



CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS EN LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC (MÉXICO) A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

*Automatic landforms classification in River Tepalcatepec basin (México) using
a digital elevation model*

L. Martínez-Zavala, A. Jordán López, M.^a Anaya Romero, I. Gómez Parrales
y N. Bellinfante Crocci

*Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola
Facultad de Química (Universidad de Sevilla)
C/Profesor García González, 1
41012 Sevilla (España)
E-mail: lorena@us.es - e-mail: ajordan@us.es
Tel.: 954 55 69 50 - Fax 954 55 71 41*

Resumen: el objetivo principal de este trabajo de investigación es la realización de un análisis detallado del medio físico de la cuenca del Río Tepalcatepec (estados de Jalisco y Michoacán, México). La superficie total de la cuenca abarca aproximadamente 17000 Km².

Se ha utilizado un método jerárquico de clasificación basado en los trabajos de Dikau et al. (1991). Los resultados obtenidos han dividido la cuenca del Río Tepalcatepec en cinco clases de geoformas principales. A su vez, cada clase ha sido dividida en subclases, de modo que se han distinguido 17 unidades de terreno.

Los resultados muestran que el método utilizado permite identificar con fiabilidad las principales formaciones del terreno, y con mucho mayor detalle, un número elevado de subclases.

Palabras clave: elementos geomorfológicos, modelo digital de elevaciones, relieve, Tepalcatepec, México.

Abstract: the main objective of this paper is a detailed analysis of the physical environment of the Tepalcatepec River basin (through the states of Jalisco and Michoacan, Mexico). The total surface of the basin includes approximately 17.000 Km².

We have used an classification system modified from Dikau et al (1991). The results obtained let us to divide the basin of the Tepalcatepec River in five classes of main geoforms. Each class has been divided in several subclasses, so that 17 land units have been distinguished.

The results show that the used method allows to identify accurately the existing land forms, and with much greater detail, an elevated number of subclasses.

Keywords: landforms, digital elevation models, relief, Tepalcatepec, Mexico.



L. Martínez-Zavala, A. Jordán López, M.^a Anaya Romero, I. Gómez Parrales y N. Bellinfante Crocci (2005). Clasificación automática de elementos geomorfológicos en la cuenca del río Tepalcatepec (México) a partir de un modelo digital de elevaciones. *Rev. C & G.*, 19 (3-4), 49-61.

1. Introducción

Como uno de los objetivos del proyecto Sustentabilidad Patrimonial de la Cuenca del Río Tepalcatepec se ha abordado la realización de un mapa de estados erosivos de la misma. Como paso previo a la cartografía del riesgo de erosión se ha abordado el análisis del medio físico, a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE) y el uso de un sistema de información geográfica (SIG).

El relieve de la corteza terrestre constituye una superficie de una gran complejidad geométrica y topográfica. Existen diversas aproximaciones a la clasificación de formas del terreno, descritas adecuadamente en términos generales, a menudo con criterios morfométricos (Zinck, 1988-89). Sin embargo, según Evans (1972) la totalidad de formas resultantes de los procesos geomorfológicos son demasiado complejas como para ser incluidas en la mayoría de los sistemas de clasificación. Los mejores métodos de clasificación son los que llevan a cabo un análisis sistemático de la superficie, describiendo cada componente de forma individual (Hammond, 1964). Un método jerárquico de clasificación espacial es una herramienta muy poderosa para el análisis de las formas del terreno, definidas en función de su tamaño, orden y complejidad geométrica (Dikau, 1990).

El análisis del paisaje desde este punto de vista permite la evaluación y modelización de distintos procesos naturales. El conocimiento profundo de las características topográficas del medio constituye un punto de partida para el estudio de los suelos debido a su influencia sobre la sedimentación y arrastre de partículas, nutrientes, el movimiento del agua superficial y muchos otros aspectos importantes (Jenny, 1941; Gerrard, 1981; ASPRS, 1994; Lark, 1999). Sin embargo, la topografía del terreno no influye sólo sobre los procesos edáficos, sino que la variedad de formas puede reflejar cambios menos perceptibles en el sustrato (Dikau & Schmidt, 1999), como la insolación, la disponibilidad de agua o la vegetación. Un MDE constituye una fuente de información básica a partir de la cual es posible construir nuevos modelos digitales derivados. En conjunto, puede decirse que éstos constituyen un modelo digital del terreno, MDT (de acuerdo con la definición de Doyle, 1978).

La cartografía automática de las formas del terreno constituye un campo de interés para la

modelización de los procesos erosivos (Dikau et al., 1991), ya que permite obtener información sobre el comportamiento de las cuencas hidrológicas y cartografiar con precisión los componentes de un territorio.

Basándose en el estudio de un MDE y de datos climáticos, Jordán & Bellinfante (2000) realizaron un mapa de erosividad de la lluvia en el área del Estrecho de Gibraltar (España). Martínez-Zavala (2001) llevó a cabo una correlación entre las características geomorfológicas del medio y parámetros climáticos y erosivos, mediante el análisis de modelos digitales derivados de un MDE en el Parque Natural Sierra de Aracena y Picos de Aroche (España). También a partir del análisis de un MDE, Ruiz et al. (1999) llevaron a cabo el análisis de la vegetación. Bellinfante et al. (2002) y Anaya (2003) han estudiado la distribución potencial de especies forestales en espacios naturales protegidos de Andalucía (España).

Por lo tanto, cada vez parece más cierto que un adecuado conocimiento del medio físico facilita la toma de decisiones por parte de los organismos responsables. De este modo, la ordenación del territorio puede llevarse a cabo dentro de los límites del desarrollo sostenible.

Según Hammond (1954) el propósito principal de la cartografía de formas del terreno es llevar a cabo una clasificación objetiva de cada unidad de territorio y facilitar así la comparación y correlación entre los resultados obtenidos por diferentes investigadores. La determinación automática de las formas del terreno elaborada a partir de la modelización de las características del relieve permite un conocimiento profundo del medio físico y constituye una herramienta rápida y eficaz en la gestión y planificación de los espacios naturales protegidos.

Hasta hace relativamente poco tiempo, los estudios geomorfológicos estaban basados en el análisis de características del relieve a partir de mapas topográficos o en la medida directa de determinados parámetros en el campo. La metodología usada para la clasificación de formas del terreno era de tipo manual y estaba basada en los trabajos de Hammond (1954; 1964) y de otros autores como Wallace (1955), Linton (1970) o Crozier & Owen (1983). El procedimiento desarrollado por Hammond utilizaba una ventana de 9.65 Km de lado, de manera que los resultados son válidos a una escala muy pequeña (1:5000000). Posterior-

mente, Dikau et al. (1991) desarrollaron un procedimiento de clasificación automática del relieve de Nuevo México (EEUU) basado en los trabajos de Hammond, utilizando como fuente básica de información un MDE de 200x200 m² de resolución. Los resultados obtenidos de esta forma eran mucho más precisos, permitiendo su explotación a escalas más bajas (como 1:200000 ó 1:100000).

