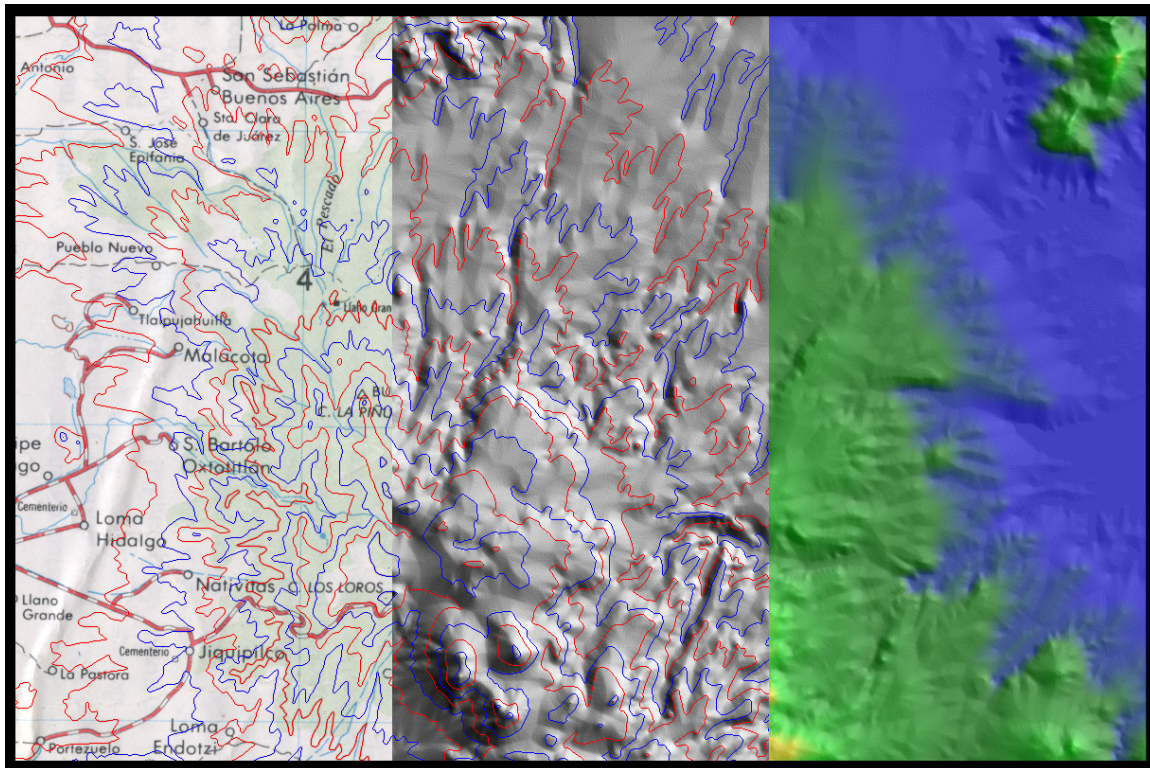


Geografía para el siglo XXI

Generación de Modelos Digitales de Terreno raster Método de digitalización

Jean-François PARROT
Verónica OCHOA TEJEDA



Serie Textos Universitarios
Instituto de Geografía, UNAM

Generación de Modelos Digitales de Terreno Raster Método de digitalización

Jean-François Parrot
Verónica Ochoa Tejeda

Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

2005

Esta investigación, arbitrada por pares académicos externos, se privilegia con el aval de la institución editora, propietaria de los derechos correspondientes.

**Generación de Modelos Digitales de Terreno Raster.
Método de digitalización**

ISBN: 970-32-3113-6

Primera edición: 2005

D.R. © 2005. Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geografía

Impreso y hecho en México.

Geografía para el siglo XXI (Obra General)
Serie Textos Universitarios
ISBN: 970-32-2965-4

Edición Digital: Agustín Fernández Eguiarte y
Eduardo Estrada Hernández

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	2
PROCEDIMIENTO	2
I OBTENCIÓN DE LA IMAGEN INICIAL	2
II CREACIÓN DE LAS CURVAS DE NIVEL	3
II.1 PREPARACIÓN DEL DOCUMENTO DE TRABAJO	3
II.2 DEFINICIÓN DE LAS PALETAS	7
II.3 DIBUJO DE LAS CURVAS DE NIVEL	11
III INTERPOLACIÓN DE LOS MDT	13
III.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ARCHIVOS UTILIZADOS EN LA INTERPOLACIÓN	13
III.2 INTERPOLACIÓN DENTRO DE LAS CAPAS DE ALTITUD	14
III.3 PARTICULARIDADES DE LAS CURVAS DE TIPO RASTER	15
III.4 INTERPOLACIÓN DENTRO DE UNA CURVA CERRADA	16
IV ALGORITMOS DE INTERPOLACIÓN	19
IV.1 CONFIGURACIÓN REQUERIDA PARA LA INTERPOLACIÓN	19
IV.2 EJECUCIÓN DE LOS ALGORITMOS	21
CONCLUSIÓN	24
EJEMPLOS DE MDT	25
REFERENCIAS	30

INTRODUCCIÓN

En este manual se explica un método para generar Modelos Digitales de Terreno (MDT) a partir de las curvas de nivel provenientes de mapas topográficos barridos (escaneados). Las curvas se dibujan directamente en la pantalla con el programa Paint Shop versión 4, el cual utiliza imágenes de tipo **raster**.¹ Se eligió este programa por su simplicidad de aplicación.

Se proporciona una guía para transformar la imagen topográfica original. Se indican los pasos a seguir para dibujar fácil y correctamente las curvas de nivel en el modo raster, explicando con detalle el uso de la tabla de colores para mayor eficacia.

También se proponen soluciones sobre los errores que se pueden cometer al dibujar las curvas. Finalmente se explican los tratamientos de casos particulares, como los puntos cotejados y los cuerpos de agua.

Una vez dibujadas todas las curvas de nivel y los puntos cotejados se elabora el MDT, con los algoritmos **Brod_tab.exe** (Parrot, 1992) y **Newmiel.exe** (Parrot y Taud, 1993).

La zona elegida para ilustrar el método se localiza en Tlamanca de Hernández [hoja Zacatlán, escala 1:50 000 de INEGI (1999)]. Al final del manual se muestran MDT de otras regiones, a diferentes escalas, obtenidos con éste método.

PROCEDIMIENTO

El procedimiento general comprende cuatro etapas: obtención de la imagen inicial, creación de las curvas de nivel, interpolación del MDT y ejecución de los algoritmos.

I OBTENCIÓN DE LA IMAGEN INICIAL

Se hace un barrido del mapa topográfico de la zona a tratar, su resolución depende de la escala del mapa y del dpi (dimension per inch o dimensión por pulgada). Es decir, se define el tamaño del píxel (Tp) tomando en cuenta una distancia (d) sobre el mapa original y el número (Np) de píxeles correspondiente, así

$$Tp = d / Np.$$

Por ejemplo, en la zona en estudio Tp es de $8.5\text{m} = 1000\text{ m} / 118\text{ píxeles}$

La imagen de barrido resultante es de 16 millones de colores. Se guarda de preferencia con la extensión **.bmp**² porque permite trabajarla en casi todos los tipos de softwares. Por seguridad debe tenerse una copia del archivo original, con la cual se va a trabajar. La copia se respalda para utilizarla después, por ejemplo, sobreponerla en el MDT final.

¹ También se pueden elegir otros programas de dibujo que utilizan imágenes raster (si el usuario lo prefiere o tiene la habilidad en otro software de dibujo).

² Se puede guardar en otros formatos .tiff, .raw, etc. **No guardar en el formato .jpg** porque reduce el tamaño de la imagen, aumenta el número de colores e introduce una difuminación de los colores.

II CREACIÓN DE LAS CURVAS DE NIVEL

Se explica con detalle cómo dibujar las curvas de nivel directamente en la pantalla. Es la etapa fundamental que permitirá obtener un MDT de alta resolución.

La creación de curvas de nivel comprende tres fases principales: (a) preparación del documento de trabajo; (b) definición de las paletas; (c) dibujo de las curvas de nivel.

II.1 Preparación del documento de trabajo

La imagen de barrido original tiene 16 millones de colores (Figura 1). Se necesita transformarla en una imagen de 256 colores, donde el fondo topográfico original tendrá solamente 16 colores. Para obtener esto, se disminuye el número de tonos de gris del fondo topográfico, reduciendo la imagen a 16 colores (Figuras 2 y 3).

Después, esta imagen de 16 colores se aumenta a 256 (Figura 4); así se obtiene el documento sobre el cual se dibujarán las curvas de nivel.

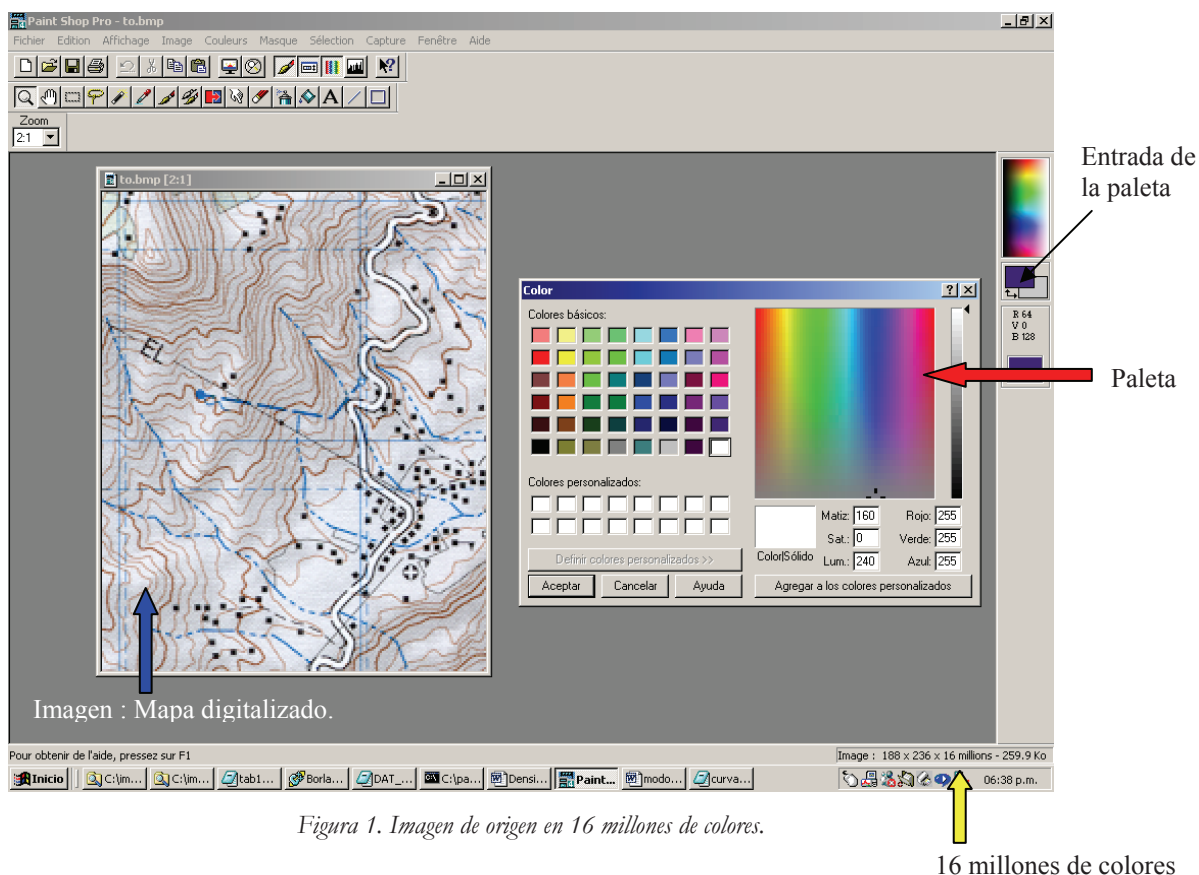


Figura 1. Imagen de origen en 16 millones de colores.

Las Figuras 2 y 3 indican las instrucciones a seguir. En la Figura 2, en el menú del comando **couleurs** [colores], ir al penúltimo comando **diminuer les couleurs** [disminuir los colores] y elegir **16 couleurs (4 bits)** [16 colores (4 bits)].

Las características de la transformación en 16 colores siguen los comandos definidos en la Figura 3. Elegir **optimisée** [optimización] y **couleurs adjac.** [colores adyacentes] (opciones por regla)

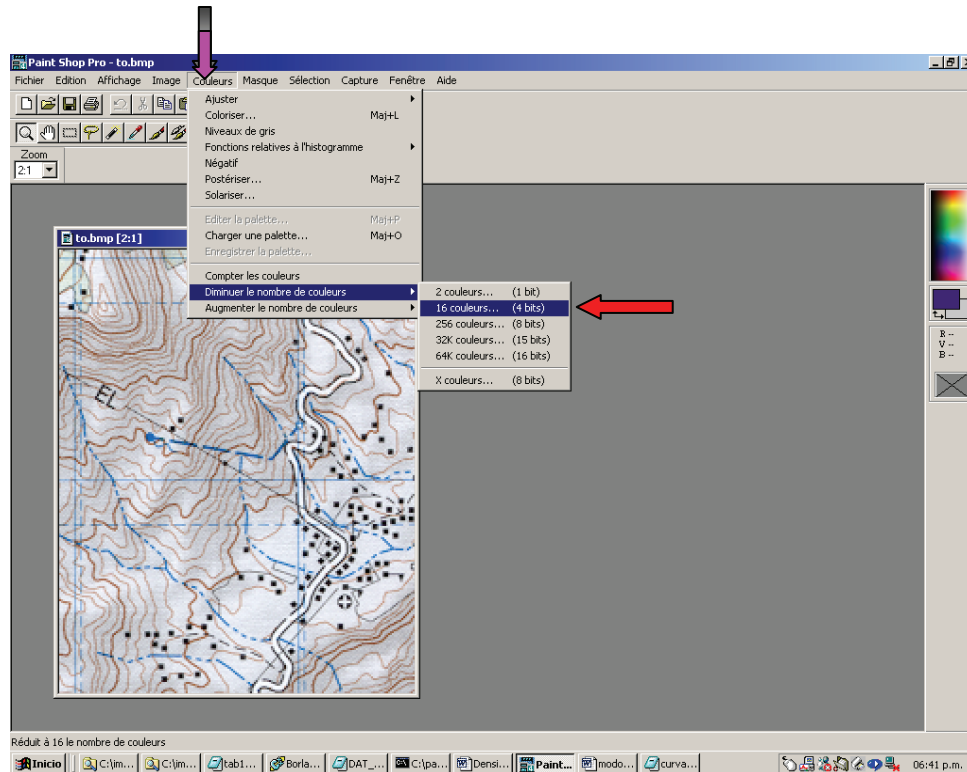


Figura 2. Transformación de la imagen a otra de 16 colores.

