

Algorítmica de los módulos ejecutables del libro Geomorfología tridimensional para el análisis del relieve mexicano

J.-F. Parrot





## Algorítmica de los módulos ejecutables del libro Geomorfología tridimensional para el análisis del relieve mexicano

Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México

# Algorítmica de los módulos ejecutables del libro Geomorfología tridimensional para el análisis del relieve mexicano

J.-F. Parrot





México, 2025

Parrot, Jean Francois

Algorítmica de los módulos ejecutables del libro Geomorfología tridimensional para el análisis
del relieve mexicano / Jean Francois Parrot. – Ciudad de México: UNAM, Instituto de Geografía, 2025
212 p. : il. – (Geografía para el siglo XXI. Textos Universitarios; 34)
ISBN 978-607-30-9102-2 (Obra general)
ISBN 978-607-587-004-5 (Esta obra)
DOI https://doi.org/10.14350/gsxxi.tu.34

1.Geomorfología – Manuales I. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. II. Serie, III. T.

Algorítmica de los módulos ejecutables del libro Geomorfología tridimensional para el análisis del relieve mexicano

Primera edición, 8 de enero de 2025

D.R. © 2025 Universidad Nacional Autónoma de México



Imagen de portada: Pendiente logarítmica calculada con el programa Log\_slope.exe (Parrot, 2008) utilizando el Modelo Digital de Terreno (MDT) provisto por INEGI (2013) a partir de un levantamiento Lidar

Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México, Cd. Mx. Instituto de Geografía, www.unam.mx, www.geografia.unam.mx

Editor académico: Federico Fernández Christlieb Editores asociados: Héctor Mendoza Vargas, Arturo García Romero, Gerardo Bocco Verdinelli y Eulalia Ribera Carbó Editor técnico: Raúl Marcó del Pont Lalli

La presente publicación presenta los resultados de una investigación científica y contó con dictámenes a doble ciego de expertos externos, de acuerdo con las normas editoriales del Instituto de Geografía

*Textos universitarios* ISBN (Obra general): 978-607-30-9102-2 ISBN: 978-607-587-004-5 DOI: https://doi.org/10.14350/gsxxi.tu.34

Hecho en México

## Índice

| Prólogo   |
|---|
| Capítulo I. Introducción11  |
| Capítulo II. Generación de modelos digitales de elevación<br>a partir de datos vectoriales15            |
| Capítulo III. Generación de modelos digitales de elevación<br>a partir de nube de puntos65              |
| Capítulo IV. Cálculo de parametros a partir de la superficie<br>de los modelos digitales de elevación99 |
| Capítulo V. Red de drenaje141   |
| Capítulo VI. Modulos utilitarios165   |
| Lista alfabética de los módulos ejecutables201  |
| Referencias207  |
| Datos adjuntos  |

### Prólogo

Muchos de los programas que he reunido en este manual han sido desarrollados durante aproximadamente 15 años. Algunos de ellos han sido realizados en colaboración con Carolina Ramírez-Núñez en el marco de estudios específicos. En una de mis estancias en la UNAM, diseñé la estructura general donde se inscribían estos programas para satisfacer las necesidades de los equipos con los cuales trabajaba y que me llevaron a realizar cortas visitas en la Ciudad de México durante más de tres años. Entre otras cosas, para no tener que introducir, abriendo los módulos ejecutables desarrollados en el entorno Ms\_Dos, la ruta que conduce al documento a procesar, decidí crear una carpeta de nombre *Images* (imágenes) en la unidad C: \ donde se colocarían todas las subcarpetas con los archivos que contienen los diversos documentos para trabajar. Esto se explica en detalle en la sección I.2 de este manual (ver figura I.1 del manual). Además, teniendo en cuenta lo que ya había desarrollado en un laboratorio de la Universidad París V en los años 1990, y para no tener que especificar el tipo de Modelos Digitales de Elevación (MDE) utilizados para realizar los tratamientos, decidí añadir a dichos modelos una extensión  $_m2$  o  $_m4$  que permitiría saber si los datos hipsométricos del documento raster se habían registrado utilizando 2 bytes o 4 bytes (unsigned short o int). Los límites de la informática en ese momento no facilitaban el uso de otros formatos (float, double, por ejemplo). Si el uso puntual de documentos de formato *bitmap* permitía precisar el número de líneas y columnas de una imagen porque estos documentos tienen un encabezado que define los parámetros característicos de la imagen, en cambio se necesitaba crear un archivo descriptivo dando esta información cuando se utilizaban datos raster (ver figura I.2 del manual). El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la necesidad de introducir en estos sistemas los documentos producidos por los módulos ejecutables que desarrollé, me llevaron gradualmente a generar y usar documentos de tipo ascii. Sin embargo, por falta de tiempo y la premura de este trabajo, me fue difícil reestructurar la totalidad de los programas que había creado durante los años anteriores. Por esta razón, encontramos en este manual módulos ejecutables que solo toman en cuenta y crean documentos raster; otros consideran datos ascii y datos raster. De hecho, la realización de un mini software permite borrar parcialmente este inconveniente. Se trata del software *Extract\_V2* que no solo garantiza la extracción de zonas dentro de una imagen o un MDE, sino que permite pasar de un tipo de imagen a otra (*raster a ascii y* viceversa cuando se trata de MDE; de *raster a bitmap* o *ascii y* viceversa cuando se trata de imágenes). Finalmente, se necesita aclarar que algunos programas están en francés, español e inglés, otros solo en inglés. Traté de armonizar todos los módulos presentados en este manual favoreciendo las versiones en inglés para que puedan ser utilizadas por una gran audiencia. Espero que este trabajo, que ha llevado muchos años de investigación, sea de gran utilidad para la comunidad científica a nivel nacional e internacional. Para que este manual también se pueda usar como una herramienta de enseñanza, todos los módulos ejecutables descritos en las páginas siguientes, así como numerosos ejemplos de datos vectoriales en formato *dxf* o del tipo de nubes de punto provenientes de Lídar no procesados, se ponen a disposición del público. También hay un acceso a una parte de los MDE que se crearon para llevar a cabo este trabajo.

Ciudad de México, diciembre de 2019

## Capítulo I. Introducción

En el curso del libro sobre **"el relieve mexicano y su representación tridimensional**", así como sobre el manejo de este tipo de información, se mencionaron varios módulos ejecutables y software.

Este manual se presenta como una guía que explica paso a paso cómo utilizar dichos módulos ejecutables y el contexto en el cual es posible emplearlos.

En función de sus características y de su finalidad, los programas se agruparon en cuatro capítulos (II. Generación de MDE a partir de datos vectoriales; III. Generación de MDE a partir de nube de puntos; IV. Cálculo de parámetros a partir de la superficie de los MDE; V. Red de drenaje; VI. Módulos utilitarios).

#### I.1. Configuración general

En primer lugar, se debe aclarar que todos los módulos ejecutables se dirigen a la carpeta *C:\images*, en la cual buscan la subcarpeta donde se necesita poner todos los documentos que los programas toman en cuenta (Fig. I.1).

Por esta razón, como lo muestra esta figura, es indispensable agrupar la totalidad de estos documentos, de acuerdo con dicha configuración.

Con el fin de homogeneizar la presentación de los módulos ejecutables, se eligió el idioma inglés. Se considera la carpeta *C:\images* como "*Directory*" donde se encuentran varios "*File Folder*"; los documentos o archivos de entrada y de salida se consideran como "*File*".

#### I.2. Tipos de datos

Cuando se trata de generar Modelos Digitales de Elevación, las imágenes deben de tener en general un formato. *raw*, el más simple de todos los formatos, pero estas imágenes necesitan un archivo de texto de formato *.txt* que juega el papel de encabezado; el archivo de texto tiene que ubicarse en la misma subcarpeta e indicar el número de líneas, el número de columnas, el número de bytes (1 en el

caso de una imagen en tonos de gris, 2 o 4 en el caso de los MDE), el mínimo de la dinámica, el máximo de la dinámica y el tamaño del píxel (Fig. I.2). Los tres primeros datos son esenciales para el funcionamiento de los programas.

También, algunos de los módulos toman en cuenta archivos tipo bitmap y ascii.

#### I.3. Los módulos ejecutables

La ubicación en la computadora de estos programas o "módulos ejecutables" es indiferente, no obstante, todos los programas buscan los archivos a tratar en la carpeta *C:\images*.

| 🔶 🚽 🕆 🚹 > Este equipo > Ti   | 110716000F (C:) > Images > L | idU2                   |                  |            |
|------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------|------------|
| 🏪 TI10716000F (C:)           | Nombre                       | Fecha                  | Tipo             | Tamaño     |
| 📙 Archivos de programa (x86) | 152_arbol1.bmp               | 20/08/2016 07:37 p. m. | Archivo BMP      | 63 KB      |
| BC5                          | 167.xyz                      | 11/07/2013 04:17 p.m.  | Archivo XYZ      | 146,166 KE |
| BDE32                        | 168.xyz                      | 11/07/2013 04:31 p.m.  | Archivo XYZ      | 157,576 KE |
| Common Files                 | 168_lidar_m4.raw             | 05/08/2016 06:42 p.m.  | Archivo RAW      | 245 KE     |
| Congregor                    | 168_lidar_m4.txt             | 05/08/2016 06:42 p.m.  | Documento de tex | 1 KE       |
|                              | 168_lidar_m4_treat.r         | 14/08/2016 04:23 p.m.  | Archivo RAW      | 245 KE     |
| Doc_diversos                 | im14.bmp                     | 20/08/2016 04:42 p.m.  | Archivo BMP      | 2 KI       |
| Imagenes_del_mes             | im14.raw                     | 20/08/2016 04:43 p.m.  | Archivo RAW      | 1 KE       |
| - Images                     | im14.txt                     | 20/08/2016 04:44 p.m.  | Documento de tex | 1 KE       |
| Intel                        | im14_bin.raw                 | 20/08/2016 04:45 p.m.  | Archivo RAW      | 1 KE       |
| JFP                          | im14_bin.txt                 | 20/08/2016 04:45 p.m.  | Documento de tex | 1 KE       |
| LAGE                         | im14_bin_report.txt          | 20/08/2016 05:40 p.m.  | Documento de tex | 1 KE       |
|                              | mask_bord.raw                | 20/08/2016 05:34 p.m.  | Archivo RAW      | 1 KE       |
| Nuevo_Aero                   | mask_bord.txt                | 20/08/2016 05:34 p.m.  | Documento de tex | 1 KI       |
| Paint Shop Pro               | rr_lidar_m4.raw              | 26/08/2016 06:17 p.m.  | Archivo RAW      | 245 KI     |
| Paint Shop Pro 9             | rr_lidar_m4.txt              | 26/08/2016 06:17 p.m.  | Documento de tex | 1 KE       |
| PerfLogs                     | rr_lidar_m4_treat.raw        | 26/08/2016 06:18 p.m.  | Archivo RAW      | 245 KE     |
| Program Files                | section.pal                  | 20/08/2016 04:26 p.m.  | Archivo PAL      | 3 KE       |

Figura I.1. Carpeta y subcarpeta donde se ubican los documentos.

| 1258 | Número de líneas            |
|------|-----------------------------|
| 796  | Número de columnas          |
| 1    | Número de bytes (u octetos) |
| 0    | Dinámica (mín.)             |
| 255  | Dinámica (máx.)             |
| 20   | Tamaño del píxel            |

Figura I.2. Archivo descriptivo asociado con una imagen de formato. *raw* 

#### I.4. Software

Al contrario de los módulos ejecutables, un software abre los archivos, cualquiera que sea su posición.

Los productos informáticos desarrollados por el autor y registrados como software en el INDAutor se citan en el manual con letras mayúsculas y en negrita. Se trata del software **TLALOC** (Parrot, 2006), **EXTRACT\_V2** (Parrot, 2011), **PINS\_V2** (Parrot, 2011) y **DENSITY\_V2** (Parrot, 2014).

Estos productos de acceso libre, así como los manuales de usuario correspondientes, se pueden bajar del sitio https://www.geografia.unam.mx/geoigg/ investigacion/lage/Metodos\_espacial/intro.html



## Capítulo II. Generación de modelos digitales de elevación a partir de datos vectoriales

#### II.1. Generalidades

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) se obtienen y se generan a partir de diversos procesos de interpolación aplicados a diferentes tipos de datos.

Los datos de entrada pueden ser datos vectoriales, imágenes "*raster*" de curvas de nivel o datos tipo nube de puntos (datos LiDAR o provenientes de drones).

Un primer grupo de módulos ejecutables concierne la generación de MDE a partir de curvas de nivel y puntos acotados. En una primera etapa, se propone mostrar cómo se obtienen a partir de datos vectoriales las curvas de nivel que se utilizan ulteriormente como base para realizar diversas interpolaciones.

En una segunda etapa, se va a explicar cómo mejorar la calidad de las curvas de nivel para obtener un producto final lo más preciso posible. Los módulos ejecutables correspondientes se agruparon en un segundo grupo.

Una última etapa concierne la interpolación por sí misma y cuáles son las herramientas que se necesitan para realizar dicha interpolación; todas esas herramientas se encuentran en un tercer grupo.

También se desarrollaron diversos módulos ejecutables que se relacionan con la generación de MDE tomando en cuenta datos provenientes de datos LiDAR. Se presentaron los módulos correspondientes en una sección específica.

#### II.2. Tipos de interpolación

El resultado de los tratamientos digitales depende del tipo de interpolación que se elige en función de la problemática. Los datos utilizados para realizar las interpolaciones pueden ser curvas de nivel, imágenes de satélite, puntos de altitud, etc...

Existen diferentes tipos de interpolaciones (Tabla II.1); entre otras:

#### a) la Triangulación

Aplicando la triangulación (Voronoï, 1908; Delaunay, 1934) y utilizando algoritmos de alta velocidad (Watson, 1981; Tsai, 1993), se obtienen rápidamente superficies triangulares, aunque haya muchos puntos de referencia (x,y,z). Las mallas *raster* se diseñan fácilmente a partir del modelo TIN creado por triangulación, siempre y cuando este método se utilice para un contexto de visualización rápida (simulaciones de vuelo, juegos de video, etc.); pero los MDE obtenidos no permiten analizar y estudiar con precisión el terreno.

#### b) la Dilatación de curvas

El método propuesto por Taud *et al.* (1999), utiliza las curvas de nivel y también los puntos cotejados; todos se dilatan hasta que las superficies resultantes de la dilatación se juntan. El límite entre las superficies corresponde a una curva con valor intermedio de ellas y el proceso se repite hasta llenar el espacio.

#### c) la Interpolación multidireccional

El algoritmo **Newmiel\_v2.exe** (Parrot 1993, 2002; Parrot y Taud, 2004), trabaja por capas comprendidas entre dos curvas de nivel. Las capas corresponden a zonas cerradas y delimitadas dentro de la imagen (Fig. II.1). Para cada píxel ubicado en una 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  $A_p$  del píxel P(i,j) es igual a:

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





#### d) el Krigeado

Desde hace mucho tiempo, la creación de mallas regulares ha sido estudiada a partir de los muestreos (Matheron, 1969; Duchon, 1975; Braile, 1978; De Masson d'Autume, 1978). Desde finales de los años sesenta, Matheron utilizó un método llamado "krigeado" (*Kriging* en inglés) inventado por Krige, un especialista de prospección minera. Este método está basado sobre los principios estadísticos de estimación (variogramas).

Aunque el *krigeado* sea un método de interpolación teóricamente muy recomendable para su inclusión en los Sistemas de Información Geográfica (Oliver y Webster, 1990), algunos autores observan que, en la práctica, su eficiencia es comparable a la de otros métodos más simples y de menor requerimiento computacional (Laslett *et al.*, 1987).

#### e) otros tipos

Duchon (1975, 1976) y otros autores (Mitas y Mitasova, 1988; Mitasova y Hofierka, 1993; Mitasova y Mitas, 1993), utilizan los splines (Spline lámina delgada o TPS Thin Plate Spline), para interpolar una superficie más realista. La liga teórica entre los dos métodos es muy conocida y la interpolación TPS corresponde a un caso particular de krigeado (Matheron, 1981; Dubrule, 1984).

Las características de diferentes interpolaciones se presentan en la Tabla II.1.

*Nota:* los módulos ejecutables presentados en este manual conciernen únicamente a la Dilatación de Curvas y la Interpolación Multidireccional.

#### II.3. Etapas de la generación

Para estudiar los diferentes elementos que constituyen una región, es posible generar un Modelo Digital de Elevación a partir de los datos vectoriales que provee el INEGI. Existen otras fuentes que se van a estudiar y describir más adelante.

En el caso de los archivos provenientes del INEGI, existen dos opciones: 1) utilizar directamente los archivos de formato dxf que se extraen del formato *shape* (*shp*); 2) transformar los archivos dxf en un formato más simple y condensado, el formato *jfp*; el tratamiento **Transf\_dif\_dxf\_jfp.exe** asegura esta transformación.

Cualquiera que sea la opción elegida, si la región en estudio cubre varias zonas geográficas, se necesita, en primer lugar, juntar los archivos de dichas zonas. Esta operación se realiza usando el módulo ejecutable **Sum\_dxf\_v2.exe** en el primer caso, o bien el módulo ejecutable **Sum\_jfp.exe** en el segundo caso.

#### 18 • J.-F. Parrot

| Modelo           | Datos  | Rapidez | Ventajas  | Desventajas  |
|------------------|--|---------|---|--|
| Splines          | Puntos Curvas  |         | MDE de calidad  | Proceso lento,<br>especialmente para<br>archivos de gran<br>volumen                  |
| Triangulación    | Puntos Curvas  | ++++    | La más rápida   | Presencia de<br>discontinuidades<br>en las derivadas de<br>primer y segundo<br>orden |
| Krigeado         | Puntos Curvas  |         | Método fiable   | Dificultad para<br>arreglar los valores<br>de los variogramas                        |
| Dilatación       | Puntos y/o<br>curvas de tipo<br><i>raster</i>            | ++      | No necesita<br>herramientas de<br>digitalización para<br>extraer las curvas<br>de nivel.<br>Muy rápido. | Presencias de zonas<br>planas cuando no<br>hay muchos puntos<br>de medida            |
| Multidireccional | Curvas de<br>tipo <i>raster</i> .<br>Puntos<br>acotados. | +       | No necesita<br>herramientas de<br>digitalización para<br>extraer las curvas<br>de nivel.<br>Rápido.     | Necesidad de<br>controlar la calidad<br>de las curvas de<br>nivel.                   |

Tabla II.1. Características de algunas interpolaciones.

El archivo resultante (formato *dxf* o *jfp*) es un conjunto de datos comprendidos entre las coordenadas UTM siguientes: *Xmin*, *Ymin*, *Xmax* y *Ymax*.

En este punto, se realiza una transformación de los datos vectoriales en una imagen raster de las curvas de nivel, utilizando en función del tipo de datos (*dxf* o *jfp*) el programa **Transf\_dxf\_v2.exe** o bien el programa **Transf\_jfp\_extract.exe** 

Cabe mencionar que en el conjunto de mapas que corresponden a la región estudiada, se encuentran a veces mapas con curvas de nivel con equidistancia diferente (10 o 20 metros). Si es el caso, la interpolación por dilatación de curvas (programa **Dilat\_Curves.exe**), es decir una interpolación por dilatación de las curvas de nivel, puede superar este obstáculo, y además generar, si es necesario, un documento con curvas de nivel cada 10 metros (Fig. II.2A y Fig. II.2B). En la imagen de 8 bits resultante, las curvas de nivel corresponden a tonos de gris y una tabla adjunta establece la correspondencia entre el tono de gris y la altitud.



Figura II.2. Transformación de datos originales con equidistancia variada. A. Datos originales. B. Interpolación del MDE cada 10 metros. Nota: la alternancia rojo azul identifica la presencia de curvas de nivel cada 10 metros. Cuando existe un solo color, por ejemplo, azul, significa que la carta topográfica contiene curvas cada 20 metros.

Los módulos anteriores permiten definir el tamaño del píxel. En el presente caso, el tamaño elegido es de 30 metros.

Un editor de pantalla ayuda a verificar el resultado, eliminar los defectos visualmente o utilizando dos módulos ejecutables (**Net\_curve2.exe** y **Hiatus.exe**).

Con la finalidad de centrarse en una región particular de una imagen de las curvas de nivel proveniente de un conjunto de archivos, el programa **Extract.exe** así como el software **Extract\_V2** realizan el corte.

Dos módulos ejecutables aseguran respectivamente la transformación de la imagen *raster* en un Modelo Digital de Elevación: 1) el programa **Brod5\_mx.exe** que, a partir de la imagen de las curvas de nivel y de la tabla de correspondencia tonos de gris/altitud, crea una imagen de 4 octetos de las curvas con sus valores de altitud en metros, decímetros, centímetros o milímetros; 2) el programa **Di-lat\_Curves.exe** o el programa **Newmiel\_v2.exe**; el primer módulo realiza una interpolación por dilatación y el segundo una interpolación multidireccional.

El Modelo Digital de Elevación resultante que ilustra el sombreado de la figura II.3 (programa **Sombra.exe**; esta función también se encuentra en el software **TLALOC**) es un archivo con una resolución de 30 metros y con una altitud entre 0 y 1860 metros. El usuario puede definir las unidades de la escala hipsométrica (metros, decímetros, centímetros o milímetros). Una escala en centímetro o milímetro requiere una imagen donde el valor altimétrico de los píxeles se reporta en 4 octetos (o *bytes*). Por ejemplo, en la figura 5, la escala hipsométrica va de 0 hasta 186000 cm.