La clasificación automática de las formas del terreno permite obtener resultados comparables a los realizados mediante métodos tradicionales. Además, se trata de una metodología versátil, que permite su mejora y adaptación a áreas específicas. Así, desde los trabajos de Dikau (Dikau, 1990; Dikau et al., 1991; Dikau & Schmidt, 1999), su metodología general ha sido aplicada por diversos autores con ligeras modificaciones logrando resultados aceptables.

Aunque el proceso de clasificación automática constituye una mejora evidente a la hora de obtener resultados con rapidez y a partir de una información básica limitada, es conveniente recordar que la terminología debe ser revisada continuamente (Brabyn, 1996), debido quizás a las diferencias entre la fuente de información inicial (el tipo de modelo del terreno), a la escala de trabajo y a las características locales del área de estudio.

Aunque la clasificación automática del paisaje ofrece problemas, también posee grandes ventajas respecto a la clasificación manual (Dymond et al., 1995; Jenco, 1992). En primer lugar, se lleva a cabo de manera totalmente objetiva. En segundo lugar, puede aplicarse a áreas de gran tamaño para obtener resultados válidos y precisos con gran velocidad (Band, 1987; Guzzetti & Reichenbach, 1994).

2. Área de estudio

La cuenca del Río Tepalcatepec (Figura 1) se extiende aproximadamente entre los 18° y 20° (N) y los 103° y 102° (O). Su superficie total abarca aproximadamente 17.000 Km². La porción más importante de su superficie se encuentra dentro de los límites del estado de Michoacán, mientras que el extremo noroccidental corresponde al estado de Jalisco. Está limitada por el Eje Neovolcánico, al norte, y la Sierra Madre del Sur en su extremo meridional. El conjunto de sierras correspondientes al Eje Neovolcánico está separado de la depresión

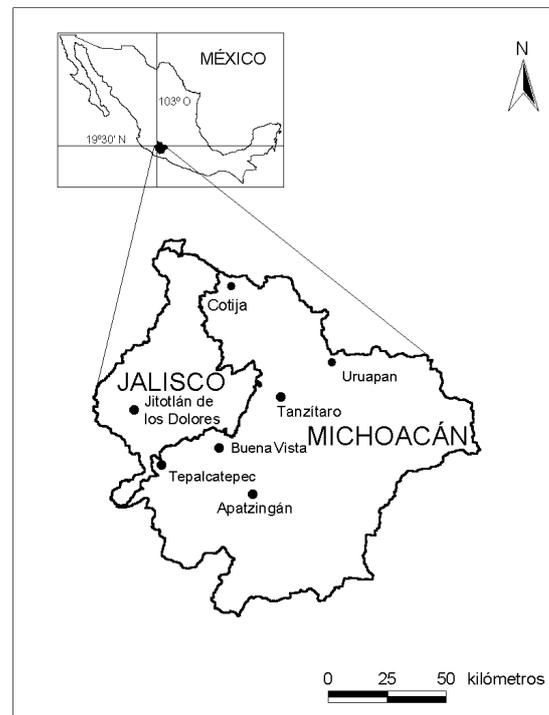


Figura 1. Área de estudio.
Figure 1. Study area.

del Río Tepalcatepec por un gran escarpe orientado hacia el sur, con una elevación comprendida entre los 1.000 y los 2.500 msnm. El relieve es muy accidentado y posee una gran diversidad de paisajes. La elevación media de la cuenca está en torno a 1.150 msnm, aunque el rango de elevaciones va desde 126 (confluencia entre el Río Tepalcatepec y el Balsas) hasta 3.860 msnm del Pico Tancitaro. (Figura 2 y Figura 3)

La cuenca está formada por sustratos ígneos en su mayoría, tanto de tipo intrusivo como extrusivo. La mitad NE de la cuenca está formada por sustratos casi exclusivamente extrusivos que se extienden sobre una gran superficie de aproximadamente 11.500 Km². Los componentes mayoritarios de este grupo son basaltos (aproximadamente 6.000 Km²) y andesitas (2.081 Km²). Otro tipo de lavas existentes son dacitas, riolitas y tobas.

Los sustratos ígneos de tipo intrusivo están formados mayoritariamente por granitos y granodioritas, que comprenden en conjunto una superficie de unos 2.300 Km². Básicamente, esto incluye los municipios de Jitotlán de los Dolores y Manuel M.

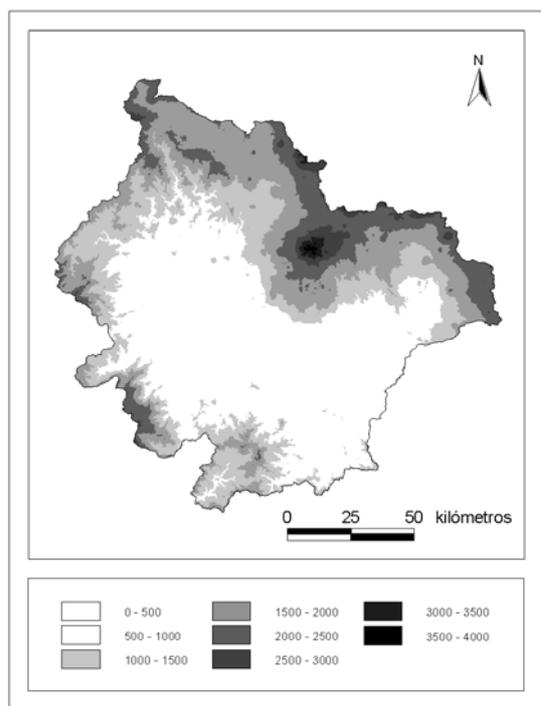


Figura 2. Mapa topográfico de la cuenca del Río Tepalcatepec.
Figure 2. Elevation map of River Tepalcatepec basin.

Diéguez (en el Estado de Jalisco), así como algunos otros puntos dispersos de extensión menos importante.

Los sustratos sedimentarios se distribuyen principalmente sobre el extremo SO de la cuenca, ocupando parte de municipios como Aguililla, Apatzingán, Gabriel Zamora, Parácuaro o Múgica (en el Estado de Michoacán). Están formados por areniscas (1.400 Km²), calizas (500 Km²) y otros sustratos menos representativos pero frecuentes, como lutitas o brechas sedimentarias. Los materiales sedimentarios de origen aluvial y coluvial se distribuyen ocupando el centro del valle de Apatzingán, sobre una superficie aproximada de 1.650 Km².

3. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es la realización de un modelo digital del terreno como herramienta básica para el posterior análisis de uni-

dades geomorfoedáficas y, especialmente, el estudio del riesgo de erosión del suelo en la cuenca del Río Tepalcatepec. Para ello, se contempla, además del análisis del MDE, la realización de modelos digitales del terreno derivados de este, como los que se enumeran a continuación:

- Modelo digital de pendientes (MDP).
- Modelo digital de la curvatura del terreno (MDC).
- Modelo digital del relieve local (MDR).

Finalmente, y a partir de estos mapas derivados, se llevó a cabo la realización de un modelo digital de formas del terreno (MDF), mediante la clasificación automática de las formas fisiográficas.

4. Metodología

Como fuente básica de información se ha utilizado el MDE de la cuenca del Río Tepalcatepec, con una resolución de 100 x 100 m², a partir del cual se ha obtenido información acerca de otras características del terreno, como la pendiente, la posición relativa o el relieve. Este nivel de detalle resulta adecuado para la obtención de un MDT de la cuenca completa, y permite la reproducción de mapas a escala 1:50000.

El análisis y explotación cartográfica de los datos se ha realizado mediante el software ARC/INFO (ESRI, 1982-1997) y Arc View GIS (ESRI, 1992-1996). A partir del MDE se han modelizado diversas variables del terreno, como la pendiente, la curvatura del perfil topográfico, la exposi-

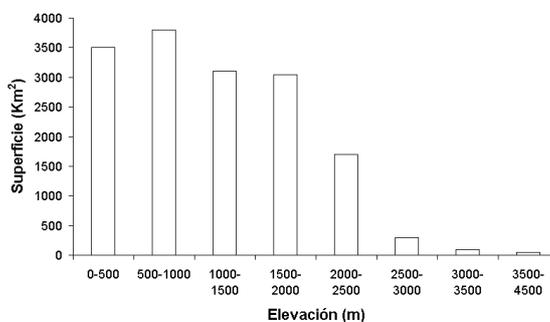


Figura 3. Distribución superficial de clases de elevación.
Figure 3. Surface distribution of elevation classes.

ción de las laderas, el relieve local y la elevación relativa de cada punto respecto a su entorno.

Finalmente, siguiendo una metodología basada en la establecida por Hammond (1964) y Dikau et al. (1991), se ha realizado la clasificación automática de las formas del terreno.

Elevación

Un MDE se define como una estructura numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. De esta forma, un MDE puede describirse mediante la siguiente ecuación (Felicísimo, 1994):

$$z = z(x, y)$$

donde:

- z es la elevación del punto situado en las coordenadas x e y.
- z es la función que relaciona la variable z con su localización geográfica.

Un MDE se construye utilizando un método de interpolación de elementos finitos. Para ello se digitalizaron las curvas de nivel a partir de mapas topográficos (E 1:50000), así como algunos puntos de elevación conocida (puntos geodésicos, picos, accidentes geográficos, etc.). Se comprobó la exactitud del modelo mediante la comparación visual de la red hidrográfica real con la generada a partir del MDE y la comprobación de determinados puntos críticos.

Pendientes

La pendiente se ha calculado a partir del MDE, como la máxima tasa de cambio de cada celda respecto a sus vecinas. Con el objetivo de obtener resultados coherentes con los de Hammond (1964) y Dikau (Dikau et al., 1991), se ha expresado la pendiente como porcentaje de inclinación. La pendiente se ha dividido en siete clases, asignando una clase de pendiente a cada celdilla del modelo digital.

Para realizar el cálculo de la pendiente es necesario definir en primer lugar el gradiente topográfico. En un MDE se puede describir la elevación en el

entorno de un punto problema como un plano de ajuste, cuya expresión matemática sería la siguiente:

$$z = a_{00} + a_{10} \cdot x + a_{01} \cdot y$$

donde los coeficientes a10 y a01 corresponden a las derivadas de la elevación con respecto a los ejes x e y, respectivamente:

$$a_{10} = \frac{\partial z}{\partial x}, a_{01} = \frac{\partial z}{\partial y}$$

Estos coeficientes pueden representarse mediante los vectores V y W, definidos por las componentes para los ejes X, Y y Z. El producto vectorial entre estos dos vectores es otro vector, P, perpendicular a ambos y al plano que los contiene, es decir, a la superficie del terreno.

$$P = V \cdot W = \begin{bmatrix} \partial x \\ 0 \\ \partial z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \partial y \\ \partial z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\partial x \cdot \partial y \\ -\partial x \cdot \partial z \\ -\partial x \cdot \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\partial z / \partial y \\ -\partial x / \partial y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{10} \\ -a_{01} \\ 1 \end{bmatrix}$$

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector gradiente en ese punto, P, y el eje Z (vertical). El eje Z puede expresarse también como un vector, H. El ángulo (a) entre estos dos vectores puede calcularse de la siguiente manera:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{P \cdot H}{\text{mod}(P) \cdot \text{mod}(H)} \right) = \frac{1}{\sqrt{a_{10}^2 + a_{01}^2 + 1}} = \tan^{-1} \sqrt{a_{10}^2 + a_{01}^2}$$

donde mod(P) es el módulo del vector P, y mod(H) el del vector H.

La pendiente de cada celda ha sido calculada a partir de un plano ajustado a los valores de elevación de una ventana de 3x3 celdas con la celda problema situada en el centro (Burrough, 1986). Debido a que esta expresión proporciona el valor de la pendiente en radianes, es necesario transformarlo a unidades porcentuales.

Curvatura del perfil

Un MDC puede usarse para describir características relativas al drenaje, lo que puede permitir el análisis de aspectos relacionados con la acumulación de escorrentía y la disponibilidad de agua (Zeverbergen y Thorne, 1987; Moore et al., 1991).

El MDC indica el grado de concavidad/convexidad de una superficie, de modo que un valor positivo indica convexidad y un valor negativo concavidad. Un valor igual o muy próximo a cero significa que la superficie es plana.

La curvatura puede definirse como la tasa de cambio de la pendiente, y depende, por lo tanto, de la derivada de segundo grado de la elevación (Felicísimo, 1994). De este modo, podemos decir que la curvatura del terreno equivale a la suma de las derivadas parciales de segundo orden respecto a los ejes de coordenadas (x e y):

$$C = \frac{\partial^2 z}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial^2 y^2}$$

El MDC, por lo tanto, puede calcularse a partir de cada celda del MDE original, mediante una aproximación polinómica a una superficie de ajuste de segundo grado:

$$z = a_{00} + a_{10} \cdot x + a_{01} \cdot y + a_{11} \cdot x \cdot y + a_{20} \cdot x^2 + a_{02} \cdot y^2$$

donde las derivadas primeras de z respecto de x e y son:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = a_{10} + 2 \cdot a_{20} \cdot x + a_{11} \cdot y$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = a_{01} + 2 \cdot a_{02} \cdot y + a_{11} \cdot x$$

Y, por lo tanto:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial^2 x} = 2 \cdot a_{20}$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial^2 y} = 2 \cdot a_{02}$$

De esta manera, la curvatura en cada celda del MDT puede calcularse de la siguiente manera:

$$C = 2(a_{20} + a_{02})$$

Según la expresión, valores negativos indican concavidad (cubetas de sedimentación, valles, etc.) mientras que valores positivos indican convexidad (macizos, domos, cumbres, partes altas de las laderas, etc.).