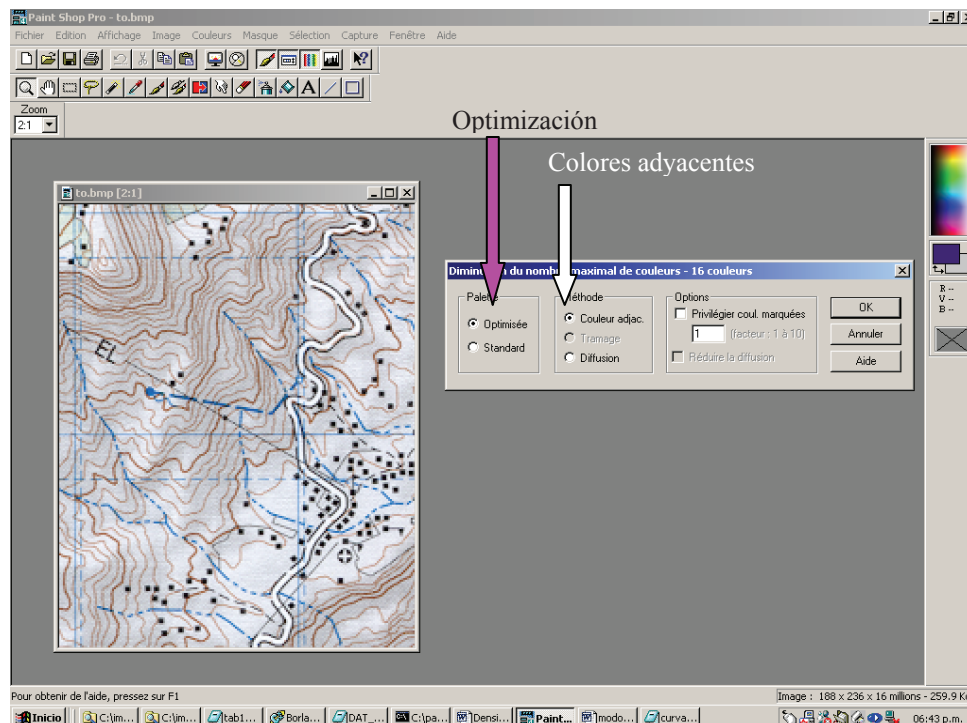


Figura 3. Selección de las características de la transformación.

El paso de la imagen de 16 colores a la de 256 tonos en gris, sigue en el menú **couleurs** [colores], el último comando **augmenter le nombre de couleurs** [aumentar el número de colores] eligiendo **256 couleurs (8 bits)** [256 colores (8 bits)] (cf. Figura 4).

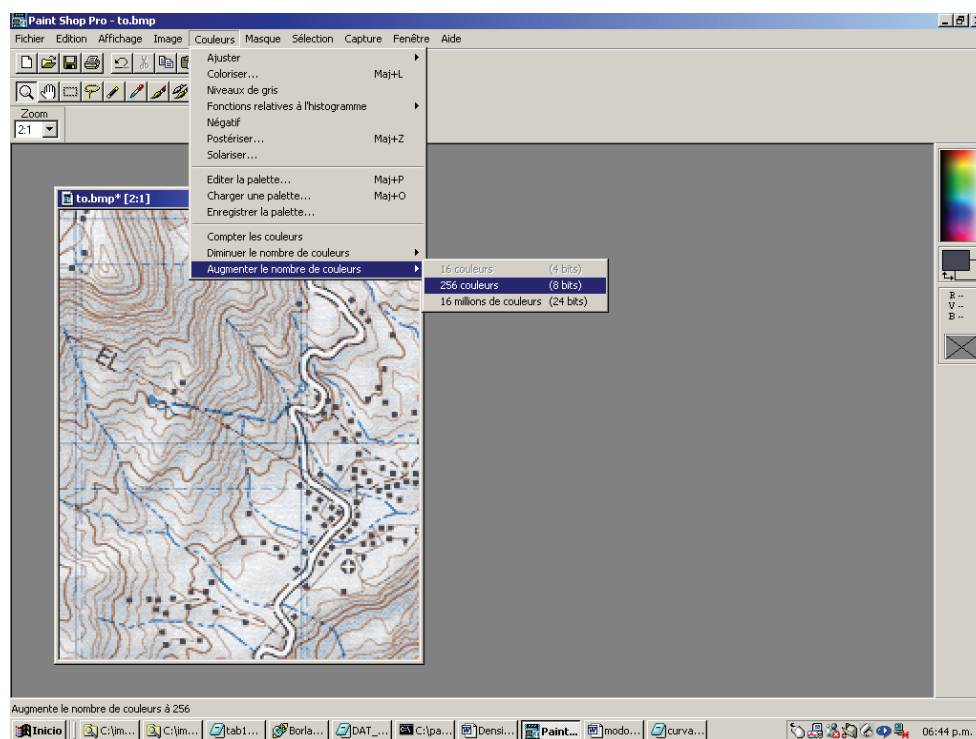


Figura 4. Transformación en 255 colores (documento de trabajo).

Después de disminuir y aumentar el número de colores de la imagen, se obtiene una paleta de 256 colores, donde solo los 16 primeros colores, del 0 al 15, corresponden a los tonos de color del mapa topográfico.

En la imagen resultante, la información topográfica reducida a 16 colores, queda bastante visible para que se puedan dibujar sobre ésta las curvas de nivel utilizando las 240 cajas disponibles de la paleta. Los valores rojo, verde y azul del fondo topográfico dependen de los colores del documento inicial, pero la mezcla de éstos dan tonos pastel. En este ejemplo de tratamiento, el fondo topográfico tiene los tonos reportados en la Figura 5 y detallados en la Tabla I.

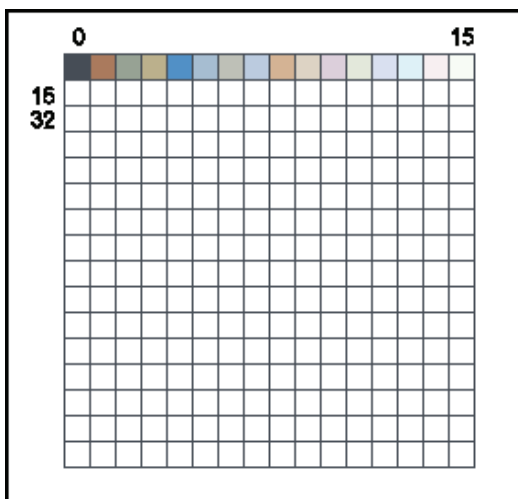


Figura 5. Detalle de los colores en la paleta.

Tabla I. Códigos RVA de los 16 primeros colores después de la transformación

Valores de los píxeles	ROJO	VERDE	AZUL
0	72	78	87
1	174	124	94
2	150	163	149
3	190	178	141
4	82	151	210
5	169	192	213
6	191	193	184
7	189	206	226
8	216	182	150
9	223	213	198
10	221	208	220
11	228	232	220
12	218	225	243
13	224	243	249
14	248	238	240
15	247	253	244

Las Figuras 6 y 7 ilustran los códigos correspondientes al mapa topográfico, respectivamente en las 16 cajas de la paleta de colores de la imagen 4 bits (Figura 6), y en las 16 primeras cajas de la paleta de colores de la imagen 8 bits (Figura 7), la cual se guarda con el formato **.bmp** o **.tiff**.

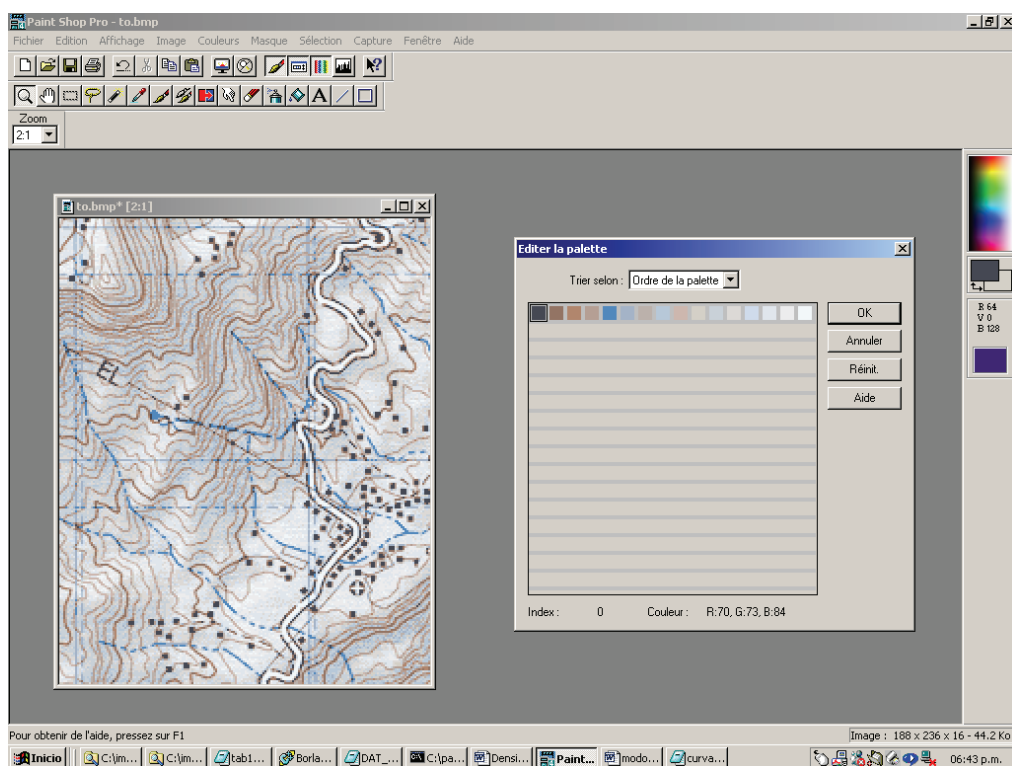


Figura 6. Paleta del mapa topográfico sobre la imagen 4 bits (16 colores).

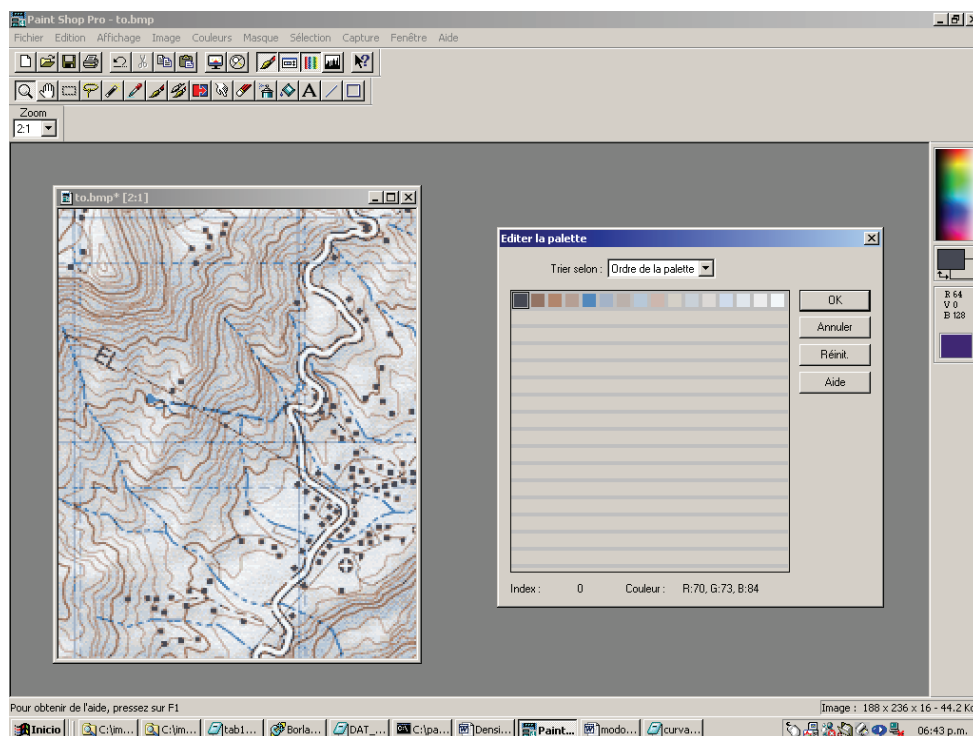


Figura 7. Imagen de 256 colores (8 bits) con su fondo topográfico reducido a 16 colores de 0 a 15.

II.2 Definición de las paletas

Para el dibujo de las curvas de nivel se utiliza el pincel o la regla, para darle a cada una un valor de tono de gris distinto, que posteriormente corresponderá a un valor de altitud.

Una vez dibujadas todas las curvas de nivel, el programa **Brod_tab.exe** tomando en cuenta la correspondencia entre los tonos de gris y la altitud definida en una tabla (véase a continuación), genera una imagen de 16 bits, donde las curvas con su valor de altitud, se superponen a un fondo neutro con valor de 65 500.³

Con el fin de no cometer errores al dibujar las curvas de nivel, se definen dos paletas de tonos en gris: la primera para dibujar directamente sobre el fondo topográfico y la segunda para controlar visualmente los resultados, sin que aparezca dicho fondo.

NOTA: no debe utilizarse el mismo color para altitudes diferentes, porque se requiere una definición precisa de los tonos en gris.

Para ello se propone atribuir a los tonos de gris, los colores **rojo** y **azul**, porque se distinguen fácilmente sobre el fondo topográfico, pero se tienen que alternar y reducir los valores del rojo o del azul cada vez que se pasa de una curva de nivel a la otra.

³ La versión del programa **Brod_tab4_mx**, asegura la creación de una imagen de 32 bits. Se puede, así, definir un intervalo hipsométrico en centímetros, o a veces en milímetros. En este caso, el fondo neutro es de 10 000 000. El nombre de la imagen resultante tiene una extensión **_c4.raw**.