Figura II.3. Horst oriental del graben de la Laguna Salada (Baja California).

#### II.4. Datos de entrada

Es posible generar Modelos Digitales de Elevación (MDE) a partir de curvas de nivel en tonos de gris. En Parrot y Ochoa-Tejeda (2014) se explica cómo utilizar datos topográficos para dibujar curvas de nivel por medio de un editor de imágenes y cómo, a partir de estas curvas, se generan MDE.

Los módulos ejecutables que se presentan en este manual se basan en parte en este proceso, pero toman directamente en cuenta datos vectoriales almacenados en un archivo que utiliza el formato *dxf*.

El formato .*dxf* permite visualizar fácilmente los datos utilizando un simple editor de texto (Wordpad o bloc de notas, por ejemplo), lo que no se puede hacer directamente a partir de los formatos *shape*.

En el caso de los mapas 1:50 000 del INEGI, la extracción de las curvas de nivel debe tomar en cuenta el archivo con extensión **cn** y el archivo con extensión **ha** (cuando se requiere utilizar la curva de nivel que representa el nivel del mar). De hecho, los datos del INEGI que corresponden a las curvas de nivel (extensión **cn**) no registran la curva de altitud cero (nivel del mar). Por esta razón, se necesita recuperar esta información en el archivo *dxf* con extensión **ha** (cuerpos de agua). Uno de los módulos presentados aquí responde a esta problemática (ver programa **Sum\_cn\_ha\_dxf.exe**).

Los datos de tipo Autocad funcionan por parejas de valores que caracterizan el tipo de variable (por ejemplo, 0 / SECTION, o bien 2 /HEADER, etc.); estos datos se reparten en secciones que empiezan con la pareja 0 / SECTION y se acaban con la pareja 0 / ENDSEC.

Dentro de cada sección, se precisa de qué tipo de información se trata. Por lo que nos concierne, existen dos secciones que los módulos toman en cuenta: la primera sección corresponde al encabezado y nos indica cuáles son las coordenadas UTM (X y Y) mínima y máxima del mapa y las altitudes mínima y máxima

| 0        | Primera sección                            |
|----------|--|
| SECTION  |  |
| 2        |  |
| HEADER   | Encabezado (HEADER)                        |
| 9        |  |
| \$EXTMIN | Valores mín. (\$EXTMIN)                    |
| 10       | 10 introduce coordenadas UTM X             |
| 393412   |  |
| 20       | 20 introduce coordenadas UTM Y             |
| 1852018  |  |
| 30       | 30 introduce el valor de altitud en metros |
| 20       |  |
| 9        |  |
| \$extmax | Valores máx. (\$EXTMAX)                    |
| 10       |  |
| 429036   |  |
| 20       |  |
| 1879827  |  |
| 30       |  |
| 940      |  |

| Tabla II.2. Ejemplo de documento <i>dxj</i> | f (Sección Header). |
|---|---------------------|
|---|---------------------|

(ver Tabla II.2). Después, dejando secciones que no nos interesan directamente, se encuentran los valores de las curvas de nivel dentro de la Sección "ENTITIES", en la rúbrica "POLYLINE" donde aparecen los vértices (VERTEX) que componen la curva (ver Tabla II.3).

Entrando en la rúbrica, se encuentra información sobre el color de la curva y, sobre todo, del valor de altitud (valor consignado en la pareja 30 / altitud). Los vértices siguen presentando información redundante, como el color y la altitud, seguida del valor de las coordenadas (UTM X, pareja 10 / X, UTM Y, pareja 20 / Y):

También, existe un archivo con otro tipo de formato donde los vértices que se encuentran en una curva de nivel forman una secuencia de coordenadas UTM

| 0<br>POLVLINE | Dentro de la sección ENTITIES se encuentran las  |
|---------------|--|
| 8             | Tublicas FOLIEINE.   |
| CN_3302       | Código de color (8 / CN_3302)  |
| 6             |  |
| CONTINUOUS    |  |
| 62            |  |
| 12            |  |
| 66            |  |
| 1             | (1, 1, 1, 2, 0, 1, 2, 0) $(1, 2, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,$ |
| 30<br>20      | Altitud (50 /20); aqui la curva de altitud 20 metros.  |
| 20            |  |
| VERTEX        | Vértice  |
| 8             | vertice  |
| ČN 3302       | De nuevo Código de color (8 / CN 3302)   |
| 62            | 8  |
| 12            |  |
| 10            | Coordenada UTM X (10 / X)  |
| 403262        |  |
| 20            | Coordenada UTM Y (20 /Y)   |
| 1863266       |  |
| 30            | De nuevo, altitud $(30/20)$ , lo que no es tan necesario   |
| 20            |  |
| U<br>VEDTEV   | Segundo vértica etc  |
| VERIEA<br>8   | Segundo vertice, etc.  |
| CN 3302       |  |
| 62            |  |
| 12            |  |
| 10            |  |
| 403268        |  |
| 20            |  |
| 1863272       |  |

Tabla II.3. Ejemplo de documento dxf (Sección ENTITIES Estructura POLYLINE).

dentro de la rúbrica "LWPOLYLINE". Este formato corresponde a una forma más compacta y sin información redundante. La Tabla II.4 ilustra la estructura que caracteriza esta nueva versión.

Por otro lado, se definió recientemente un formato más simple y compacto que solamente toma en cuenta los datos que se relacionan directa y únicamente con las curvas de nivel.

Este formato que corresponde a un archivo con la extensión *.jfp* tiene la forma siguiente: un valor entero seguido de dos valores flotantes (%d %lf %lf). Todos los registros tienen la misma estructura (ver Tabla II.5).

Los códigos 4, 5 y 6 definen el cuadro general del archivo (mínimo de las coordenadas UTM [X, Y], máximo de las coordenadas UTM, altitudes mínima y máxima de las curvas de nivel).

| Tabla II.4. Ejen | nplo de documento | dxf (Sección | ENTITIES, | Estructura | lwpolyline). |
|------------------|-------------------|--------------|-----------|------------|--------------|
|------------------|-------------------|--------------|-----------|------------|--------------|

| ρ                           | 10              |
|-----------------------------|-----------------|
| SECTION                     | 679757.059579   |
| 2                           | 20              |
| ENTITIES                    | 2101699.7788833 |
| D                           | 10              |
| LWPOLYLINE                  | 679754.8805518  |
| 5                           | 20              |
| 25                          | 2101696.4606585 |
| 330                         | 10              |
| A                           | 679749.3593623  |
| 100                         | 20              |
| AcDbEntity                  | 2101688.990355  |
| 8                           | 10              |
| el4b56a curva nivel20 l utm | 679740.2694955  |
| 62                          | 20              |
| 91                          | 2101678.3399135 |
| 390                         | 10              |
| 1D                          | 679734.6104973  |
| 100                         | 20              |
| AcDbPolyline                | 2101672.5491725 |
| 90                          | 10              |
| 94D                         | 679730.6093501  |
| 70                          | 20              |
| D                           | 2101669.0293398 |
| 43                          | 10              |
| 0.0                         | 679722.4004254  |
| 38                          | 20              |
| 4150.0                      | 2101661.0799551 |
|                             |                 |

El valor de la altitud se encuentra debajo del código 38.

| (int) | (float) | (float) |                                       |
|-------|---------|---------|---------------------------------------|
| 4     | Х       | Y       | Cuadro (mín.) Coordenadas UTM         |
| 5     | Х       | Y       | Cuadro (máx.) Coordenadas UTM         |
| 6     | Min.    | Máx.    | Altitud (mín., máx.) en metros        |
| 7     | 0.00    | Altitud | Altitud de la primera curva           |
| 1     | Х       | Y       | Inicio de la curva (Coordenadas X, Y) |
| 0     | Х       | Y       | Vértice siguiente                     |
| 0     | Х       | Y       | Vértice siguiente                     |
| 0     | Х       | Y       | Vértice siguiente                     |
|       |         |         |                                       |
| 7     | 0.00    | Altitud | Curva siguiente (Altitud)             |
| 1     | Х       | Y       | Inicio de la curva (Coordenadas X, Y) |
| 0     | Х       | Y       | Vértice siguiente                     |
| 0     | Х       | Y       | Vértice siguiente                     |

Tabla II.5. Estructura de los datos en el formato .jfp

El código 7 corresponde a una nueva línea (el segundo valor flotante indica cual es la altitud de esta línea). Aparece después el código 1 que corresponde al primer vértice o punto inicial de la línea con sus coordenadas X Y, y toda una serie de registros con el código 0 que son los puntos que van a generar en otra etapa la curva de nivel (coordenadas X Y de cada punto).

Dos códigos suplementarios (8 y 2) permiten introducir en el archivo puntos aislados o puntos acotados.

Existen tres módulos ejecutables que aseguran la transformación de los datos *dxf* en un archivo de formato *jfp*. Se trata de los módulos: **Transf\_dif\_dxf\_jfp.exe** y **Transf\_ha\_dxf\_jfp.exe**.

El primer módulo (**Transf\_dif\_dxf\_jfp.exe**) asegura la transformación de los datos *dxf* del archivo de las curvas de nivel (archivo con extensión **cn**); busca el valor de altitud mínimo dentro del archivo *dxf* antes de transformar los datos.

El segundo módulo (**Transf\_ha\_dxf\_jfp.exe**) permite extraer dentro de un archivo del INEGI (archivo con extensión **ha**) que agrupa todos los tipos de cuerpos de agua, el valor que corresponde al nivel del mar con la finalidad de incorporar este valor en un archivo final que contiene de esta manera la curva de nivel de altitud 0. Se necesita solamente indicar cuál es el código de color que describe la

curva de altitud 0. Si dentro del archivo *dxf*, el código se escribe con minúsculas o mayúsculas, se necesita utilizar las mismas características.

Finalmente, el módulo **Sum\_jfp.exe** permite agregar los datos de formato *jfp* en un solo archivo. Se puede agrupar todos los tipos de archivo *dxf* anteriormente transformados en archivos de tipo formato *jfp*.

# II.5. Primeras etapas del tratamiento. Transformación de los datos vectoriales en curvas de nivel.

Diversos módulos aseguran esta transformación. La lista de los módulos ejecutables se presenta en varias tablas. La presentación sigue un orden que corresponde más o menos a las etapas que se necesitan seguir para generar un MDE. Sin embargo, como lo vamos a ver en las líneas siguientes, el usuario puede seguir un camino diferente en función de su propia estrategia de utilización. A continuación, se describen en detalle cada uno de los módulos ejecutables de las tablas que resumen los programas correspondientes a las etapas de tratamiento. Se explica lo que hace el programa, su finalidad y como se debe manejarlo (datos de entrada y resultados).

#### II.5.1. Datos dxf

En la tabla II.6 aparecen los dos módulos que utilizan datos de tipo dxf.

#### a) Sum\_cn\_ha\_dxf.exe

El programa abre la ventana de la figura II.4.

Se pide el nombre de la subcarpeta (*"File Folder in the Directory C:\images"*) donde se encuentran los archivos **cn** y **ha** a pegar lo que implica la unión de una

| Programa | Nombre        | Autor (Año)   | Función  |
|----------|---------------|---------------|--|
|          | Sum_cn_ha_dxf | Parrot (2006) | Suma de los archivos <b>cn_</b> <i>dxf</i> (curvas<br>de nivel) y <b>ha</b> _ <i>dxf</i> (cuerpos de agua)<br>y generación de un archivo único<br>(cn_ha_dxf). |
| +<br>DXF | Sum_dxf_v2    | Parrot (2005) | Suma de varios archivos <i>dxf</i> .   |

Tabla II.6. Pretratamientos. Manipulación de los datos dxf

sola carta escala 1:50000 a la vez. La imagen resultante tendrá la extensión **cnha**, donde las curvas de nivel van de 0 (nivel del mar) hasta el máximo de altitud en la carta topográfica (Fig. II.5). Se introducen los nombres de los archivos sin las extensiones **cn**, **ha** y **cnha**.

En la figura II.6 se observan las curvas de nivel cada 20 metros del archivo e14c57cn.dxf con un solo código de color. Las curvas que corresponden al límite de los cuerpos de agua (e14c57ha.dxf) aparecen en la figura II.7. La figura II.8 muestra el resultado de la unión de todas estas curvas con un valor de tono de gris diferente para cada curva de nivel (desde 0 hasta 254 si es necesario) sobre un fondo neutro con valor 255.

#### b) Sum\_dxf\_v2.exe

Este módulo, que asegura el enlace de diversos archivos *dxf*, es de uso muy simple; pide el número de los archivos a pegar y sus nombres, así como el nombre que se va a dar al archivo resultante (Fig. II.9).

El programa realiza una primera lectura de todos los archivos, lo que le permite calcular las coordenadas UTM y las altitudes de la zona completa (Fig. II.10). Estos datos se reportan en el encabezado (\$EXTMIN y \$EXTMAX) y una nueva lectura asegura la transferencia de todas las curvas de nivel y de sus vértices (Fig. II.11).

Figura II.4. Inicio del programa Sum\_cn\_ha\_dxf.

| Treatment      |  |
|----------------|--|
| Reading th     | e first file   |
| CN             | record 1855  |
| First File     | Data   |
| mi<br>ma<br>mi | n x = 393412.000000 min y = 1852018.000000<br>x x = 429036.000000 max y = 1879827.000000<br>n z = 20.000000 max z = 940.000000 |
| New Lectur     | e  |
| re             | cord 1855  |
| Reading th     | e second file  |
| НА             | record 107   |
| Resulting      | data   |
| mi<br>ma<br>mi | n x = 393412.000000 min y = 1852018.000000<br>x x = 429036.000000 max y = 1879827.000000<br>n z = 0.000000 max z = 940.000000  |

Figura II.5. Proceso.



Figura II.6. Datos *cn* 



Figura II.7. Datos ha



Figura II.8. Datos *cnha* resultantes.

### II.5.2. Datos jfp

En la tabla siguiente se presentan los módulos ejecutables que transforman los datos *dxf* en datos de tipo *jfp*. (Tabla II.7).

De hecho, se definió un formato vectorial especifico, el formato *jfp* que facilita la manipulación de los datos vectoriales. El paso por el formato *jfp* dependerá del tipo de encabezado del archivo *dxf*. La ventaja de este formato es la simplificación del archivo y una estructura económica de la información (Tabla II.5).

#### a) Sum\_jfp.exe

Este programa (Fig. II.12 y Fig. II.13) junta diversos archivos de tipo *jfp* en un solo archivo con extensión *jfp*.

```
Treatment
File 1 Name : c:\images\Mexico\e14a29cn.dxf
        record 1295
File 2 Name : c:\images\Mexico\e14a39cn.dxf
        record 632
File 3 Name : c:\images\Mexico\e14a49cn.dxf
        record 3085
File 4 Name : c:\images\Mexico\e14b21cn.dxf
       record 1368
File 5 Name : c:\images\Mexico\e14b31cn.dxf
       record 823
File 6 Name : c:\images\Mexico\e14b41cn.dxf
       record 787
min x = 465084.304376 min y = 2100827.451735
max x = 535048.370629 max y = 2183850.954352
min z = -100.000000 max z = 5700.000000
```

Figura II.9. Datos de entrada en el programa Sum\_dxf\_v2

```
File 1 Name : c:\images\Mexico\e14a29cn.dxf
record 1295
File 2 Name : c:\images\Mexico\e14a39cn.dxf
record 632
File 3 Name : c:\images\Mexico\e14a49cn.dxf
record 3085
File 4 Name : c:\images\Mexico\e14b21cn.dxf
record 1368
File 5 Name : c:\images\Mexico\e14b31cn.dxf
record 823
File 6 Name : c:\images\Mexico\e14b41cn.dxf
record 787
```

Figura II.10. Lectura de los datos de entrada y cálculo de las nuevas coordenadas UTM.



Figura II.11. Transferencia de los datos de entrada.

Tabla II.7. Creación y manipulación de los datos jfp.

| Programa | Nombre             | Autor (Año)   | Función  |
|----------|--------------------|---------------|--|
| JFP      | Sum_jfp            | Parrot (2012) | Suma de varios archivos de<br>tipo <i>jfp</i> .  |
| -        | Transf_dif_dxf_jfp | Parrot (2014) | Transformación de<br>archivos <i>dxf</i> de varios tipos<br>(Polyline, Lwpolyline, etc.)<br>en un archivo <i>jfp</i> . |
| JFP      | Transf_ha_dxf_jfp  | Parrot (2012) | Transformación de<br>archivos <b>ha</b> _ <i>dxf</i> en un<br>archivo <i>jfp</i> .                                     |

El número de documentos puede ser importante, pero el orden de entrada de estos no importa.

b) Transf\_dif\_dxf\_jfp.exe

El módulo ejecutable **Transf\_dif\_dxf\_jfp.exe** es capaz de leer diversos tipos de documentos AutoCAD<sup>®</sup> para transformarlos en archivos de tipo *jfp*.

```
SUM_JFP

SUM_JFP

SUM_JFP

Sum_JFP

Sum_JFP

Sum_JFP

Sum_JFP

Sum_JFP

Sum_JFP

Sum_Structure
Sum_JfP
Summer SumJfP
Summer SumJfP
Summer SumJfP
Summer SumJfP
SumM_JFP
SumM_JFP
SumM_JFP
SumM_JFP
SumJfP
Sumff
Su
```

Figura II.12. Menú del programa Sum\_jfp.exe.

```
Treatment
min x = 325059.809859 min y = 2128792.167293
max x = 395226.489736 max y = 2212349.181826
min z = 0.000000 max z = 3640.000000
File 1 Name : C:\images\Monarca\e14a15.jfp
File 2 Name : C:\images\Monarca\e14a16.jfp
File 3 Name : C:\images\Monarca\e14a26.jfp
File 4 Name : C:\images\Monarca\e14a36.jfp
File 6 Name : C:\images\Monarca\e14a36.jfp
```

Figura II.13. Funcionamiento del programa.

Después de la introducción de los datos (Fig. II.14), el programa calcula las coordenadas UTM del archivo, precisa el tipo de registro (POLYLINE o LWPOLYLINE) y (Fig. II.15) envía el mensaje *"In this file, the data are of POLYLINE type, and there are n records in VERTEX before reaching the first group code corresponding to coordinate X"* o bien el mensaje *"data are in a File of LWPOLYLINE type"*. Por fin, el programa genera el archivo de formato *jfp*.

#### c) Transf\_ha\_dxf\_jfp.exe

Este módulo asegura la transformación de un archivo *dxf* utilizando registros de tipo POLYLINE en un archivo *jfp*. El programa requiere solamente conocer



Figura II.14. Inicio del tratamiento Transf\_dif\_dxf\_jfp.

```
Treatment

Original values of the header :

X_min 325604.108416 X_max 360332.630756

Y_min 2184365.776487 Y_max 2212349.181826

Z_min 1940.000000 Z_max 3600.000000

In this file, the data are of POLYLINE type

and there are 4 records in VERTEX before reaching

the first group code corresponding to coordinate X

Real values extracted from the file :

X_min 325604.108416 X_max 360332.630756

Y_min 2184365.776487 Y_max 2212349.181826

Z_min 1940.000000 Z_max 3600.000000

Hypsometric interval = 17

Transfert
```

Figura II.15. Ejecución del programa.

el código utilizado para caracterizar el mar en el archivo **ha**. Generalmente, los metadatos de los conjuntos de datos vectoriales del INEGI indican el significado de los códigos utilizados (Tabla II.8).

En este caso, las líneas que corresponden a los límites de los cuerpos de agua perennes toman en cuenta la línea de costa.

El código es igual a *HA\_6292*, pero en las versiones más recientes, este código se escribe con minúsculas.

Se necesita checar, con *WordPad* por ejemplo, los datos de los archivos **ha**, porque a veces los metadatos señalan que los códigos están con mayúsculas cuando en el archivo mismo se utiliza minúsculas.

| Tipos de datos                              |   | Códigos   |
|---|---|---|
|   | Puntos acotados   | PA_690  |
| Altimetria y datos de elevación             | Línea (Curvas de nivel)   | CN_3302   |
| Hidrografía e infraestructura<br>hidráulica | Rasgos puntuales:<br>- punto (corriente que desaparece)<br>- punto (tanque de agua en operación)<br>- punto (tanque elevado en operación)<br>Corrientes, vía de conducción de agua<br>- línea (acueducto subterráneo)<br>- línea (canal en operación)<br>- línea (canal: fuera de uso)<br>- línea (canal: fuera de uso)<br>- línea (corriente de agua intermitente)<br>- línea (separador: salina artificial)<br>Cuerpos de agua<br>- área (canal en operación)<br>- área (cuerpo de agua intermitente)<br>- área (cuerpo de agua perenne)<br>- área (estanque acuícola)<br>- área (estanque de sedimentación)<br>- área (estanque regulador) | HP_280<br>HP_811<br>HP_812<br>HL_3113<br>HL_3160<br>HL_3180<br>HL_3182<br>HL_3763<br>HA_6180<br>HA_6291<br>HA_6292<br>HA_6362<br>HA_6363<br>HA_6364 |
| I acalidadae y Daegoe yrhanoe               | - área (estanque: otro)   | HA_6365   |
|   |   |   |
| Límites                                     |   |   |
| Instalaciones diversas e industriales       |   |   |
| Tanques de Almacenamiento                   |   |   |
| Comunicación y Transporte                   |   |   |
| Elementos de Referencia Topográfica         |   |   |

Tabla II.8. Lista de los primeros tipos de elementos y sus códigos.

