado a través del comando CLUSTER de IDRISI, de esta manera los *píxeles* serán asignados a una sola clase, la que muestre el máximo relativo más cercano a su valor, obteniendo una capa con códigos asignados a cada *pixel* según las clases que representen.

Para la obtención de la capa de unidades homogéneas del relieve, optamos por realizar la clasificación multivariante con siete clases, las cuales en principio parecen más de las existentes en el área a la escala de trabajo, sin embargo, indicando un número de clases que supere el número de clases existentes en el área de estudio, es factible unir posteriormente aquellas clases «similares» o que representen unidades parecidas en cuanto a las características del relieve que describan en base a las variables inicialmente consideradas.

Las clases finalmente definidas en el área fueron cinco, ya que de las siete originales, dos pares de clases eran muy similares en cuanto a las unidades que representaban, procediendo así a su unión en una sola.

En el cuadro III se muestran cada una de las unidades homogéneas del relieve obtenidas en el proceso implementado, así como los valores en las variables establecidas del promedio (M.A.), la desvia-

ción estándar (D.E.) y la superficie ocupada por cada una de las mismas en la cuenca del lago de Valencia.

Para verificar la fiabilidad estadística de los grupos formados, llevamos a cabo un test de comparación de medias aritméticas para cada par de grupos adyacentes en cada una de las tres variables consideradas (altitud, pendiente y rugosidad), es decir, en cada variable existen grupos adyacentes en relación a los valores promedio (ver cuadro III), así, por ejemplo, en la variable pendiente las clase 1 y 2 son adyacentes, siendo en estos casos en los cuales el test nos permitirá conocer si los grupos formados son significativamente diferentes, considerando su media aritmética, la desviación estándar y el número de *píxeles* en cada clase (n).

CUADRO III

UNIDADES HOMOGÉNEAS DEL RELIEVE DEFINIDAS EN LA CLASIFICACIÓN MULTIVARIANTE (M. A.: MEDIA ARITMÉTICA, D. E.: DESVIACIÓN ESTÁNDAR)

Clases	Altitud (m.s.n.m.)		Pendiente (%)		Rugosidad (m.)		Superficie (Km ²)
	M.A.	D.E.	M.A.	D.E.	M.A.	D.E.	
1	487	118	4,33	7,22	46	67	1.595,64
2	601	159	6,38	5,24	171	75	510,17
3	668	88	26,33	8,18	286	69	394,09
4	915	108	41,07	9,81	446	72	152,51
5	1.416	311	35,91	14,64	466	118	351,42

Siguiendo este procedimiento, inicialmente, en la variable altitud realizamos un test para cada par de grupos adyacentes en la clase asignada, 1-2, 2-3, 3-4 y 4-5, con el fin de determinar si los grupos formados son significativamente diferentes, utilizando un ensayo de significación basado en distribuciones que se asumen como normales, ya que al trabajar con números de muestra elevados ($N > 30$) las distribuciones de datos tienden a ser de este tipo.

Utilizamos una prueba de hipótesis, en la cual la hipótesis nula (H_0) plantea que cada par de grupos no son significativamente diferentes, mientras que la hipótesis de investigación (H_1) plantea lo con-

trario, es decir, que cada par de grupos son significativamente diferentes.

Se consideró un nivel de significación del 0,01 (nivel de confianza del 99 %), siendo así el valor crítico de Z según la curva normal: $(Z_c) = |2,33|$.

Para la variable altitud la Z_c fue superada por Z ($Z > Z_c$) en cada par de grupos así:

$$Z(1,2) = 149,33$$

$$Z(2,3) = 80,44$$

$$Z(3,4) = 251,68$$

$$Z(4,5) = 267,14$$

Verificándose así la hipótesis de investigación (H_1), para todos los pares de casos, pudiendo asumir a un nivel de confianza de 99 %, que existe una diferencia significativa entre cada par de grupos. Considerando finalmente los grupos como homogéneos intrínsecamente y significativamente diferentes entre ellos en relación a la variable altitud.

