

EVALUACIÓN GEOMORFOLÓGICA ESTRUCTURAL A TRAVÉS DE MODELOS SOMBREADOS Y PARES ESTEREOSCÓPICOS GENERADOS A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO

José Luis Palacio Prieto*
Jorge López Blanco*
Mario A. Ortiz Pérez*

Resumen

Un Modelo Digital de Elevación (MDE) es una representación digital de la superficie terrestre generada por computadora; es decir, se trata de un conjunto de puntos de los cuales las coordenadas X, Y y Z son registradas en una base de datos.

Los bloques diagrama son representaciones oblicuas del terreno generados a partir de un MDE, que permiten una visualización del terreno, así como algunos otros atributos del paisaje, que en una vista vertical son difíciles de apreciar. Comúnmente, se utiliza una red de separación ajustable ("fishnet representation") aunque también es posible la representación de superficies continuas, como sería el caso de imágenes de satélite o mapas previamente georeferenciados respecto al MDE.

Por otra parte, la obtención de modelos de terreno sombreados implica, en términos generales, la aplicación de filtros direccionales al MDE, ajustables para simular iluminaciones desde diferentes orientaciones.

El objetivo de este trabajo consiste en mostrar la utilidad de las vistas oblicuas y los modelos sombreados en la generación de pares estereoscópicos como una alternativa en la evaluación geomorfológica estructural (lineamientos), especialmente de áreas en las que las fotografías aéreas y/o imágenes de satélite no son, por alguna razón, accesibles.

Summary

A Digital Elevation Model (DEM) is a digital representation of the terrain; that is, a set of points whose x, y and z coordinates are recorded in a database.

Block diagrams are oblique representations of terrain generated from a DEM. Commonly, a "fishnet" graphic mode is used, although it is also possible to represent continuous surfaces, such as maps and satellite images.

Hill shaded models are obtained from DEM through directional filtering. Through this procedure it is possible to simulate shaded maps considering different positions of the source of light.

This paper aims to show the use shaded models and oblique representations in order to make stereopairs, through which geomorphological analyses of structures (lineaments) can be done, especially in those cases in which, for some reason, aerial photographs and/or satellite imagery are not available.

This methodology has a number of advantages in comparison to the traditional methods in structural geomorphology, in which aerial photographs and/or satellite imagery are widely used.

* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 20-850, 01000 México, D. F.

Introducción

Un Modelo Digital de Elevación (MDE) es una representación digital de la superficie terrestre generada por computadora; es decir, se trata de un conjunto de puntos de los cuales las coordenadas X, Y y Z son registradas en una base de datos (Skidmore, 1989). Diversos términos son utilizados para designar a estos modelos, siendo los más comunes los de: datos de elevación digital (Digital Elevation Data, DED), modelo digital de terreno (Digital Terrain Model, (DTM), datos de elevación digital del terreno (Digital Terrain Elevation Data, DTED), entre otros.¹

Aronoff² reconoce cuatro diferentes métodos de captura y almacenamiento de los datos necesarios para la generación de un MDE (a través de una retícula regular, perfiles equidistantes, digitación de curvas de nivel y por triangulación de una red irregular de puntos), a partir de lo cual se lleva a cabo una interpolación de los valores de altitud, es decir, el MDE.

La aplicación de estos modelos es variada. Burrough (1986), refiere siete posibles productos derivados de los MDE (tabla 1), entre los que se cuentan la construcción de bloques diagrama y la obtención de modelos de terreno sombreados.

Tabla 1. Productos derivados de un MDE (Burrough, 1986)

Bloques diagrama, perfiles y horizontes
Estimaciones de volumen por integración numérica
Mapas de curvas de nivel
Mapas de visual (visual maps)
Mapas de pendiente, convexidad y aspecto
Mapas sombreados
Delineación de cauces y redes de drenaje

Los bloques diagrama son representaciones oblicuas del terreno que permiten una visualización del mismo así como algunos otros atributos del paisaje, que en una vista vertical son difíciles de apreciar. Comúnmente se utiliza una red de separación ajustable ("fishnet representation") aunque también es posible la representación de superficies continuas, como sería el caso de imágenes de satélite o mapas previamente georeferenciados respecto al MDE (figura 1). Normalmente, los algoritmos que han sido desarrollados para generar vistas oblicuas a partir de un MDE (véase por ejemplo Sharpnack, 1969; Lam, 1983; Guth *et al.*, 1987; Hutchinson, 1989; Hodgson, 1989; ILWIS, 1990) cuentan con la posibilidad de manipular, entre otros parámetros, la altura del observador, la orientación del modelo y la escala tanto horizontal como vertical (exageración vertical).

¹ Aronoff, S., *Geographic Information Systems: A Management Approach*, pág. 121.

² *Op. cit.*, pág. 121.