Relieve local

El estudio del relieve local se ha realizado directamente a partir del MDE. Para ello, se ha delimitado una ventana cuadrada de 1000 m de

lado correspondiente a cada celda (es decir, una ventana que incluye a 100 celdas, centrada en la celda problema, como se muestra en la Figura 4). A continuación, se ha determinado el rango de elevación en cada ventana, asignando ese valor a la celda central. A partir de este rango de elevación se ha

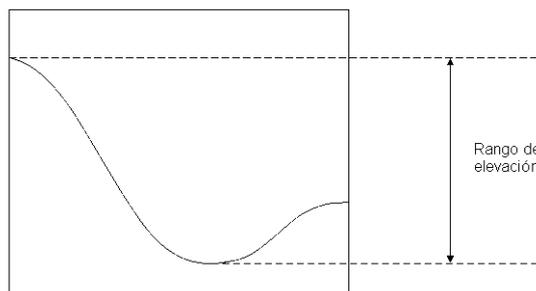


Figura 4. Determinación del relieve local.
Figure 4. Determination of local relief.

Tabla 1. Criterio para la clasificación del relieve local.
Table 1. Classification of local relief.

Rango (m)	Relieve	Código
0-30	Relieve suave	1
30-90	Relieve localizado	2
90-150	Relieve moderado	3
150-300	Relieve fuerte	4
300-900	Relieve montañoso	5

clasificado el relieve local, utilizando el criterio mostrado en la Tabla 1 (Dikau et al., 1991).

Posición relativa

La posición relativa se ha calculado en cada punto del terreno respecto a los puntos cercanos. De esta manera puede diferenciarse entre superficies más o menos llanas situadas a diferente elevación sobre el terreno que las circunda. Así puede distinguirse fácilmente entre formas planas como fondos de valle y mesetas elevadas. Para ello se ha delimitado también una ventana de 1000 m de lado, delimitando la máxima y la mínima elevación de la superficie incluida. Los puntos situados por encima de la mitad del rango comprendido entre estas dos cotas se catalogaron como tierras altas. El resto, fueron clasificadas como tierras bajas. Este proceso se muestra esquemáticamente en la Figura 5.

Formas del terreno

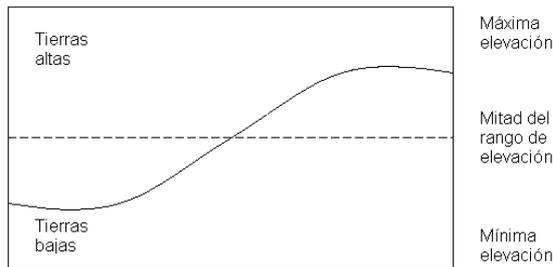


Figura 5. Determinación de la posición relativa.
 Figure 5. Determination of relative position.

Las formas del terreno son el resultado de los procesos de modelado que actúan sobre la superficie. El modelado es, por lo tanto, función de los distintos agentes geomorfológicos que tienen lugar en la génesis del paisaje. El clima, la geología, la vegetación o el suelo son algunos de estos factores. Teniendo esto en cuenta, Hammond (1964) llevó a cabo una clasificación general de las formas del terreno en EEUU, diferenciando cinco tipos principales de relieve: llanuras, mesetas, llanuras con colinas o montañas, colinas/montañas abiertas y colinas/montañas. A su vez, cada uno de estos tipos principales fue dividido en clases y subclases en función de la pendiente, el relieve local y el tipo de perfil (curvatura/convexidad de la superficie).

Basándose en los trabajos ya citados de Hammond, Dikau et al. (1991) realizaron la clasificación automática del terreno en áreas de EEUU. Iriagaray et al. (1997) y Martínez-Zavala et al. (2004) llevaron a cabo estudios similares en España a una escala más detallada. La misma metodología ha sido aplicada en el presente trabajo, aunque con algunas modificaciones.

La clasificación automática de formas principales del terreno se ha llevado a cabo a partir de la pendiente, el relieve local y la posición relativa. Para producir resultados homogéneos y comparables a los obtenidos por Hammond y Dikau, la pendiente se ha considerado “suave” por debajo del 4% (Tabla 2). En la metodología utilizada por Dikau et al. (1991) el factor pendiente se describía según el porcentaje de la superficie con pendiente suave, y se establecía a partir de una ventana de 1.000 m de lado, generalizándose a cada celdilla de 40.000 m². En este trabajo se ha utilizado como unidad básica una celdilla de 10.000 m². Esto per-

Tabla 2. Criterio para la clasificación de la pendiente.
 Table 2. Classification of slope.

Porcentaje de la ventana con pendiente suave	Código
Más del 80 % con pendiente suave	1
50-80 % con pendiente suave	2
20-50 % con pendiente suave	3
<20 % con pendiente suave	4

mite obtener resultados con una precisión más elevada.

Para ello, a cada celdilla del MDT se le ha asignado un código compuesto por tres dígitos, correspondientes a cada uno de los tres factores mencio-

Tabla 3. Criterio para la clasificación de formas del terreno.
 Código: pendiente/relieve local/posición relativa.

Table 3. Classification of landforms. Code: slope/local relief/relative position.

Tipo	Clase	Código
Llanuras	Llanuras planas o casi planas	111 112
	Llanuras suaves con relieve localizado	121 122
	Llanuras irregulares de bajo relieve	211 212
	Llanuras irregulares de relieve moderado	221 222
Mesetas	Mesetas con relieve moderado	131 231
	Mesetas con relieve considerable	141 241
	Mesetas con alto relieve	151 251
	Mesetas con relieve muy alto	161 261
Llanuras con colina o montañas	Llanuras con colinas	132 232
	Llanuras con colinas altas	142 242
	Llanuras con montañas bajas	152 252
Colinas y montañas abiertas	Llanuras con montañas altas	162 262
	Colinas abiertas muy bajas	311 312
	Colinas abiertas bajas	321 322
	Colinas abiertas moderadas	331 332
	Colinas abiertas altas	341 342
	Montañas abiertas bajas	351 352
Colinas y montañas	Montañas abiertas altas	361 362
	Colinas muy bajas	411 412
	Colinas bajas	421 422
	Colinas moderadas	431 432
	Colinas altas	441 442
	Montañas bajas	451 452
	Montañas altas	461 462

nados. Posteriormente, cada código se clasificó utilizando el criterio que se muestra en la Tabla 3.