Es decir, de las 240 celdas de la paleta disponibles, 120 son para los rojos e igual para los azules, los cuales van respectivamente de los valores 255 al 135 (cf. Tabla II y Figura 8).

NOTA: el ojo no puede distinguir los valores de tonos de rojo y azul, pero la computadora lo registra, ya que para ella es solamente un color atribuido a tonos de gris, desde 16 a 255.

Tabla II. Códigos

Valor del píxel	Rojo	Azul
16	255	
17		255
18	254	
19		254
20	253	
21		253
22	252	
23		252
24	251	
25		251
26	250	

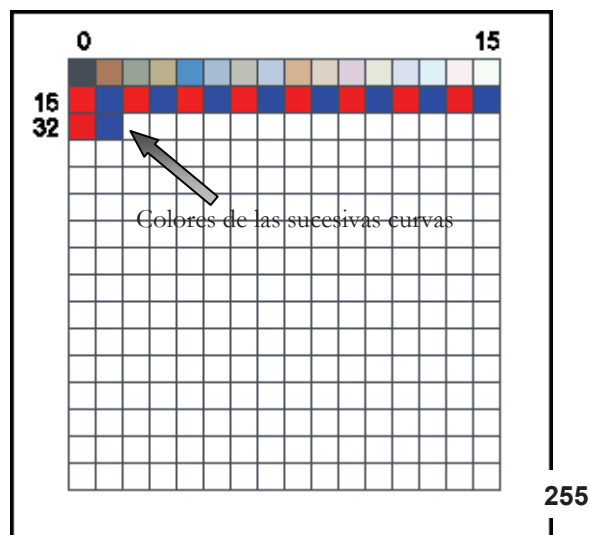


Figura 8. Paleta de trabajo resultante. Por otro lado, se puede definir una paleta de control, borrando con blanco los 16 primeros valores correspondientes al fondo topográfico (Figura 9).

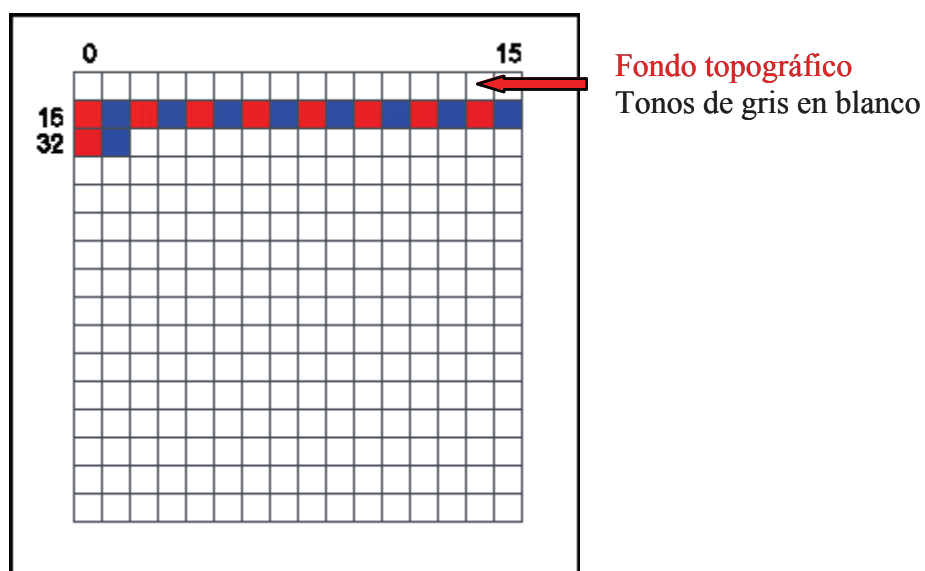


Figura 9. Paleta de control.

¿Cómo atribuir valores a los colores rojo y azul?

Ir a la paleta de colores haciendo doble clic en el cuadro superior derecho (Figura 1) donde aparecerá el editor de paleta (Figura 10), elegir una celda haciendo doble clic y aparecerá el cuadro de color (Figura 11), lo que permitirá darle cualquier color, por ejemplo, rojo 255, verde 0 y azul 0 a la celda 16.

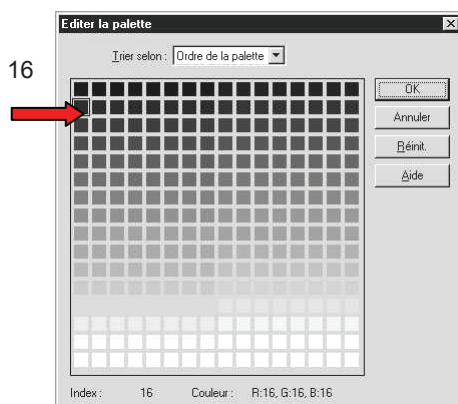


Figura 10. Paleta de colores.

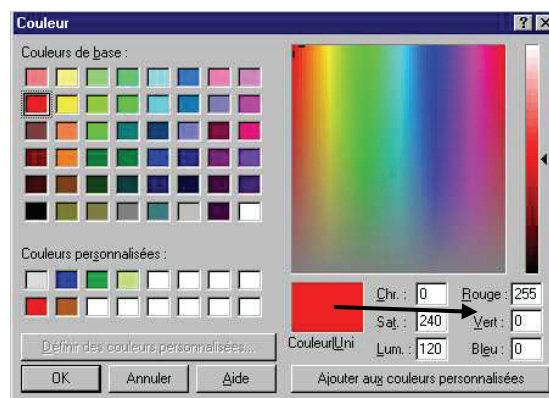


Figura 11. Editor de colores.

¿Cómo guardar y/o aplicar las paletas de colores?

Para registrar las paletas, ir al comando **couleurs** y elegir el comando **enregistrer la palette** [registrar] (Figura 12), seleccionando el formato JASC (Figura 13).

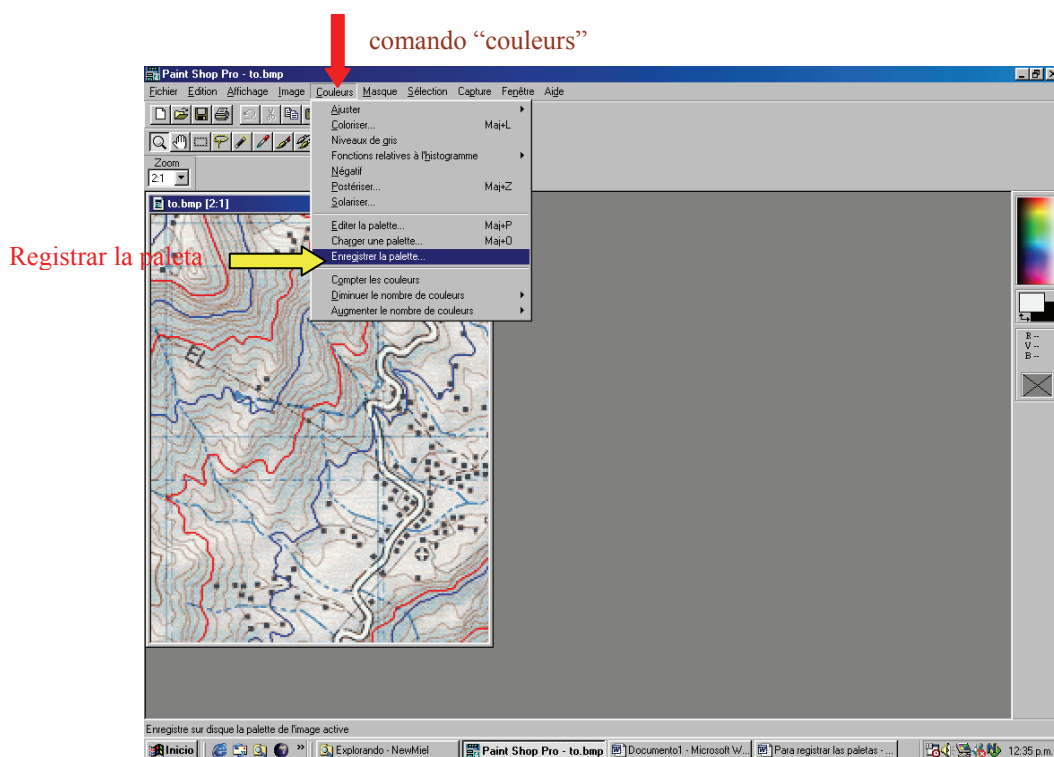


Figura 12. Registro de una paleta.

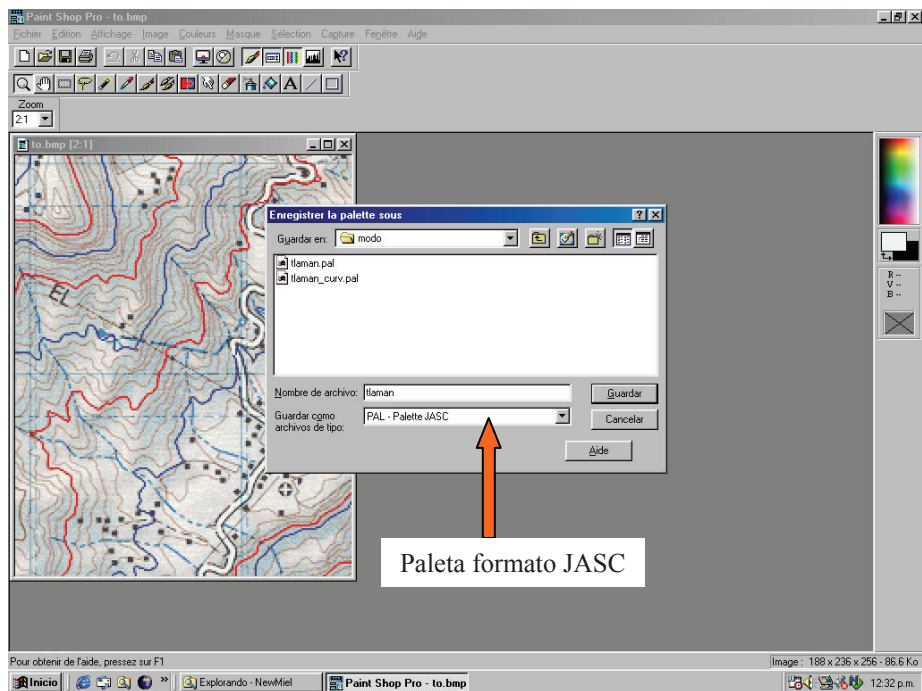


Figura 13. Elección del formato de registro.

Para aplicar una paleta ya registrada, ir al comando **couleurs**, elegir la operación **charger une palette** [aplicar paleta], darle el nombre de la paleta y abrirla con la opción **maintien des index**, (condiciones de aplicación por regla), (Figura 14).

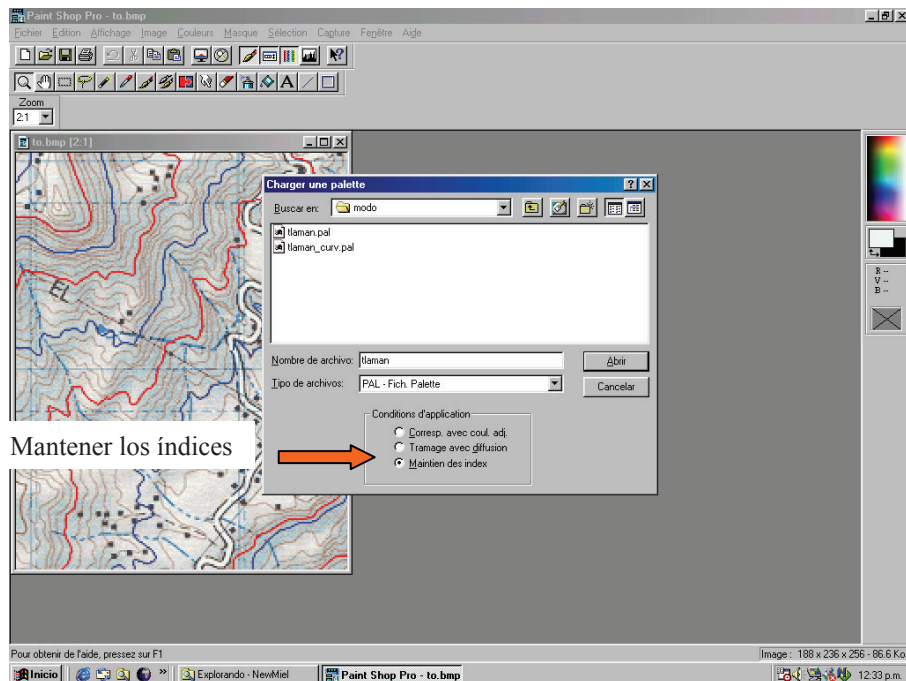


Figura 14. Aplicación de una paleta con condiciones de aplicación.

II.3 Dibujo de las curvas de nivel

Las principales herramientas (Figura 15) que se utilizan para dibujar son: la pipeta, el pincel y la regla. La pipeta selecciona el valor del píxel sobre la pantalla, el pincel permite dibujar píxeles por píxeles, y la regla traza líneas rectas.

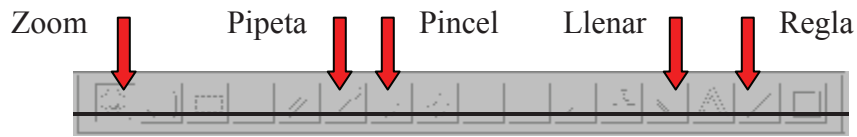


Figura 15. Barra de herramientas para dibujar.

El ejemplo reportado en las Figuras 16 y 17, muestra un tratamiento hecho sobre una pequeña zona de prueba, localizada al oeste de Tlamanca de Hernández entre las coordenadas $19^{\circ}57'$ y $19^{\circ}58'$ de latitud norte y $97^{\circ}50'50''$ y $97^{\circ}51'50''$ de longitud oeste.⁴ La imagen tiene 236 líneas y 188 columnas con un tamaño del píxel de 8.5 m. Se dibujaron las curvas de nivel cada 20 m.

El uso de la paleta de control resalta los errores, por ejemplo, una discontinuidad de curva (Figura 17).