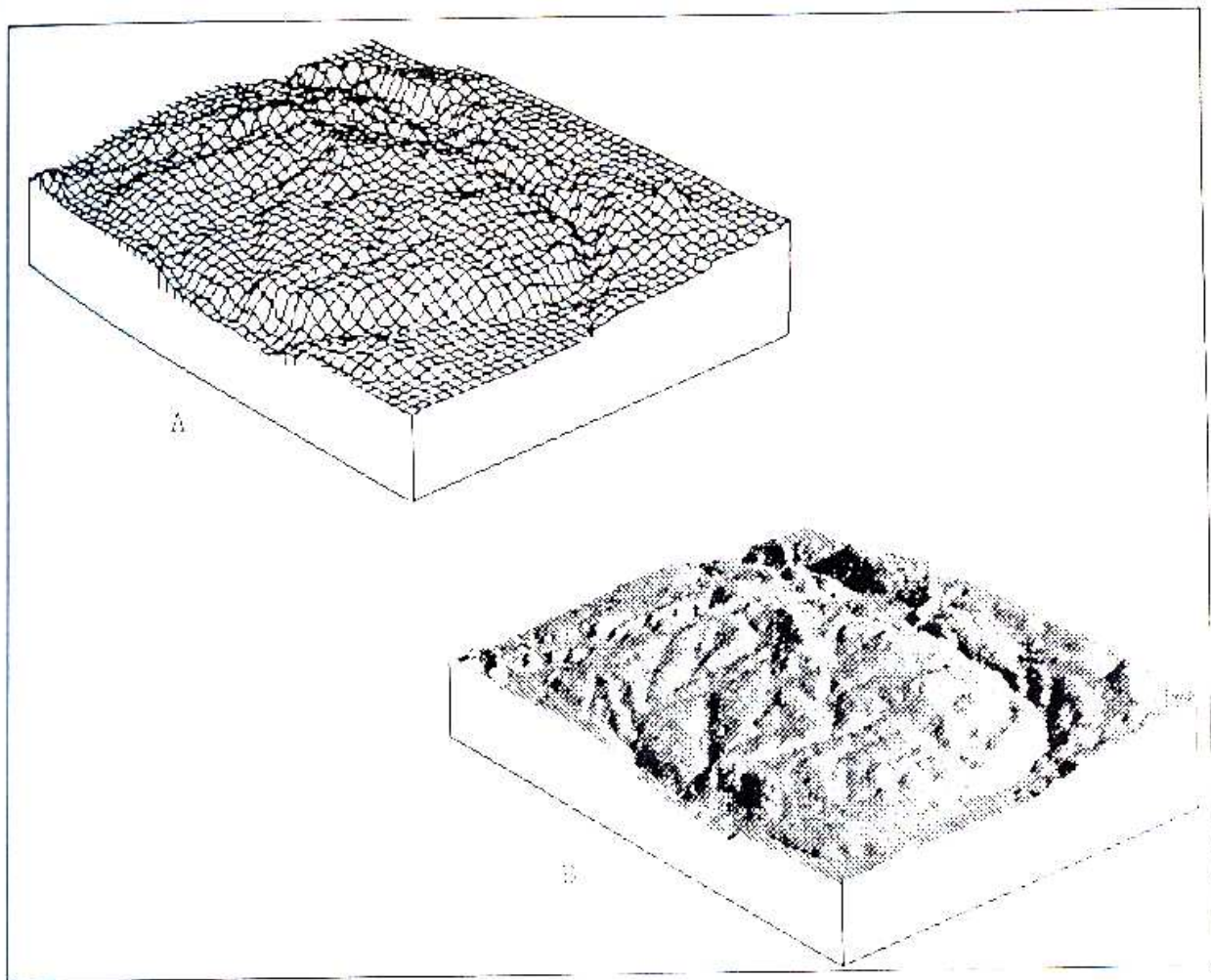


Figura 1. Representación oblicua del terreno a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE). A) representación en red de separación ajustable ("fishnet representation"); B) representación de superficie continua.

Por otra parte, la obtención de modelos de terreno sombreados implica, en términos generales, la aplicación de filtros direccionales al MDE, ajustables para simular iluminaciones desde diferentes orientaciones (véase por ejemplo: Pelton, 1987; Romo, 1989; Ware, 1989; Savazzi, 1990). Se logra de esta manera, una aparente tercera dimensión definida por la distribución de tonos de gris que facilita la percepción visual de las características del terreno.

El objetivo de este trabajo, consiste en mostrar la utilidad de las vistas oblicuas y los modelos sombreados en la generación de pares estereoscópicos como una alternativa en la evaluación geomorfológica estructural (lineamientos), especialmente de áreas en las que las fotografías aéreas y/o imágenes de satélite no son, por alguna razón, accesibles. La aplicación o generación es parte del objetivo central de este trabajo; las fuentes están referidas en el texto. Se evalúa, a manera de ejemplo, una estructura dómica. Para la captura, generación y manipulación de la información, se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) basado en una computadora personal AT-286/386 (ILWIS, Valenzuela, 1988).

Metodología

La captura de la información altimétrica se llevó a cabo a partir de la digitación de curvas de nivel con equidistancias variables (50, 20 y 10 m) en cartas topográficas en escala 1:50 000 publicadas por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, claves I-11 D 73 e I-11 D 83), en las cuales es posible identificar una estructura dómica de origen intrusivo, ubicada en el noroeste de México. El mapa resultante de curvas de nivel fue rasterizado y se le aplicó un algoritmo de interpolación, el cual calcula para cada pixel las dos distancias más cortas a las dos curvas de nivel más cercanas; enseguida se calcula el valor altitudinal del pixel mediante una relación lineal y se obtiene con ello el MDE.