Resultados

Mapa de pendientes

El mapa de rangos de pendiente obtenido se muestra en la Figura 6 y su distribución en superficie (Km²) en la Figura 7.

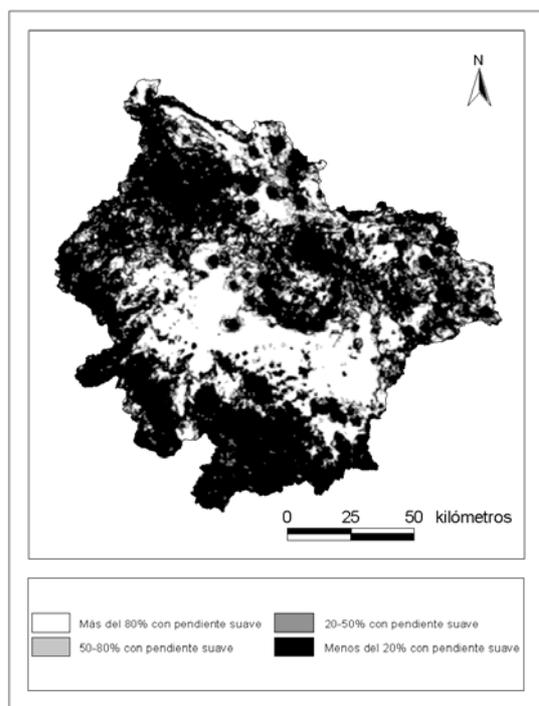


Figura 6. Modelo digital de pendientes.
Figure 6. Digital slope model.

En la primera clase de pendiente (0-3%) la escorrentía superficial es lenta o muy lenta. En este tipo de superficies no existen dificultades para el uso de maquinaria agrícola y, en general, tampoco existe peligro de erosión hídrica. Normalmente se trata de valles y terrazas de origen fluvial donde predominan los procesos de deposición de sedimentos procedentes de la escorrentía de las laderas circundantes y de las corrientes de agua.

En el intervalo que va del 3 al 16%, la velocidad de la escorrentía es moderada o rápida. La maquinaria agrícola pesada es difícil de utilizar, y suele exigir el cultivo en terrazas artificiales, especialmente a partir del 8%.

En la clase del 16 al 21%, se incluyen áreas montañosas moderadamente escarpadas, con escorrentía muy rápida, y el uso de máquinas es muy complicado. Por esta razón, el cultivo del suelo es muy difícil, siendo preferible su dedicación a usos pecuarios.

En el intervalo del 21 al 31% existe una escorrentía superficial muy elevada. Las laderas que

presentan pendientes mayores del 30%, prácticamente no son aptas para las prácticas agrícolas y el uso predominante es forestal. En este caso, son aconsejables las medidas de protección.

Los rangos de pendiente más suave (0-8%) se extienden sobre una superficie de aproximadamente 8.800 Km², lo que representa casi el 60% de la cuenca (las áreas más aplanadas corresponden principalmente a los municipios de Apatzingán, Buenavista, Jilotlán, Múgica, Parácuaro y Tepalcatepec, asociados a la depresión del Río Tepalcatepec).

Los rangos de pendiente moderada (8-21%) y escarpada (21-41%) se distribuyen en los márgenes de la cuenca. Ocupan un total de 5.180 Km² (34% de la superficie total). Se incluye aquí parte de la vertiente norte de la Sierra Madre del Sur (municipios de Aguililla, Apatzingán, Coalcomán y Tumbiscatío), así como los conjuntos montañosos de los municipios de Cotija y Tocuambo, pertenecientes al Eje Neovolcánico.

Las pendientes muy escarpadas (superiores al 41%) se distribuyen también sobre estos mismos conjuntos, pero ocupando una superficie de unos 15 Km² (apenas un 0.1% de la superficie total). Estas laderas muy escarpadas pueden encontrarse en puntos de la Sierra Madre del Sur y más al norte, sobre el conjunto montañoso asociado al Pico del Tancitaro.

Mapa de curvatura del perfil

El mapa de morfología del perfil se muestra en la Figura 8. Dependiendo de la resolución del modelo digital y de las dimensiones de la ventana de vecindad que se haya utilizado durante el proce-

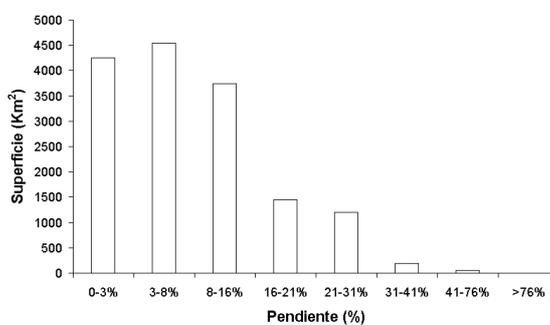


Figura 7. Distribución superficial de las clases de pendiente.
Figure 7. Surface distribution of slope classes.

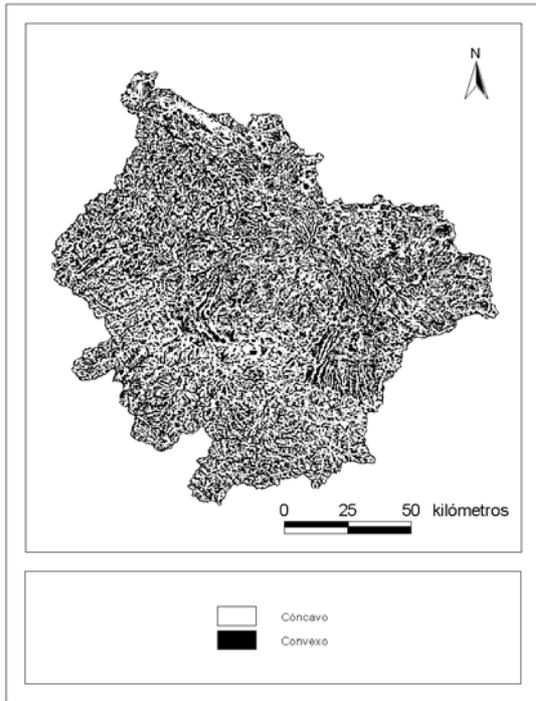


Figura 8. Modelo digital de curvatura.
 Figure 8. Digital curvatura model.

so analítico, es posible detectar formas de mayor o menor tamaño. De este modo, una misma formación (como una ladera o una garganta) puede dividirse en formaciones convexas o cóncavas si se analizan con distinto detalle.

El mapa final ha sido filtrado con el objetivo de eliminar información poco útil, de manera que queden reflejadas las formaciones importantes a la escala de trabajo. El resultado ha sido confrontado de manera visual con un modelo sombreado del terreno obtenido a partir del MDE, para detectar posibles incongruencias. Como se muestra en la Figura 9, aproximadamente un 53% de la superficie total posee un perfil de tipo cóncavo. El 47% restante, convexo.