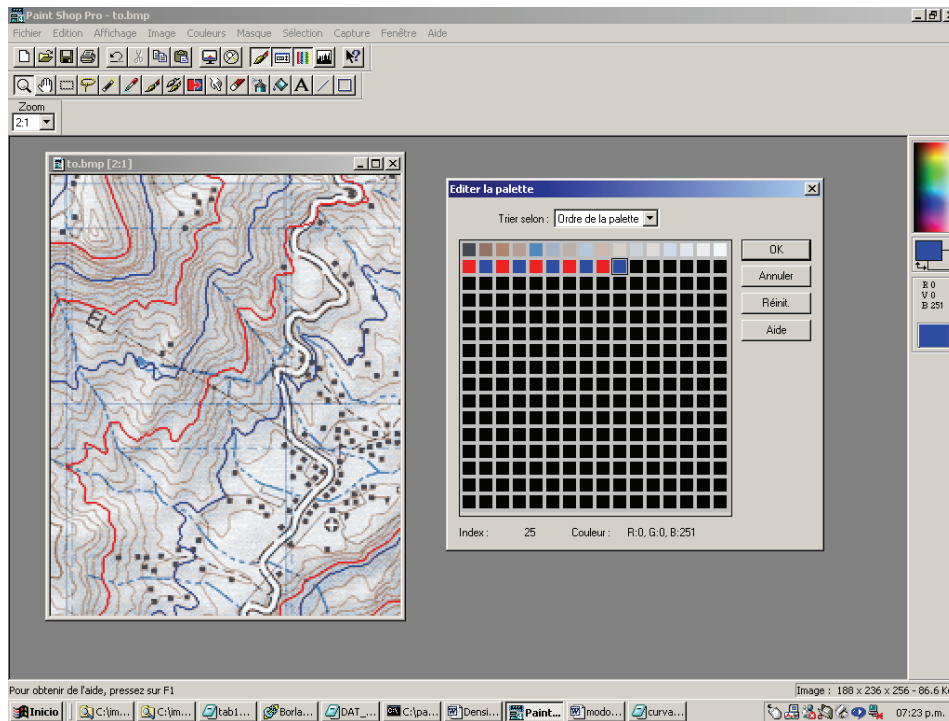


Figura 16. Dibujo de diez curvas de nivel con intervalo hipsométrico de 100 m.

⁴ Corte extraído de la hoja de Zacatlán escala 1:50 000 de INEGI (1999).

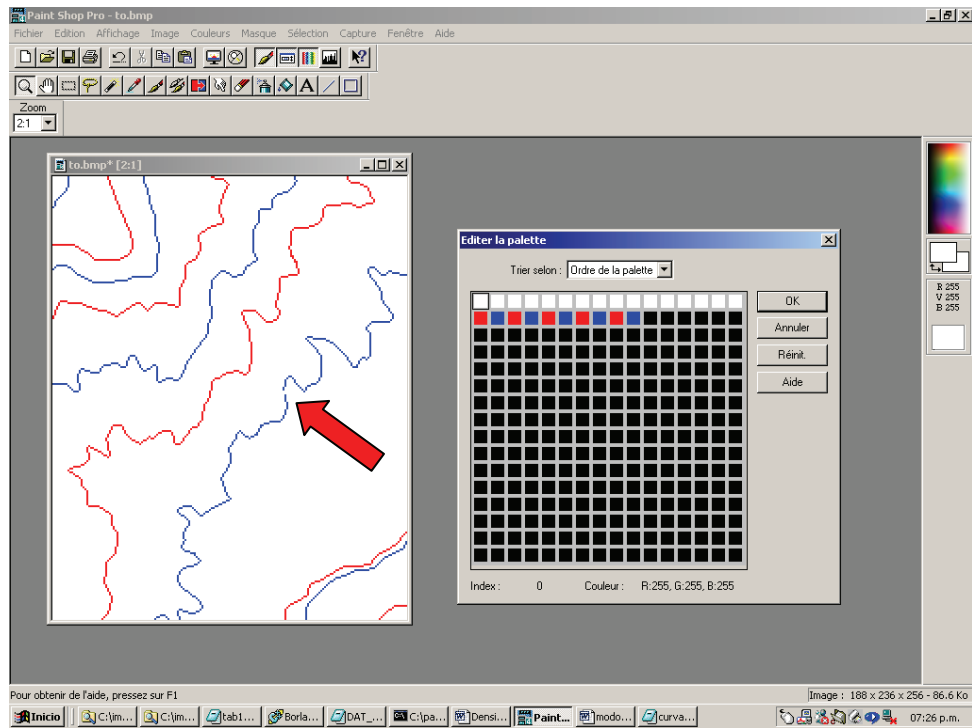


Figura 17. Operación de control mostrando una discontinuidad de la curva 4.

También se pueden controlar las zonas que están totalmente cerradas, utilizando la función "llenar" con un tono de gris diferente para detectar discontinuidades (Figura 18).

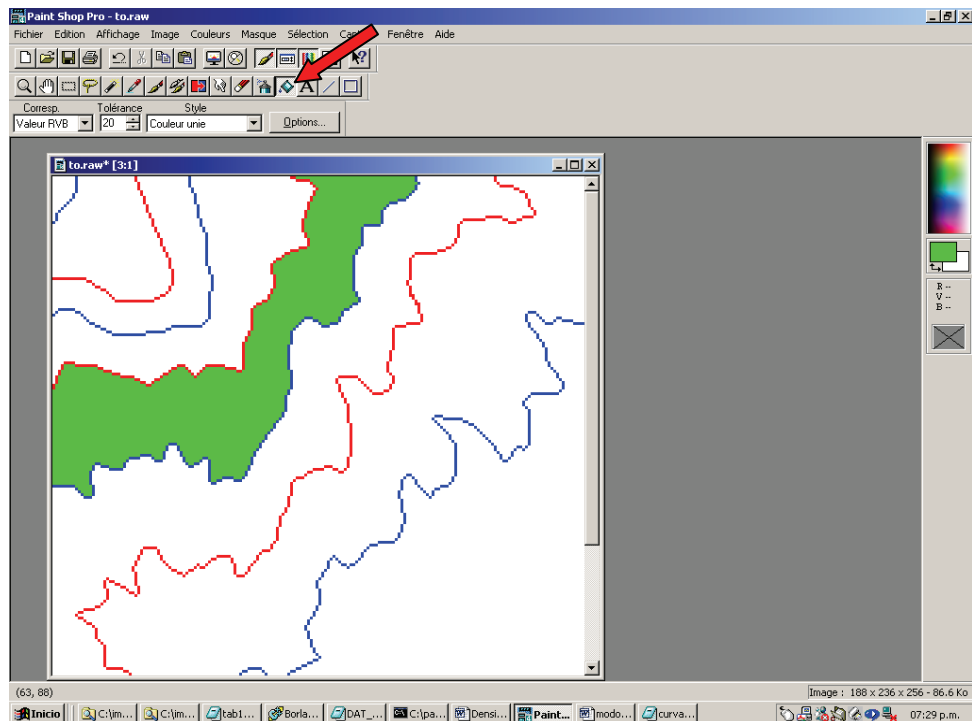


Figura 18. Control de las zonas cerradas. Interpolación.

III INTERPOLACIÓN DE LOS MDT

III.1 Descripción de los archivos utilizados en la interpolación

Una vez dibujadas todas las curvas de nivel, la imagen se guarda en el formato **.raw** como lo requieren los algoritmos que generan un modelo digital de terreno (MDT). Estos programas necesitan un archivo de formato **.txt** que corresponde al archivo descriptivo de la imagen **.raw** (por ejemplo, imagen *tlamanca.raw* con archivo descriptivo *tlamanca.txt*). El archivo **.txt** (Figura 19) contiene el número de líneas, el número de columnas, el número de byte por píxel (en este caso 1), el valor inferior de la dinámica (0), el valor superior de la dinámica (255) y el tamaño del lado del píxel.

286	Líneas
188	Columnas
1	Número de byte
0	Min
255	Max
8.5	Píxel

Figura 19. Ejemplo del formato *.txt*.

Aquí, la creación del MDT necesita una tabla que establece la correspondencia entre el valor de las curvas de la imagen de 256 colores y los valores de altitud de cada una. Tomando en cuenta esta tabla de correspondencia (Figura 20), el programa **Brod_tab.exe** (Parrot, 1992) va a crear una imagen que tiene la extensión **_c2.raw**.

16	1100
17	1200
18	1300
19	1400
20	1500
21	1600
22	1700
23	1800
24	1900
25	2000

Figura 20. Tabla de correspondencia (con extensión *.txt*)

Finalmente, con el programa **Newmiel.exe** (Parrot y Taud, 1993) se genera el MDT (con extensión **_m2.raw**) a partir de la imagen **_c2.raw**, haciendo una interpolación multidireccional. Estas dos imágenes están codificadas en dos bytes (*unsigned short*). Este formato asegura valores (de 0 a 2^{16}) lo que corresponde a una diferencia de isometría de 6.5 km si el tamaño del píxel se mide en decímetros, o de 65 km si el tamaño del píxel se mide en metros.⁵

⁵ Si se trabaja en zonas con altitudes mayores a 6.5 km y con píxeles decimétricos se requiere un formato de 4 bytes. La versión del programa **Miel4_mx.exe** permite generar MDT de 32 bits con extensión **_m4.raw**. Lo hace a partir de una imagen de las curvas de nivel de 32 bits, con extensión **_c4.raw**, generada por el programa **Brod4_mx.exe**.

Las imágenes con extensión **_c2.raw** y **_m2.raw** están asociadas a un archivo descriptivo **.txt** que indica las características de dichas imágenes (Figura 21).

286	Líneas
138	Columnas
2	Número de bytes
1200	Altitud Mínima
3600	Altitud Máxima
8.5	Píxel

Figura 21. Ejemplo del formato .txt de las dos imágenes _c2.raw y _m2.raw.

Cuando el programa hace la interpolación se presentan dos casos:

- el píxel está dentro de una capa de altitud definida por dos curvas de nivel.
- el píxel se encuentra en una curva cerrada.

III.2 Interpolación dentro de las capas de altitud

Las diferentes versiones del algoritmo **Newmiel.exe** trabajan por capas comprendidas entre dos curvas de nivel. Las capas corresponden a zonas cerradas y delimitadas dentro de la imagen. Por cada píxel ubicado en la capa se mide el valor de la distancia mínima (d_i) entre este punto y la curva inferior de altitud A_i y su distancia mínima (d_s) con la curva superior de altitud A_s (Figura 22).

El valor de la altitud A_p del píxel $P(i,j)$ es igual a :

$$A_p = A_i + [(A_s - A_i) \times (d_i / d)] \text{ donde } d = d_i + d_s.$$

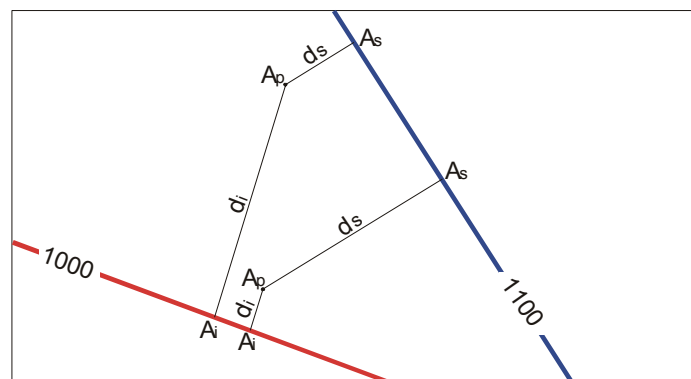


Figura 22. Cálculo de la interpolación lineal entre las curvas 1000 y 1100.

Se requiere verificar sobre la pantalla que las zonas están realmente cerradas por las curvas correspondientes. Por ejemplo, la capa de altitud 1000-1100 entre las curvas 1000 y 1100.

El resultado del tratamiento hecho sobre la zona de prueba está reportado en la Figura 23. Aunque en esta zona, el mapa de INEGI no tiene curvas de nivel entre 1 200 y 1 300 m, el programa **Newmiel.exe** es capaz de hacer la interpolación. Por eso, este programa utiliza en una primera etapa el algoritmo descrito arriba para todas las capas que presentan un intervalo de 20 m, dejando aparte la capa que no tiene este intervalo.

En una segunda etapa, el programa utiliza el algoritmo de dilatación de curvas (Taud *et al.*, 1999) para calcular los valores del fondo neutro dentro de una curva cerrada (párrafo III.4.).