El programa (Fig. II.16) permite definir otro código para leer archivos AutoCAD<sup>®</sup> si existen en dichos archivos otros tipos de código.

#### II.5.3. Transformación de los datos vectoriales en imágenes raster

En relación con el tipo de datos de entrada existen dos módulos (Tabla II.9).

#### a) Transf\_dxf\_v2.exe

El primer módulo de la Tabla II.9, tomando en cuenta los valores de los archivos *dxf* originales o provenientes del uso de los dos módulos anteriores, crea una

| Programa | Nombre                 | Autor (Año)   | Función  |
|----------|------------------------|---------------|--|
| DXF      | Transf_dxf_v2          | Parrot (2005) | Transformación de un archivo <i>dxf</i> en<br>una imagen en tonos de gris de las curvas<br>de nivel y creación de una tabla de<br>correspondencia tonos de gris / altitud. |
| 蓫        | Transf_jfp_<br>extract | Parrot (2012) | Transformación de un archivo <i>jfp</i> en una<br>imagen en tonos de gris de las curvas<br>de nivel y creación de una tabla de<br>correspondencia tonos de gris / altitud. |

Tabla II.9. Transformación de datos vectoriales en imágenes raster.

```
TRANSF_HA_DXF_JFP

J.-F. PARBOT

(September 2012)

Hame of the File Folder located in the Directory C:\inages\ : Comondu

Rame of the input .dxf File to be transformed (without extension .dxf) ? g12aE8ha

Name of the output .jfp File to be treated (without extension .dxf) ? g12aE8ha

Name of the output .jfp File to be treated (without extension .dxf) ? g12aE8ha

Name of the output .jfp File to be treated (without extension .dxf) ? g12aE8ha

Chosen code that corresponds to the sea :

0 ===> HA_6292

1 ===> other code
```

Figura II.16. Abertura y tratamiento del programa Transf\_ha\_dxf\_jfp.

imagen de las curvas de nivel de acuerdo con la elección que concierne el tamaño del píxel.

La figura II.17 muestra cuales son las preguntas que hace el programa. En primer lugar, pide el nombre de la subcarpeta (*Folder File in the Directory C:* $\$ *images*) donde se encuentra el archivo *dxf*, así como el nombre de este archivo.

Después, se necesita definir el tamaño del píxel de la imagen resultante.

En primer lugar, el tratamiento realiza una prueba para definir el número de registros que, dentro del archivo *dxf* siguen a la palabra VERTEX (ver Tabla II.3) y preceden el código 10 de la pareja 10/UTM\_X de los grupos etiquetados. En general, hay 4 registros, pero algunos archivos no tienen ninguna indicación de código de color y en este caso, existen solo dos registros. Es posible abrir el archivo con *WordPad*, por ejemplo, para contar dichos registros, pero por si mismo el programa determina este valor.

En relación con los datos encontrados en el archivo y el tamaño del píxel definido, el programa calcula el tamaño de la imagen resultante, y el intervalo altimétrico entre las curvas de nivel. Si el usuario considera que este intervalo es el correcto (Fig.II.17), el programa salva el resultado. Un archivo descriptivo acompaña la imagen resultante (Fig. II.18).



Figura II.17. Inicio del programa Transf\_dxf\_v2.exe. Nota: si el número total de curvas para el intervalo retenido es superior a 250 (número máximo de tonos de gris definido), el programa se detiene enviando un mensaje de error.

```
Second approximation :
    pix_size 30.000000
    lines - 927 columns - 1187
        record 1962
Hypsometric Range = 20
0 ====> take this range into account
1 =----> choose another
0
Table of Correspondence Gray Tones / Altitud Values
    Minimum altitude = 0
    Maximum altitude = 940
    Number of contour lines = 47
Saving
    line 800
```

Figura II.18. Tratamiento del programa Transf\_dxf\_v2.exe

De lo contrario, se genera una imagen de las curvas de nivel en tonos de gris (Fig. II.19). Esta imagen tiene la extensión *\_trdxf.raw*.

Cada curva de nivel tiene un valor de tono de gris que corresponde a una altitud dada, como lo muestra un detalle reportado en la figura II.20.

Se muestra una alternancia rojo-azul para ilustrar la diferencia que existe entre dos curvas consecutivas. En el archivo con extensión .*txt* (Fig. II.21), se re-



Figura II.19. Curvas de nivel de la región de Acapulco.



Figura II.20. Detalle mostrando que cada curva tiene su propio valor.

| 927                          |    |      |    |                  |
|------------------------------|----|------|----|------------------|
| 1187                         |    |      |    |                  |
| 1                            |    |      |    |                  |
| 0                            |    |      |    |                  |
| 940                          |    |      |    |                  |
| 30.000000                    |    |      |    |                  |
| Input Data : c:\images\acapu | lc | o\e1 | 4c | 57cnha2.dxf      |
| Contour lines type PO        | Y  | LINE |    |                  |
| UTM Coordinates :            |    |      |    |                  |
| X min : 393412.000000        | Y  | min  | :  | 1852018.000000   |
| X max : 429036.000000        | Y  | max  | :  | 1879827.000000   |
|                              |    | Copy | vr | ight J.F. Parrot |

Figura II.21. Archivo descriptivo (Header File) de la imagen resultante.

portan las características de la imagen: número de líneas y columnas, el número de bytes, la dinámica (min., máx.), el tamaño del píxel, el nombre del archivo de entrada y las coordenadas UTM de la imagen resultante.

Por otro lado, el programa también genera una tabla de correspondencia entre los tonos de gris de la imagen y los valores de altitud (ver Figura II.47). Es esta tabla de correspondencia que va a servir de base para generar los MDE.

También, ver más adelante, el módulo **Crear\_Tabla.exe** genera una tabla de correspondencia (en metros).

#### b) Transf\_jfp\_extract.exe

A partir de un archivo con extensión *jfp*, este programa (Fig. II.22, Fig. II.23 y Fig. II.24) genera directamente una imagen *raster* de las curvas de nivel. Esta imagen corresponde a una zona que el programa permite elegir tomando en cuenta las coordenadas UTM de dicha zona.

El interés de este programa radica, entre otros, en el hecho de poder seleccionar una zona si esta se encuentra por parte en dos mapas adyacentes.

También, es posible definir cualquier escala dinámica de altitud y cualquier tamaño de píxel.

El archivo descriptivo (Fig. II.25) da información sobre la imagen inicial y sobre la zona extraída. Como en el caso anterior, la imagen resultante tiene la extensión *\_trdxf.raw* y se genera igualmente un archivo con extensión *\_trdxf\_tab.txt* que corresponde a la tabla de correlación entre tonos de gris y altitud en metros.

Después de leer el archivo, el programa calcula la dinámica hipsométrica de la imagen y pide cual es el intervalo altimétrico. Se recomienda ver en los datos originales cual es este intervalo, aunque existe también otro modo de control (ver más adelante). De hecho, como lo vimos en las figuras II.2 y II.20, la alternancia rojo-azul del color de las curvas representa un modo de revisión. Si, por ejemplo,

Figura II.22. Inicio del programa y definición de la escala dinámica de entrada.

```
output scale
        0 ----> neters
        1 ----> decinetres
        2 ----> centimeters
        3 ----> millimeters
        ÷.
Treatment
Original UTH coordinates :
Min_X 675436.618158 Min_Y 2087824.759277
        Max_X 687273.810528 Max_Y 2101772.806993
Original hypsometric scale :
        Min_7 2269.060608 Max_7 4588.060608
In relation to the pixel size (2.808080 meters), the complete image
will have 6974 lines and 5919 columns.
Type of treatment :
        8 ----> full scene
        1 ====> extraction
         1
New coordinates :
       Min X 7 676000
        Min Y 7 2092000
        Max X ? 681000
        Max Y ? 2100000
```

Figura II.23. Definición de la escala dinámica de salida y selección de la zona a extraer.

```
In relation to the pixel size (2.000000 meters), the extrated zone
will have 4000 lines and 2500 columns
The limits of the extracted area inside input data are the following :
    Lines : 886 - 4886
    Columns : 281 - 2781
record 832999
Minimum of the hypsometric scale (in meters) = 2200.000000
Maximum of the hypsometric scale (in meters) = 4500.000000
Define the altimetric interval in meters (see original data) = 10
Saving
line 4000
```

Figura II.24. Tratamiento y registro.

el intervalo real es de 10 metros y si el usuario indica 20 metros, las curvas de nivel van a tener un solo color (rojo o azul).

El módulo **Transf\_jfp\_extract.exe** presenta otra ventaja. Cuando la diferencia de altitud entre el punto más alto y el punto más bajo de la imagen a crear, necesita, en función del intervalo altimétrico, un número de curvas de

```
4000

2500

1

220000

458000

2.000000

Input data : C:\images\ori\cndxf.jfp

Scale in centimeters

UTM Coordinates of the original File :

X min : 675436.610158 Y min : 2087824.759277

X max : 687273.810528 Y max : 2101772.806993

UTM Coordinates of the extracted zone :

X min : 676000.000000 Y min : 2092000.000000

X max : 681000.000000 Y max : 2100000.000000

Copyright J.F. Parrot
```

Figura II.25. Header File de la imagen resultante.

nivel superior a 254 (la escala de una imagen en tonos de gris va de 0 hasta 255), es posible generar dos imágenes cada una con un rango de valores diferente; por ejemplo, en el caso del tratamiento de la región del Pico de Orizaba (Fig. II.26 y Fig. II.27) cuya altitud va de 0 hasta 5600 metros se va a necesitar, para un intervalo altimétrico de 20 metros, dos imágenes; en la primera imagen, el rango de altitud será de 0 hasta 2800 metros y en la segunda de 2820 hasta 5600 metros.

Las dos imágenes de curvas de nivel en tonos de gris (Fig. II.28A y Fig. II.28B) y sus tablas de correspondencia se van a utilizar ulteriormente (con o sin los mejoramientos propuestos en el apartado 6) para generar una imagen de la totalidad de las curvas de nivel con el apoyo del módulo **Brod5\_mx.exe** (ver más adelante en el apartado 7).

#### II.6. Segunda etapa del tratamiento. Mejoramiento de las curvas de nivel.

El uso de un editor de pantalla permite mejorar las curvas de nivel, eliminar manualmente errores, modificar y añadir información como por ejemplo puntos


Figura II.26. Inicio del tratamiento.

acotados como lo ilustró la figura I.20 del capítulo I del libro, figura reportada aquí con el número II.29.

Cuando se añaden puntos acotados se necesita reportar el valor del tono de gris y la altitud respectiva en la tabla de correspondencia tonos de gris / altitud.

También se desarrollaron tres módulos ejecutables para mejorar automáticamente el dibujo de las curvas de nivel (Tabla II.10).

## a) Net\_curve2.exe

El módulo **Net\_curve2.exe** transforma si es necesario e igualmente posible las curvas de nivel de camino 4 en curvas de camino 8 (Fig. II.30). El camino 8 para una curva significa que dicha curva se compone de una sucesión de segmentos lineales de 1 hasta n píxeles, segmentos que se unen solamente por sus esquinas.

```
Treatment
Original UTM coordinates
                               120
         Min_X 675207.363006 Min_Y 2074349.100900
         Mex X 745966.666879 Max Y 2129699.749730
Original hypsometric scale :
         Hin Z 8.800308 Max_Z 5508.030880
In relation to the pixel size (30.000000 meters), the complete image
will have 1845 lines and 2359 columns
Type of treatment :
         8 ----> full scene
         1 ----> extraction
         6
The limits of the extracted area inside input data are the following :
         Lines : 0 - 1845
         Columns : 0 - 2359
record 2189999
Ninimum of the hypsometric scale (in maters) = 0.020030
Naximum of the hypsometric scale (in meters) - 5600.000000
Define the altimetric interval in meters (see original data) = 20
The total number of layers (281) is too large
The new version of Tranf_jfp_extract proposes a solution : 
create different images of contour lines taking into account
different hypsometric ranges
(for example, an image of the contour lines between 0 and 1000 meters,
and another image of the contour lines between 1010 meters and 2020 meters
define the hypsometric range :
         Min. ? 0
Max. ? 2800
```

Figura II.27. Preguntas en función de un número excesivo de curvas de nivel.



Figura II.28. Curvas de nivel de la región del Pico de Orizaba (Mapas E14B46, E14B47, E14B56 y E14B57). A. Rango altitudinal 0-2800 m; B. Rango altitudinal 2820-5600 m.



Figura II.29. Puntos acotados y curvas cerradas.

## Tabla II.10. Módulos utilitarios.

| Iconos | Nombre             | Autor (Año)                         | Descripción somera   |
|--------|--------------------|-------------------------------------|--|
| r.     | Net_curve2.exe     | Parrot (2003)                       | Eliminación, en las curvas<br>de nivel, de los pixeles de<br>esquina, para obtener una<br>curva de camino 8. |
| È      | Net_curv_final.exe | Parrot (2004)                       | Ebarbulación*  |
| 22     | Hiatus.exe         | Parrot (2012)<br>Actualización 2019 | Eliminación de los hiatus en<br>las curvas de nivel.   |

\* Las ramas secundarias que no existen en la curva principal se denominan "barbules" o púas, "ebarbular" implica eliminar dichos segmentos por iteración sucesiva (Pettier y Camillerapp, 1993).



Figura II.30. Caminos: A. camino 4; B. camino 8.

Esto se realiza tomando en cuenta cada curva desde la curva de nivel de altitud más baja hasta la curva de nivel de altitud más alta, eliminando los píxeles de esquina y algunos otros en función del valor del código que muestra cual es la disposición de los píxeles vecinos dentro de una ventana móvil.

Para realizar este tratamiento, se utilizan los códigos como ellos aparecen en el dibujo de la figura II.31. La suma de los códigos de los píxeles vecinos nos permite conocer la configuración. Esta suma va de 0 (ningún píxel vecino, es decir un punto aislado, hasta 255, es decir presencia de 8 vecinos con el código del píxel central).

Las figuras II.32 y II.33 muestran cuáles son las sumas de los códigos de los píxeles vecinos que generan la eliminación del píxel central de la ventana móvil.

Cuando se inicia el tratamiento, la ventana de diálogo de la figura II.34 se abre, pidiendo el nombre de la subcarpeta (*File Folder*) que se encuentra en la carpeta (*Directory*) C:\images y contiene los archivos (*Files*) a tratar.

Si el usuario desea crear un archivo con un nombre diferente que el nombre de entrada (respuesta 1), el programa pide definir este nombre (Fig. II.35), si no se crea un archivo concatenando la extensión *\_venc8* al nombre genérico.

Después de responder 0 o bien de responder 1 y definir el nuevo nombre deseado, el programa se desencadena precisando curva de nivel por curva de nivel el número de pixeles modificados en las diferentes iteraciones que realiza hasta no modificar ningún píxel (Fig. II.36).

La figura siguiente (Fig. II.37) muestra sobre una pequeña zona, el resultado obtenido.

## b) Net\_curv\_final.exe

El módulo **Net\_curv\_final.exe** elimina los conjuntos de píxeles que forman líneas y son como apéndices que se conectan en las curvas de nivel.

| 1   | 2  | 4  |
|-----|----|----|
| 128 |    | 8  |
| 64  | 32 | 16 |

Figura II.31. Códigos para los píxeles vecinos



Figura II.32. Configuraciones que eliminan el píxel central.



Figura II.33. Segundo panel mostrando las sumas que eliminan el píxel central.



Figura II.34. Abertura del programa.



Figura II.35. Definición del nuevo nombre.

La eliminación se basa sobre la técnica de la "*ebarbulación*" que consiste en sacar píxel por píxel los apéndices considerados como "pelos de barba". La figura II.38 muestra cuales son los códigos de "*ebarbulación*". Dos pares de configuración dentro de la ventana móvil: a la izquierda la configuración inicial; a la derecha eliminación del píxel central.

Se inicia el tratamiento con la ventana de diálogo de la figura II.39. Se necesita aclarar que el proceso es iterativo; por esta razón, se debe utilizar dicha función con mucho cuidado porque si falta solamente un píxel en una curva de nivel y si se aplican muchas iteraciones, esta curva puede desaparecer totalmente.

De tal modo que es menester checar con cuidado la imagen de las curvas de nivel para tener la certeza de que no haya rupturas en las series de píxeles que forman las curvas de nivel (Fig. II.40 y Fig. II.41).



Figura II.36. Modificaciones de las 47 curvas de nivel que existen en la imagen acapulco\_trdxf.



Figura II.37. Ejemplo de resultado. A. Imagen de las curvas provenientes de los diferentes tratamientos de transformación de los datos vectoriales en imagen raster. B. Resultado del tratamiento *Net\_Curve2*.



Figura II.38. Códigos de "ebarbulación".

```
×
                  NET_CURV_FINAL
*
                     J.-F. PARROT (November 2004)
Warning : be sure that in this image, all the contour lines
        correspond to closed contour lines.
Thus, a checking is recommanded before using the program.
Name of the File Folder located in the Directory C:\images : acapulco
Name of the File to be modified (without extension .raw) ? zona_venc8
      THE IMAGE HAS :
            150 LINES
        AND 180 COLUMNS
0 ----> Taking into account the generic name zona_venc8 ?
1
 ----> Creating a new File ?
1
Name of the resulting File (without extension _totnetcurv.raw) ? zona
lecture
Total number of contour lines : 18
Treatment of the contour line number 20
```

Figura II.39. Ventana de diálogo del módulo Net\_Curv\_Final.



Figura II.40. Ejemplos de tratamiento *Net\_Curv\_Final.exe*. A. Imagen proveniente del tratamiento *Net\_Curve2* (imagen con extensión *\_venc8*); B. Eliminación de diversas colas (Imagen con extensión *\_totnetcurv*).



Figura II.41. Artefactos creados por el tratamiento. A. Presencia de una ruptura (hiatus) en la curva verde (ver flecha); B. Eliminación de la casi totalidad de la curva verde.

## c) Hiatus.exe

El módulo **Hiatus.exe** trata de juntar elementos de curvas de nivel si, dentro de esta curva, la distancia entre las extremidades de los elementos no sobrepasa un número importante de píxeles.

Se abre una ventana de diálogo (Fig. II.42) que pide el nombre de la imagen de entrada, el nombre de la imagen de salida y la distancia máxima en píxeles que separa dos extremidades dentro de una curva de nivel. Si esta distancia entre las



Figura II.42. Ventana de diálogo del programa Hiatus.exe.

extremidades es inferior o igual a la distancia máxima definida por el usuario, el programa junta estas extremidades.

El programa genera una imagen con formato *raw* (extensión \_*hiatus.raw* y archivo descriptivo con extensión \_*hiatus.txt*), así como un archivo informativo con extensión \_*hiatus\_tab.txt* que indica cual es el valor de la distancia utilizada para juntar los segmentos y si se presentan o no extremidades remanentes (Fig. II.43 y Fig. II.44). Si se quedan extremidades libres, se precisa el código de la línea que presenta rupturas y cuáles son las coordenadas *i*, *j* (línea y columna) de las extremidades que el programa no pudo juntar tomando en cuenta la distancia definida por el usuario.

La figura II.45 da un ejemplo del tratamiento. Una flecha negra muestra donde se ubican algunas de las rupturas (Fig. II.45A).

## II.7. Última etapa del tratamiento. Interpolaciones.

En la tabla II.11 se reportan los módulos ejecutables que permiten generar los Modelos Digitales de Elevación a partir de las imágenes en tonos de gris de las curvas de nivel.

```
Treatment applied to the input image c:\images\hiat\chichonl8_corte_hiat.raw
Resulting output image : c:\images\hiat\chichon_sp2_hiatus.raw
Space (in pixels) between ends of branch = 2
Remaining breaks
the line number 50 presents 4 end of branch
point 1 i - 38 j - 161
point 2 i - 42 j - 162
point 3 i - 113 j - 65
point 4 i - 115 j - 69
```

Figura II.43. Archivo informativo. Un espacio de 2 no junta todas las extremidades.



Figura II.44. Con un espacio igual a 6, no subsisten extremidades libres.



Figura II.45. Ejemplo de aplicación (Curvas del volcán Chichón).

## a) Crear\_Tabla.exe

El programa **Crear\_Tabla.exe** es un módulo utilitario que crea una tabla de correspondencia entre los tonos de gris y la altitud.