De este modo, las principales formaciones montañosas (correspondientes a las sierras del Estado de Jalisco o el sistema montañoso volcánico) ofrecen un perfil mayoritariamente convexo. Aquí predominan los procesos de erosión hídrica frente a la edafogénesis, como resultado de la acción de la escorrentía superficial.

Las áreas de deposición de sedimentos coluviales y piedemontes interrumpen la forma de la lade-

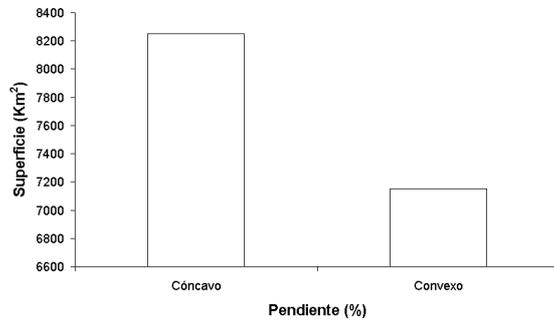


Figura 9. Distribución superficial del tipo de perfil del terreno.
 Figure 9. Surface distribution of profile types.

ra, ofreciendo una morfología cóncava como resultado de los procesos geomorfológicos.

Otras zonas de morfología cóncava detectadas coinciden con los principales valles fluviales y cuerpos de agua (Río Tepalcatepec por ejemplo) y formaciones lacustres (como el lago San Juanico, en Cotija).

Mapa de relieve local

El mapa de relieve local obtenido se muestra en la Figura 10. En la Figura 11 se muestra la distri-

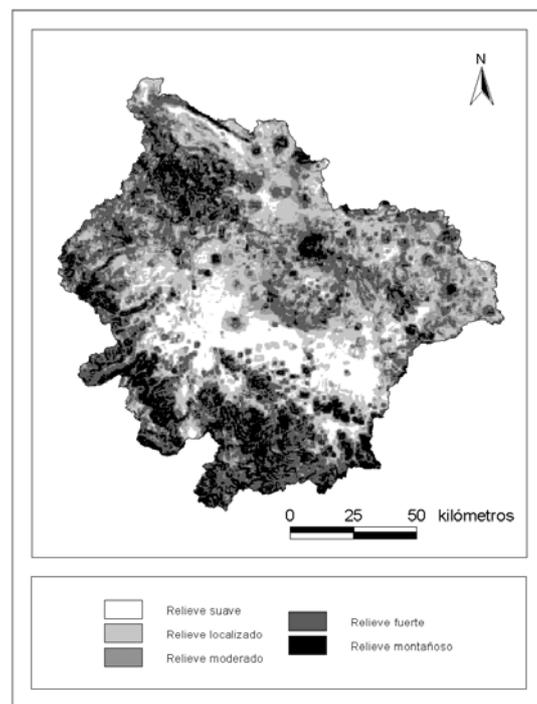


Figura 10. Modelo digital del relieve.
 Figure 10. Digital relief model.

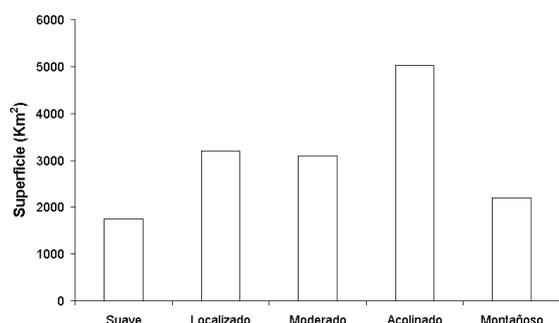


Figura 11. Distribución superficial de las clases de relieve.
Figure 11. Surface distribution of relief classes.

bución superficial de cada clase de relieve establecida.

El valle central del Río Tepalcatepec posee un relieve muy suave, con diferencias de cota menores de 30 metros. En total, esta superficie representa aproximadamente el 11% de la cuenca.

La transición entre el valle y las laderas de las sierras muestra un relieve localizado a moderado, con desniveles locales entre 30-90 y 90-150 m, respectivamente. Se trata de llanuras con promontorios aislados o formaciones correspondientes al piedemonte de las principales unidades montañosas. En conjunto, estos rangos de relieve cubren el 40% de la superficie de la cuenca.

Las sierras, especialmente los conjuntos montañosos que bordean la cuenca en sus límites N a S y algunas formaciones que destacan en su entorno como las laderas del volcán Tancítaro, poseen un relieve fuerte a montañoso (150 a 900 m).

Mapa de formas del terreno

Se han diferenciado 5 clases (Figura 12) y 17 subclases distintas en función de la pendiente, el relieve y la posición relativa de cada punto del terreno. La distribución en superficie de estas formas principales se muestra en la Figura 13.

En total, las superficies llanas más o menos aplanadas comprenden el 31% de la superficie de la cuenca. Estas formas han sido subdivididas en tres clases distintas: llanuras planas o casi planas, llanuras suaves con relieve localizado, llanuras irregulares de bajo relieve y llanuras irregulares de relieve moderado.

Las llanuras planas o casi planas ocupan un área de 1.664 Km², lo que corresponde al 12% de

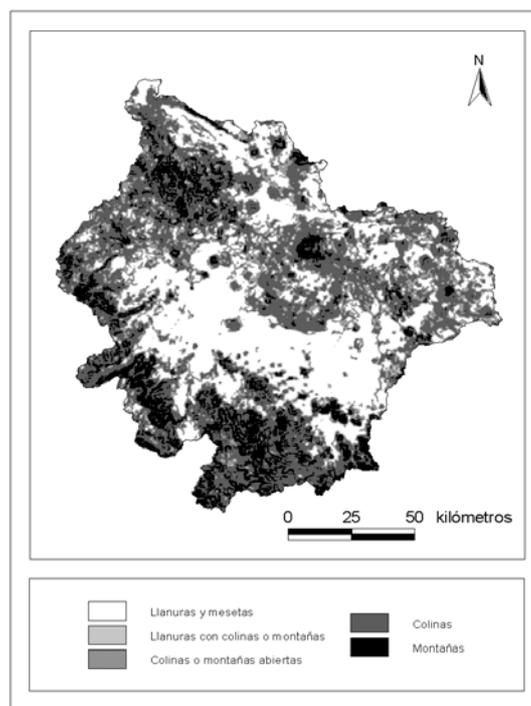


Figura 12. Modelo digital de clases principales de formas del terreno.