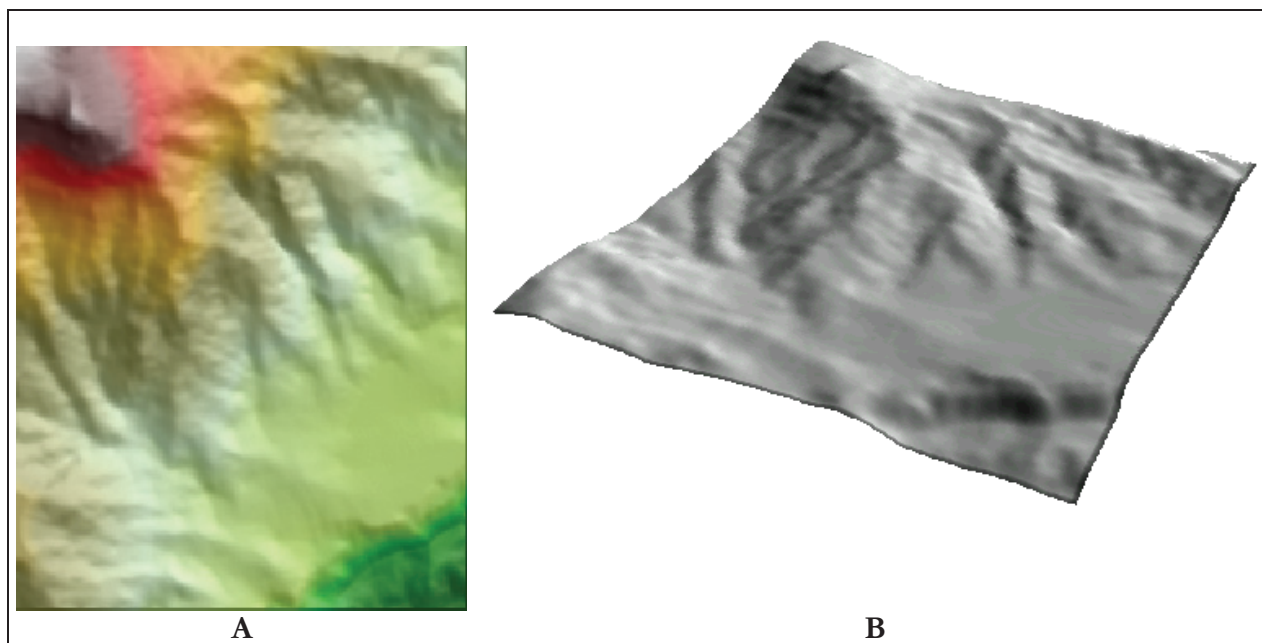
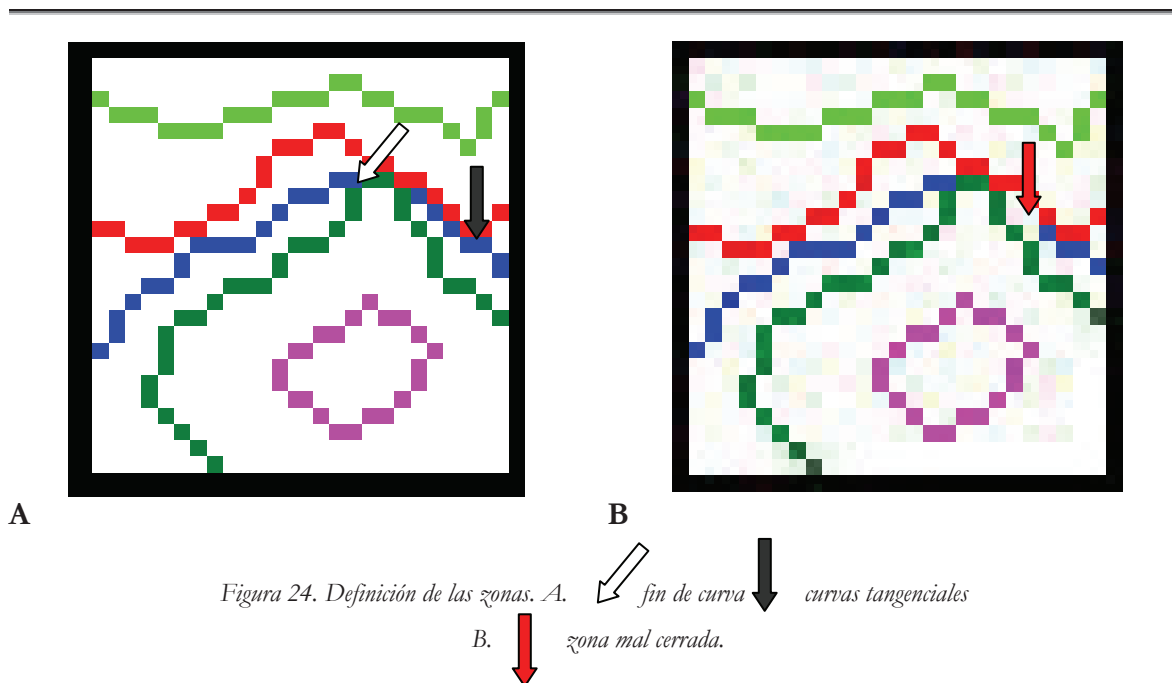


Figura 23. Resultado del tratamiento. A.- MDT sombreado con capas de altitud. B.- Bloque 3D de Tlamanca de Hernández;

III.3 Particularidades de las curvas de tipo raster

Al contrario de los datos de tipo vectorial, dos curvas dibujadas con píxeles pueden tocarse sin introducir una confusión entre ellas (Figura 24A). También algunas curvas pueden desaparecer, pero se necesita asegurar que cada zona esté bien definida. Se debe encontrar solamente dos valores de tonos de gris en los píxeles del perímetro de una zona, porque el algoritmo trabaja capas por capas, de la capa inferior hasta la capa superior, y si falta un píxel en alguna curva de nivel o si también la zona presenta más de dos tonos de gris en su perímetro (Figura 24B), la capa no corresponderá a una zona correcta, lo que introducirá errores.



Así, un dibujo correcto de las curvas de nivel que se juntan y/o desaparecen (Figura 25), permite obtener una representación más realista de la superficie (Figura 26), en este caso, un acantilado.

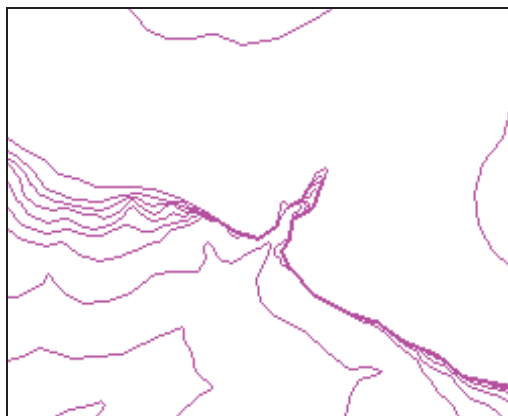


Figura 25. Representación de las curvas de nivel.

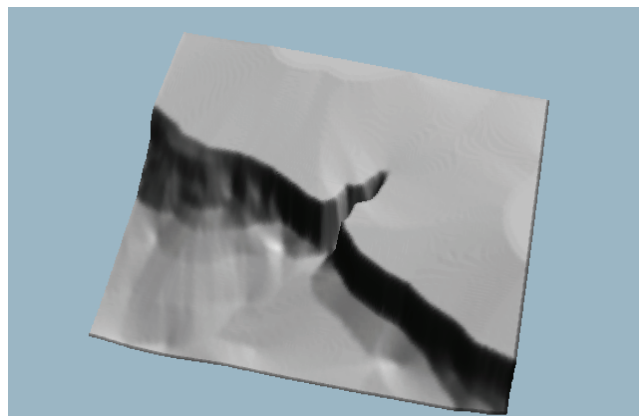


Figura 26. Bloque 3D de una mesa con barranco y borde escarpado.

Interpolación dentro de una curva cerrada

Una curva cerrada puede corresponder a:

- Una forma positiva como meseta o cima o negativa como dolina y cráter.*

Si dentro de la curva cerrada no hay un punto cotejado, se trata de una mesa (Figura 27A) que puede corresponder o no a la realidad. Generalmente es un artefacto y se requiere poner un punto cotejado dentro del área descrita por la curva, con un valor de altitud más alto o más bajo, en relación con la geoforma encontrada.

Se obtiene una cima cuando el punto cotejado tiene un valor más alto que la curva (Figura 27B) o un cráter si el punto cotejado tiene un valor inferior (Figura 27C).

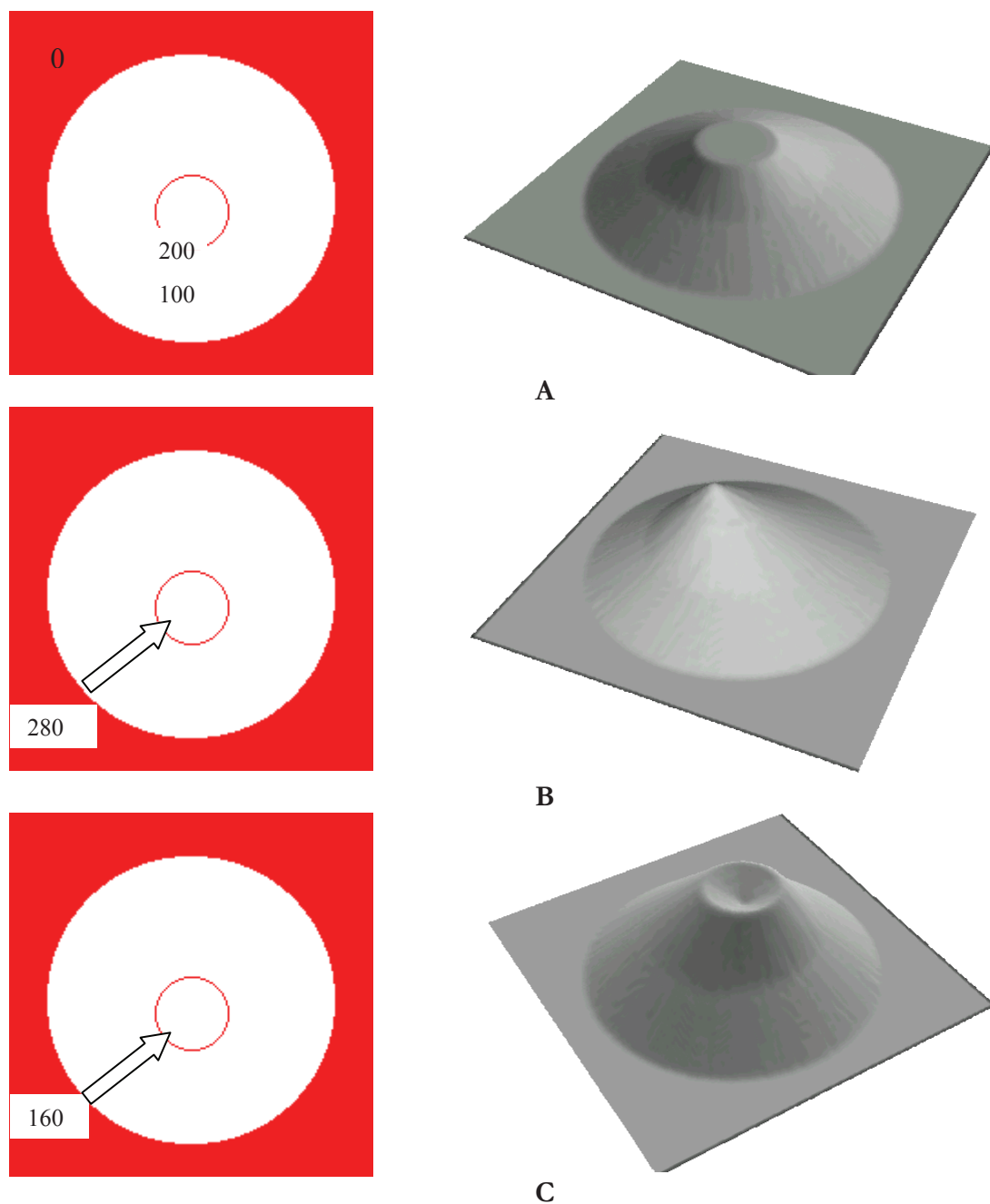


Figura 27. Puntos cotejados. A. Curva cerrada sin punto cotejado o zona plana: formación de una mesa; B. Punto cotejado más alto que la curva cerrada: formación de una cima y C. Punto cotejado más bajo: formación de un cráter (también de esta manera se puede crear una dolina u otra forma de depresión).

En estos tres casos, el algoritmo que asegura la interpolación es el algoritmo de dilatación de las curvas desarrollado por Taud *et al.* (1999). Este método utiliza las curvas de nivel y los puntos cotejados. En el mundo raster, las líneas son constituidas por *píxeles*, lo que significa

que tiene una superficie. De tal manera que se puede dilatar la superficie utilizando alternativamente una dilatación de conectividad 4 y 8 para obtener una dilatación casi isotrópica (Figura 28).

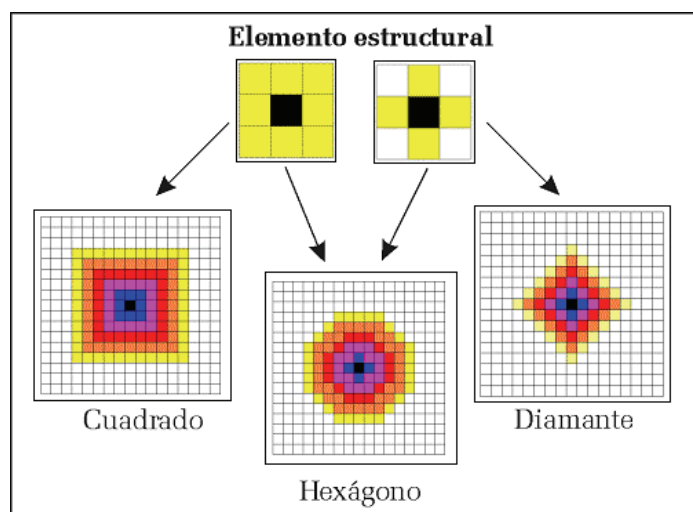


Figura 28. Dilatación hexagonal de un punto.

Las curvas y los puntos se dilatan hasta que las superficies resultantes de la dilatación se juntan. Se repite el proceso hasta que todos los puntos tienen un valor de altitud. El límite entre las superficies así obtenidas corresponde a una curva con valor intermedio; el proceso se repite hasta llenar todo el espacio (Figura 29).

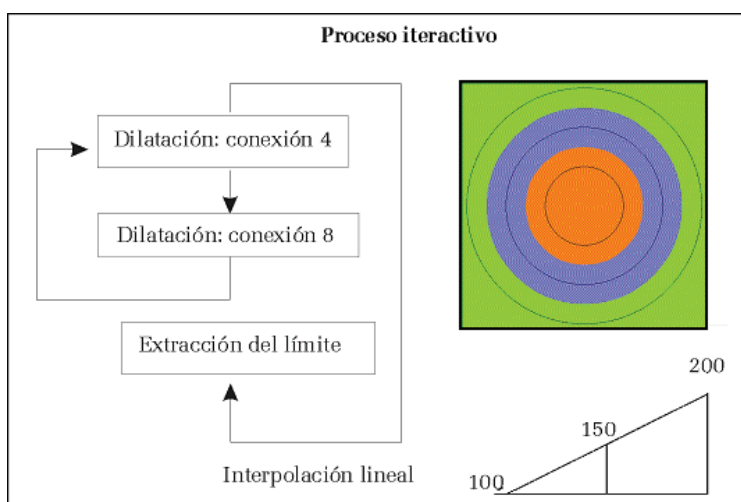


Figura 29. Método de dilatación de curvas.

b. un cuerpo de agua.

Cuando hay un cuerpo de agua⁶ se puede llenar directamente la zona cerrada con el valor de la curva (Figura 30), o la zona correspondiente al mar con el valor de la línea de costa. Así, el

⁶ También, cuando una zona cerrada por una única curva corresponde realmente a un relieve de tipo meseta, se puede llenar esta zona con el valor de la curva que la encierra.

programa⁷ no tiene que hacer una interpolación en esta zona, puede ir más rápido y no tiene que detenerse en el cálculo.