Para la generación del mapa sombreado se requiere de la estimación de la orientación de las celdas individuales (o "píxeles") y de un modelo que determine la reflectancia de cada una de dichas celdas cuando es iluminada por una fuente de luz localizada a 45° sobre la horizontal.³

De acuerdo con Horn (1981), pueden seguirse los siguientes pasos para obtención del modelo sombreado. El primer paso consiste en calcular las pendientes p, q para cada celda o "pixel" en cada uno de los ejes "x" y "y" (direcciones este-oeste y norte-sur, respectivamente) de acuerdo con las siguientes fórmulas definidas a partir de análisis numérico:

$$\left[\frac{\delta Z}{\delta X} \right]_{i,j} = \frac{[(Z_{i+1,j+1} + 2Z_{i+1,j} + Z_{i+1,j-1}) - (Z_{i-1,j+1} + 2Z_{i-1,j} + Z_{i-1,j-1})]}{8\delta x}$$

esto para el eje de las "x", o p; y

$$\left[\frac{\delta Z}{\delta Y} \right]_{i,j} = \frac{[(Z_{i+1,j+1} + Z_{i-1,j+1}) - (Z_{i+1,j-1} + 2Z_{i,j-1} + Z_{i-1,j-1})]}{8\delta y}$$

esto para el eje de las "y", o q.

De la formulación anterior se deriva un "kernel" o matriz de 3 x 3 que es sucesivamente aplicado a todas las celdas del MDE, con lo cual se obtienen los valores p, q para cada una de ellas. La matriz es la siguiente:

$Z_{i-1,j+1}$	$Z_{i,j+1}$	$Z_{i+1,j+1}$
$Z_{i-1,j}$	$Z_{i,j}$	$Z_{i+1,j}$
$Z_{i-1,j-1}$	$Z_{i,j-1}$	$Z_{i+1,j-1}$

³Burrough, P. A., *Principles of Geographic Information Systems*, pág. 52.

El siguiente paso consiste en convertir los valores p , q a valores de reflectancia que quedan representados en forma gráfica con distintos tonos de gris. Para ello, Horn⁴ sugiere la siguiente fórmula de reflectancia:

$$R(p,q) = (1/2) + 1/2(p'+a)/b$$

donde $p' = (p_0 p + q_0 q) / \sqrt{(p_0^2 + q_0^2)}$ es la pendiente (o ángulo de inclinación) de la celda respecto a la fuente de luz. Para una fuente de iluminación en la posición cartográfica estándar (noroeste 45°), $p_0 = 1/\sqrt{2}$ y $q_0 = -1/\sqrt{2}$. Los parámetros a y b permiten la elección de valores de gris para superfocos horizontales y el cambio progresivo de tonalidades en función de los valores de inclinación de cada celda. Horn⁵ recomienda que $a=0$ y $b=1/\sqrt{2}$.

Algunas soluciones para la definición de reflectancia son computacionalmente complejas y puede ser más eficiente crear una tabla de colores ("look-up-table") para convertir directamente pendientes a valores de reflectancia.⁶

En términos prácticos, el procedimiento seguido en este trabajo consistió en los siguientes pasos:

A los valores altitudinales del MDE se les aplicó una serie de matrices de 3 x 3, con las cuales se obtuvieron vistas ortogonales (verticales) sombreadas, simulando ocho diferentes posiciones de la fuente de luz, con el objeto de resaltar, igualmente, lineamientos con distintas orientaciones.

El filtrado direccional, o de convolución lineal (aplicación del "kernel"), es un proceso en el cual cada valor de pixel en un mapa de formato de celdas ("raster"), es sustituido por un nuevo valor obtenido a partir de la aplicación de cierta función sobre los pixeles y sus vecinos.⁷ En este caso, los pixeles vecinos fueron los ocho pixeles adyacentes por tratarse de un filtro de 3 x 3. El procedimiento de aplicación de filtros se hizo de la siguiente manera.

Los valores de altitud de cada pixel del MDE y sus ocho vecinos más cercanos son multiplicados por sus valores correspondientes en el filtro. Los nueve valores resultantes son sumados algebraicamente y el resultado se multiplica por un factor de reducción (ganancia o "gain"). Posteriormente se le suma una constante de desplazamiento para evitar valores negativos ("offset"). El valor resultante al ser desplegado en un monitor de computadora (formato "byte"), permite tener una visión sombreada del terreno usando hasta 256 tonos de gris.

El filtro o matriz utilizado para la simulación de la fuente de luz proveniente del norte fue la siguiente:

$$\begin{matrix} -3 & -3 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 3 \end{matrix}$$

⁴Op. cit.

⁵Op. cit.

⁶Burrough, op. cit., pág. 52.

⁷ILWIS, pág. 109.