Un test similar fue desarrollado para las otras dos variables, obteniendo para cada par de grupos en pendiente los siguientes valores de Z:

$$Z(1,2) = 69,73$$

$$Z(2,3) = 421,78$$

$$Z(3,4) = 164,69$$

$$Z(4,5) = 46,32$$

Concluyendo en este caso de la misma manera que en la variable anterior. Finalmente para la variable rugosidad los valores de Z fueron:

$$Z(1,2) = 336,02$$

$$Z(2,3) = 239,23$$

$$Z(3,4) = 235,71$$

$$Z(4,5) = 23,31$$

En base al test realizado, podemos considerar a los grupos formados como discriminantes para las unidades homogéneas del relieve.

ve, ya que son significativamente diferentes entre sí para las tres variables consideradas (altitud, pendiente y rugosidad), habiendo sido asimismo discriminantes si solo hubiesen sido significativamente diferentes para una sola variable o dos, lo cual en este caso en concreto provee de gran robustez al proceso de clasificación llevado a cabo, ya que cada par de clases son significativamente diferentes en las tres variables de entrada en la clasificación multivariante.

Cabe destacar que un elemento importante en las ecuaciones empleadas para el test estadístico es el valor de la población considerada (N), ya que al aumentar ésta, la separabilidad entre pares de grupos aumenta, inicialmente el procedimiento estadístico llevado a cabo para el cálculo de Z plantea las siguientes ecuaciones:

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} \quad (3)$$

Donde:

\bar{x}_1 : media aritmética del grupo 1
 \bar{x}_2 : media aritmética del grupo 2

Siendo:

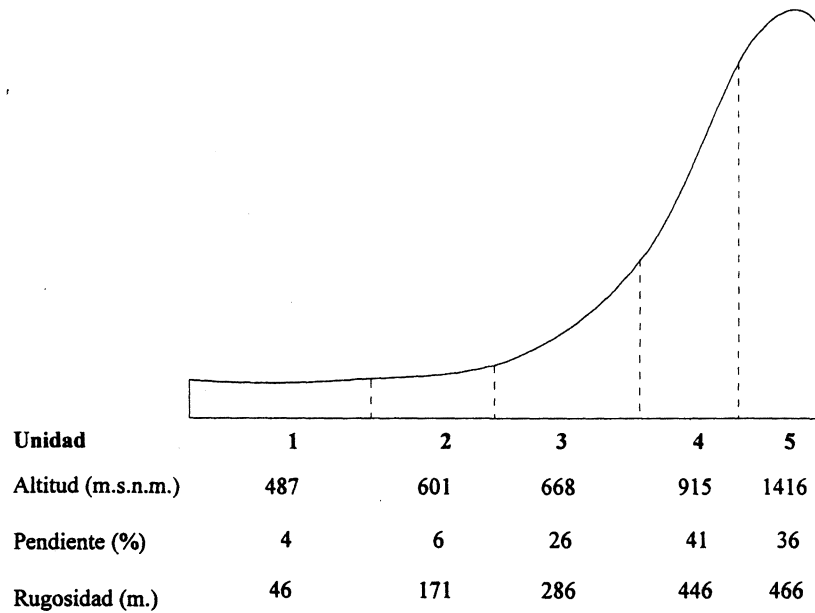
$$\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}} \quad (4)$$

Donde:

σ_1 : desviación típica del grupo 1
 σ_2 : desviación típica del grupo 2
 N_1 : población del grupo 1
 N_2 : población del grupo 2

Es así que el gran número de *píxeles* correspondientes a cada grupo (mayor a 15.000), pueden incidir finalmente en la diferenciación estadística de cada par de grupos, es decir, al trabajar con un N elevado la diferencia entre medias aritméticas se hace más robusta.

En la figura 2 presentamos un perfil ideal para la representación de las unidades representadas en la capa aquí obtenida, asimismo, en la figura se comprende de manera gráfica la secuencia ideal que seguirían las unidades homogéneas del relieve en un perfil de una por-



Fuente: elaboración propia

FIGURA 2.—Representación gráfica de un perfil ideal para las unidades homogéneas del relieve.

ción de la cuenca, cabe mencionar que las zonas como fondos de valles intramontañosos corresponden a la clase 2, así como las zonas de colinas corresponden a la clase 3, debiendo entenderse el perfil como una representación genérica de las unidades homogéneas del relieve.