En la ventana de diálogo de la figura II.46, se introduce la serie de tonos de gris (primer valor y paso de los tonos de gris), el primer valor hipsométrico en metros y el último valor hipsométrico en metros.

| Programa | Nombre                  | Autores (Año)                      | Descripción somera  |
|----------|-------------------------|------------------------------------|---|
|          | Crear_tabla.exe         | Parrot,<br>Ramírez-Núñez<br>(2012) | Creación de una tabla de<br>correspondencia entre los tonos de gris<br>y la altitud (en metros, decímetros,<br>centímetros, etc.)                                     |
| JFP      | Transf_jfp_brod.<br>exe | Parrot (2012)                      | Creación de una imagen de 4 bytes con<br>los valores de altitud de las curvas de<br>nivel (a partir de datos <i>jfp</i> )   |
| 4<br>4   | Brod5_mx.exe            | Parrot (2017)                      | Creación de una imagen de 4 bytes con<br>la altitud de las curvas de nivel (a partir<br>de la imagen de las curvas en tonos de<br>gris y la tabla de correspondencia) |
| 2        | Dilat_curves.exe        | Taud, Parrot<br>(1997)             | Generación del Modelo Digital de<br>Elevación por dilatación de curvas.   |
| 1        | Newmiel_v2.exe          | Parrot (2012)                      | Generación del Modelo Digital de<br>Elevación por medio de la interpolación<br>multidireccional.  |

Tabla II.11. Módulos ejecutables (Creación de los Modelos Digitales de Elevación).

Finalmente, se realiza la elección de la escala altitudinal: metros, decímetros, centímetros o milímetros.

La tabla resultante (Fig. II.47) se utiliza para generar el MDE.

# b)Transf\_jfp\_brod.exe

Este programa permite pasar directamente de los datos vectoriales con formato *jfp* a la primera etapa de la generación de los Modelos Digitales de Elevación, sin utilizar los módulos de mejoramiento del dibujo de las curvas de nivel. Si el usuario supone que el dibujo de las curvas de nivel no necesita un examen ni tampoco un mejoramiento, en este caso este tratamiento es más rápido. También, a pesar de la presencia de artefactos en el dibujo de las curvas de nivel, es posible utilizar este módulo para obtener una primera visión del MDE que corresponde a los datos vectoriales.

La ventana de diálogo de la figura II.48 se abre al iniciar el tratamiento. Los datos de entrada son datos vectoriales y la imagen resultante es una imagen de valores enteros de 32 bits con extensión  $_c$ *4.raw* donde sobre un fondo neutro que

```
CREAR TABLA
                          J.-F. PARROT y C. RAMIREZ-NUNEZ
                                            (October 2012)
This program creates a table of correspondence between gray tones
and altitude in meters, decimeters, centimeters or millimeters
This table is used to generate the Digital Elevation Models
Name of the File Folder located in the Directory C:\images : ? ceboruco
Name of the Table (without extension _tab.txt) ? cebo_centimeter
First gray tone value in the image ? 1
Gray tone Step ? 1
First hypsometric value (in meter) ? 2000
Last hypsometric value (in meter) ? 3620
Value of the hypsometric step (in meter) ? 20
Output dynamic scale
        0 ----> meters
        1 ====> decimeters
        2 ====> centimeters
        3 ----> millimeters
        2
```

Figura II.46. Ventana de diálogo del programa Crear\_Tabla.exe.

| 1  | 208000 |
|----|--------|
| 2  | 210000 |
| 3  | 212000 |
| 4  | 214000 |
| 5  | 216000 |
| 6  | 218000 |
| 7  | 220000 |
| 8  | 222000 |
| 9  | 224000 |
| 10 | 226000 |

Figura II.47. Ejemplo de tabla de correspondencia en decímetros. Se utiliza cuando se crea una imagen raster de 16 o 32 octetos (bytes).

vale -99999 se inscriben las curvas de nivel con sus valores de altitud (en metros, decímetros, centímetros o milímetros en función de la decisión del usuario).

Después de precisar cuál será el tamaño del píxel, el tipo de escala y el intervalo altimétrico que se encuentra en los datos de entrada (Fig. II.49), se inicia el tratamiento y se salva el resultado.

| *                                |                                      |                            |
|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| ×                                |                                      |                            |
|                                  | TRANSE JEP BROD                      |                            |
| ×                                |                                      |                            |
| *                                |                                      |                            |
| •                                |                                      | •                          |
| *                                |                                      | *                          |
| *                                |                                      |                            |
| •                                | JF. PARROT                           |                            |
| ×                                | (September 2012                      | ) *                        |
| *                                |                                      | •                          |
| ****************                 | ******                               | *****                      |
| Name of the File F               | older located in the Directory C:\im | ages\ : chichon            |
| Name of <mark>t</mark> he .jfp F | ile (without extension .jfp) ? chich | on_extract                 |
| Name of the result               | ing 32 bits image (without extension | _c4.raw) ? chichon_extract |
| Divol ciro (docina               | 1 value is estors) 2 10              |                            |

Figura II.48. Primera fase del tratamiento.

```
Treatment
pixel size 10.000000
lines = 576 columns = 772
Input altimetric scale :
       0 ====> in meters
       1 ----> in decimeters
       2 ----> in centimeters
       3 ----> in millimeters
       0
Output altimetric scale :
       0 ----> in meters
       1 ====> in decimeters
       2 ----> in centimeters
       3 ----> in millimotors
       2
Input Scale 0 Output Scale 2 Scale coefficient = 100
After consulting the original .jfp file
Please, give the value of the altimetric interval (in meters) ? 10
The total number of contour lines is equal to 111
Saving
```

Figura II.49. Introducción de los parámetros y tratamiento

Se genera la imagen (Fig.II.50), su archivo descriptivo y una tabla de correspondencia entre los valores de tonos de gris y la altitud. En esta imagen, el tono verde que aparece en el fondo corresponde al valor -99999. La paleta de las curvas de nivel va del amarillo hasta el rojo (1200 metros).



Figura II.50. Imagen tipo \_*c4* del volcán Chichón.

## c) Brod5\_mx.exe

Como se explicó anteriormente, el módulo **Brod5\_mx.exe** (actualización más reciente) asegura la transformación de la imagen con curvas en tonos de gris en una imagen de 32 bits (cuatro octetos) con extensión *\_c4.raw* y donde, sobre un fondo neutro igual a -99999, dichas curvas tienen cada una su valor de altitud (en metros, decímetros, centímetros o milímetros, en función de los datos que se encuentran en la tabla de correspondencia tonos de gris/altitudes).

**Brod5\_mx.exe** ofrece la posibilidad de introducir otros valores de altitud en un archivo *\_c4.raw* preexistente. Esta función permite introducir puntos acotados por ejemplo o bien, si el número de curvas de nivel excede 250, definir dos paquetes (ver Fig. II.28).

Al inicio del tratamiento, se abre una ventana de diálogo (Fig. II.51) que pide el nombre de la subcarpeta ubicada en la carpeta *C:\images*, el nombre de la imagen con las curvas de nivel en tonos de gris y el nombre de la tabla de correspondencia tonos de gris/altitudes.

Después se pregunta si se necesita crear una nueva imagen de 32 bits o reutilizar una imagen con extensión *\_c4.raw* preexistente.



Figura II.51. Ventana de diálogo del programa Brod5\_mx.exe

El despliegue de los valores de las curvas de nivel en tonos de gris y altitudes sigue la introducción del nombre de la imagen con extensión *\_c4.raw*. Al final del despliegue (Fig. II.52), el programa pregunta si estos valores corresponden a la escala deseada. Si es el caso, el proceso empieza y finaliza hasta guardar el resultado, de lo contrario, el programa se detiene.

## d) Dilat\_curves.exe

En el mundo *raster*, una línea, aquí en el caso de los MDE, una curva de nivel corresponde a una serie de segmentos formados por una sucesión de píxeles. Esto significa que una línea tiene una superficie al inverso del mundo de las matemáticas donde las líneas no corresponden a una superficie. Aprovechando esta incongruencia, es posible dilatar esta superficie como si fuera cualquier otra forma. El módulo ejecutable **Dilat\_curves.exe** (Taud y Parrot, 1997) algoritmo descrito en detalle en el artículo de Taud *et al.* (1999) se basa en la dilatación isotrópica de una imagen digital (Borgefors, 1984) y el cómputo de las distancias euclidianas

|          | contour  | line  | 1.6  | a gray | tone | 68 | altitute | 128698 | ŝ. |  |  |
|----------|----------|-------|------|--------|------|----|----------|--------|----|--|--|
|          | contour  | line  | 16   | 1 gray | tone | 51 | altitude | 122688 |    |  |  |
|          | contour  | line  | i t  | 2 gray | tone | 62 | altitude | 124668 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1.6  | 3 gray | tone | 63 | altitude | 125000 |    |  |  |
|          | contour  | 11ne  | 1 6  | 4 gray | tone | 64 | altitude | 178668 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 6  | 5 gray | tone | 65 | altitude | 133698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 0  | b gray | tone | 30 | altitude | 132099 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1.6  | 7 gray | tone | 67 | altitude | 134698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 6  | B gray | tone | 68 | altitude | 136668 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 0  | 9 gray | tone | 65 | altitude | 133698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 7  | в дляу | tone | 78 | sltitude | 149699 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 7  | t gray | tone | 71 | altitude | 142688 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 17   | 2 gray | tone | 72 | altitude | 144608 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 17.  | s gray | tone | 73 | altitude | 145698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 17   | t gray | tone | 24 | sltitude | 148698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 7  | 5 gray | tone | 75 | altitude | 152698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 7  | 6 gray | tone | 76 | altitude | 152698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 17   | 7 gray | tone | 77 | altitude | 154698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 7  | 3 gray | tone | 78 | altitude | 156698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 7  | 0 gray | tone | 79 | altitude | 158698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 8  | 8 gray | tone | 38 | altitude | 103698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 8  | 1 дгву | tone | 81 | altitude | 162698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1.0  | 2 gray | tone | 82 | altitude | 164698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 8  | s gray | tone | 83 | altitude | 166608 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 8  | 4 gray | tone | 34 | altitude | 163698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 8  | S Ruah | tone | 85 | altitude | 178666 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 8  | 6 gray | tone | 86 | altitude | 172698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 8  | 7 gray | tone | 37 | altitude | 174698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 8  | s gray | tone | 38 | altitude | 175698 |    |  |  |
|          | contour  | line  | 1 0  | 9 gray | tone | 89 | altitude | 179000 |    |  |  |
| Are the  | se value | s cor | rect | 2      |      |    |          |        |    |  |  |
|          | 8>       | Yes   |      |        |      |    |          |        |    |  |  |
|          | 1>       | no    |      |        |      |    |          |        |    |  |  |
|          | 0        |       |      |        |      |    |          |        |    |  |  |
| Processi | Ing      |       |      |        |      |    |          |        |    |  |  |
| Saving   |          |       |      |        |      |    |          |        |    |  |  |

Fig. II.52. Proceso.

por medio de dos estructuras de la morfología matemática, la cruz y el cuadrado (Fig. II.53). Cuando una zona dilatada de altitud *z* encuentra otra zona de altitud *z'*, el valor de la zona de contacto es igual a (z + z') /2 (Fig. II.54). El proceso se repite hasta que todos los píxeles de la imagen tengan un valor de altitud.

Entrando en el programa (Fig. II.55), el módulo ejecutable pide el nombre de la imagen con extensión  $_{c2}$  o  $_{c4}$  (extensión que indica que números de octetos se utiliza para registrar la imagen) que proviene del uso anterior del programa **Brod5\_mx.exe**.

Después de precisar si se trata de una imagen de 2 o 4 octetos (2 o 4 bytes), es posible utilizar el mismo nombre genérico o definir otro nombre.

El tratamiento empieza cuando el usuario define el tamaño de la malla cuadrada con la cual se realiza una suavización eventualmente (Fig. II.56).

Al final del proceso de interpolación, se realiza una suavización y después se guarda el resultado (Fig. II.57).

#### e) Newmiel\_v2.exe

El módulo **Newmiel\_v2.exe** genera un MDE a partir de una imagen raster de las curvas de nivel y de la imagen creada utilizando anteriormente el módulo



Figura II.53. Elementos estructurales utilizados para dilatar las curvas y/o los puntos.



Figura II.54. Proceso de dilatación. A. Iteraciones (alternancia conexión 4 / conexión 8). B. Resultado de dos iteraciones sucesivas de dilatación (dos iteraciones sobre 3 curvas generan 6 nuevas curvas).

**Brod5\_mx.exe**. La calidad del MDE que se genera requiere de una imagen de las curvas de nivel sin ningún defecto, es decir que cada curva de nivel tiene que ser completa. Si falta un solo píxel, el resultado presentará defectos como lo ilustra la figura II.58.



Figura II.55. Inicio del programa Dilat\_curves.exe

```
Lecture

Iterative process number 1

number of modified pixels = 73857

Iterative process number 2

number of modified pixels = 111691

Iterative process number 3

number of modified pixels = 96157

Iterative process number 4

number of modified pixels = 38771

Iterative process number 5

number of modified pixels = 13586

Iterative process number 6

number of modified pixels = 5943

Iterative process number 7

number of modified pixels = 3184
```

Figura II.56. Inicio del proceso.



Figura II.57. Fin del tratamiento.



Figura II.58. Ejemplos de tratamientos ilustrando la presencia de artefactos. A. Curvas de nivel completas. B. presencia de un hiato (flecha). C. MDE sin artefacto. D. MDE con artefacto.

De hecho, como lo muestra este ejemplo que corresponde a una zona dentro de la cuarta sección del proyecto del Complejo Cultural Chapultepec, la ausencia de un solo píxel en una de las curvas de nivel genera un plano altitudinal ya que el algoritmo trabaja capa de altitud por capa de altitud (ver figura II.1) y porque las capas se definen entre una curva inferior y superior.

Cuando se inicia el programa (Fig. II.59), se requiere dar el nombre de la subcarpeta donde se encuentra el archivo que corresponde al resultado que provee el programa **Brod5\_mx.exe** archivo con extensión *\_m2.raw* o *\_m4.raw* en función del número de bytes que sirven para definir la altitud de cada píxel).

Una vez definido el nombre de la subcarpeta y el nombre del archivo \_*c4.raw*, se necesita introducir el nombre del archivo resultante (es posible tomar en cuenta el nombre genérico de entrada [opción 0] o dar un nuevo nombre [opción 1]), así como los valores de altitud mínima y máxima; también es necesario indicar el valor del intervalo altimétrico. Se debe aclarar que estos valores toman en cuenta la escala dinámica que se eligió cuando se creó la tabla de correspondencia tonos de gris vs. altitud (ver módulo ejecutable **Crear\_tabla.exe**).

```
*****
                     NEWMIEL_V2
                                         J.-F. PARROT
                                          (July 2012)
                   New version of the Newmiel program (J.-F. PARROT, July 2012
for images with contour lines of more than 30,000 pixels
using 4 byte images and creating 4 and 2 byte images
Name of the File Folder located in the Directory C:images : chapultepec
Name of the contour line image in (without extension _c4.raw) ? corte_norte
Pixel size ? 5
THE INPUT IMAGE HAS :
        230 LINES
     AND 238 COLUMNS
Resulting Image :
       0 -----> Using the generic name corte_norte ?
       1 ----> Creating a file ?
```

Figura II.59. Primer paso del programa Newmiel\_v2.exe

En el caso del ejemplo sobre la cuarta sección del Bosque de Chapultepec, estos valores son en milímetros, de tal manera que la altitud se da utilizando estas unidades; por ejemplo, el intervalo hipsométrico de las curvas de nivel es de 5 metros, es decir 5000 milímetros.

En una primera etapa, se menciona el número máximo de píxeles que constituyen la curva de nivel más larga encontrada en la imagen (Fig. II.62), y después el tratamiento se realiza capas de altitud por capas de altitud (Fig. II.63).

| Name of the resulting DEN (without extension _m2.raw o _m4.raw) ? corte_norte   | 21 |
|---|----|
| Images and descriptive files created  |    |
| <pre>nomin1 c:\images\chapultepec\corte_norte_c4.raw<br/>nomin2 c:\images\chapultepec\corte_nortel_m1.raw<br/>nomin3 c:\images\chapultepec\corte_nortel_m2.raw<br/>nomin4 c:\images\chapultepec\corte_nortel_m4.raw<br/>nomdesc1 c:\images\chapultepec\corte_nortel_m1.txt<br/>nomdesc2 c:\images\chapultepec\corte_nortel_m1.txt<br/>nomdesc2 c:\images\chapultepec\corte_nortel_m2.txt<br/>nomdesc2 c:\images\chapultepec\corte_nortel_m2.txt</pre> |    |
| Value of the lower altitude? 2255000<br>Value of the upper altitude ? 2455000<br>Altimetric interval ? 5000<br>Size of the smoothing mesh (1, 3, 5 or larger odd value) ? 7   |    |

Figura II.60. Nombre del archivo resultante y parámetros.

```
Lecture
lower altitude contour line 1 number of pixels = 0
lower altitude contour line 2 number of pixels = 0
lower altitude contour line 3 number of pixels = 0
lower altitude contour line 4 number of pixels = 0
lower altitude contour line 5 number of pixels - 0
lower altitude contour line 6 number of pixels = 0
lower altitude contour line 7 number of pixels = 0
lower altitude contour line 8 number of pixels = 74
lower altitude contour line 9 number of pixels = 262
lower altitude contour line 10 number of pixels - 481
lower altitude contour line 11 number of pixels = 583
lower altitude contour line 12 number of pixels = 723
lower altitude contour line 13 number of pixels = 678
lower altitude contour line 14 number of pixels = 665
lower altitude contour line 15 number of pixels = 643
lower altitude contour line 16 number of pixels = 468
lower altitude contour line 17 number of pixels - 207
lower altitude contour line 18 number of pixels = 161
lower altitude contour line 19 number of pixels = 120
lower altitude contour line 20 number of pixels = 97
lower altitude contour line 21 number of pixels = 59
lower altitude contour line 22 number of pixels = 0
lower altitude contour line 23 number of pixels = 0
lower altitude contour line 24 number of pixels = 0
......
...........
lower altitude contour line 39 number of pixels - 0
lower altitude contour line 40 number of pixels = 0
maximum number of pixels in a contour line = 723
```

Figura II.61. Primera lectura.

```
treatment in the area coded with the value 1
area included between contour lines 2255000 and 2260000
line 220
treatment in the area coded with the value 2
area included between contour lines 2260000 and 2265000
line 220
treatment in the area coded with the value 3
area included between contour lines 2265000 and 2270000
line 220
treatment in the area coded with the value 4
area included between contour lines 2270000 and 2275000
line 220
treatment in the area coded with the value 4
area included between contour lines 2270000 and 2275000
line 220
treatment in the area coded with the value 5
area included between contour lines 2275000 and 2280000
line 220
```

Figura II.62. Interpolación dentro de las capas sucesivas.

```
Treatment by dilation

number of interpolated points = 1

during the iteration number 1

number of interpolated points = 325

during the iteration number 2

number of interpolated points = 24

during the iteration number 3

number of interpolated points = 7

during the iteration number 4

number of interpolated points = 2

during the iteration number 5

number of interpolated points = 1

during the iteration number 6

number of interpolated points = 1

during the iteration number 7
```

Figura II.63. Tratamiento de las zonas cerradas y suavización

Si al final de este tratamiento se quedan zonas sin valores que corresponden a curvas de nivel cerradas, el proceso que se utilizó en el algoritmo **Brod5\_mx.exe** se aplica para dar un valor de altitud a todos los píxeles del MDE *raster* (Fig. II.63).

Por ende, se realiza la suavización del MDE tomando en cuenta el número de iteraciones definido por el usuario. El MDE resultante se guarda al final de la suavización (Fig. II.64).

```
Smoothing of Size 7
line 20
line 40
line 60
line 100
line 120
line 140
line 160
line 180
line 200
line 220
Saving the result
```

Figura II.64. Suavización y registro.

# Capítulo III. Generación de modelos digitales de elevación a partir de nube de puntos

## III.1. Generalidades

Las nubes de punto (datos lídar o bien datos provenientes de drones) representan otro tipo de fuente que se utiliza para generar Modelos Digitales de Elevación. Los datos lídar corresponden a un conjunto de retornos georreferenciados que se obtienen a partir de un barrido con un láser montado en una plataforma, en este caso aérea. Son datos tridimensionales de la superficie terrestre.

El primer algoritmo que desarrollé se encuentra en el módulo ejecutable **Dem\_Lidar.exe** (Parrot, 2013; actualización 2019); a partir de la nube de puntos de tipo *x,y,z*, este algoritmo genera un Modelo Digital de Superficie [MDS] que corresponde al primer retorno es decir para una posición x,y o bien una posición *i,j* (si se trata de la proyección de estos puntos en un pixel *i,j* de tamaño  $m \times m$ ) al punto de mayor altitud. También se genera, a partir de los retornos correspondientes al terreno, un Modelo Digital de Terreno [MDT] provisorio, es decir, un modelo donde aparece el terreno si no hay primeros retornos.

En el caso de la República Mexicana, el INEGI provee, solamente para algunas zonas del país, dos series de datos con formato *xyz*, la primera corresponde a una representación de la superficie terrestre sin objetos que conciernen edificios o cobertura vegetal, la segunda que comprende estos objetos. Sin entrar más en el detalle, estos datos permiten generar dos tipos de modelo digital: el Modelo de Terreno [MT] y el Modelo de Superficie [MS].