Distintas orientaciones de sombreado se obtuvieron al variar la posición de los valores dentro del filtro. Para simular la posición de la fuente de luz en el sur se utilizó:

3	3	3
0	0	0
-3	-3	-3

Para simular la posición en el noroeste:

-3	-3	0
-3	0	3
0	3	3

Y así sucesivamente para obtener ocho diferentes orientaciones.

La salida de los modelos ortogonales sombreados se hizo en impresora laser.

Se generó posteriormente una vista oblicua de los ocho modelos sombreados. El procedimiento para la generación de vistas oblicuas está ampliamente documentado (véase por ejemplo Playstock y Kalley, 1987; Savazzi, 1990). Las vistas oblicuas fueron generadas considerando una desviación de la vertical de 10° ; es decir, que el ángulo de elevación del observador sobre la vertical es equivalente a 80° . Es importante señalar que, con el objeto de obtener el par estereoscópico, la posición del observador en la vista oblicua debe ser concordante con la posición de la fuente de luz, es decir, opuesta a la dirección de las sombras en el modelo. El alargamiento consecuente de las sombras facilita, de esta manera, la generación del efecto estereoscópico. Se asignó una exageración en la escala vertical en el modelo equivalente a tres veces la escala horizontal. El modelo generado se imprimió igualmente en una impresora laser en la misma escala de los modelos ortogonales.

Las impresiones obtenidas contribuyeron en la evaluación geomorfológico-estructural del ejemplo escogido, a partir de la interpretación de los modelos bajo el estereoscopio de espejos.

Área de estudio

El domo "El Pinal" es un plutón de roca tonalítica que forma parte del batolito de California del Sur, asociado éste a la serie de batolitos que se extienden desde la cordillera costera de Alaska hasta el sur de México. Se ubica hacia el extremo norte del estado fronterizo de Baja California, a unos 40 km al NE de la ciudad de Ensenada (véase figura 2). El arreglo estructural que define al domo, consiste en lineamientos de configuración anular distribuidos de manera circundante, formando una secuencia de depresiones atrincheradas e interfluvios de trayectoria arqueada que definen la forma ovoide a lo largo de toda la periferia del domo.



Figura 2. Localización del área en estudio: Domo "El Pinal".

Resultados y discusión

La figura 3 muestra los modelos sombreados del domo considerando ocho distintas posiciones de la fuente de luz. En términos generales, la expresión de los lineamientos está condicionada de manera directamente proporcional a su oblicuidad respecto de la fuente de luz.

La iluminación proveniente del norte (figura 3 posición N) permite apreciar el arreglo que define con claridad los límites de la forma ovoide. Dichos límites se expresan con buena definición debido al efecto de sombra en la curvatura del flanco sur del domo. Este efecto también se ve acentuado por el desnivel topográfico (alrededor de 200 m) existente entre el borde y la depresión del valle de configuración anular que limita al domo de manera circundante.

Los lineamientos radiales de posición transversal y/o diagonales a la fuente de luz son detectados con claridad, por lo que la mayor parte de la estructura en bloques se expresa notablemente, excepto para los bloques que limitan con lineamientos tectónicos de orientación norte-sur ya que éstos se pierden en el arreglo de este modelo.

La iluminación incidente del sur inhibe la configuración anular del domo al quedar iluminadas sin contraste los lineamientos periféricos, excepto los del flanco norte. Se iluminan las superficies de nivelación planar que aún conservan el par de los bloques de forma casi homogénea, salvo en escarpes o lineamientos atrincherados profundos mayores a los 20 m.

Los rasgos más elevados y de mayor pendiente que se exponen de frente hacia el sur quedan intensamente iluminados de tal modo que de manera local los rasgos puntuales y los lineales de escasa longitud no se expresan en el modelo.

En el modelo que simula la iluminación proveniente del Este, la perspectiva dada por las sombras en los flancos occidentales reduce la expresión de las fracturas radiales de disposición transversal a la estructura. Sin embargo, es posible observar los lineamientos longitudinales generalizados norte-sur.

Los detalles de los rasgos lineales que pueden ser detectados en la figura 3 posición W, son condicionados a la composición del relieve y la orientación oblicua del haz de luz. De manera general, los bloques se escalonan altitudinalmente de oeste a este, presentando, para la mayoría de los límites de los bloques, una suavización de la morfología en la imagen.

La iluminación desde NE nulifica los lineamientos de dirección paralela a dicha orientación, pero se contrastan los del oeste-noroeste que son el segundo grupo mayoritario de concentración de fracturas y fallas.

En la posición NW se observa con nitidez el arreglo de los bloques y los lineamientos principales, así como el registro de cimas o elevaciones aisladas.

En la posición SE se invierte el arreglo de la incidencia de luz respecto al anterior modelo; la posición de la fuente de luz permite igualmente observar con claridad la disposición de los bloques que constituyen a la estructura dómica.

La posición SW de la fuente de luz inhibe la definición de los lineamientos con orientación NE-SW, al quedar éstos alineados en el sentido de la misma proyección de luz y que en este caso son los rasgos lineales mayoritarios. Se pierde, así, la mayoría de los límites de los bloques.