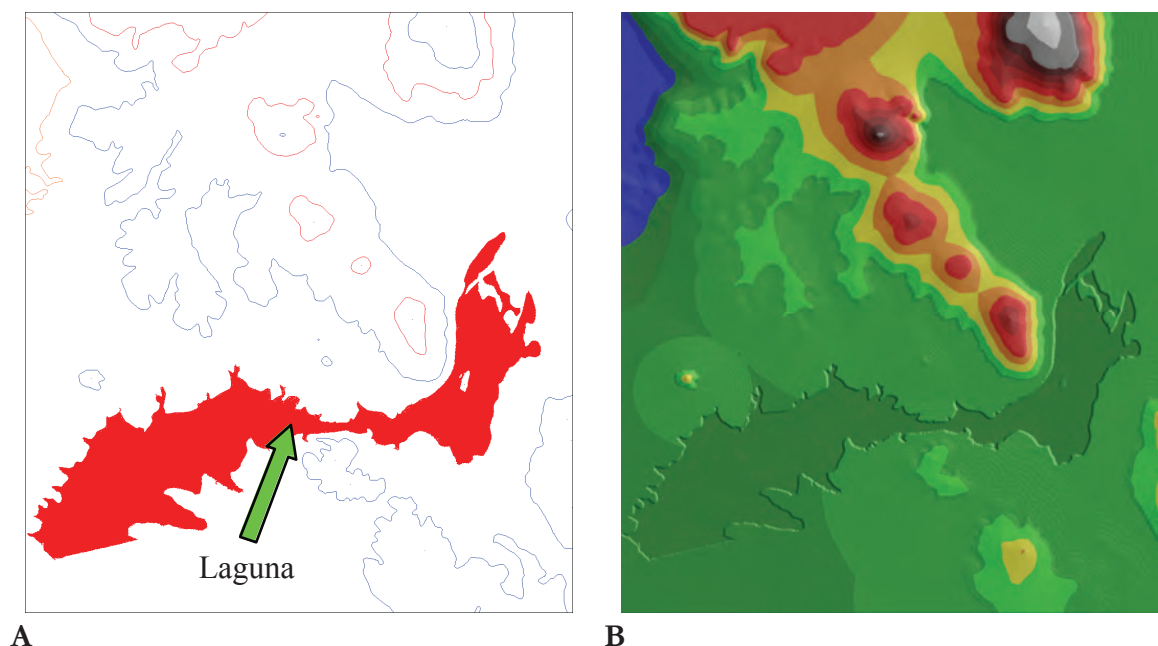


Figura 30. Ejemplo de cuerpo de agua (Laguna de Iguala, Guerrero), curvas de nivel y puntos cotejados (A) y MDT con con capas hipsométricas (B).

IV ALGORITMOS DE INTERPOLACIÓN

IV.1 Configuración requerida para la interpolación

Los algoritmos y la imagen de referencia utilizados en este manual se pueden adquirir en la página del Instituto de Geografía, UNAM:

http://www.igg.unam.mx/sigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/manual_mde.php

Estos algoritmos están escritos en Borland C++. Los módulos ejecutables fueron compilados de manera dinámica y no estática (porque existe un *copyright*), lo que significa que el software Borland se debe instalar en su computadora. En este caso el software se instala directamente en el disco **C:**, y no en la carpeta **C:\Archivos de programa**.

También se necesita crear en **C:** la carpeta **C:\Jfp**, y dentro una subcarpeta **C:\Jfp\Prog**.

La subcarpeta **C:\Jfp\Prog**, a su vez, se subdivide en dos subcarpetas: la primera **C:\Jfp\Prog\Miel** donde se guardan los programas **Brod_tab.exe**, **Brod4_mx.exe**,

⁷ El programa hace el cálculo solamente para los píxeles que no tienen valor de altitud, es decir, los píxeles que tienen el valor neutro del fondo topográfico (*cf.* supra). Por eso, al contrario de otros algoritmos de interpolación, entre más píxeles tenga la imagen valores de altitud, más rápido se hará el cálculo.

Newmiel.exe, **Miel4_mx.exe**, **Dilat_curves.exe** y **Sombra.exe** y la segunda **C:\Jfp\Prog\lib** que contiene las librerías **nrutil.h** y **nrutil.cpp**.

Finalmente, todas las imágenes a tratar deben guardarse en una subcarpeta **C:\images\Nombre_de_la_sub-carpeta** dentro de la carpeta **C:\images** (Figura 31).

La imagen elegida para ilustrar el tratamiento corresponde a la zona de Tlamanca. El documento de base se llama *tlamanca_topo.bmp*

Todas las curvas dibujadas figuran en la imagen *tlamanca.bmp*. Dos paletas (*tlaman.pal* y *tlaman_curv.pal*) permiten ver respectivamente las curvas de nivel sobrepuestas sobre el fondo topográfico y las curvas sin fondo topográfico.

Por otro lado, existe una tabla *tlaman_tab.txt* que establece las relaciones entre los valores de tono de gris de las curvas y sus valores hipsométricos. Se debe notar que en las figuras del manual, se tomaron en cuenta solamente las curvas de nivel cada 100 m para no sobrecargar las ilustraciones. Estas curvas van del valor 16 al valor 25 en tonos de gris con sus correspondientes altitudes (1 100 a 2 000 m). Sin embargo, para obtener un MDT de alta calidad, también se dibujaron las curvas de nivel cada 20 m. Se ven en la imagen *tlamanca.bmp* utilizando la paleta *tlaman_curv.pal*. En este caso, la escala de colores de las curvas de nivel cada 20 m no siguen la alternancia rojo/azul para que se distingan. Se utilizó una alternancia verde/amarillo y otra morado/amarillo en las altitudes superiores. Los valores en tonos de gris van de 32 hasta 70. Las correspondencias altimétricas están en la Tabla III.

Tabla III. Correspondencia de los tonos de gris con sus altitudes

Tono de gris	Altitud	Tono de gris	Altitud	Tono de gris	Altitud
16	1 100	39	1 240	56	1 660
17	1 200	40	1 260	57	1 680
18	1 300	41	1 280	58	1 720
19	1 400	42	1 320	59	1 740
20	1 500	43	1 340	60	1 760
21	1 600	44	1 360	61	1 780
22	1 700	45	1 380	62	1 820
23	1 800	46	1 420	63	1 840
24	1 900	47	1 440	64	1 860
25	2 000	48	1 460	65	1 880
32	1 060	49	1 480	66	1 920
33	1 080	50	1 520	67	1 940
34	1 120	51	1 540	68	1 960
35	1 140	52	1 560	69	1 980
36	1 160	53	1 580	70	2 020
37	1 180	54	1 620	128	1 345
38	1 220	55	1 640	129	1 350

También existen dos puntos cotejados ubicados en el lado este de la zona en estudio (tonos de gris 128 y 129) que corresponden a la altitud de los ríos en el límite de la imagen.

El uso de los programas **Brod_tab.exe** y **Newmiel.exe** requiere transformar la imagen *tlamanca.bmp* en una imagen *tlamanca.raw* con su fila descriptiva *tlamanca.txt*.

También se encuentran en la página del Instituto de Geografía:

- las imágenes relacionadas con la producción del MDT : *tlamanca_c2.raw*, *tlamanca_c2.txt* (curvas en una imagen 16 bits), *tlamanca_m1.raw*, *tlamanca_m1.txt* (MDT 8 bits directamente visible en la pantalla), *tlamanca_m2.raw*, *tlamanca_m2.txt* (MDT 16 bits).
- y algunos resultados como : *tlamanca_sombra.bmp*, *tlamanca_sombra_capas.bmp* y *tlamanca_sombra_topo.bmp*.

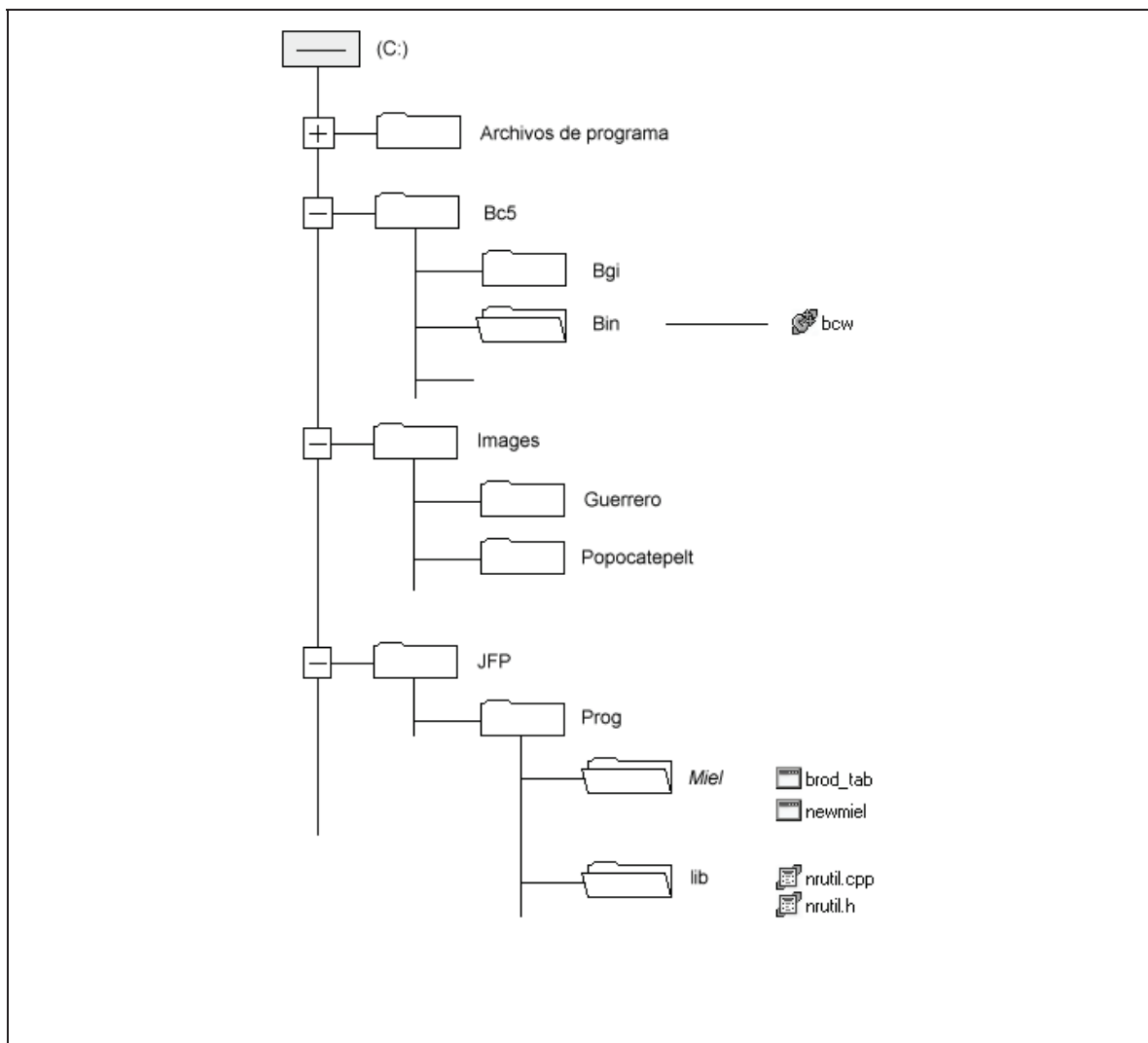


Figura 31. Configuración requerida para los tratamientos.

IV.2 Ejecución de los algoritmos⁸

a) Programa **Brod_tab.exe**

P1 Nombre del archivo ?

P2 Nombre de la imagen de las curvas ASCII (sin extensión .raw) ?

P3 Nombre de la tabla de correspondencia tonos/altitud (sin extensión .txt) ?

P4 Imagen _c2.raw
0 =====> ya existe
1 =====> crear una nueva

P5 (si P4 = 0)
Dar el nombre de la imagen existente (sin extensión _c2.raw) ?

P5 (si P4= 1)
Nombre de la imagen a crear (sin extensión _c2.raw) ?

b) Programa **NewMiel.exe**

P1 Nombre del archivo ?

P2 Nombre de la imagen de las curvas (sin extensión _c2.raw) ?

P3
0 =====> Usar el nombre de origen
1 =====> Dar un nuevo nombre

P4 (si P3 = 1)
Nombre de la imagen a crear (sin ninguna extensión) ?

Nota : si P3 = 0, el programa crea una imagen “Nombre_de_origen_m2.raw”.

P5 Valor de altitud más bajo de las curvas ?

P6 Valor de altitud más alto de las curvas ?