El programa **Transf\_ascii\_xyz\_dem\_lidar\_v2.exe** (Parrot, 2013a; ex programa **Dem\_Lidar\_Inegi.exe**) asegura la transformación de estos archivos en Modelos Digitales (Terreno y Superficie). En realidad, los datos del INEGI representan solamente una parte de la información que proveen las nubes de puntos. Se trata en el caso de los modelos de superficie de los primeros retornos de la nube, retornos provenientes de la cima del dosel o de los techos de los edificios. En el caso de los modelos de terreno, se trata por parte de los últimos retornos, los que alcanzan el suelo y de tratamientos anexos realizados para eliminar los elementos de la superficie que se quedan porque la densidad de la vegetación no permitió al haz penetrar más allá que un cierto nivel o porque el haz rebotó sobre los techos.

De manera general, existen filtros que definen las elevaciones mínimas y máximas para precisar la escala de altitud (Zhang *et al.*, 2003; Zhang y Whitman, 2005), pero no permiten resolver todos los casos. Siguiendo esta lógica, Parrot (2013) definió un algoritmo (**Cloud\_sorting\_xyz.exe**) más sencillo que usa directamente la nube de puntos para generar el MDT. El cálculo toma en cuenta un tamaño de píxel tal que los edificios de la zona de estudio entran en esta superficie. Posteriormente, se realizan pruebas con tamaños decrecientes de píxel, lo que implica la detección de las variaciones de altitud pasando de una escala a la siguiente. Esta es la condición *sine qua non* para asegurar que la obtención del último retorno corresponde al terreno. Finalmente, se toma en cuenta el valor de menor altitud excepto si se trata de un "*pit*". La figura III.1 muestra que este procedimiento no utiliza polígonos para definir la altitud del terreno debajo de los edificios.



Figura III.1. Modelo Digital de Superficie (sombreado) sobrepuesto en el MDT (hipsometría local mínima a máxima en color, de verde a rojo) obtenido de un archivo vectorial completo (en formato *xyz*) de la nube de puntos original en formato LAS (Cloud\_sorting\_xyz.exe, Parrot, 2013) En: Parrot y Ramírez-Núñez, 2016.

## III.2. Algoritmos

Se definen y se presentan en esta sección los diversos algoritmos y programas que se relacionan con la producción de modelos digitales de elevación a partir de los datos lídar. En algunas ocasiones, la generación de dichos modelos digitales requiere de algunos pretratamientos dentro de los cuales se debe mencionar los programas que aseguran la manipulación de los datos lídar con formatos *xyz*.

El módulo ejecutable **xyz\_stick.exe** (Parrot, 2018) permite pegar diversos archivos de tipo *xyz*. Estos archivos necesitan tener una extensión *xyz*. El pegamento así obtenido permite juntar diferentes zonas, pero a veces, la zona en estudio corresponde parcialmente al producto obtenido con el programa **xyz\_stick**. **exe** y, por esta razón, se necesita extraer con el programa **Cut\_xyz\_zone.exe** (Parrot y Ramírez-Núñez, 2018) la zona de interés.

Estos dos programas toman en cuenta nubes de punto completas o productos derivados como lo son los Modelos de Terreno y/o de Superficie.

Por otro lado, se necesita mencionar la existencia de tres módulos utilitarios que aseguran respectivamente la rotación de los datos *xyz*, la eliminación de los *pits* presentes y finalmente el crecimiento o la disminución del tamaño del píxel de manera iterativa. Esta última función se puede aplicar también a imágenes en tonos de gris.

| Iconos | Nombre                                    | Autores (Año)                           | Descripción somera  |
|--------|---|---|---|
|        | xyz_stick.exe                             | Parrot (2018)                           | Este algoritmo pega<br>diferentes archivos con<br>extensión <i>xyz</i> .                                      |
|        | Cut_xyz_zone.<br>exe                      | Parrot y<br>Ramírez Núñez<br>(2018)     | Extracción de una zona dentro<br>de un archivo <i>xyz</i> y creación<br>del archivo <i>xyz</i> de extracción. |
|        | Dem_Lidar.exe                             | Parrot (2013)                           | Generación de modelos de<br>elevación a partir de una nube<br>de puntos.                                      |
|        | Transf_ascii_<br>xyz_dem_lidar_<br>v2.exe | Parrot (2013)                           | Generación de modelos a partir<br>de los datos del INEGI con 5 m<br>de resolución.                            |
|        | Cloud_sorting_<br>xyz.exe                 | Parrot (2013;<br>actualización<br>2019) | Generación de modelos<br>y transformación del MT<br>provisorio.   |

Tabla III.1. Generación de Modelos Digitales a partir de datos lídar.

## a) xyz\_stick.exe

El programa **xyz\_stick.exe** une diferentes archivos de formato *xyz* que pueden corresponder a una nube de puntos lídar, datos provenientes del INEGI que corresponden a Modelos Digitales de Superficie o Modelos Digitales de Terreno, nube de puntos provenientes de drones, etc., es decir que este programa toma en cuenta cualquier tipo de datos *xyz*.

El tratamiento (Fig. III.2) pide en primer lugar el nombre del sub-archivo (*File Folder*) que se encuentra en el archivo (*Directory*) C:\images.

Después de indicar el número de archivos que se necesita juntar, el programa pide el nombre de cada uno de dichos archivos y también el nombre que se desea dar al archivo *xyz* resultante.

Durante el tratamiento (Fig. III.3), el programa **xyz\_stick.exe** lee cada archivo dando el número de segmentos que este archivo contiene y las coordenadas UTM que le corresponde. No importa el orden en el cual se leen los archivos porque el archivo resultante agrupa la suma de todos los segmentos *xyz*.

Las figuras III.4 y III.5 ilustran como se juntan los archivos. Se trata solamente de una ilustración porque las figuras provienen de un tratamiento que genera

Fig. III.2. Inicio del tratamiento.

```
File number 1 named c:\images\Jardin_botanico\unam-000151f.xyz
        record 5400000
layer 1
        X min - 479318.380000 X max - 479568.490000
        Y_min = 2136083.950000 Y_max = 2136334.030000
File number 2 named c:\images\Jardin_botanico\unam-000152f.xyz
        record 4200000
layer 2
        X min = 479568.380000 X max = 479818.480000
        Y_min = 2136083.930000 Y_max = 2136334.040000
File number 3 named c:\images\Jardin_botanico\unam-800168f.xyz
        record 4700000
layer 3
        X_min = 479318.370000 X_max = 479568.500000
        Y_min = 2135833.930000 Y_max = 2136084.030000
File number 4 named c:\images\Jardin_botanico\unam-800169f.xyz
        record 4500000
layer 4
        X_min = 479568.370000 X_max = 479818.490000
        Y_min = 2135833.930000 Y_max = 2136084.050000
```

Figura III.3. Información durante el tratamiento.



Figura III.4. Modelos de Superficie sombreados. Jardín botánico UNAM.



Figura III.5. Resultado de la unión de los 4 datos lídar.

los modelos digitales y de un sombreado realizado con el programa **Sombra.exe** o bien con el software **TLALOC** (Parrot, 2006).

## b) Cut\_xyz\_zone.exe

El programa **Cut\_xyz\_zone.exe** extrae zonas dentro de archivos *xyz*. Este módulo es particularmente útil cuando se necesita elegir una zona de interés después de pegar el número de documentos lídar necesarios.

Como lo muestra la figura III.6, el programa pide la ubicación y el nombre del archivo del cual se va a extraer una zona, así como el nombre que se va a atribuir al nuevo archivo.

El programa examina el archivo *xyz* de entrada e indica sus coordenadas UTM, antes de pedir las coordenadas propias de la zona a extraer.

Posteriormente, se piden las coordenadas y el tamaño de píxel deseado (Fig. III.7). Se indica cual será el tamaño (en líneas y columnas) de la futura imagen, este tamaño corresponderá a la transferencia al mundo *raster* de la zona extraída con los módulos siguientes.



Figura III.6. Inicio del programa.

```
Coordinates of the zone to be extracted :

X_min ? 479026

X_max ? 481480

Y_min ? 2146416

Y_max ? 2148320

Pixel Size (decimal value in meters) ? 5

For a pixel size of 5 meters, the resulting image

will have 380 lines and 490 columns
```

Figura III.7. Final del tratamiento.

Cuando se obtuvo el archivo resultante, el programa genera un archivo informativo (Fig. III.8) que señala los nombres de los archivos de entrada y salida, las coordenadas UTM de estos archivos, el tamaño del píxel y de la imagen.

```
CUT XYZ ZONE
File in : c:\images\Mex Lid\e14a39 b c ms.xyz
File out : c:\images\Mex Lid\chapultepec ms.xyz
Info concerning File_in named c:\images\Mex_Lid\e14a39_b_c_ms.xyz :
        Number of records : 14247910
       Coordinates :
               X min : 476506.500000
                X_max : 500158.500000
                Y_min : 2142164.500000
                Y max : 2156323.500000
                Z_min : 2208.940000
                Z_max : 2458.460000
Coordinates of the selected zone named c:\images\Mex Lid\chapultepec ms.xyz :
        X min = 479026.000000
        X max = 481480.000000
        Y_min = 2146416.000000
        Y_max = 2148320.000000
Pixel size : 5.000000
For a pixel size of 5 meters, the resulting image
will have 380 lines and 490 columns
                J.-F. Parrot and C. Ramirez-Nunez (2018)
```

Figura III.8. Archivo informativo.

Las figuras siguientes ilustran un tratamiento. Como se mencionó anteriormente, las imágenes de estas figuras provienen de un tratamiento que genera los modelos digitales y de un sombreado realizado con el programa **Sombra.exe** o bien con el software **TLALOC**.



Figura III.9. Modelo de Superficie de una parte de la Ciudad de México.



Figura III.10. Resultado de la extracción.

## c) Dem\_Lidar.exe

Este módulo ejecutable genera Modelos a partir de la nube de puntos. Toma en cuenta los primeros retornos y de esta manera genera un Modelo de Superficie. Cuando se toman en cuenta los retornos del terreno se crea parcialmente un Modelo de Terreno, sobre todo cuando en el terreno no hay árboles o edificios. El módulo siguiente trata de aportar una respuesta a este tipo de problema.

Como lo muestra la figura III.11, el programa pide el nombre de la subcarpeta ubicada en la carpeta *C:\images* y el número de archivos que se van a tomar en cuenta para hacer el tratamiento. El programa pega estos archivos independientemente del orden de entrada.

Después, se define el tamaño del píxel que tendrá el archivo resultante. El tamaño se da con valores decimales en metros.

En tercer lugar, se precisa si el tratamiento va a tomar en cuenta el primer retorno (para generar un Modelo de Superficie) o el último retorno (Modelo de Terreno aproximado).

El proceso empieza leyendo los diferentes archivos que se deben juntar; si es el caso, indica el número total de registros antes de hacer el tratamiento. Por otro lado, si existen "*pits*" en relación con el tamaño de píxel elegido y la densidad de la nube de puntos, el programa trata de eliminarlos (Fig. III.12).

Si no es posible eliminar estos defectos, el programa envía el mensaje siguiente (Fig. III.13) y el tratamiento se para.



Figura III.11. Inicio del programa.



Figura III.12. Tratamiento.

| End of initial t  | treatment   |
|---|---|
| Xn1n 479318.3886  | 900 Xmax 479818.486080 Ymin 2136883.936080 Ymax 2136334.646086  |
| Total number of   | pits (empty pixels) at the end of the first treatment - 214432  |
| Elimination of 1  | local pits  |
| Despite an atten<br>of the point clu<br>a pixel size of | mpt to eliminate the pits, the density<br>and is not enough to generate an MDE with<br>0.200800 mater |

Figura III.13. Eliminación de los "pits".

Una vez el tratamiento terminado, el programa pide el nombre del archivo de salida y el tipo de formato deseado (*raster* o *ascii*). Si se trata de un archivo *raster*, se necesita precisar el número de bytes y la unidad de la escala hipsométrica (Fig. III.14). En el caso de un archivo *ascii*, estas precisiones no se necesitan y los datos de altitud se registran en metros con un formato decimal.

Cuando el archivo de salida es de tipo *raster*, el archivo descriptivo reporta información sobre el tratamiento (Fig. III.15).

Las figuras III.16 y III.17 ilustran los resultados. En el primer caso, se obtuvo el Modelo de Superficie que muestra los niveles altos del dosel y los techos de los edificios (Fig. III.16). En principio, no debería presentar artefactos excepto si pasó una nube de pájaros cuando se tomaron los datos. Pero en el caso del modelo creado a partir de los últimos retornos de los datos lídar (Fig. III.17), se encuentra parcialmente el suelo desnudo y la creación de un verdadero Modelo de Terreno requiere tratamientos suplementarios (ver más adelante).

```
Hame of the resulting DEM (without any extension) ? jardin2_ms
Format Type :
    0 ----> sstil
    1 ---> raster
    1
type of DEM raster :
    0 ----> 16 bits
    1 ---> 12 bits
    1
output nipsometric scale:
    0 ----> decimeters
    1 ---> decimeters
    3 ----> dilimeters
    3 ----> dilimeters
    2
```

Figura III.14. Guardando el resultado.



Figura III.15. Informes relacionados con los tratamientos y resultados guardado con formato raster. A. Archivo descriptivo del Modelo de Superficie. B. Archivo descriptivo del modelo creado con el último retorno.



Figura III.16. Resultado obtenido a partir de los primeros retornos.



Figura III.17. Resultado obtenido a partir de los últimos retornos.

## d) Transf\_ascii\_xyz\_dem\_lidar\_v2.exe (ex Dem\_Lidar\_INEGI.exe)

El INEGI provee para una parte de la República Mexicana Modelos de Superficie [MS] y Modelos de Terreno [MT] obtenidos por medio de la combinación de imágenes de satélite y de sensores aerotransportados, así como modelos generados específicamente con datos de tipo lídar. Éstos últimos, fueron generados con algoritmos específicos. El tamaño del lado del píxel es de 5 metros y el promedio de la altitud en cada píxel está en centímetros. Las coordenadas UTM corresponden al centro de gravedad del píxel, pero a veces, dichas coordenadas no dependen del mismo múltiplo cuando pasamos de un mapa al vecino (escala 1:10 000 definida por INEGI).
De tal manera que no era posible juntar directamente los archivos *xyz* de diversas zonas (por ejemplo, la zona oeste y este de la cuenca de México). De un mapa al otro, los pixeles no tienen la misma referencia UTM de origen, lo que crea un desfase que no permite recuperar todos los datos.

Por esta razón, desarrollé el programa **Transf\_ascii\_xyz\_dem\_lidar\_v2.exe** (Parrot, 2013).

Como lo muestra la figura III.18, el algoritmo pide el nombre de la subcarpeta ubicada en la carpeta *C:\images* y el nombre del archivo *xyz* que contiene todos los archivos *xyz* que corresponden a la zona en estudio. Vimos anteriormente que el programa **xyz\_stick.exe** pega diferentes archivos de formato *xyz*. Es el archivo resultante que se toma en cuenta cuando se generan los modelos digitales de elevación.

Una vez introducido el nombre del Modelo Digital de Elevación resultante, se necesita definir las unidades de la escala hipsométrica. Se debe aclarar que este módulo crea solamente datos de tipo *raster* (4 enteros y extensión \_*m4.raw*), pero como se mencionó anteriormente, el minisoft **EXTRACT\_V2** permite crear, a partir de un archivo *raster*, un archivo de tipo *ascii*.

El módulo lee los datos y calcula las coordenadas de la zona, así como la dinámica hipsométrica. Después de definir el tamaño del píxel, el programa pide si el archivo cubre o no toda la zona en estudio. De hecho, a veces, como lo muestra



Figura III.18. Inicio del algoritmo Transf\_ascii\_xyz\_dem\_lidar\_v2

Figura III.19. Procesamiento.

el primer ejemplo de tratamiento, no todas las subzonas tienen valores. En este caso, se juntaron solamente 3 subzonas para crear con el módulo **xyz\_stick.exe** un archivo llamado *barranco1\_mt.xyz*.

Por razones didácticas y para recordar al usuario cual es la estructura de los datos lídar proveniente del INEGI (escala 1: 10 000), la figura III.20 muestra cómo se relacionan las subzonas.

Las claves de los datos lídar siguen la nomenclatura que se utiliza para definir los mapas topográficos a escala 1:50 000 del INEGI, pero cada mapa 1:50 000 se divide en 6 zonas, 3 en la mitad norte numerada **a**, **b** y **c**, y 3 en la parte sur: **d**, **e** y **f**. A su turno, cada una de las zonas se dividen en cuatro como lo muestra el dibujo de la figura III.20.

El archivo *barranco1\_mt.xyz* anteriormente mencionado se creó juntando las subzonas e14a39a2, e14a39a4 y e14a39b3, es decir que el cuadrante noreste no tiene información.



Figura III.20. Zonas y subzonas de los datos lídar.

Para evitar crear subzonas con el valor 0, lo que genera un resultado poco realista, es posible atribuir a las zonas sin valor (en este caso, la subzona e14a39b1, un valor de altitud *Zmin* que puede corresponder al mínimo de la dinámica hipsométrica que aparece cuando se desarrolla el programa. En este caso se necesita precisar el valor de altitud, respondiendo a la pregunta: *"Altitude decimal value in meters attributed to the neutral background?"*.

La figura III.21 muestra cómo se presenta el resultado.

El segundo ejemplo toma en cuenta la unión de las 4 subzonas siguientes: e14a39a2, e14a39a4, e14a39b1 y e14a39b3. El archivo correspondiente se llama *barranco2\_mt.xyz*.

Cuando el usuario especifica que el archivo cubre toda la zona (Fig. III.22), el programa no pide ningún valor de altitud para el fondo neutro.



Figura III.21. Modelo sombreado.



Figura III.22. Proceso cuando el archivo xyz cubre toda la zona en estudio.

En realidad, se necesita aclarar que generalmente existe un sesgo en relación con la proyección cartográfica de los datos y este fenómeno crea en el borde de los cuadros zonas triangulares sin valor de altitud. En este caso, se necesita o bien, eliminar dichas zonas cortando el MDE o bien, decir que el archivo *xyz* no cubre totalmente la zona en estudio dejando al usuario definir el valor que el quiere atribuir a estas zonas, o bien usar el programa **elim\_pit.exe** para definir el valor de altitud que se consigue atribuir a estas zonas.

De hecho, es importante definir una metodología clara para evitar la creación de datos que contengan valores que no sean compatibles con la representación de la superficie terrestre.

La figura III.23 muestra el resultado obtenido a partir de una representación completa de la zona en estudio.

#### e) Cloud\_sorting\_xyz.exe

En su primera versión (**Dem\_Lidar.exe**), este módulo ejecutable representaba el algoritmo general para generar un Modelo Digital de Elevación a partir de los datos *xyz*. Este programa toma en cuenta los primeros retornos de la nube de puntos o los últimos retornos. En el primer caso se obtiene un Modelo de Superficie, es decir un modelo donde se encuentran todos los objetos que se presentan en la superficie terrestre (edificios y vegetación). En el segundo caso, se obtiene un Modelo de Terreno, pero únicamente cuando el haz láser pulsado alcanza el suelo.



Figura III.23. MDE sombreado de las 4 subzonas del archivo barranco2\_mt.xyz

Si en el primer caso, no se necesita más que registrar los puntos más altos que se encuentran sobre la superficie de un píxel, en el segundo, se requiere definir un tamaño de píxel que permite encontrar un valor de altitud que corresponde efectivamente al suelo. La primera versión proponía generar el modelo de elevación en función del tamaño de píxel definido por el usuario; este tamaño dependía de una estimación: por ejemplo, si la anchura máxima de un edificio era de 25 metros, un tamaño de 26 metros para la arista del píxel permitía esperar alcanzar el suelo para todas las posiciones de la ventana móvil dentro de la cual se buscaba esta posibilidad. Ulteriormente, el módulo **DEM\_resamp.exe** (ver más adelante) aseguraba la transformación de la superficie horizontal, de tal manera que los dos modelos (Superficie y Terreno) tengan el mismo tamaño. En realidad, este procesamiento daba un resultado aproximativo, ya que el tamaño grande utilizado para buscar la respuesta del suelo desnudo creaba una fuerte suavización que eliminaba los detalles.

En su versión actualizada, el módulo **Cloud\_sorting\_xyz.exe** crea en primer lugar, dos modelos de elevación: el primero corresponde al Modelo de Superficie y el segundo al Modelo de las últimas respuestas de la nube de punto sobre la superficie del píxel (ver la figura III.16).

Es posible estimar que cuando existe un objeto sobre el terreno (por ejemplo, un edificio), los retornos encuentran el techo de la estructura que se consideran como primeros o últimos retornos. Es decir, que el valor más alto del edificio será comparable en los dos casos. Pueden existir algunas diferencias generadas por la rugosidad de la superficie, pero deben entrar en un rango *HIS* más o menos estrecho. Se define este rango respondiendo a la pregunta "¿*Hypsometric interval of sensibility*?". Así, se puede generar una máscara *M* cuando la diferencia de altura entre el valor del *MS* y del *MT* en un punto es menor o igual a este rango.  $M_{(i,j)}$ será igual a 1 si *abs*[*MS*<sub>(i,j)</sub>- *MT*<sub>(i,j)</sub>] ≤*HIS*.

La figura III.24 ilustra el tratamiento.