Figure 12. Digital model of main classes of landforms.

la cuenca. Se trata de superficies planas, atravesadas por una red de cauces dendrítica o paraleliforme, y pueden estar sujetas a inundaciones estacionales. Destacan dos formaciones principales: la primera y más extensa, formada por los valles de Buenavista, Sta. Ana Amatlán y, mayoritariamente, el valle de Apatzingán, constituido por materiales coluviales cuyas aguas vierten al Río Tepalcatepec. Esta formación ocupa una extensión de aproxima-

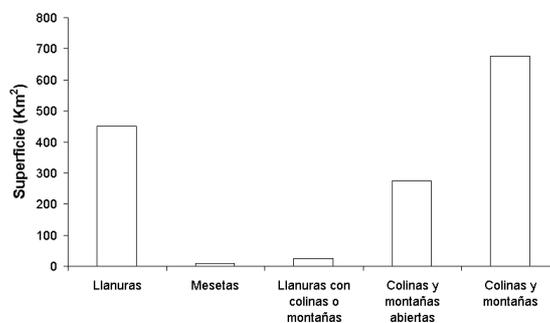


Figura 13. Distribución de clases principales de formas del terreno.

Figure 13. Distribution of main classes of landforms.

damente 88 Km de largo por 19 de ancho y se halla orientado en sentido NO - SE. En ella destacan algunos promontorios aislados como el Cerro de Buenavista Tomatlán (907 msnm). La segunda se encuentra asociada a la depresión del lago San Juanico (Cotija), al NW del área de estudio.

El resto de clases de llanura y llanuras con colinas o montañas se sitúan bordeando a esta formación principal, en los puntos en que limita con el inicio de las laderas de colinas y montañas.

Las mesetas constituyen porciones de terreno elevado, relativamente planas, y rodeadas de valles o barrancos. Su extensión no es importante (apenas el 1% de la cuenca), y se presentan formando enclaves aislados.

Las colinas y montañas abiertas están representadas por 4 subclases, y ocupan en total una superficie de 2777 Km² (19% de la cuenca). En conjunto, estas formaciones ocupan las laderas abiertas al valle que corresponden a la falda de las sierras y los principales conjuntos montañosos.

La clase de colinas y montañas ocupa la mayor parte de la cuenca, 47% de la superficie total, repartiéndose entre las áreas correspondientes al Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur incluidas dentro de la cuenca. Las colinas bajas y moderadas se extienden sobre una parte residual (de la clase de colinas y montañas), mientras que colinas altas y montañas ocupan respectivamente 4.457 y 2.248 Km² (31 y 16% de la superficie de la cuenca). Las formaciones más destacables en este caso están constituidas por los núcleos montañosos del Tancítaro, las Sierras de Tepalcatepec, Coalcomán, Aguililla y Apatzingán (Michoacán) o la Sierra de Jalmich (en la frontera entre los estados de Jalisco y Michoacán).

Finalmente, la Figura 14 muestra una vista tridimensional del área de estudio, clasificada en función de las formas determinadas.

Conclusiones

Mediante un método jerárquico de clasificación se ha dividido la cuenca del Río Tepalcatepec (Estado de Michoacán) en cinco clases de formas principales. La superficie incluida en cada clase está caracterizada por una serie de características geomorfológicas que la distinguen de las áreas vecinas. A su vez, cada clase ha sido dividida en

subclases, de modo que se han distinguido 17 unidades de terreno.

A partir del modelo digital de formas del terreno se ha generado una vista en tres dimensiones que permita evaluar los resultados de una manera visual y rápida (Figura 14). Los resultados muestran que el método utilizado permite identificar con fiabilidad las principales formaciones del terreno, y con mucho mayor detalle, un número elevado de subclases. Como objetivo de futuras investigaciones, el uso combinado de imágenes de satélite y de cartografía geológica preexistente a una escala adecuada puede permitir una mayor precisión en la identificación de las geoformas, en el levantamiento de nueva información, en el análisis físico de cuencas hidrográficas, o en el caso de la realización de un mapa de suelos, de riesgos geológicos o de erosión.

La clasificación de las formas del terreno propuesta en el presente trabajo refleja las principales diferencias físicas y estructurales del área estudiada. Sin embargo, los resultados obtenidos pueden ser mejorados. El uso de un MDE más detallado podría permitir la identificación de microformas que no pueden percibirse con la resolución empleada, como formas fluviales que aparecen como superficies planas.

Agradecimientos

El presente trabajo constituye parte de los resultados preliminares del subproyecto de investigación Cartografía y Descripción de Unidades Ambientales en la Cuenca del Río Tepalcatepec, encuadrado en el proyecto Sustentabilidad Patrimonial de la Cuenca del Río Tepalcatepec (Estado de Michoacán, México). Este proyecto se lleva a cabo mediante un convenio de colaboración entre el Colegio de Michoacán AC (Michoacán, México), el Laboratorio de Sinecología de la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo (Michoacán, México) y el grupo de investigación Suelos y Medio Ambiente (RNM-274) de la Universidad de Sevilla (España).

En especial, los autores desean agradecer la ayuda prestada por el Prof. Fernando Guevara (UMSNH), coordinador del subproyecto, sin la cual este trabajo no hubiese podido llevarse a cabo. El Prof. Guevara puso a nuestra disposición el equipamiento informático de su laboratorio y parti-

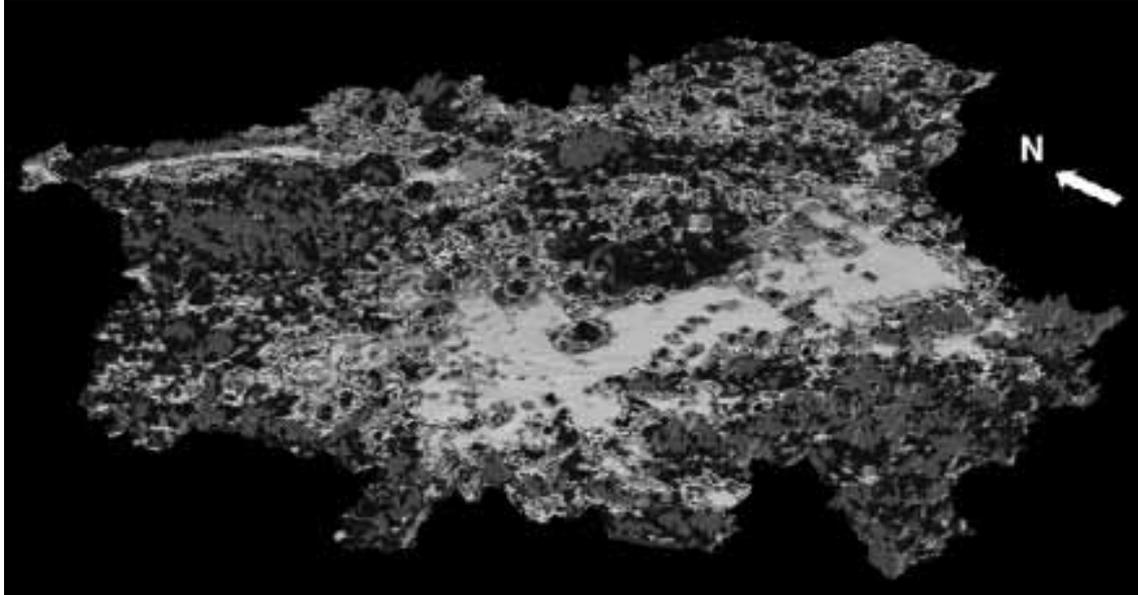


Figura 14. Vista tridimensional (la dimensión vertical ha sido exagerada).
Figure 14. 3-D view (vertical dimension has been exaggerated).

cipó en las excursiones de reconocimiento del terreno.