Con base en la interpretación estereoscópica de los modelos correspondientes a cada posición de la fuente de luz, se construyó una rosa de aquellas fracturas de dimensiones superiores a los 200 m (figura 4 y 5). Los modelos fueron interpretados bajo un estereoscopio de espejos.

La mayor parte de los lineamientos de la primera clase modal están orientados al este-noreste y específicamente entre 50 y 60° de azimut; representan poco más del 11% del total de lineamientos. A ambos lados de esta rama principalmente se agrupan lineamientos que oscilan entre los intervalos comprendidos de los 30 y los 70° de azimut. Todo el conjunto de este sistema principal representa el 34.5% de la longitud total de los lineamientos.

La rama secundaria en importancia se orienta con una dirección de 295° de azimut; con esta orientación se dispone el 9.6% de los lineamientos. Esta rama se presenta formando un ángulo divergente de la rama principal en 115°.

Se reconoce otro sistema menor de tercer orden de alineamientos entre los 270 y los 290° de azimut, los cuales representan, en todo su conjunto, el 12.8% de las fracturas y fallas.

Otro agrupamiento pequeño, de cuarto orden, se delinea entre el rumbo de 70 y 90°; su porcentaje es menor de 11.6%.

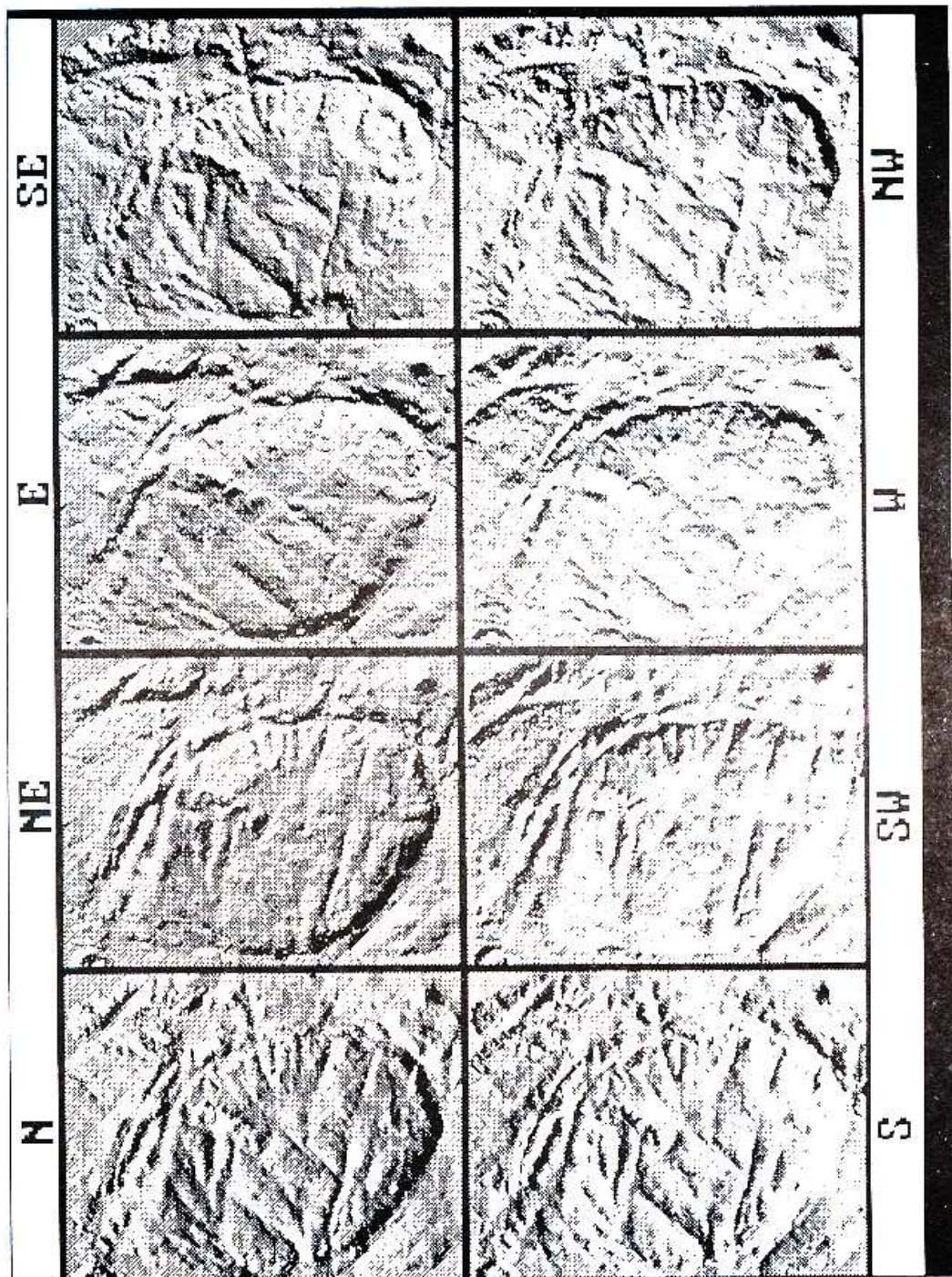


Figura 3. Modificări morfologice observate în timpul procesului de curățare a suprafeței de fabricație de membrană cu Modificarea de suprafață (MS), Modificarea de suprafață (M) și Modificarea de suprafață (NW) în funcție de poziția difracției (N, NE, E, SE).