El tratamiento tiene diversas etapas que se explican a continuación. El problema consiste en definir con precisión el valor de *HIS*. Este valor depende del tamaño del píxel definido, de la densidad de la nube de puntos y del tipo de estructura urbana. Por ejemplo, en la zona de los rascacielos del centro de la Ciudad de México; entre otros, en el caso de la Torre Latinoamérica, la altura del edificio es de 134 metros sobre el nivel de la calle, pero incluyendo el pararrayos de 54 metros, el edificio alcanza 181.33 metros. Esto significa que la diferencia entre el valor que provee el primero retorno y el valor proveniente del último retorno es por lo menos de 54 metros.



Figura III.24. Generación de la máscara. A. MS; B. MT; C. Máscara.

Durante el proceso, el programa propone al usuario modificar el valor de *HIS* en función de la observación de la imagen de la máscara (ver más adelante).

Una vez obtenida la máscara que es, para cada edificio, la superficie del terreno sobre la cual está construido, el proceso consiste en buscar alrededor de esta superficie el valor más pequeño que debe corresponder a la altitud del terreno. Después de calcular este valor, se atribuye a la superficie de base del edificio este valor de base.

Las figuras siguientes ilustran el proceso. En primer lugar, cuando se inicia el programa aparece sobre la pantalla las preguntas que corresponden a la primera etapa del tratamiento (Fig. III.25).

Una vez definido el nombre de la subcarpeta (*File Folder*) que se encuentra en la carpeta (*Directory*) C:\*images*, el programa pide el número de archivos (*Files*) que se van a tratar. El algoritmo asegura la unión si se presentan diferentes archivos. El orden de entrada no importa.

Durante una primera lectura, el programa busca el número total de registros de la suma de todos los archivos (si existe más de uno) y después crea, durante una segunda lectura, los archivos *raster* que utiliza el programa (MS y MT provisorio).

Como en el caso del módulo ejecutable **Dem\_Lidar.exe** (Fig. II.12; Fig: II.13), el algoritmo hace el conteo de los pixeles que no tienen valor de altitud para tratar de eliminar los "*pits*". Si el tamaño del píxel y la densidad de puntos en la nube no es suficiente, el módulo señala que existen demasiado "*pits*" para seguir trabajando (Fig. III.27), y se detiene.

Si no hay "*pits*" o es posible eliminar los "*pits*", el programa pide el valor de *HIS* (*Hypsometric interval of sensibility*) para iniciar el tratamiento. De acuerdo con el valor del intervalo *HIS*, el algoritmo crea una máscara y, en este punto (Fig. III.28), pide si el usuario desea realizar el tratamiento sin checar la imagen *bitmap* de la

| -  |  |              |
|--|--|--------------|
|  |  |              |
| *  | CLOUD SORTING  |              |
| •  |  | ×            |
| *  |  |              |
|  |  |              |
|  |  |              |
|  | First version : Dem lidar Unam   |              |
| *  | 3F. PARROT (March 2013)  |              |
| *  |  |              |
| *  | New Version : September 2019)  |              |
| *  |  |              |
|  |  |              |
| Name of the Fil  | le Folder located in the Directory c:\lmag   | pes\ : jardi |
| Number of files  | s to stick ? 1   |              |
| Name of the fil  | le number 1 (without extension .xy2) 7 una   | in-000151f   |
| decimal pixel o  | nutnut size (decimal value in maters) 2 0.   | 5            |
|  | terfare same fractions taxing at more shirt at   |              |
| First Lecture  |  |              |
| First Lecture<br>File 1 Name : c   | ::\leages\jardln\unae-000151f.xyz  |              |
| First Lecture<br>File 1 Name : c<br>register 540000  | t:\leages\jardin\unes-000151f.vyz<br>90  |              |
| First Lecture<br>File 1 Name : c<br>register 540000<br>Creating the ra                                       | t:\lmages\jardin\unam-000151€.syz<br>00<br>sster image   |              |
| First Lecture<br>File 1 Name : c<br>register 540000<br>Creating the ra<br>File 1 Name : c                    | ::\lmages\jardin\unam-000151f.syz<br>00<br>sster image<br>:\lmages\jardin\unam-000151f.syz       |              |
| First Lecture<br>File 1 Name : c<br>register 540000<br>Creating the ra<br>File 1 Name : c<br>register 540000 | ::\lmages\jardin\unam-000151f.wyz<br>00<br>ester image<br>:\lmages\jardin\unam-000151f.wyz<br>N0 |              |

Figura III.25. Inicio del programa Cloud\_sorting\_xyz.exe



Figura III.26. Lectura y creación de la máscara.



Figura III.27. Eliminación de los "pits".



Figura III.28. Proceso y final del tratamiento

máscara, o bien si estima necesario ver esta imagen antes de seguir el tratamiento. En caso de hacer un control, se requiere dar un nombre para caracterizar la máscara. Una vez definido el nombre de la máscara, aparece una nueva pregunta para: a) seguir el tratamiento tomando en cuenta la máscara; b) cambiar el valor de *HIS*. En este último caso, el programa pide el nuevo valor que el usuario desea dar al parámetro de sensibilidad *HIS*; se crea una nueva máscara y aparecen de nuevo las preguntas anteriores.

A partir de este momento, el proceso empieza. Se calcula el número de formas generadas por el tratamiento y para cada una, se busca el valor mínimo de altitud alrededor de la forma con el fin de atribuir este valor a la forma (Fig. III.28).

Una vez realizada esta transformación, se guarda el resultado de los dos modelos de elevación (MS y MT recalculado) utilizando el formato *ascii* o el formato *raster*. En este segundo caso, se necesita dar información complementaria (tipo de *raster* y unidad de la escala altimétrica).

También, si se guardan los modelos digitales de terreno con un formato *raster*, existe la posibilidad de reportar en los archivos descriptivos, el número de píxeles de cada forma (Fig. III.29).

Los archivos resultantes tienen las extensiones siguientes: <u>\_lidar\_ms\_m4.raw</u> con un archivo descriptivo <u>\_lidar\_ms\_m4.txt</u>, <u>\_lidar\_mt\_m4.raw</u> y archivo des-

Figura III.29.

criptivo \_*lidar\_mt\_m4.txt* si se tratan de archivos raster con un formato "integer 4"; si el formato elegido es de tipo 16 bits (integer 2), la extensión será *\_m2*. En los archivos descriptivos, se menciona el número de líneas y columnas, el número de bytes, el mínimo y el máximo de la escala hipsométrica y el tamaño del píxel. También se indica el valor de los parámetros utilizados (Fig. III.30).

En el ejemplo reportado en la figura III.31, se muestra cómo se modifica el Modelo de Terreno provisorio.



Figura III.30. Ejemplo de archivo descriptivo.



Figura III.31. Modelos de Terreno. A. last returns; B. Modelo recalculado.

La eliminación completa de rasgos que corresponden a edificios o bien a algunas estructuras verticales depende del tamaño del píxel elegido para realizar el tratamiento, del valor de *HIS* y también de la densidad de puntos en la nube lídar.

# III.3. Módulos utilitarios

Como se mencionó anteriormente, se desarrollaron, en relación con los tratamientos que generan MDE utilizando datos vectoriales o datos *xyz*, varios módulos utilitarios (Tabla III.2).

## a) Elim\_pit.exe

De vez en cuando, los MDE presentan valores que corresponden a la ausencia de información y se traducen en el archivo por valores dispersos que corresponden a valores neutros; en general, se trata de valores negativos, pero también pueden presentar el valor cero.

Una vez definido el nombre de la subcarpeta (*File Folder*) que se encuentra en la carpeta (*Directory*) C:\*images*, el programa pide el nombre del Modelo Digital que se necesita arreglar (Fig. III.32).

Los tres primeros módulos permiten corregir diferentes tipos de artefactos, ya sea la presencia de hoyos, la definición de un valor piso o la búsqueda de un valor específico.

Los tres siguientes se refieren a manipulaciones de MDE (rotación y cambio de tamaño).

El programa pide el tipo de formato que caracteriza el archivo de entrada: *ascii* o *raster*. Si se trata de un archivo *raster*, también se necesita precisar el número de *bits* (16 o 32) y el rango de la escala hipsométrica.

| Iconos   | Nombre                          | Autor (Año)                            | Descripción somera  |
|----------|---------------------------------|--|---|
| *        | Elim_pit.exe                    | Parrot (2018)                          | Este algoritmo elimina en<br>el MDE valores considerados<br>como " <i>pits</i> ". |
| <b>1</b> | Search_Val.exe                  | Parrot (2019)                          | Búsqueda de los <i>pits</i> y<br>creación de un <i>bitmap</i> .                   |
| <b>~</b> | Basic_Level_<br>Calculation.exe | Parrot (2019)                          | Este programa reemplaza<br>los valores nulos por el valor<br>mínimo del MDE.      |
|          | Rotation_xyz.<br>exe            | Parrot (2018)                          | Rotación horaria y<br>antihoraria de los valores <i>xyz</i> .                     |
|          | Rotation_dem.<br>exe            | Parrot (2018)                          | Rotación horaria y<br>antihoraria de un MDE                                       |
|          | Dem_resamp.exe                  | Parrot (2003)<br>Actualización<br>2020 | Remuestreo de un Modelo<br>Digital de Elevación                                   |

Tabla III.2. Módulos utilitarios.

Figura III.32. Inicio del tratamiento.

Después de leer el archivo, el módulo indica el número de líneas y columnas del archivo de entrada (Fig. III.33).

También se señala el valor mínimo y el valor máximo de la dinámica altitudinal y se pregunta si el usuario considera el valor mínimo como un *pit*. Si es el caso, se requiere decir cuáles son las condiciones del arreglo: a) se considera el valor cero y valores negativos como un *pit*; b) solamente los valores negativos corresponden a un *pit*; c) se define el valor del *pit*.

Una vez terminado el tratamiento, se necesita salvar el resultado. La extensión del archivo de salida será función de la elección de formato: *\_elpit\_m2.raw*, *\_elpit\_m4.raw*, *\_elpit\_asc*.

```
THE DEM HAS :
       501 LINES
 AND 501 COLUMNS
Treatment
Altitude value of the original DEM :
            Min - 0.000000 Max. - 2336.000000
 number of pixels with min value = 103
 Do you consider that negative values or values
 equal to 0 correspond to a pit ?
            0 ====> yes
            1 ----> no
            0
Conditions of pit elimination :
            0 ----> considering that values <- 0 are pits
1 ----> considering that only negative values are pits
2 ----> defining a specific value for the pit
 Digital Elevation Model repaired
 Name of the output Digital Elevation Model [DEM] :
 0 -----> Use of the generic name unam-169_lidar ?
1 ----> Creation of a new File ?
 8
 Format Type :
0 ====> ascii
1 ====> raster
            1
 type of DEM raster :
0 ----> 16 bits
1 ----> 32 bits
Modified dynamic scale :
Min. = 2313.050000
Max. = 2336.000000
Dynamic hypsometric scale out :
            θ ====> in meters
1 ====> in decimeters
2 ====> in centimeters
            3 ----> in millimeters
```

Figura III.33. Proceso.

Si visualmente, no se registra ninguna diferencia entre las imágenes de las figuras III.34A y III.34B, en realidad la ausencia de *pits* en la segunda imagen representa un aporte importante para todos los tratamientos ulteriores: búsqueda de rasgos específicos, cálculos estadísticos, etc.

Una imagen de detalle (Fig. III.35) ilustra el resultado.

La búsqueda de la ubicación de los valores transformados se realiza con el programa utilitario **Search\_Val.exe** que se describe someramente en el apartado siguiente.

# b) Search\_val.exe

Este módulo abre el MDE, define a partir de los valores del archivo, el mínimo y máximo de la dinámica (Fig. III.36), y busca todos los píxeles que tienen el valor mínimo si se considera que se trata de *pits* (Fig. III.37). Este tratamiento permite definir la ubicación de los píxeles con el valor mínimo.

# c) Basic\_Level\_Calculation.exe

De hecho, sobre todo, cuando el número de píxeles con un valor negativo o igual a cero es importante, esto significa que este fenómeno proviene de una ausencia de información (lo que pasa frecuentemente cuando no se define correctamente el plan de vuelo del dron encargado de registrar diversos tipos de datos, lo que ilustra la figura III.38) o bien de espacios laterales que corresponden a zonas no



Figura III.34A. Presencia de 103 pits. 34B. MDE sin pits.



Figura III.35. Visualización de los píxeles transformados por el programa. A. Ausencia de pits. B. Posición de algunos pits.

| •   |                        |
|---|------------------------|
| <ul> <li>SEARCH WHILE</li> </ul>  |                        |
| *   |                        |
|   |                        |
| *   |                        |
|   |                        |
| * 3F. P4R80T  |                        |
| * (October 2019)  |                        |
| Content representation of the content of the con |                        |
|   |                        |
| This program researches a value in a Digital Elevation H  | odel                   |
| Name of the File Folder located in the Directory C:lmage  | s 7 a_jardin           |
| Name of Digital Elevation Model (DEM) (without any exten  | sion) ? utam-169_lidar |
| Format Type :<br>0 ====> ascli<br>1 ====> raster<br>1   |                        |
| type of GEN naster :<br>0 ====> 16 bits<br>1 ====> 32 bits<br>1   |                        |
| Hypsometric dynamic scale:<br>Min = 0<br>Max = 233600   |                        |
| Arm these values<br>0 ===> 1x meters<br>1 ===> 1x delimiters<br>2 ===> 1x delimiters<br>3 ===> 1x delimiters  |                        |

Figura III.36. Abertura del programa



Figura III.37. Búsqueda de pits



Figura III.38. Ejemplo de la presencia de hiatos en los datos provenientes de un dron (región de Tepoztlán). A. Modelo sombreado. B. Píxeles sin valor (en negro).

cubiertas por los datos *xyz* en razón de una ligera rotación debida a la proyección (ver figura III.39).

Como el módulo anterior, el programa **Basic\_Level\_Calculation.exe** busca el valor cero en el MDE, pero lo remplaza por el valor mínimo del modelo digital que no tiene el valor cero. Es un proceso simple, útil para realizar tratamientos estructurales o estadísticos.

#### d) Rotation\_xyz.exe

Existen software que realizan sus tratamientos en una sola dirección. Por ejemplo, el nuevo software CRSP-3 D de la FHWA (Federal Highway Administration, Wash-



Figura III.39. Modelo de Superficie (datos del INEGI). A. Modelo sombreado. B. Zona sin valor (en rojo) proveniente de la proyección de los datos *xyz*.

ington) que ofrece una solución eficaz para estudiar los movimientos durante un proceso de remoción en masa y evaluar los peligros.

Por esta razón, en el cuadro de una investigación realizada en colaboración, desarrollé diversos programas, entre otros, un algoritmo que asegura la rotación de un archivo *xyz* para obtener un documento que corresponde a las exigencias de la herramienta mencionada arriba.

Este módulo ejecutable se llama **Rotation\_xyz.exe**. También se desarrolló un módulo similar que asegura directamente la rotación de los Modelos Digitales de Elevación; este módulo se presentará en el apartado siguiente.

Cuando se abre el programa (Fig. III.40), se necesita en primer lugar, indicar donde se encuentra el archivo de entrada. Después, se pide el nombre que el usuario desea dar al archivo de salida y se requiere decir si el punto de referencia ubicado en el centro de la imagen se calcula directamente a partir de los datos *xyz* de entrada o si el usuario quiere definir las coordenadas del punto de rotación.

Una vez introducido o calculadas las coordenadas del punto de rotación, se introduce el valor del ángulo de rotación (Fig. III.41). Como lo precisa el programa, un valor positivo crea un movimiento antihorario y un valor negativo una rotación horaria.

El proceso empieza después y se genera el archivo xyz resultante.

Las imágenes reportadas en la figura III.42 provienen de la transformación de los datos *xyz* en un Modelo Digital de Elevación que se generaron únicamente para visualizar el resultado.



Figura III.40. Inicio del programa Rotation\_xyz.exe



Figura III.41. Valor del ángulo elegido.



Figura III.42. Ejemplo de tratamiento aplicado a datos provenientes de un dron. A. Rotación de 2° en el sentido horario. B. Modelo de Superficie original. C. Rotación de 2° en el sentido antihorario.

### e) Rotation\_DEM.exe

También es posible realizar una rotación directamente a partir de un MDE, pero como se va a mostrar el resultado presenta artefactos que no se pueden reducir fácilmente.

La figura III.43 ilustra las primeras etapas del tratamiento que, de forma indistinta, toma en cuenta archivos *raster* y archivos *ascii* en la entrada y en la salida.

Una vez definido el nombre del archivo de salida, se requiere indicar (Fig. III.44) la posición del centro de rotación (centro del archivo o indicación del usuario) y el valor del ángulo de rotación, así como su sentido (horario o antihorario).

Con la ayuda de las figuras siguientes, se puede explicar cuáles son los artefactos que genera el tratamiento y cómo es posible eliminarlos.

La figura III.45 muestra el resultado de una rotación antihoraria, pero una visión detallada (Fig. III.46A) muestra que este resultado presenta dos tipos de artefactos: formación de *pits* en el MDE y creación de zonas triangulares con el valor cero.

Como lo vimos anteriormente, existe la posibilidad de eliminar en primer lugar los *pits* (programa **Elim\_pit.exe**) y por otra parte, de dar a las zonas triangu-



Figura III.43. Inicio del módulo ejecutable Rotation\_Dem.exe

Figura III.44. Punto de referencia y ángulo de rotación.



Figura III.45. Rotación de un MDE en la región de Cerro Prieto. A. MDE sombreado en posición original. B. Sombreado de la rotación (10° en el sentido antihorario).



Figura III.46. A. Detalle que concierne a los artefactos (en rojo): 1. Zona triangular; 2. Puntos aislados. B. Resultado corregido.

lares un valor que corresponde al valor mínimo del MDE (programa **Basic\_Level** \_**Calculation.exe**).

Se introdujeron estos acercamientos en la versión actual del programa de rotación, pero todavía el resultado presenta ligeros defectos (Fig. III.46B) que en realidad no se generan cuando la rotación se basa sobre los valores *xyz*.

## f) DEM\_Resamp.exe

Como se mencionó arriba, a veces se requiere cambiar la escala del Modelo Digital de Elevación; esta transformación se realiza a partir de una función spline. El programa **DEM\_Resamp.exe** toma en cuenta MDE de tipo *raster* o de tipo *ascii*.

La figura III.47 corresponde a las preguntas que aparecen al inicio del tratamiento: nombre, ubicación y tipo del MDE; cuando el MDE es de tipo *raster*, se necesita precisar si se trata de un archivo de 2 o 4 bytes (octetos) e indicar el valor del tamaño del lado del píxel. Si el modelo es de tipo *ascii*, no se necesita dar esta información.

Como lo muestra la figura siguiente (Fig. III.48), el programa abre y lee el archivo. Si el archivo es *raster*, aparece el valor mínimo y el valor máximo de la dinámica y se necesita precisar cuál es la unidad usada en la escala dinámica (metros, decímetros, centímetros o milímetros).

```
DEM RESAMPLING

J.-F. PARROT

(june 2003)

Actualization 2020

Name of the File Folder located in the Directory c:\images\ : Quiche

Name of DEM File (without any extension) ? dem_xecotz

Format Type :

0 ====> ascii

1 ====> raster

1

type of DEM raster :

0 ====> 16 bits

1 ====> 32 bits

1

Pixel Size (in meters) ? 30
```

Figura III.47. Inicio del tratamiento.

```
Hypsometric dynamic scale:
         Min = 109999
Max = 330000
Are these values
         0 ====> in meters
         1 ====> in decimeters
2 ====> in centimeters
3 ====> in millimeters
THE ORIGINAL DEM HAS :
              538 LINES
         AND 1321 COLUMNS
0 -----> Use of the generic name dem_xecotz ?
1 ----> Creation of a new File ?
1
Name of the DEM out (without any extension) ? dem_xecotz
Format Type :
          0 ====> ascii
         1 ====> raster
type of DEM raster :
         0 ====> 16 bits
1 ====> 32 bits
Parameters :
         pixel size in ? 30
pixel size out ? 20
```

Figura III.48. Continuación del programa.

En el caso de un archivo ascii, en su encabezado se encuentra el número de columnas y líneas, las coordenadas UTM y el tamaño del píxel; por otro lado, los valores de altitud se registran con un valor decimal en metros.

El programa lee el archivo del MDE y precisa el valor de su tamaño (en líneas y columnas), antes de pedir el nombre del archivo de salida que va a tener una de las extensiones siguientes: *\_resamp\_m2.raw*, *\_resamp\_m4.raw* o bien *\_resamp.asc* en relación con la elección del usuario.

Se introducen los valores del tamaño del píxel de entrada y de salida; después el proceso se realiza y el módulo salva el resultado (Fig. III.49).

| resulting ratio = 1.500000                                    |
|---|
| The resulting image will have :<br>807 lines and 1981 columns |
| Enlargement   |
| Treatment   |
| line 800  |

Figura III.49. Tratamiento.

En el ejemplo de la figura III.50, se aplicó un aumento lineal de 1.5 al MDE de una región del departamento de Quiché, Guatemala; el número de líneas pasa así de 538 a 807 y el número de columnas de 1321 a 1981.5, es decir, que el aumento en superficie es igual a 2.25, es decir 1.52.



Figura III.50. Ejemplo de tratamiento. A. MDE original (538 líneas, 1321 columnas); B. MDE redimensionado (807 líneas, 1981 columnas).