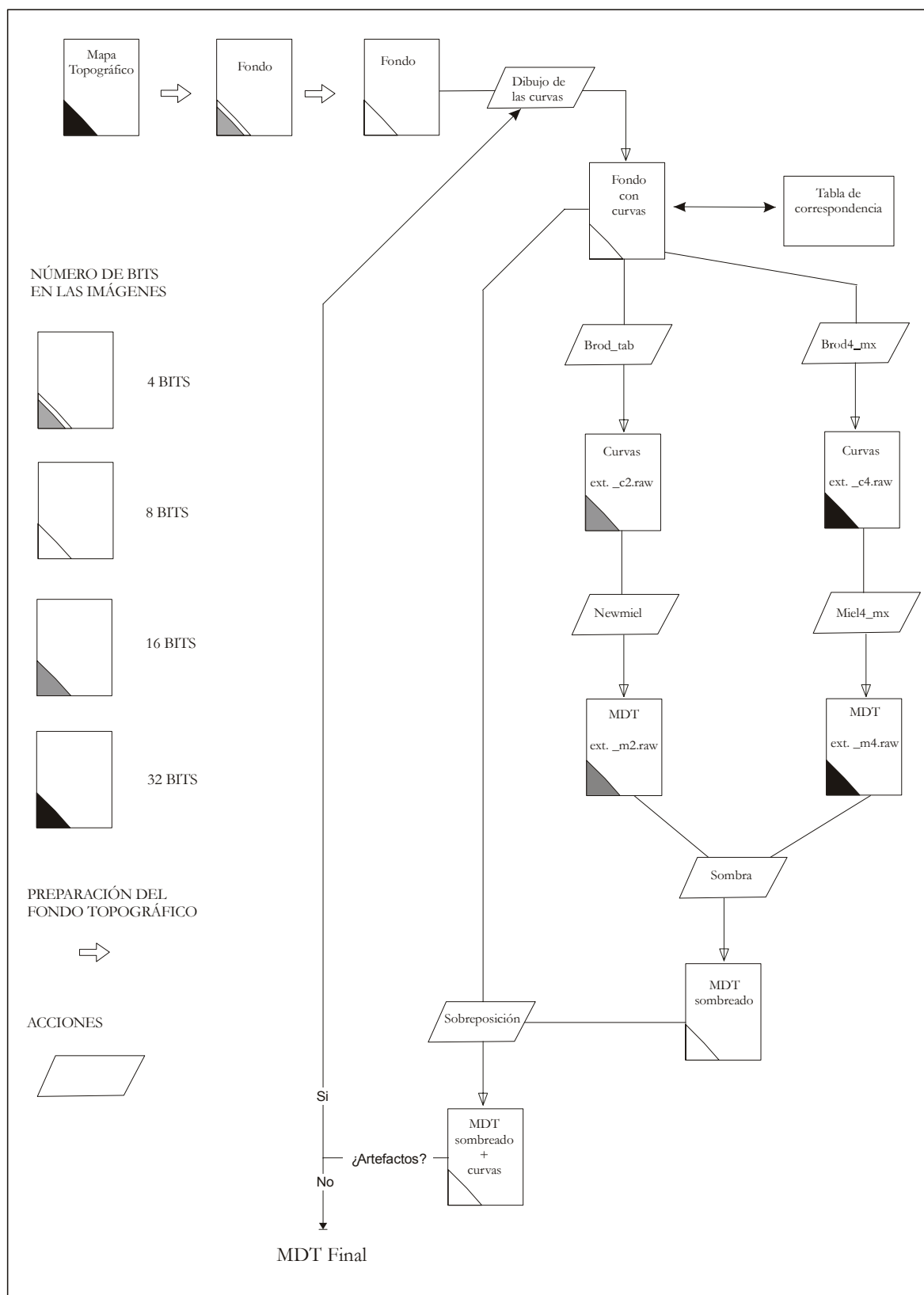
P7 Intervalo hipsométrico entre las curvas de nivel ?

P8 Suavización ⁹(1, 3 o 5) ?

⁸ Los programas Brod_tab4_mx y Newmiel4_mx crean y utilizan respectivamente una imagen que tiene la extensión c4.raw. Las preguntas se refieren a dicha extensión y el programa Newmiel4_mx crea una imagen con extensión _m4.raw.

⁹ La suavización permite borrar las asperezas de la superficie del MDT utilizando una interpolación de tipo spline.

Diagrama general de utilización de los programas de generación de los MDT



CONCLUSIÓN

El método presentado en este manual, muestra de manera simple la elaboración de Modelos Digitales de Terreno (MDT) de alta calidad requerido en los tratamientos geomorfológicos, tales como la extracción de las redes fluviales o para calcular parámetros específicos (rugosidad de la superficie, la iluminación diurna, mensual o anual, índices como la densidad de disección, la dimensión fractal local y/o global) que requieren MDT sin artefactos y muy finos, los cuales, se ilustrarán en un próximo manual.

El dibujo de las curvas de nivel a partir de imágenes raster y con ayuda del software Paint Shop 4 permite controlar paso a paso la ubicación real de las curvas de nivel e inferir la información que falta o no aparece sobre los fondos topográficos (por ejemplo, las curvas intermediarias en las zonas con pendiente importante).

Esperamos que este trabajo sirva de gran ayuda para todos los que utilizan MDT, no solo por razones estéticas, sino también para extraer información de la superficie terrestre y los parámetros que requieren en sus investigaciones.

EJEMPLOS DE MDT OBTENIDOS CON EL MÉTODO

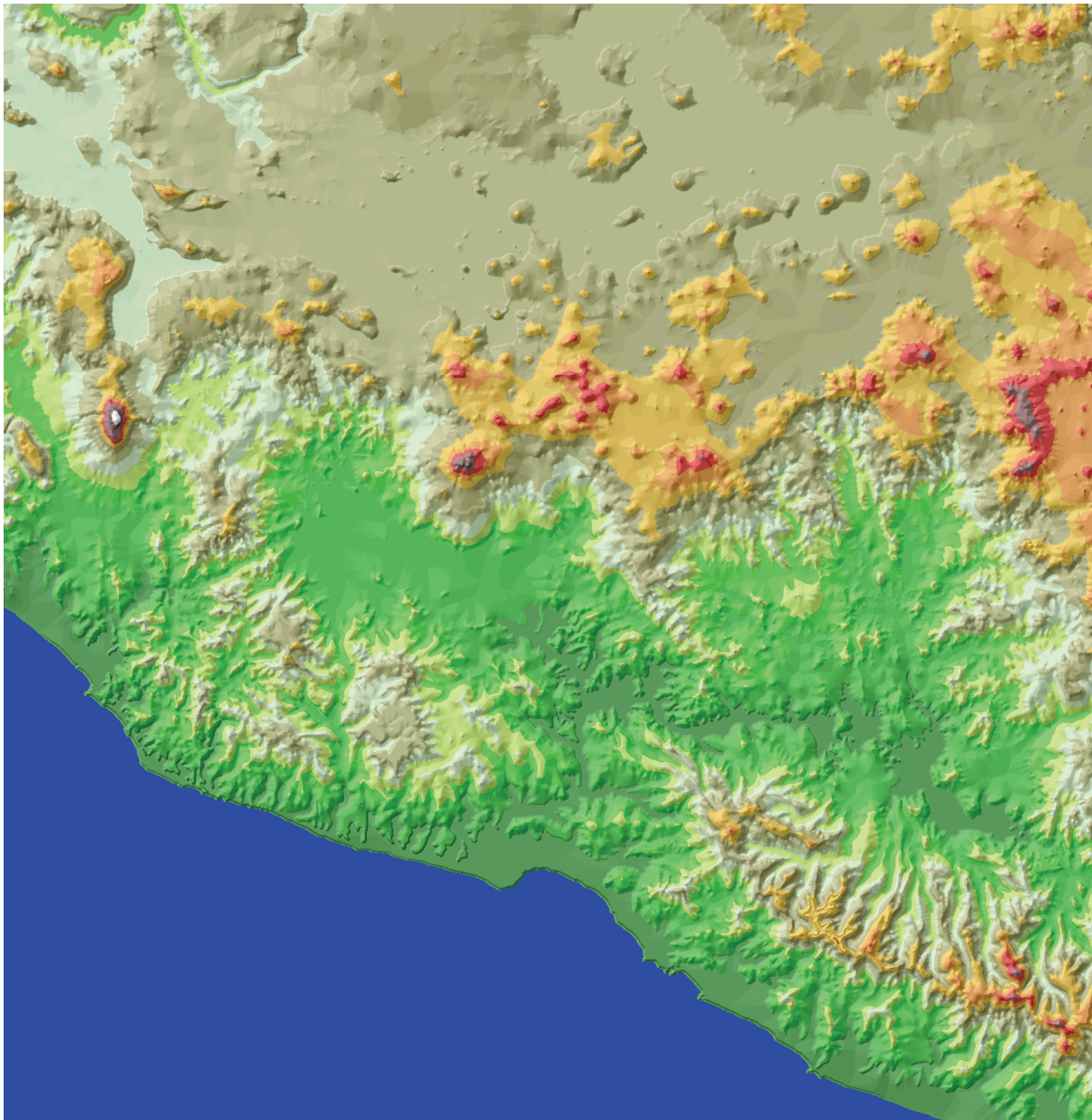
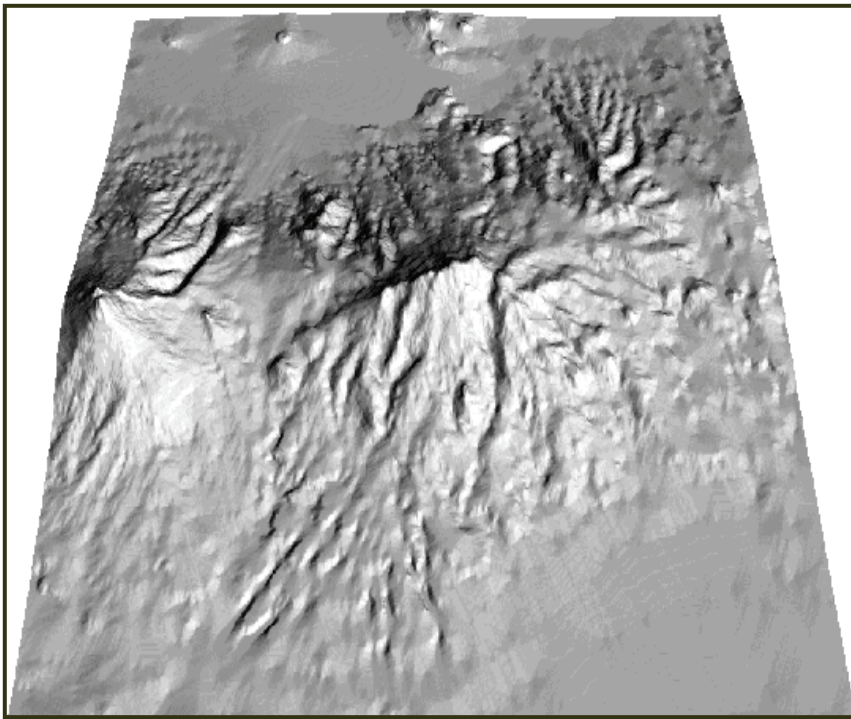


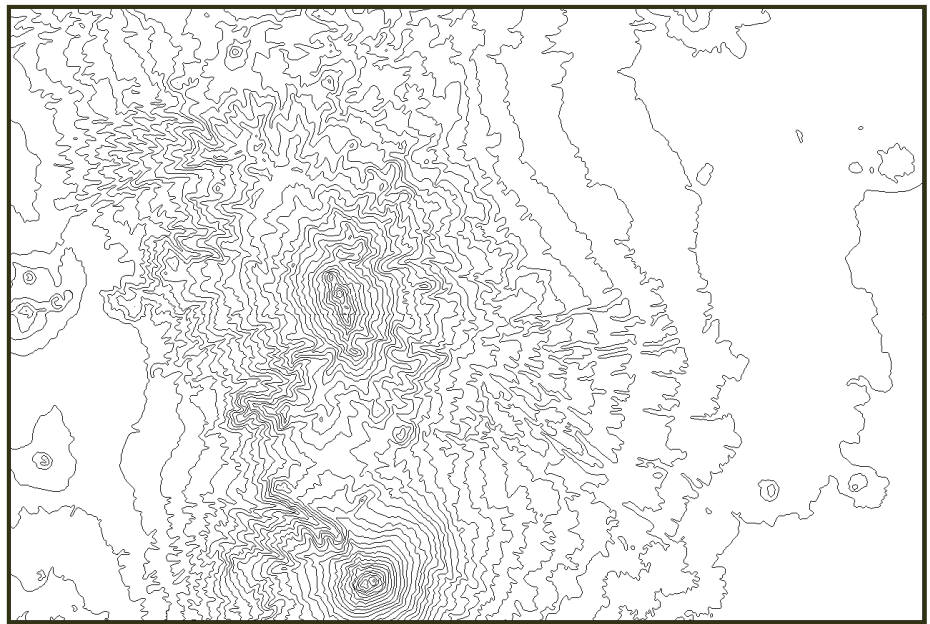
Figura 32. Estado de Michoacán [curvas extraídas del Digital Chart of the World].

En la base de datos DCW, el intervalo altimétrico de las curvas de nivel es de 1 000 pies (304.8 m). También existen en la base puntos cotejados (puntos de cima, aeropuertos o ciudades con su altitud y localización, etc.) que se pueden utilizar cuando éstas se encuentran en zonas delimitadas por una curva cerrada. Además, se encuentra la curva de nivel de 500 pies (152.4 msnm), ya que existen numerosas zonas planas a las orillas del mar.

Las curvas de nivel se arreglaron con el software Paint Shop, siguiendo este método.

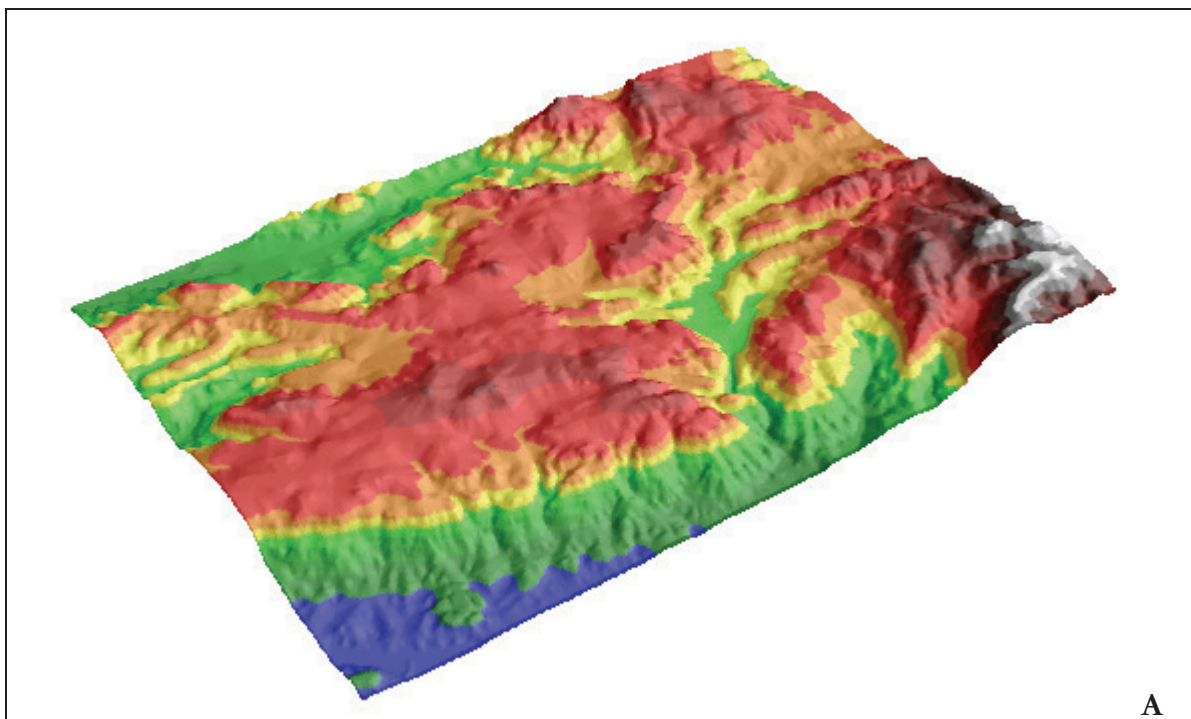


A

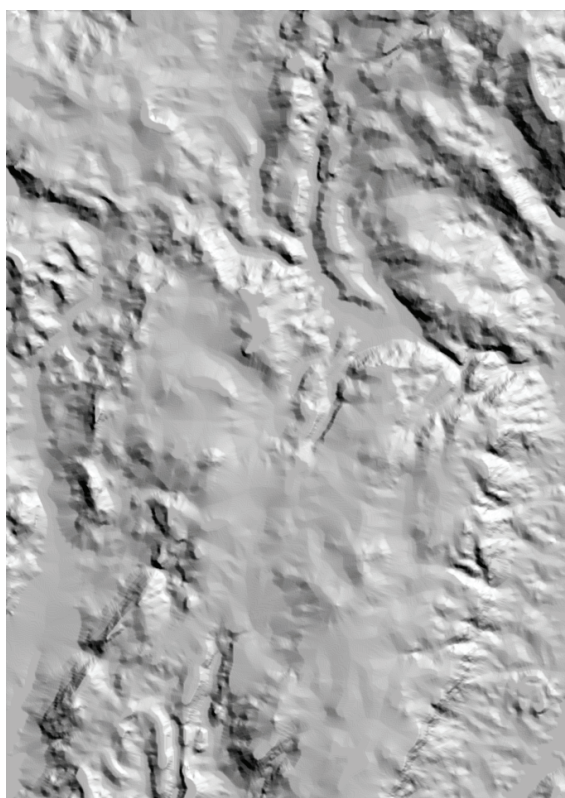


B

Figura 33. Bloque tridimensional sombreado del Popocatepetl y del Iztaccihuatl [A] obtenida del MDT generado a partir del mapa topográfico escala 1:50 000 de la carta Ciudad de México INEGI (1989). Curvas de nivel cada 100 m [B].