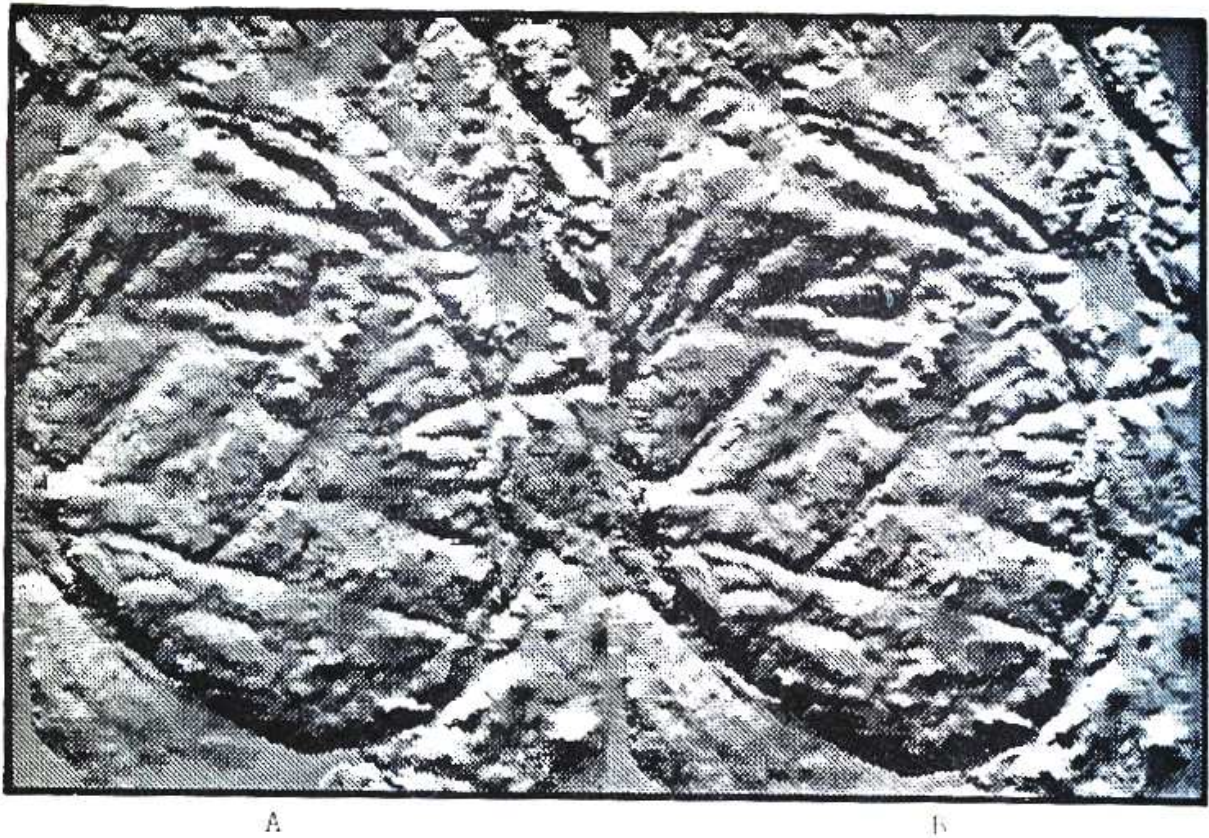


Figura 4. Estereopar del domo “El Pinal”; la fuente de luz se ubica al NE. A) modelo ortogonal y B) modelo oblicuo considerando 10° de inclinación respecto al eje vertical. Escala aproximada 1:150 000.

El arreglo de la distribución de lineamientos junto con su disposición altitudinal relativa conforma una estructura particular en la cual se reconoce un total de diez bloques (figura 6), de acuerdo con la metodología de análisis propuesta por Simonov (1972).

Consideraciones finales

La metodología propuesta permite contar con una serie de ventajas respecto de los modelos tradicionales de evaluación geomorfológica estructural, en donde los productos más comunes son las fotografías aéreas y las imágenes de satélite.

A diferencia de estos productos, en donde la orientación de la fuente de luz (posición del Sol en el momento de la toma) es única, en los modelos generados por computadora la orientación de la fuente de luz es ajustable a prácticamente cualquier dirección. Ello permite detectar lineamientos que pueden ser invisibles en fotos e imágenes, dependiendo de la oblicuidad de las estructuras respecto al haz de luz. La manipulación de la posición de la fuente de luz permite, entonces, definir de manera más clara.