# Capítulo IV. Cálculo de parametros a partir de la superficie de los modelos digitales de elevación

#### IV.1. Introducción

Dentro de la serie de módulos ejecutables mencionados en el curso del capítulo III del libro, capítulo que concierne las variables y parámetros que se obtienen a partir de la superficie de los MDE, algunos corresponden a productos específicos, otros a módulos utilitarios, y otros más a módulos de tratamiento de imágenes.

Estos módulos ejecutables se presentan en tres subcapítulos: el primero concierne a la superficie de los MDE y diferentes modos de cálculo, el segundo trata de los volúmenes y finalmente, el último agrupa diversas herramientas.

#### **IV.2.** Superficie terrestre

La noción de superficie y volumen representa un punto esencial de los tratamientos que se realizan a partir de la superficie del MDE.

En el libro se mencionaron diversos módulos. El módulo ejecutable **Surface2.exe** y su nueva versión permiten definir el valor de la superficie a partir de un nuevo acercamiento que toma en cuenta los datos *raster* y llega a una perfecta precisión.

El valor exacto de la superficie de una forma en el espacio bidimensional se calcula a partir de coordenadas rectangulares utilizando la siguiente fórmula:

Area= 
$$\frac{(\sum X_1 Y_2 \dots + X_n Y_1) - (\sum Y_1 X_2 \dots + Y_n X_1)}{2}$$

donde *X* y *Y* son las coordenadas UTM y *n* el número de vértices. El valor resultante se expresa en m<sup>2</sup>.

El mismo cálculo se puede aplicar a una imagen *raster* donde las coordenadas de los vértices se definen con los valores *i*,*j* (*i* para las líneas y *j* para las columnas).

En este caso, se multiplica el resultado obtenido por el valor de la superficie  $S_{pix}$  del píxel.

Como se explicó en detalle en el libro, este cálculo, así como en el caso de la fórmula de Pratt (1978) o la fórmula de Parrot (2007) necesitan, en primer lugar, diferenciar los píxeles que pertenecen al perímetro y los que corresponden a pixeles de superficie.

Tres módulos ejecutables entran en esta sección (Tabla IV.1): el programa **Surface2.exe** genera imágenes de la superficie tridimensional, el programa **Surf\_2D\_3D\_jfp.exe** calcula la relación entre le superficie bidimensional de una forma y su superficie tridimensional y el programa **Log\_Slope.exe** que se utiliza en zonas con pendientes débiles.

#### a) Surface2.exe

El programa toma en cuenta el MDE en formato *raw* (tipo  $_m2$  o  $_m4$ ) o en formato *ascii*. Estos archivos suelen presentarse en una subcarpeta (*File Folder*) donde se encuentran los documentos de entrada y de salida.

Como lo muestra la figura IV.1, el programa pide la ubicación y el nombre del MDE, así como su tipo.

Después de introducir el tamaño del píxel, se necesita definir en función de las indicaciones sobre la dinámica del MDE, cuál es la unidad que caracteriza esta escala (metros, decímetros, centímetros o milímetros). Cuando se abre el documento en formato ascii, no se necesita introducir estos datos.

El programa pide posteriormente el nombre del archivo de salida (Fig. IV.1) y el rango de la ventana móvil que se va a utilizar para el cálculo del segundo tratamiento.

| Iconos | Nombre                 | Autor (Año)                         | Descripción somera  |
|--------|------------------------|-------------------------------------|---|
| ~      | Surface2.exe           | Parrot (2018)                       | Este algoritmo elimina en<br>el MDE valores considerados<br>como " <i>pits</i> ". |
| 20 30  | Surf_2D_3D_<br>jfp.exe | Parrot (2019)                       | Búsqueda de los <i>pits</i> y<br>creación de un <i>bitmap</i> .                   |
|        | Log_Slope.exe          | Parrot (2012)<br>actualización 2020 | Pendiente logarítmica.<br>Estudio de zonas con<br>pendientes débiles.             |

Tabla IV.1. Cálculo de las superficies.

| ****************  | ***************************************   |                           |
|---|---|---------------------------|
| •   |   |                           |
| *   | SURFACE2  |                           |
| *   |   |                           |
| •   |   |                           |
| *   |   |                           |
| *   |   |                           |
| •   | JF. PARROT  |                           |
| •   | (January 2003)  |                           |
| *   |   |                           |
| *   | Actualization September 15, 2019  |                           |
| •   |   |                           |
| ••••••  | ***************************************   | *****                     |
| The update concerns<br>an image of the thre<br>type MDE with intege | the creation of two additional images<br>e-dimensional surface per pixel and a<br>r values to realize a 30 vision of th | :<br>document<br>e result |
| Name of the File Fol  | der located in the Directory C:images   | ? barranco                |
| Name of Digital Elev  | ation Model [DEH] (without any extens   | ion) ? mt                 |
| Format Type :   |   |                           |
| 0> asci   | i   |                           |
| 1> Past   | er  |                           |
| 1   |   |                           |
| type of DEH master :  |   |                           |
| 8> 16 b   | dts   |                           |
| 1> 32 b   | its   |                           |
| 1   |   |                           |
| Pixel Size (in meter  | s) ? 5  |                           |
| Hypsometric dynamic   | scale:  |                           |
| Min - 0   |   |                           |
|   |   |                           |

Figura IV.1. Abertura del programa.



Figura IV.2. Continuación del programa.

El proceso comienza cuando se acepta el valor del tamaño de la ventana móvil en función del tamaño de la superficie correspondiente (en km<sup>2</sup> y hectáreas), si no pide de nuevo el rango deseado.

El programa calcula en primer lugar, la dinámica altimétrica del MDE y estos valores se reportan en la pantalla. El valor mínimo permite identificar si existen o no artefactos en el modelo digital. Por ejemplo, en el caso del MDE estudiado que corresponde a una zona cuya altitud está comprendida entre 2385 y 3862 m, es evidente que el valor 0 es un artefacto. A veces, el mínimo puede ser un valor negativo, valor que, excepto en el caso de la Laguna Salada (Baja California) (superficie por debajo del nivel del mar), traduce la presencia de un artefacto en el MDE.

Si existe un "*pit*", el programa hace la corrección, indica los nuevos valores de altitud, calcula la superficie tridimensional de cada píxel, da indicaciones sobre los valores resultantes y propone modificar eventualmente la relación máximo/ mínimo si el usuario desea enfatizar o no los valores más bajos (Fig. IV.3).

Tomando en cuenta esta información, el programa recalcula la dinámica y propone salvar el resultado con o sin normalización. Después sigue calculando la superficie tridimensional dentro de la ventana móvil definida anteriormente.

El cálculo de la superficie tridimensional de un Modelo Digital de Elevación (Parrot, 2007) obedece a las reglas siguientes: cada píxel se divide en ocho triángulos rectángulos que convergen en el centro del píxel; la figura IV.4 ilustra el arreglo. Usando el valor de altitud del píxel estudiado y los valores de elevación de los cuatro vecinos diagonales se calcula el valor de la diferencia; luego, esta diferencia se divide entre 2 y se reporta el resultado sobre las esquinas A1, A3, A5 y A7 en relación con la posición de los píxeles vecinos; el valor del centro de cada lado (A2, A4, A6 y A8) se calcula de la misma manera tomando en cuenta los vecinos cardinales.

A partir de esta división se mide la longitud de los lados *base* y *bside* de cada triángulo. Estas medidas son respectivamente iguales a:  $bside = \sqrt{hps^2 + A^2}$  y *base* =  $\sqrt{hd^2 + A^2}$ , donde *hps* corresponde a la mitad del valor del lado del píxel, *hd* = *hps* ×  $\sqrt{2}$  y *A* es el valor de altitud de los puntos *A1*, *A2*, *A3*, ... *A8*.

Por otra parte, los valores *a1, a2, a3, ... a8* corresponden a la diferencia entre los valores de los puntos A entre los cuales se encuentran; estos valores permiten calcular la longitud\_del tercer lado *aside* del triángulo rectángulo, aplicando la ecuación *aside*= $\sqrt{hps^2 + a^2}$ .

En esta etapa y tomando en cuenta los resultados anteriores, con la fórmula de Herón se calcula la superficie *S* de cada triángulo:

```
Digital Elevation Hodel repaired
Recalculated altimetric scale :
Min. = 2385.716000 Mox. = 3862.750000
line 1899
The calculated pixel surfaces are comprised hatween :

Min. = 25.090000 Max. = 212,439256

Difference = 187,439256

Batto = 8.497576
In order to bring out the lower values, it is possible
to define a ratio lower than 8.497570
Do you want to reduce the factor value ?
         a ----> yes
1 ----> no
3
Factor value ? 8
Applying this factor, the greater surface will be equal to 158.000000
Do you agree ?
         1 ----> no
Treatment 2
11ng 1893
min_ratio 1.000076 max_ratic 2.711207 dif_ratio 1.711130
Transformation
Transfer scale :
0 ----> 100
1 ----> 255
```

Figura IV.3. Fin del programa.



Figura IV.4. Cálculo de la superficie "tridimensional" al interior de un píxel (en Parrot, 2007).

 $S = \sqrt{(\omega(\omega - base)(\omega - aside)(\omega - bside))}$  donde  $\omega = (base + aside + bside)/2$ .

Finalmente, la superficie tridimensional  $S_{3D}$  del píxel corresponde a la suma de la superficie de cada uno de los 8 triángulos de acuerdo con la ecuación:

$$S_{3D} = \sum_{l=1}^{l=8} S(l)$$

La figura IV.5B ilustra el resultado mostrando cómo es posible representar el relieve virtual del píxel en estudio.

La superficie tridimensional  $ST_{3D}$  es igual a la suma de la superficie de los ocho triángulos cuando los píxeles son de superficie; cuando se trata de un píxel de perímetro se suman únicamente los triángulos que corresponden a las configuraciones presentadas en Parrot (2007).

Se debe aclarar que el programa genera a partir de ese tratamiento tres tipos de archivo: el primero corresponde al cálculo puntual de la superficie tridimensional; el segundo define estos valores como si fueran comprendidos en un modelo tridimensional; finalmente, el algoritmo retoma esta información para calcular el valor de la superficie tridimensional en una ventana móvil.

A cada imagen se asocia un archivo descriptivo que corresponde a un informe del tratamiento, de las variables utilizadas, de los resultados, etc.



Figura IV.5. Cálculo de la superficie tridimensional de un píxel. A. Configuración original. B. Visión tridimensional del resultado.



Figura IV.6. Superficie tridimensional por píxeles. A. Imagen proveniente del tratamiento. B. Estiramiento dinámico (Software **PINS\_V2**).



Figura IV.7. Superficie tridimensional. A. Detalle (Zoom ×2) del MDE de la rugosidad calculada a partir de la superficie 3D por píxeles. B. Superficie 3D en una ventana móvil de rango 10.

### b) Surf\_2D\_3D\_jfp.exe

El módulo **Surf\_2D\_3D\_jfp.exe** calcula la superficie tridimensional de un objeto, así como la superficie bidimensional sobre la cual se encuentra. El programa no genera una imagen, sino un archivo donde se reportan los resultados.

Como lo muestra la figura IV.8, el módulo pide el nombre de la subcarpeta y del MDE (en formato *raster* o *ascii*). Si se trata de un archivo *raster*, se necesita indicar el número de bytes, la unidad que se utiliza para definir la escala altimétrica y el tamaño del píxel, lo que no es necesario cuando se trata de un archivo *ascii* que contiene en su encabezado esta información.



Figura IV.8. Primeros pasos del programa.

Una vez que se da esta información, el programa pide el nombre de la imagen que corresponde a la máscara. Esta imagen puede ser de formato *raster*, *bitmap* o *ascii*.

El cálculo se realiza de inmediato y el resultado aparece (Fig. IV.9); se presiona cualquier tecla para finalizar el proceso. El archivo con el nombre del MDE de entrada y una extensión *\_surf\_info.txt* (Fig. IV.10) contiene la información de los cálculos.

El tratamiento que se presenta aquí corresponde a un MDE con resolución vertical en centímetros y un tamaño de píxel de 10 × 10 metros (Fig. IV.11). Este mismo MDE del volcán Chichón se retomará como ejemplo de cálculo de un volumen.

La máscara se extrae de la imagen de la sección altimétrica, utilizando por ejemplo los programas **DEM\_Mask.exe** y **Select\_Dem\_Zone.exe** (ver más adelante en el capítulo VI).

Figura IV.9. Conclusión del programa.

```
PROGRAM SURF_2D_3D_JFP

Treatment applied to c:\images\chichon\chichon_10_meters_m4.raw

inside the surface defined by

the image c:\images\chichon\chichon_mask_800_meter.bmp

Image <u>Size :</u>

<u>Lines :</u> 576 - Columns : 772

Bidimensional <u>surface :</u>

Classic calculation (pix*<u>surf_pix</u>) = 1892075.000000 m2 = 1.892075 km2 = 189.207500 ha

Surface (Pratt <u>formula</u>) = 1872387.500000 m2 = 1.872387 km2 = 187.238750 ha

Surface (Parrot formula) = 1872343.750000 m2 = 1.872344 km2 = 187.234375 ha

Tridimensional surface : 2681047.520485

Roughness Index = 43.192057
```

Figura IV.10. Resultados.

#### c) Log\_Slope.exe

Cuando la zona en estudio corresponde a zonas casi planas o con una pendiente menor a uno o dos grados como es el caso de las zonas costeras, los rasgos poco pronunciados no se distinguen. El cálculo de la pendiente logarítmica aporta una respuesta detallada sobre todo en relieves con poca diferencia de altitud. El logaritmo de la pendiente estira los valores bajos, lo que permite diferenciar cambios de pendiente al nivel local en zonas *a priori* homogéneas.



Figura IV.11. Volcán Chichón. A. Modelo sombreado. B. sección a la altitud 800 metros.

| ángulo | Log (ángulo +1) | cálculo                        | resultado | tono de gris |
|--------|-----------------|--------------------------------|-----------|--------------|
| 0°     | 0               |                                | 0         | 0            |
| 1°     | 0.301           | $GT = (0.301/1.79) \times 255$ | 42.87     | 43           |
| 2°     | 0.477           | $GT = (0.477/1.79) \times 255$ | 67.95     | 68           |
| 3°     | 0.602           | $GT = (0.602/1.79) \times 255$ | 87.75     | 88           |
| 4°     | 0.699           | $GT = (0.699/1.79) \times 255$ | 95.57     | 96           |
| 5°     | 0.778           | $GT = (0.778/1.79) \times 255$ | 110.83    | 111          |

Tabla IV.2. Ejemplo de aplicación de la fórmula para los 5 primeros ángulos.

Para visualizar estos rasgos, se necesita por otro lado normalizar los valores logarítmicos entre 0 y 255, ya que dichos valores van de 0 hasta 1.95 (log 90°) valores que corresponden a pendientes entre 1° y 90°. Por otro lado, es menester añadir un valor 1 a los ángulos de pendiente, porque no existe el logaritmo de 0.

La fórmula siguiente muestra cómo se define el tono de gris *GT* sobre la imagen resultante:

$$GT = \left[ \begin{array}{c} log(\alpha + 1) \\ \hline log(\alpha_{max} + 1) \end{array} \right] \times 255$$

en función de los logaritmos del valor de los ángulos  $\alpha$ +1 y del logaritmo del ángulo máximo  $\alpha_{max}$ +1 de la zona en estudio.

Por ejemplo, en la zona de San Lorenzo, Veracruz que se presenta aquí, el valor máximo de la pendiente  $\alpha_{max}$  es igual a 61.09 y el logaritmo del valor  $\alpha_{max}$ +1 corresponde a 1.793.

La tabla siguiente muestra cómo se establece la correspondencia entre pendiente y logaritmo normalizado entre 0 y 255.

La relación entre pendiente y logaritmo normalizado se observa en el diagrama bidimensional de la figura IV.12.

Cuando se abre, el programa propone desplegar información sobre el tratamiento (Fig. IV.13); este panel describe de manera somera diversas etapas del proceso (Fig. IV.14).



Figura IV.12. Histograma Bidimensional Pendiente/ Log normalizado entre 0 y 255.



Figura IV.13. Inicio del tratamiento.

```
This program generates an image of the logarithmic values of the slope and normalizes these values between 0 and 255.
An attached two-dimensional histogram allows defining the correspondence between gray tones scale and the slope values in degrees.
```

Figura IV.14. Información general.

Existe la posibilidad de abrir un Modelo Digital de Elevación de tipo *raster* o de tipo *ascii*. En el primer caso, se necesita precisar el tipo de documento *raster* (2 bytes o 4 bytes), el tamaño del píxel y también la unidad utilizada para definir la escala hipsométrica. La lectura de la dinámica general de la imagen ayuda a precisar el tipo de unidad.

En el caso de un MDE de tipo *ascii*, el programa no necesita esta información que se ubica en el encabezado del documento *ascii*.

Una vez definido el tipo de MDE (*raster* o *ascii*), el proceso se realiza de inmediato.

Antes de pedir el nombre que se da al resultado, el programa indica el número de líneas y columnas del MDE, la escala de los valores decimales de la pendiente (°) y la escala logarítmica correspondiente (Fig. IV.15).

El MDE del ejemplo es un modelo de tipo lídar con un tamaño de píxel de  $5 \times 5$  metros y de resolución vertical en centímetros (Fig. IV.16).

```
Are these values
      0 ----> in meters
       1 ====> in decimeters
       2 ----> in centimeters
       3 ----> in millimeters
        3
THE ORIGINAL DEM HAS :
            2171 LINES
       AND 3641 COLUMNS
line 2100
Logarithmic Treatment
Dynamic Scale in:
       Min - 0.000000 Max - 61.080930
Logarithmic scale:
       Min - 0.8888880 Max - 1.792958
Generic name of the resulting file ?
```

Figura IV.15. Tratamiento.

La zona corresponde a la cuenca baja del río Coatzacoalcos en la región de la antigua capital olmeca de San Lorenzo.

Una vez introducido el nombre genérico que se va a dar a los documentos finales (Fig. IV.17), el programa pide cual será el tipo de la primera imagen (*raster*, *bitmap* o *ascii*).

Si se elige salvar el resultado con formato *ascii* y si el MDE que se abrió tiene el formato *raster*, el programa pide las coordenadas UTM de la zona en estudio.



Figura IV.16. MDE sombreado.

Figura IV.17. Guardando los resultados

Esto vale también para guardar el MDE que corresponde a una representación tridimensional de los resultados.

Si el MDE de entrada tiene el formato *ascii*, la introducción de las coordenadas UTM no se necesita si el resultado tiene el formato *ascii*.

Cuando se registra el resultado como MDE, se aplica un estiramiento para normalizar los valores logarítmicos. Los diagramas de la figura IV.18 establecen la correspondencia entre el valor de pendiente y el resultado de la normalización.

Las figuras IV.19 y IV.20 ilustran el resultado del tratamiento.

Sobre una planicie fluvial como la del río Coatzacoalcos (Veracruz), la escala logarítmica de la pendiente enfatiza las formas fluviales como por ejemplo las variaciones del cauce, la presencia de cordones en los meandros, también las formas de origen antrópico de edad prehispánica (región olmeca de San Lorenzo).



Figura IV.18. Diagramas: pendiente/logaritmo normalizado. A. Normalización 0-255 de la imagen de 8 bits; B. Normalización 0-400 de la representación tridimensional del resultado.



Figura IV.19. Pendiente logarítmica
En la figura IV.20, el valor de la pendiente en grados decimales aparece en frente del valor del logaritmo normalizado.

Un ejemplo de tratamiento local muestra el nivel de detalle alcanzado por el tratamiento (Fig. IV.21).

El programa genera dos imágenes: la primera presenta una extensión *\_log.raw*, o *\_log.bmp* o *\_log.asc* que depende del tipo de documento pedido por el usuario y corresponde al documento en tonos de gris de la figura IV.19; la segunda (Fig. IV.20) se presenta como un MDE con extensión *\_log\_dem.raw*, o *\_log\_dem.asc* (en función de la petición del usuario).



Figura IV.20. Imagen de color de la zona (utilizando el software TLALOC).



Figura IV.21. Detalle ilustrando el desplazamiento de los cordones del río.

A estos dos tipos de imagen corresponden dos archivos Excel con la extensión *\_log.xls* y *\_dem\_log.xls*.

## IV.3. Volúmenes

El cálculo de los volúmenes (Tabla IV.3) aplicados sobre todo en el caso de la modificación de la morfología del relieve volcánico en relación con su actividad o en el estudio de los volúmenes desplazados cuando ocurre un proceso de remoción en masa, representa un aporte cuantitativo al estudio de estos fenómenos.

## a) Dif\_dem.exe

Este programa calcula la diferencia entre dos Modelos Digitales de Elevación que cubren la misma zona. Se puede usarlo entre otros en el caso de la estimación del volumen desplazado durante un deslizamiento. También para generar un Modelo de Altura del Dosel (CHM o *Canopy Height Model*).