A



B



C

Figura 34. Bloque tridimensional [A] del MDT [B] de Teloloapan, Guerrero, con capas hipsométricas. Curvas extraídas cada 100 m del mapa topográfico [C] escala 1:250 000 de la hoja IGUALA de INEGI (2000).

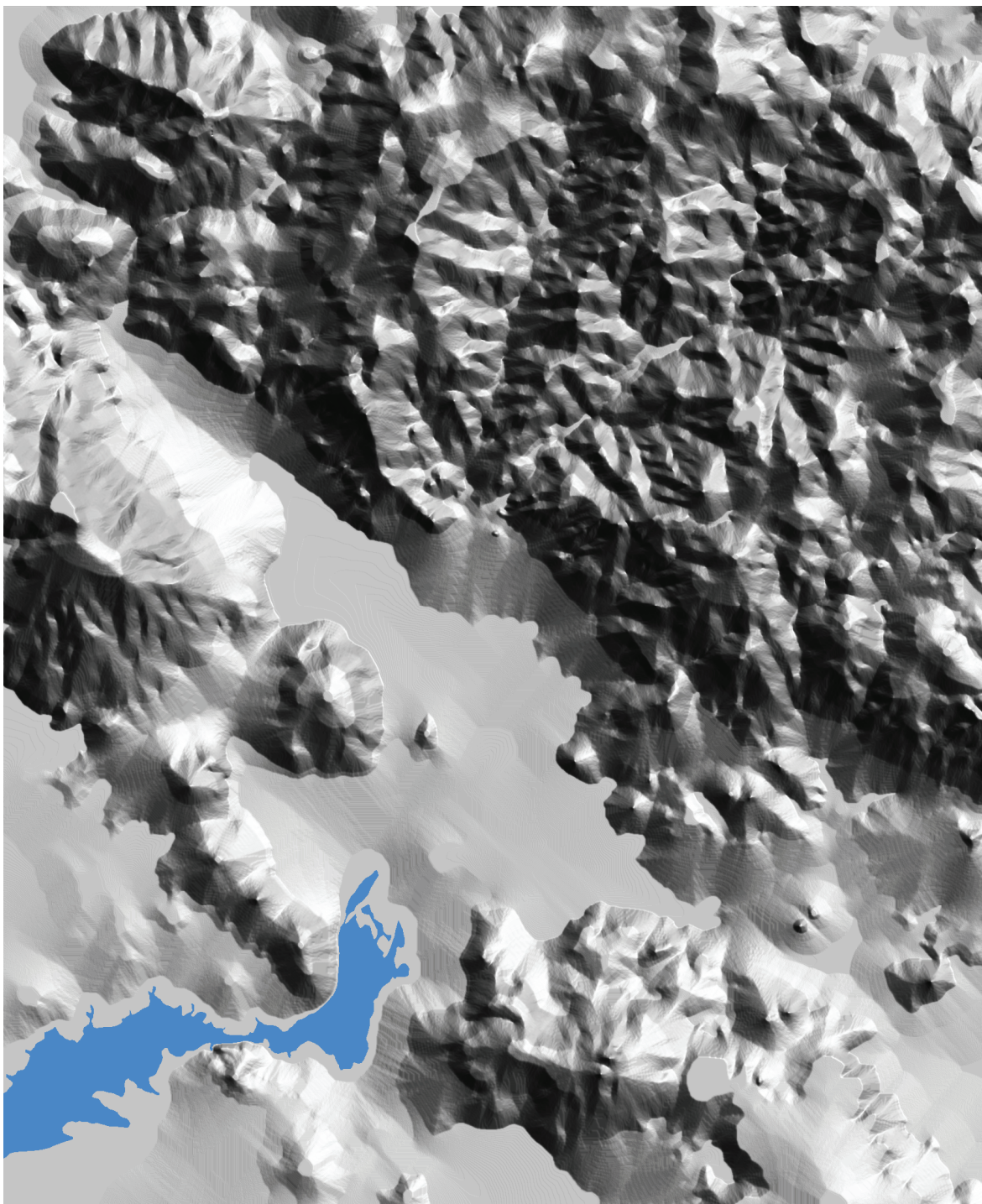
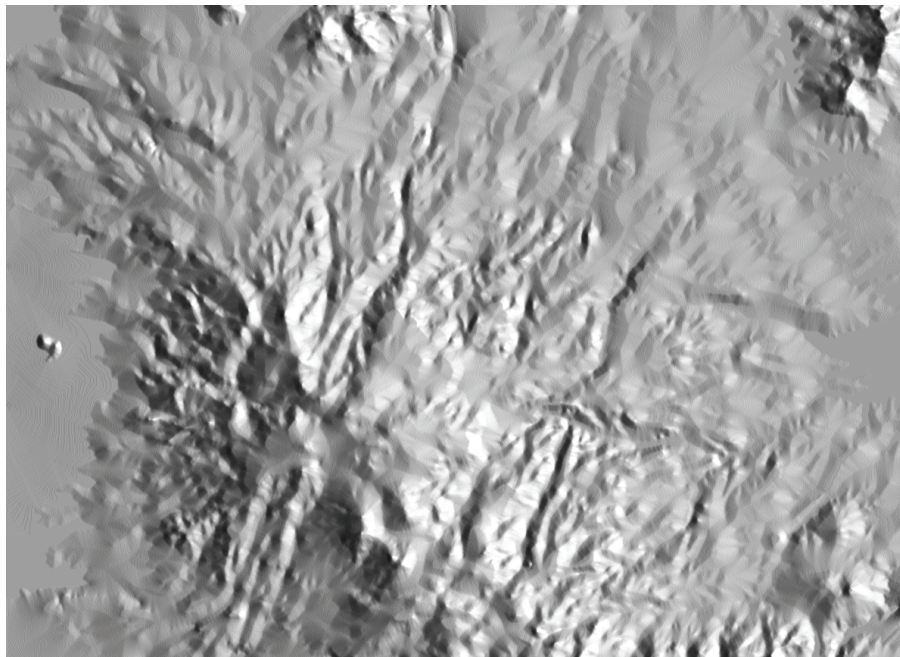
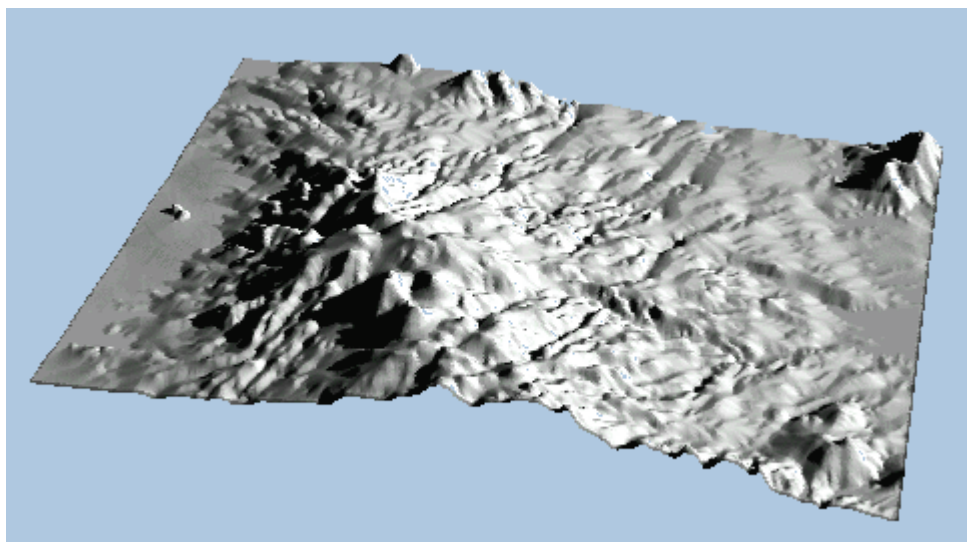


Figura 35. MDT sombreado de Huitzuco de los Figueroa, curvas cada 20 m de la carta topográfica Iguala escala 1:50 000 de INEGI. Tamaño del píxel 25 m, resolución altimétrica en centímetros reportado en píxeles de 4 bytes.

El cuerpo de agua en azul, sobrepuesto en el MDT, corresponde a una zona cerrada, la cual se llenó antes de hacer la interpolación (véase párrafo III.4.b. *Interpolación dentro de una curva cerrada*).



A



B

Figura 36. MDT sombreado [A] de la región Monte Bajo de la carta topográfica Ciudad de México, escala 1: 250 000 INEGI (1989). [B] Bloque del MDT con sombras proyectadas. El valor bajo de la elevación, la elección del azimut solar y el cálculo de las sombras proyectadas destacan los rasgos estructurales.

REFERENCIAS

INEGI (1999), Carta Topográfica, Zacatlán escala 1:50 000

INEGI (1989), Carta Topográfica, México escala 1:250 000

INEGI (2000), Carta Topográfica, Iguala escala 1:250 000

INEGI (2000), Carta Topográfica, Iguala escala 1:50 000

Digital Chart of the World (1993), US Defence Mapping Agency Data Base.

Parrot, J.-F. (1992), Brod_tab.exe : Transformation des courbes de niveaux 8 bits en courbes altimétriques. LGGST ORSTOM, doc. interne, 4 p. multigr.

Parrot, J.-F. et H. Tau (1993), Newmiel.exe: Interpolation multidirectionnelle. LGGST ORSTOM, doc. interne, 7 p. multigr.

Parrot J.-F. (2003), Versión española y adaptación de los algoritmos Brod_tab.exe y Newmiel.exe (este fascículo) (Inédito) Brod4_mx.exe y Miel4_mx.exe.

Taud, H., J.-F. Parrot and R. Álvarez (1999), DEM generation by contour line dilation, *Computers and Geosciences*, vol. 25, no. 7, pp. 775-783.

ADENDUM

Se añadió en el sitio del Instituto de Geografía el programa **Dilat_curves.exe** correspondiente a una versión actualizada del programa descrito en la publicación Taud *et al.* (1999). Este programa actuando a partir del documento producido por el programa **Brod_tab.exe** o el programa **Brod4_mx.exe**, genera un MDT sin necesitar un dibujo perfecto de las curvas de nivel. El resultado obtenido no tiene la cualidad de los MDT producidos con **Miel4_mx.exe**, pero permite obtener rápidamente un MDT correcto con curvas de nivel presentando artefactos. En realidad, la cualidad de los resultados obtenidos a partir de tratamientos ulteriores correspondientes por ejemplo a la extracción de atributos primarios como la pendiente, el aspecto, la concavidad, la convexidad, la dispersión de los normales, etc., a la generación de atributos secundarios y sobre todo a la extracción de la red fluvial, depende del nivel de precisión del MDT utilizado. Por esta razón, el modulo **Dilat_curves.exe** representa solamente un utilitario que permite visualizar el primer borrador correspondiente al MDT generado.

Un manual que describe los diferentes programas generando atributos primarios y secundarios está en redacción, así como la creación de un software agrupando todos estos módulos. Se pretende utilizar la misma presentación que este manual para divulgar dichos módulos.

Generación de Modelos Digitales de Terreno raster. Método de digitalización es un manual sencillo que introduce al estudiante universitario en el campo de la modelación terrestre y cuyo contenido explica los pasos a seguir para generar los MDT, desde como escanear los mapas topográficos, transformar la imagen topográfica original, digitalizar las curvas de nivel directamente en la pantalla, explicar el uso de la tabla de colores o tonos de gris para mayor eficacia y dar las soluciones de los errores que se cometen cuando se dibujan las curvas. Por último se explica el tipo de interpolación que se utilizará para generar el modelo digital de terreno.

Jean-François Yves Pierre PARROT-FAURE

Doctor de Estado en Ciencias (Especialidad en Petrología), Facultad de Nancy (Francia).

Investigador Titular en el Instituto de Geografía de la UNAM.

Profesor del tema selecto Modelos Digitales de Terreno en el Posgrado de Ciencias de la Tierra.

Sus líneas de investigación anteriores conciernen el estudio de las ofiolitas en el Medio-Oriente.

Sus principales líneas de investigación actuales son el tratamiento de imágenes, Modelos Digitales de Terreno, morfometría digital, así como el desarrollo en C++ de los programas que necesitan estos temas.

Verónica OCHOA-TEJEDA

Maestra en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.

Doctorante en la especialidad de Geología Ambiental en el Posgrado de Ciencias de la Tierra de la UNAM.