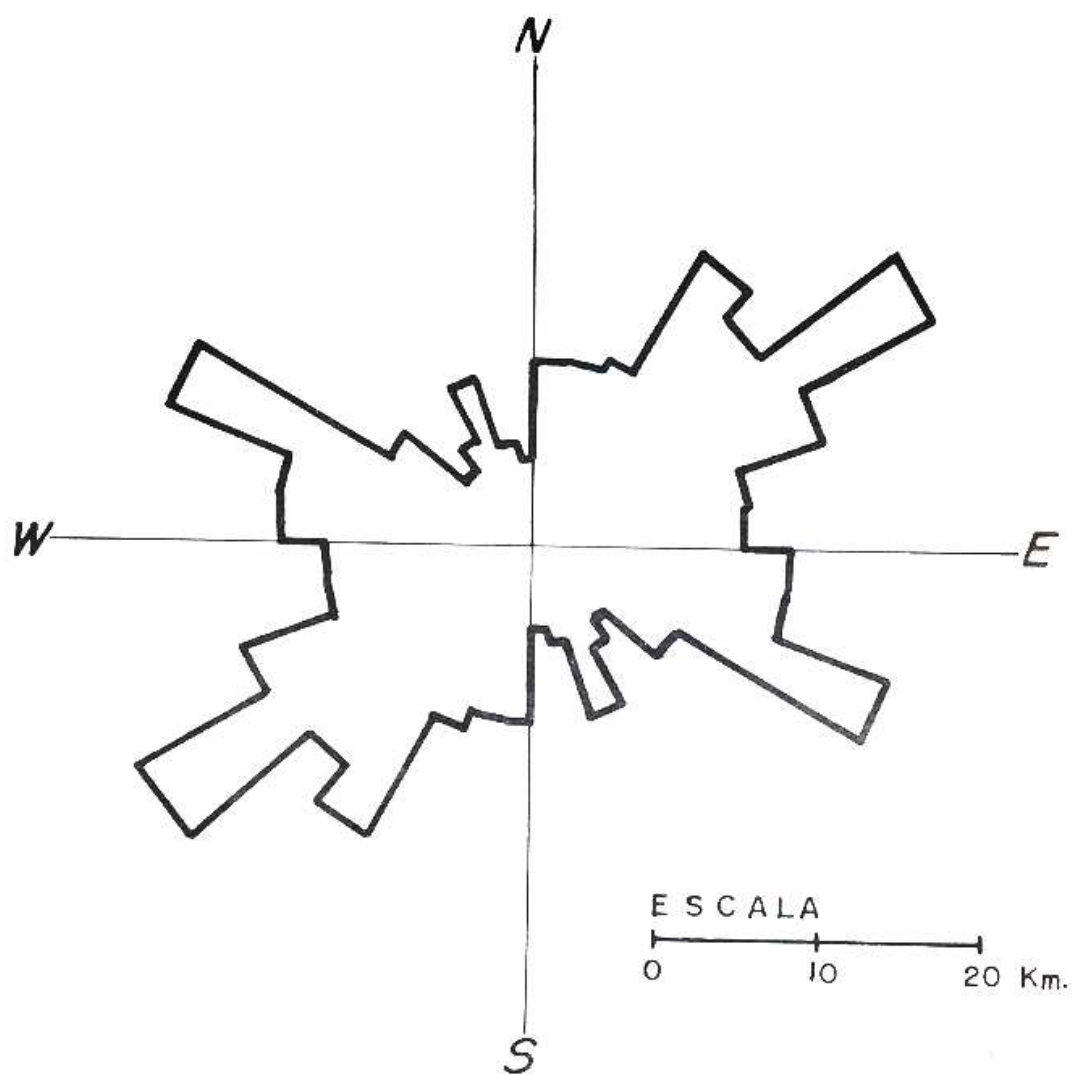


Figura 5. Orientación de fracturas de longitud superior a los 200 m, obtenida a partir de la interpretación de modelos estereoscópicos sombreados.

lineamientos prácticamente de cualquier orientación y con ello la delimitación de bloques estructurales que componen al relieve.