La primera clase (ver figura 3) representa las zonas de planicie lacustrina y aluvial, estas zonas son las de menor altitud de la cuenca y las de menor pendiente, sobre ellas se encuentran los principales núcleos urbanos de esta zona, siendo una consecuencia del poco desnivel en esta clase la baja rugosidad promedio en relación a las otras clases.

La segunda clase es por lo general adyacente a la primera (ver figura 3), en esta las pendientes y la altitud son algo mayores que en la primera clase, ésta puede considerarse una zona de relieve transicional entre las zonas de planicie y las de montaña, asimismo los valles intramontañosos que desaguan en la planicie lacustrina pertene-

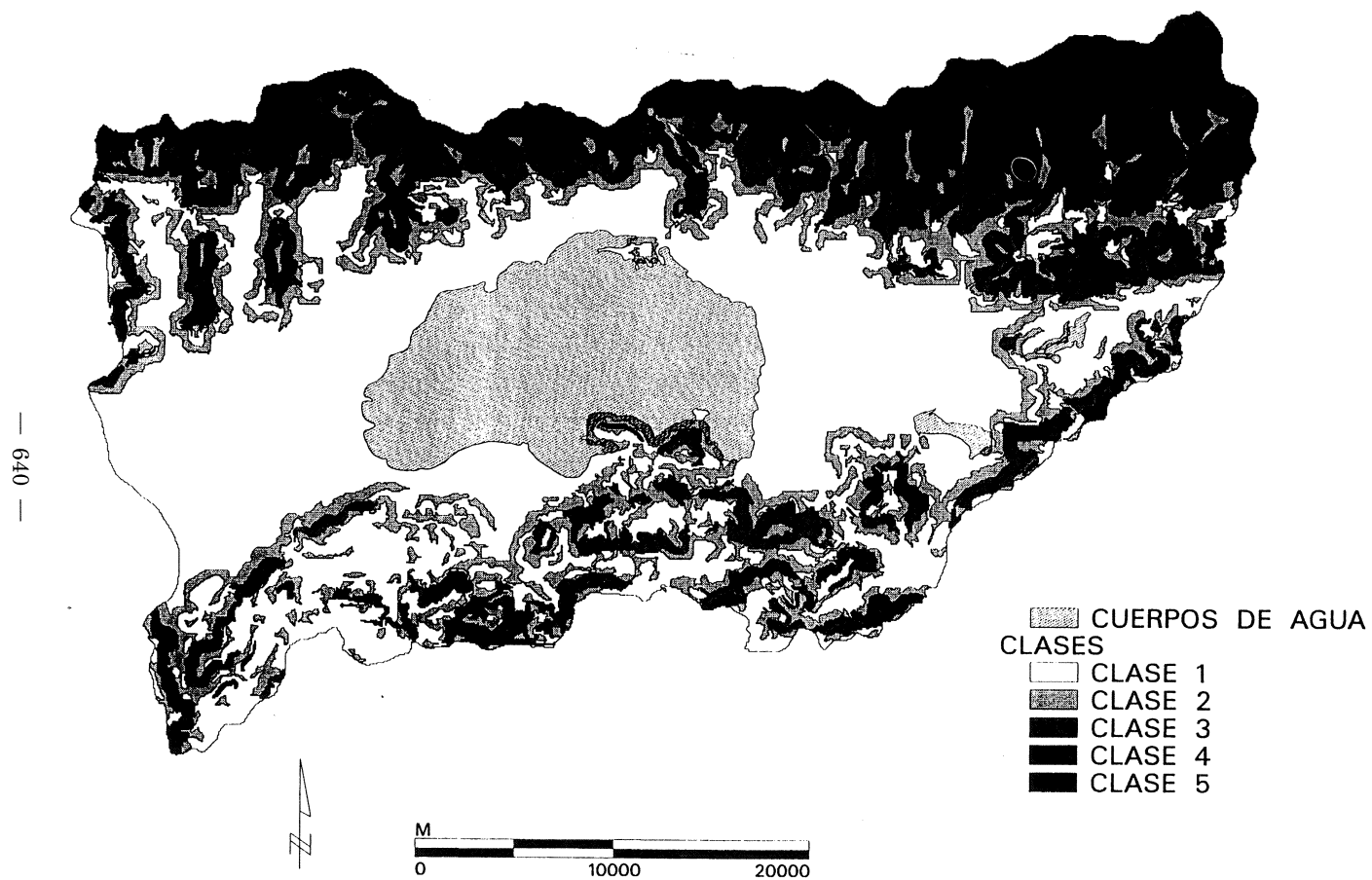


FIGURA 3.-Mapa de unidades homogéneas del relieve

cen a esta clase, en esta zona la rugosidad del relieve es mayor que en la clase 1, ya que las diferencias de altitud son más marcadas.

La clase 3, es la zona que por lo general sigue a la clase 2 en las zonas de montaña, esta clase representa espacios de no mucha altitud (668 m) en el entorno de la cuenca, pero muestra pendientes fuertes (*Soil Conservation Service*, 1966), en esta zona se representan los espacios de vertiente baja de la Serranía del Litoral (al norte), así como el sistema de colinas ubicado en el sur-oeste y sur de la cuenca.

La clase 4 representa las zonas de mayor pendiente, y una de las de mayor rugosidad de la cuenca, esta clase representa los espacios de vertiente alta de la Serranía del Litoral, así como ciertas zonas de cumbres en la Serranía del Interior, al sur de la cuenca.

Finalmente la clase 5, representa los espacios más altos y con la máxima rugosidad de la cuenca, en esta clase se representan las cimas y las zonas de muy fuertes pendientes adyacentes a las mismas, sin embargo, muestra pendientes inferiores a la clase 4 debido al efecto de las cimas.

Conclusiones

Resalta en este trabajo la versatilidad de aplicaciones susceptibles de desarrollar a partir de los MDE, en nuestro caso específicamente la obtención de un modelo de unidades homogéneas de relieve, que simplifica y sintetiza un gran volumen de datos; pudiendo realizarse a un relativo bajo costo.

La obtención de modelos de unidades homogéneas del relieve proporciona una importante herramienta de cara a una mejor comprensión de un espacio determinado, siendo posible asimismo la inclusión de dichos modelos como capas integrantes de una base de datos espaciales, es decir, pueden ser insumos de procesos posteriores, tales como estudios de la estructura del territorio, evaluaciones de impacto ambiental, estudios de capacidad de acogida del territorio y otros que requieran grandes volúmenes de información espacial (ver Barredo, 1996).

La utilización de modelos de este tipo ofrece en una sola capa la síntesis de varias variables espaciales, proporcionando así una capa especialmente útil en los tipos de estudios antes comentados.