Los doctores Alejandro Toledo, Juan Ortiz Esteban Barragán (Colegio de Michoacán, AC), coordinadores generales del proyecto, han prestado también su apoyo en todo momento, poniendo a nuestra disposición la cartografía y la información digital disponible en el Colegio. El Lic. Marco A. Hernández, técnico de SIG del Departamento de Cómputo del Colegio de Michoacán, AC, dedicó amable y desinteresadamente su tiempo al procesamiento de la cartografía digital.

Referencias

- Anaya, M. (2003). Modelo de distribución potencial de usos forestales basado en parámetros edáficos, geomorfológicos, climáticos y topográficos. Tesis Doctoral (Universidad de Sevilla). Sevilla (España).
- ASPRS (1994). The GIS Application Book. Examples in Natural Resources: A Compendium. William J. Ripple (ed.). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. EEUU.
- Band, L.E. (1986). Topographic partitioning of watersheds with digital elevation models. *Water resource Res.* 22:15-24.
- Bellinfante, N., Jordán, A., Anaya, M., & Martínez-Zavala, L. (2002). Propuesta metodológica para la realización de un modelo de distribución potencial de usos forestales basado en parámetros geomorfoedáficos, climáticos y topográficos (Memoria del proyecto). Universidad de Sevilla – Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía. Sevilla (España).
- Brabyn, L. (1996). Landscape Classification using GIS and National Digital Databases. Tesis Doctoral. University of Canterbury. Canterbury (N. Zelanda).
- Burrough, P.A. (1986). Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment. Oxford University Press. New York (EEUU).
- Crozier, M.J. & Owen, R.C. (1983). Terrain evaluation for rapid ecological survey. *Physical Geography*. University of Victoria. Wellington (N. Zelanda).
- Dikau, R. (1990). Geomorphic landform modelling based on hierarchy theory. *Proceedings 4th International Symposium on Spatial Data Handling*. Vol. 1:230-239. Zürich (Suiza).
- Dikau, R., & Schmidt, J. (1999). Georeliefklassifikation. En: Schneider-Sliwa, R., Schaub, D., & Gerold, G. (eds.). *Angewandte landschaftsökologie*. Springer. Stuttgart (Alemania). Pp. 217-244.
- Dikau, R., Brabb, E.E., & Mark, R. (1991). Landform classification of New Mexico by computer. US Geological Survey, Open File Report 91/634.
- Doyle, F.J. (1978). Digital terrain models: an overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44/12:1481-1485.
- Dymond, J.R., De Rose, R.C., & Harmsworth, G.R. (1995). Automated mapping of the land components from digital ele-

- vation data. *Earth Surface Processes and Landform*, 20:131-137.
- ESRI (1982-1997). *ARC/INFO Version 7.1.2*, Redlands (EEUU), Environmental Systems Research Institute Inc. Redlands (EEUU).
- ESRI (1992-1996). *ARC VIEW GIS Version 3.0*. Redlands (EEUU), Environmental Systems Research Institute Inc. Redlands (EEUU).
- Evans, I.S., (1972). General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. En: R.J. Chorley (ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*. Pp: 17-90. Harper and Row, Londres (Reino Unido).
- Felicísimo, A.M. (1994). *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales*. Ediciones PENTALFA. Oviedo (España).
- Gerrard, A.J. (1981). *Soils and landforms. An integration of Geomorphology and Pedology*. Ed. George Allen & Unwin. Londres (Reino Unido).
- Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1994), *Toward the definition of topographic divisions for Italy*. *Geomorphology* 11;57-75.
- Hammond, E.H. (1954). Small scale continental landform maps, *Annals AAG* 44:34-42.
- Hammond, E.H. (1964). *Classes of landsurface form in the forty eight states USA.*, Annual Association of American Geographers v54, 1964. Washington (EEUU).
- Iriagaray, C., Fernández, T., & Chacón, J. (1997). *Aplicación de un sistema de información geográfica al análisis del medio físico en el sector de Rute (Córdoba)*. *Cuaternario y Geomorfología*, 11/1-2:99-112.
- Jenco, M. (1992). The morfometric analysis of georelief, in terms of the theoretical conception of the complex digital model georelief. *Acta fac. rec. nat. universitatis comenianae. Geographica* 33. Bratislava (Eslovaquia).
- Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation*. McGraw Hill. New York (EEUU).
- Jordán, A., & Bellinfante, N. (2000). *Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz)*. *Edafología*, 7-3:83 - 92.
- Lark, R.M. (1999). *Soil-landform relationships at within-field scales: an investigation using continuous classification*. *Geoderma*, 92:141-165.
- Linton, D. (1970). *The assessment of scenery as a natural resource*. *Scottish Geography Magazine* 84(3):219-238.
- Martínez-Zavala, L., Jordán, A., & Illana-Sanmiguel, P. (2004). *Aplicación de un sistema de información geográfica al análisis del medio físico en el Parque Natural Los Alcornocales (Cádiz – Málaga)*. Aproximación a una cartografía geomorfológica a partir de un modelo digital de elevaciones. Almoraima. En prensa
- Martínez-Zavala, L. (2001). *Análisis territorial de la comarca del andévalo occidental: una aproximación desde el medio físico (Tesis Doctoral)*. Sevilla, Universidad de Sevilla. Sevilla (España).
- Moore, I.D., Grayson, R.B., & Landson, A.R. (1991). *Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications*. *Hydrological processes* 5:3-30.
- Ruiz, L.A., Pardo, J.E., Porres de la Haza, M.J., Fernández Sarra, A.(1999). *Relaciones entre las características de modelos digitales de elevación y texturas aplicadas al análisis de la vegetación*. En: Casta, O., & Quintanilla, A. (eds.): *Teledetección. Avances y aplicaciones*. Asociación Española de Teledetección. Albacete (España). Pp. 76-79.
- Wallace, H.W. (1955) *New Zealand landforms*. *New Zealand Geographer* 11(1):17-27.
- Zeuberger, L.W., & Thorne, C.R. (1987). *Quantitative analysis of land surface topography*. *Earth surface processes and landforms* 12:47-56.
- Zinck, J.A. (1988-89). *Physiography and soils – Soil Survey courses*. ITC. Enschede (Holanda).