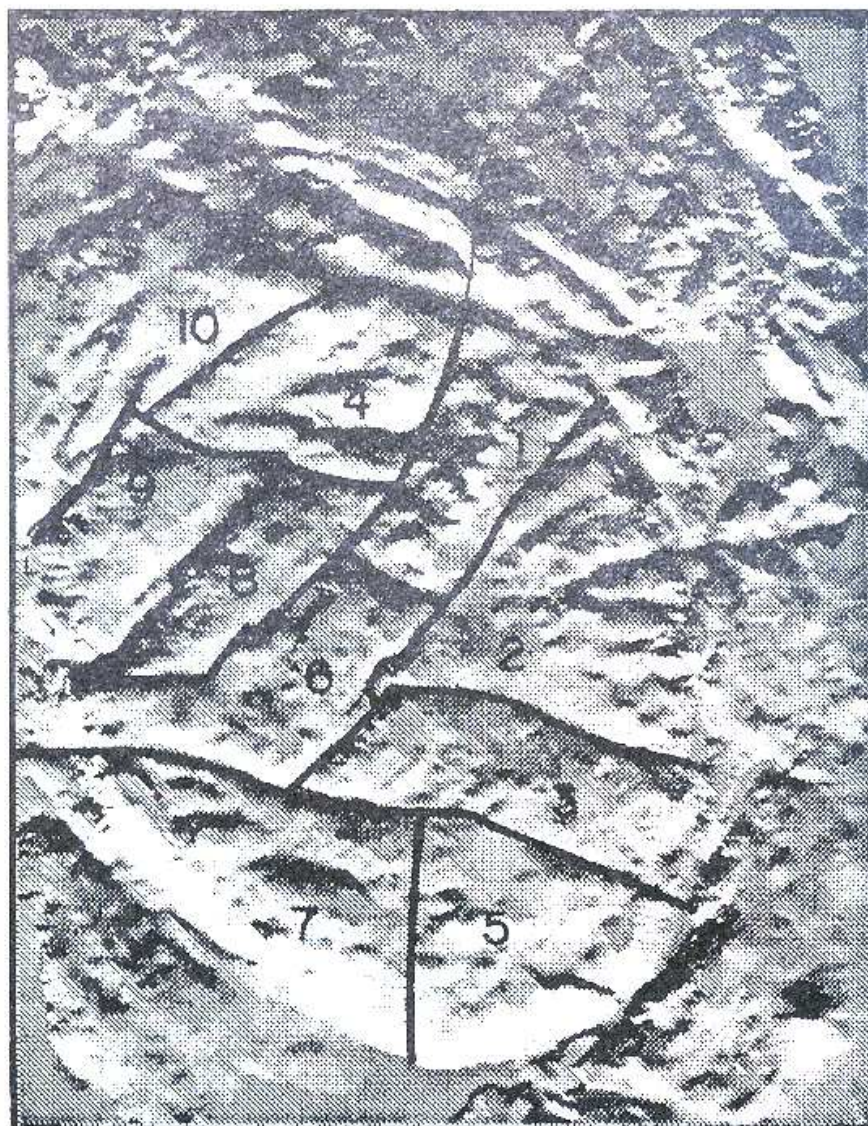


Figura 6. Bloques tectónicos diferenciados a partir de la red de fracturas principales. La numeración indica la altura relativa de los bloques, siendo el número 1 el de mayor altitud. Escala aproximada 1:100 000.

Otra ventaja, especialmente respecto a las fotografías aéreas, es la posibilidad de manipular la escala de los modelos, lo cual permite captar detalles con mayor o menor claridad. Esto puede apreciarse si se comparan las figuras que acompañan este artículo. Además, debe tenerse en cuenta que la interpretación estereoscópica se lleva a cabo en modelos ortogonales que no requieren, a diferencia de las fotografías aéreas, de restitución fotogramétrica, por lo cual pueden llevarse a cabo mediciones directas.

Debe aceptarse, por otro lado, que la información que contiene el modelo es monotemática; es decir, se restringe a las condiciones de relieve, mientras que en la fotografía aérea e imágenes de satélite la información temática es mucho más variada.

Referencias

- Aronoff, S., *Geographic Information Systems: A Management Approach*, WDL Publications, Canadá, 1989.
- Burrough, P. A., *Principles of Geographic Information Systems*, Clarendon Press, Oxford, 1986.
- Guth, P. L., E. K. Ressler y T. S. Becastow, "Microcomputer program for manipulating large digital terrain models", *Computers & Geosciences*, vol. 13, núm. 3, 1987, pág. 209-213.
- Hodgson, M. E. P., "Searching methods for rapid grid interpolation", *Professional Geographer*, 41(1), 1989, pág. 51-61.
- Horn, B. K. P., "Hill shading and the reflectance map", *Geo-Processing*, vol. 2, 1989, pág. 65-146.
- Hutchinson, M. F., "A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits", *Journal of Hydrology*, núm. 106, 1989.
- ILWIS, Integrated Land and Watershed Management Information System. User's Manual, *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC)*, Enschede, The Netherlands, 1990.
- Lam, N. S., "Spatial interpolation methods: a review" *The American Cartographer*, núm. 2, 1983 pág. 129-149.
- Mc Donnel, M. J., "Automatic Relief Shading", *N. Z. Phys. Eng. Lab. Rep.*, núm. 764, 1982, pág. 545-548.
- Pelton, C., "A computer program for hill shading digital topographic data sets" *Computers & Geosciences*, vol. 13, núm. 5, 1987, pág. 545-548.
- Playstock, R. A. y G. Kalley, *Teoría y problemas de gráficas por computadora*, McGraw-Hill, México, 1987.
- Romo, J. M., "Gray scale maps with a personal computer" *Computers & Geosciences*, vol. 15, núm. 8, 1989, pág. 1249-1263.
- Savazzi, E., "C programs for displaying shaded three-dimensional objects on a PC", *Computers & Geosciences*, vol. 16, núm. 2, 1990, pág. 195-209.
- Simonov, Y. G., *Análisis geomorfológico estructural*, Universidad Estatal de Moscú (en ruso), 1972.
- Sharpnack, D. A. y G. Akin, "An algorithm for computing slope and aspect from elevations", *Photogram. Eng. & Remote Sensing.*, núm. 35, 1969.
- Valenzuela, C., "ILWIS overview", *ITC Journal*, 1988-1, pág. 3-14.
- Ware, C., "Fast hill shading with cast shadows" *Computers & Geosciences*, vol. 15, núm. 8, 1989, pág. 1327-1334.