BIBLIOGRAFIA

- BALCE, A. (1987): «Determination of optimum sampling interval in grid digital elevation models (DEM) data acquisition», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (3): 323-330.
- BARREDO, J. I. (1986): *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*, Ra-Ma, Madrid.
- BATISTA, J. (1984): «Componentes principales y análisis factorial (exploratorio y confirmatorio)», en J. Sánchez Carrión (ed.): *Introducción a las Técnicas de Análisis Multivariable Aplicado a las Ciencias Sociales*, Centro de Investigaciones Sociológicas, Madrid.
- BERRY, J. (1988): «Maps as data: fundamental considerations in computer-assisted map analysis», Proc. *GIS/LIS 88*, San Antonio, Texas.
- BOSQUE, J. (1992): *Sistemas de Información Geográfica*, Rialp, Madrid.
- BOSQUE, J.; DOMÍNGUEZ, J., y VEGA, J. (1990): «Generación de un modelo topográfico digital para la ciudad de Granada: problemas y soluciones con el programa IDRISI», en *Actas del IV Coloquio de Geografía Cuantitativa*, Palma de Mallorca.
- BURROUGH, P. (1986): *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Oxford Science, Oxford.
- CARTER, J. (1988): «Digital representation of topographic surfaces», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, n. 54 (11), pp. 1577-1580.
- CEBRÍAN, J., y MARK, D. (1986): «Modelos topográficos digitales», *Métodos Cuantitativos en Geografía: Enseñanza, investigación y Planeamiento*, AGE, Madrid.
- CHUVIECO, E.; BOSQUE, J., y SALAS, J. (1991): «An evaluation of Interpolation methods to generate elevation data», Proc. *EGIS 91*, Utrecht, vol. II, p. 1309.
- CHUVIECO, E. (1990): *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Rialp, Madrid.
- CICERI, M., et al. (1977): *Introduction à l'Analyse de l'Espace*, Masson, Paris.
- CLARKE, A.; GRUEN, A., y LOON, J. (1982): «The Application of contour data for generating high fidelity grid digital elevation models», Proc. *AUTOCARTO 5*, pp. 213-222.
- CORTIZO, J. (1986): «La selección de variables en el análisis multivariante», en AGE (ed.): *Métodos cuantitativos en Geografía: Enseñanza, Investigación y Planeamiento*, AGE, Madrid.
- DOLTON, L., y DUEKER, K. (1986): «A comparison of functionality of grid and vector data structures in a microcomputer environment», en Niemann (eds.): *Paper from annual conference of the urban and regional information Systems Association*, vol. 1, pp. 214-231.
- EASTMAN, R. (1992): *IDRISI, A grid based geographyc analysis system*, Version 4.0, Clark Univerity, Graduate School of Geography, Worcester, Massachusetts.
- EASTMAN, R.; KYEM, P. A.; TOLEDANO, J., y JIN, W. (1993): *Gis and Decision Making*, United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), Ginebra.
- ELASSAL, A., y CARUSO, V. (1983): USGS Digital cartographic data standards: digital elevations models, United States Geological Survey, National Mapping Program, circular 895-B.
- ERDAS (1991): *Erdas Field Guide*, Version 7.5. Erdas INC. Atlanta.
- ESRI, (1992): *PC-ARC/INFO*, Ver. 3.4D Plus, Environmental Systems Research Institute, California.
- EVANS, I. (1972): «General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics», en R. Chorley (ed.): *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen, Londres.
- FELICÍSIMO, A. (1994): *Modelos Digitales del Terreno, Introducción y Aplicaciones en las Ciencias Ambientales*, Pentalfa, Oviedo.
- GUEVARA, J. M. (1983): *Geografía de las Regiones Capital y Central*, Ariel Seix-Barral Venezolana, Caracas.

DELIMITACIÓN DE UNIDADES HOMOGÉNEAS DEL RELIEVE

- HAIR, J.; ANDERSON, R., y TATHAM, R. (1984): *Multivariable Data Analysis with Readings*, 2.^a ed. 1987, Mac Millan.
- JENSEN, J. (1986): *Introductory Digital Image Processing, A Remote Sensing Perspective*, Prentice- Hall, Nueva Jersey.
- MATHER, P. (1981): «Factor analysis», en N. Wrigley y R. Bennett (eds.): *Quantitative Geography*, Routledge and Kegan Paul LTD, Londres.
- SAGREDO, J. (1972): *Geología y Mineralogía*, Diccionario, Diccionarios Rioduero, Madrid.
- SIRCAR, J., y CEBRIÁN, J. (1990): «Creación de modelos topográficos digitales (MTDs): a partir de curvas de nivel rasterizadas», *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, núm. 10, Madrid.
- STAR, J., y ESTES, J. (1990): *Geographic information systems: an Introduction*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Nueva York.
- USSCS (1966): *Manual de conservación de suelos*, Centro regional de ayuda técnica, México.
- WEIBEL, R., y DELOTTO, J. (1988): «Automated terrain classification for GIS modeling», *Proc. GIS/LIS '88*: 618-627, San Antonio, Texas.
- WEIBEL, R., y HELLER, M. (1991): «Digital terrain model», en D. Maguire, M. Goodchild y D. Rhind (eds.): *Geographical Information Systems*, vol. 1, Longman, Scientific and Technical.
- YOELI, P. (1975): «Compilation of data for computer-assisted relief cartography», en J. Davis, y M. Mc Culloch (eds.), *Analysis and Display of Spatial Data*, John Wiley and Sons, Londres.