El algoritmo utiliza dos modelos y abre o un archivo *raster* o un archivo *ascii*. Por esta razón el programa pide los tipos de archivo de entrada (Fig. IV.22 y Fig. 23). En el ejemplo de abertura, se utilizó el formato *ascii*. El programa lee este archivo e indica cuál es su tamaño (líneas y columnas). Se introduce después

| Iconos | Nombre                       | Autores (Año)   | Descripción somera  |
|--------|------------------------------|---|---|
| -      | Dif_dem.exe                  | Parrot (2006)<br>Actualización 2017-19                                  | Cálculo de la diferencia<br>de altitud entre 2 MDE<br>(absoluta, negativa, positiva)                |
|        | Dif_dem_3d_<br>V2.exe        | Parrot (2006)<br>Actualización Parrot,<br>Ramírez-Núñez (2017)          | Cálculo del volumen de la<br>diferencia de altitud entre<br>2 MDE (absoluta, negativa,<br>positiva) |
|        | Dif_dem_3d_<br>roughness.exe | Parrot (2006)<br>Actualización Parrot,<br>Ramírez-Núñez (2017-<br>2018) | Cálculo de la rugosidad<br>como relación superficie<br>2D-3D  |
|        | Param_vol4.exe               | Parrot (2004)<br>Actualización 2018                                     | Definición y cálculo de para-<br>metros característicos de un<br>edificio volcánico.                |

| Tabla IV.3. | Cálculo | de los | volúmenes. |
|-------------|---------|--------|------------|
| -           |         |        |            |



Figura IV.22. Inicio del programa.



Figura IV.23. Abertura de los dos modelos de entrada.

el nombre del segundo MDE. Como lo muestra la figura IV.22, se eligió en este segundo caso el formato *raster*. Se requiere definir el número de bytes que se utilizó para registrar los valores de altitud (16 o 32 bits); 16 bits corresponden a *"unsigned short"* (2 bytes) y 32 bits a *"integer"* (4 bytes).

Si el descriptivo no menciona el valor del tamaño del píxel, se pide este valor. El módulo calcula la dinámica y la despliega, pidiendo cual es la unidad métrica que se utilizó para definir la hipsometría. En función del tipo de unidad, se transforma la escala y se despliega en valores decimales (*"Float hypsometric Dynamic scale"*).

En la imagen siguiente (Fig. IV.24), se definen los parámetros que se utilizan para generar el modelo digital resultante. Cuando se guarda el archivo resultante con el formato *ascii*, se piden las coordenadas UTM si ninguno de los MDE de entrada tiene el formato *ascii*.

La altitud de la línea de base permite eliminar los artefactos que aparecen eventualmente cuando la base no se define (Fig. IV.25). En verde, altitud igual a cero; en rojo, la altitud de base definida por el usuario.

Las figuras siguientes ilustran dos tratamientos utilizando el módulo ejecutable **Dif\_dem.exe**: en el primer caso, investigación realizada sobre un deslizamiento (Fig. IV.26 y Fig. IV.27); en el segundo, creación de un Modelo de Altura del Dosel (Fig. IV.28).

Figura IV.24. Parámetros del MDE de salida.



Figura IV.25. Definición de la línea de base.



Figura IV.26. Tratamiento sobre un deslizamiento. A. Pre-Lansdlide\_Form (reconstitución del paisaje antes del deslizamiento). B. MDE 2020.



Figura IV.27. A. Valor absoluto de las diferencias. B. Valores negativos. C. Valores positivos.

## b) Dif\_DEM\_3D\_V2.exe

El módulo **Dif\_DEM\_3D\_V2.exe** realiza un cálculo similar, pero calcula la diferencia entre la representación tridimensional de los dos modelos digitales, como lo muestra la figura IV.29.



Figura IV.28. Ejemplo de generación de un Modelo de Altura del Dosel a partir de los MDE lídar de Superficie y de Terreno (región de tres cumbres, Chichinautzin). A. Modelo de Superficie. B. Modelo de Terreno. C. Modelo de Altura del Dosel (MAD). D. Detalle sobre el MAD.

Como en el caso del programa anterior, se necesita definir los nombres de los modelos digitales, así como el tamaño del píxel y la unidad métrica de la escala hipsométrica (Fig. IV.30 y Fig. IV.31). También se requiere elegir el tipo de tratamiento (Fig. IV.32).

#### c) Dif\_DEM\_3D\_Roughness.exe

El módulo **Dif\_DEM\_3D\_Roughness.exe** toma en cuenta el cálculo que permite medir la superficie tridimensional como se explicó en el caso del módulo **Surface2.exe** (Fig. IV.4 y Fig. IV.5) con la finalidad de extraer la rugosidad de la superficie de un MDE.

Como para todos los módulos, se necesita dar el nombre de la subcarpeta donde se encuentra el MDE a estudiar, así como el nombre de este MDE. El pro-



Figura IV.29. Cálculo de la diferencia volumétrica entre dos superficies tridimensionales.



Figura IV.30. Inicio del programa.

```
Name of the two DEMs that will be created (without any extension) > Dif_PIF_Deslit
Type of the two DEMs
0 ==>> pr2
1 ==>> pr4
1 ==>> pr4
1 ==>> pr4
Dynamic scale of the first DEM :
Min : 10903 Max : 32485
Hypsometric Interval of the first DEM :
0 ==>> in exclimators
3 ===>> in millimeters
3 ===>> in millimeters
2 ===> in metris
1 ===> in declimators
3 ===>> in millimeters
2 ===> in declimators
3 ===>> in millimeters
2 ===> in declimators
3 ===> in declimators
2 ===> in declimators
3 ===> in millimetors
3 ===> in millimetors
3 ===> in millimetors
3 ===> in millimetors
3 ===> in declimators
2 ===> in declimators
3 ===> in decli
```

Figura IV.31. Parámetros.

| Pixel siz | re (in meters) ? 1                      |
|-----------|---|
| Type of t | reatment :                              |
| 0         | +> absolute values                      |
| 1         | I ====> negative values                 |
| 2         | <pre>t ====&gt; positive values</pre>   |
| 2         |   |
| 2D Volune | 3209562.180049 3D Volume 3209562.165790 |

Figura IV.32. Resultado.

grama se aplica a modelos digitales de 2 o 4 bytes (extensión *m2.raw* o extensión *m4.raw*). Después de mostrar los valores de la escala dinámica, el programa pregunta a qué unidad métrica corresponde esta escala (Fig. IV.33).

Las imágenes resultantes pueden tener el formato *bitmap* o *raster*. Cuando se genera imágenes *raster*, el archivo descriptivo indica el valor de los parámetros (factor y coeficiente de estiramiento).

El programa crea dos tipos de imagen: 1) resultado bruto del tratamiento (imagen con extensión *\_roughness*); 2) proceso de estiramiento con saturación de los valores extremos [0 y 255] (imagen con extensión *\_roughness\_str*). También existe la posibilidad de realizar el estiramiento de la imagen 1 con el mini software **PINS\_V2.exe**.

Después de dar el nombre genérico de las imágenes resultantes y precisar el tipo de documento deseado, aparecen indicaciones sobre el tratamiento que



Figura IV.33. Menu del programa.

permite definir el coeficiente que se va a utilizar para estirar el resultado bruto (Fig. IV.34).

La figura IV.35 ilustra el resultado de un tratamiento hecho sobre un edificio volcánico.

Dentro del programa, la introducción de un coeficiente de estiramiento genera, paralelamente a la imagen de los datos brutos de rugosidad, una imagen con estiramiento. La saturación así creada destaca los valores mínimo y máximo (ver histogramas de la figura IV.36).

#### d) Param\_vol4.exe

Este módulo toma en cuenta la suma de los parámetros característicos de un cono volcánico, tal como fue descrito en Parrot (2007) y, por otro lado, propone acercamientos como la tomomorfometría (García-Zúñiga y Parrot, 1998), la migración en el espacio tridimensional de los centros de gravedad de las secciones

```
Stretch : Hin. = 0.00051 Max. = 1.084282 dif 0.007630
maximum stretch 1 = 0.000349
maximum stretch 2 = 0.004202
line 500
nin 27.000546 max 255.000000
nin 27 max 256
Coefficient of stretching 2 1.5
```

Figura IV.34. Proceso.



Figura IV.35. Volcán Chichón. A. Resultado bruto. B. Con estiramiento (coeficiente 5).



Figura IV.36. Histograma A. datos brutos. B. con coeficiente 1. C. con coeficiente 5.

altitudinales desde la línea de base hasta la cumbre del edificio, y la estimación de la erosión a partir de una reconstitución del edificio volcánico.

El programa toma en cuenta los MDE de tipo *ascii* o de tipo *raster*, pero en el presente proyecto, crea solamente imágenes *raster*.

La figura IV.37 corresponde a la abertura del programa para un Modelo Digital de Elevación de tipo *ascii*.

Se necesita aclarar que el algoritmo se aplica a MDE cuando la escala altimétrica corresponde a valores enteros en metros.

En el caso de un MDE de tipo *ascii* donde la altitud se registra con valores decimales en metros, el programa toma en cuenta la parte entera del valor.

Cuando el MDE de entrada es de tipo *raster*, el programa pide el número de bytes utilizados para registrar el MDE y recalcula la escala dinámica en función del tipo del intervalo hipsométrico (Fig. IV.38).

Se define enseguida el nombre genérico de la serie de imágenes de salida. Si el formato de estas imágenes es de tipo *raster* (Fig. IV.39), se necesita definir el número de octetos que se van a usar para registrar los datos (2 o 4, lo que equivale a 16 o 32 bits), así como la unidad métrica utilizada (metros, decímetros, centímetros o milímetros).

El uso de datos de tipo *ascii* no necesitan esta información ya que estos datos corresponden a valores decimales en metros. Pero si el archivo de entrada es un



Figura IV.37. Inicio del programa. Abertura de un modelo de elevación tipo ascii.

```
Format Type :
        0 .....> ascii
        1 ----> raster
        .
type of DEM raster :
        0 ----> 16 bits
        1 ----> 32 bits
THE DIGITAL ELEVATION MODEL HAS :
       576 LINES
AND 772 COLUMNS
Dynamic scale of the selected DEM :
Hin : 22608
               Max : 110848
Hypsometric Interval :
        0 ----> in neters
        1 ----> in docimetors
        2 ----> in centineters
        1 >> in nillimeters
Transformation of the original dynamic scale
Dynamic scale of the DEM in meters (integer values) :
Min : 220
               Max : 1198
```

Figura IV.38. Abertura de un MDE de tipo raster.



Figura IV.39. Tipo y formato de los datos raster de salida.

MDE de tipo *raster*, es necesario definir las coordenadas de la esquina inferior izquierda (Fig. IV.40).

El proceso inicia después de introducir diversos parámetros (Fig. IV.41). Estos conciernen en primer lugar, a la definición del tamaño del píxel, la hipsometría de la línea de base del volcán y las coordenadas en línea y columna del centro de gravedad del edificio. Se recomienda definir estos valores para asegurar la correspondencia entre este punto y el centro del cráter.



Figura IV.40. Introducción de las coordenadas UTM (esquina inferior izquierda).

```
Altitude of the volcanic base line (in meters) ? 300
Gravity Center :
         0 .....> defined by the user (recommended choice)
1 ....> calculated from the basal slice
Coordinates of the gravity center :
         line ? 268
column ? 448
Basic Slice Representation :
         0 > Surface
         1 ----> Perimeter
Upper Slices Visualization in the Gravity Center Model :
         0 ----> yes
1 ----> no
Number of Upper Slices (2 to 18 max) # 6
Type of Visualization :
        0 ----> Surface
1 ----> Perimeter
Number of pixels in the former basic slice - 24614
Only one come located opper the base line
Chosen item - 1
```

Figura IV.41. Definición de los parámetros.

El segundo paquete de preguntas corresponde a la definición de la representación de la evolución de los centros de gravedad: visualización de la superficie de base (superficie o perímetro), número de secciones de referencia y tipo de visualización (superficie o perímetro). Más adelante, la figura IV.49 ilustra diversos tipos de representación.

Se realiza una primera sucesión del tratamiento y sobre la pantalla aparecen los resultados: posición de la línea de base y de la cumbre, altura del edificio, volumen global del volcán, promedio de la pendiente en las vertientes y en el cráter, profundidad del cráter, radio mínimo y máximo de la línea de base, lo que permite calcular un factor de elongación del edificio, superficie bidimensional  $S_{2D}$  y tridimensional  $S_{3D}$ .

```
Treatment
Slice No altitude 1195 meters
blobal Wohame of the edifice from MRM until 1157 m :
              0.975666 km3
Coordinates of the Gravity Center defined by the user
           line - 208
column - 448
Mean angle value :
           Slope down = 24.27 degrees
Slope up = 25.04 degrees
Base Radius :
Lover radius = 1134.04 m
Greater radius = 2348.88 m
Elongation Fector = 111.85
trater Hadius :
tower radius 1/1.1/ =
Greater radius 191.85 =
Base line altitude = 800.00 m
Upper altitude = 1197.00 m
Volcanic height - 307.00 m
Crater depth - 56.00 m
Original volcanic shape
           Bi-dimensional surface : 7.382950 km2
Tri-dimensional surface : 8.357573 km2
Surface Ratio = 13.200998
First Interpolation
inside the crater
outside the crater
Crater botton 1141 m
```

Figura IV.42. Primera parte del tratamiento.



Figura IV.43. Continuación y fin del programa.

El cálculo de la superficie tridimensional  $S_{3D}$  se explicó en detalle más arriba (ver Fig. IV.4 y Fig. IV.5). La relación ( $S_{3D}/S_{2D}$ )×100 define la rugosidad de la superficie del edificio.

Durante el tratamiento se generan dos archivos Excel (extensión *\_orient. xls* y *\_surf\_slice.xls*) y un archivo con extensión *\_gravcenters.xyz* que aseguran la generación de varios diagramas que caracterizan el edificio.

Esta primera serie de tratamientos es seguida por interpolaciones que generan dos MDE, el primero, tomando en cuenta la totalidad del edificio, el segundo, la zona que está afuera del borde del cráter. Estos tratamientos permiten estimar el nivel de erosión sobre las vertientes del cono volcánico. También, se calculan los mismos parámetros que en el caso del edificio original: altura y volumen del volcán, promedios de pendiente, superficie bidimensional  $S_{2D}$  y tridimensional  $S_{3D}$ , etc.

El tratamiento realizado a título de ejemplo concierne a la parte alta del volcán Chichonal (Chiapas).

El tratamiento arranca después de precisar cuál será el tipo de visualización de los niveles de altitud que definen el edificio (superficies o perímetros). La primera fase del tratamiento (Fig. IV.42) concierne al estudio de las características del cono volcánico y la segunda fase al cálculo de los mismos parámetros después de realizar la reconstitución original del edificio (Fig. IV.43).

El programa genera dos Modelos Digitales de Elevación, el primero corresponde al cono reconstituido y el segundo a la cantidad de material arrastrado

```
VOLCARIC CORE PARAMETERIZATION
Name of the treated file : c:\images\chichon\chichon 18 meters.asc
UTH coordinates :

X_min = 100000.000000 Y_min = 2000015.000000

Dynamic scale of the selected DEH :

Hin : 220.000000 Nax : 1197.530000
Dynamic scale of the DEM in meters (integer values) :
Min : 220 Max : 1197
Hypsometric Interval : 1 meter
Pixel size - 10.000000 m
Generic name of the different file out (without any extension) : chickon-IBm
Altitude of the base line (in metars) = 800
Gravity Center defined by the user
Only one zone located upper the base line
Chosen Itee = 1
Global Volume of the edifice from 880 until 1197 m :
           0.975666 km3
Coordinates of the Gravity Center defined by the user
         11ns = 268
column = 448
Hean angle value :
         Slope down = 24.27 *
Slope up = 25.54 *
```

Figura IV.44. Continuación y fin del programa.

```
State Watters 1
                 Lower radius = 1104.94 m
Greater radius = 2340.88 m
Elongation factor = 111.8
                                                                 111.85
Crater Radius :
Lower radius = 171.17 m
Greater radius = 191.05 m
                                                                                                                                 Base line altitude - 880.00 m
Three altitude - 1197.00 m
 Base line altitude = 800.00 m
linear altitude = 1197.00 m
                                                                                                                                  Volcanic height = 297.00 m
Crater depth = 56.00 m
 Volcanic height = 397.00 m
Crater depth = 56.00 m
                                                                                                                                 Characteristics after the first interpolation
Original volcanic shape
                                                                                                                                                  B1-dimensional surface : 7.382950 km2
Tr1-dimensional surface : 7.533760 km2
Surface flatio = 2.042679
                  a voicenic snape
Bi-dimensional surface : 7.382950 km2
Tri-dimensional surface : 8.357573 km2
Surface Natio = 13.200998
                                                                                                                                  DUM of the reconstituted cone saved as c:\images\chichon\chichon-lim_recl_mai.raw
Erosion DUM saved as c:\images\chichon\chichon-lim_recl_eros_m4-raw
Shadowed DUM saved as c:\images\chichon\chichon-lim_recl_shad.raw
Shadowed eroded deposits saved as c:\images\chichon\chichon-lim_recl_shaderss.raw
GLOBAL VOLUME = 1.105 km3
Interpolating treatment
                                                                                                                                  Layer orientation excel file saved as c:\images\chichor\chichor.10e_orient.wis
Layer surface/volume excel file saved as c:\images\chichor\chichor.10e_surf_slice.xis
forwity center evolution seved as c:\images\chichor\chichor.10e_surecenters.vgr
Mean angle value :
Slope down = 23.27 *
                  51ope up + 26.48 *
Rase Radius :
                  lower radius = 1184,94 m
Greater radius = 2340,88 m
flongation factor = 111,8
                                                                                                                                                                                                                                                                                 В
                                                                111.85
Crater Radius :
Lower radius = 171.17 m
Greater radius = 191.05 m
                                                                                                   Α
```

Figura IV.45A. Continuación y fin del programa. 45B. Continuación y fin del programa.

por la erosión. Si el formato de los datos de salida son del tipo *raster*, estos MDE tendrán la extensión *\_rec1\_m4.raw* y *rec1\_eros\_m4.raw* (*\_rec1\_m2.raw* y *rec1\_eros\_m2.raw* para los modelos de 16 bits), sino tendrán la extensión *\_rec1. asc* y *\_eros1.asc* si se tratan de datos *ascii.* 

También se generan dos imágenes que corresponden al sombreado de dichos modelos: a) con formato *raster*: \_*rec1\_shad.raw* y \_*rec1\_shaderos.raw*; b) con formato *ascii*: \_*shad1.asc* y \_*shaderos1.asc*.

Se generan igualmente dos archivos Excel, el primero con extensión *\_orient. xls* donde se reporta el valor de la orientación (entre 0° y 180°) de cada nivel de altitud y el segundo con extensión *\_surf\_slice.xls* que contiene información relativa a la superficie y el volumen de cada nivel de altitud.

El conjunto de estos tratamientos y resultados se reportan (Fig. IV.44 y IV.45) en un archivo con extensión *\_info.txt*.

La representación de la evolución del valor de la superficie de cada capa (Fig. IV.46) y del volumen en función de la altitud (Fig. IV.47) se obtiene a partir del archivo extensión *\_surf\_slice.xls*.

Por su parte, el archivo \_*orient.xls* permite definir al valor de la orientación en función de la altitud (Fig. IV.48).

Los gráficos de las figuras IV.46, IV.47 y IV.48 enfatizan las características del edificio estudiado. Se observa sobre el primer gráfico, una ruptura a la altitud



de 1000 m s.n.m. Esta ruptura se traduce, al nivel del histograma cumulativo del volumen, por un cambio brutal de pendiente. También, en la figura IV.48 que ilustra el valor de la orientación de cada capa métrica, se registra un cambio entre 1030 y 1100 m s.n.m.; si la orientación general del edificio se concentra alrededor de 125°, entre 1030 y 1100 m s.n.m. la orientación se ubica alrededor de 20°.

De la misma manera, este cambio se observa en los bloques tridimensionales de la figura IV.49A y B.



Figura IV.49. Bloques tridimensionales.

En estos bloques se representa dos ejemplos de tratamiento. En la imagen A se definieron 8 secciones intermedias que se representan por sus perímetros; la columna de puntos al centro de las zonas delimitadas por los perímetros corresponde a los centros de gravedad de las 397 secciones (desde 800 hasta 1197 m s.n.m.). En la imagen B, la primera sección que corresponde a la base del cono volcánico a 800 m s.n.m. se materializa por su superficie.

Finalmente, entre los diversos productos que genera el programa, se muestra en la figura IV.50 las zonas de erosión del edificio y el espesor del material movilizado (desde el azul para el mínimo hasta el rojo que equivale a un máximo de 120 metros). Cada tono de gris corresponde a un espesor de 47 centímetros.



Figura IV.50. Zonas de erosión.

#### e) Atributos primarios

Se considera que las variables que se extraen directamente de la superficie del MDE corresponden a atributos primarios. Se trata, entre otros, de la pendiente (normal o logarítmica), del aspecto (dirección de la pendiente), de la concavidad y convexidad, de la rugosidad superficial, de la dimensión fractal local en el espacio tridimensional, o de atributos estadísticos como el promedio de la elevación, la diferencia de la elevación promedio, la desviación estándar de la elevación, el rango de la elevación, la desviación de la elevación promedio o los percentiles. El software **TLALOC** (Parrot, 2006) calcula todas estas variables, así como atributos que no solamente toman en cuenta la superficie terrestre, sino que necesitan el aporte de datos exógenos como, por ejemplo, la posición del Sol en el caso del cálculo del sombreado, de la sombra proyectada o de la iluminación.

Estas funciones también se presentan en forma de módulos ejecutables, algunos de los cuales se encuentran en el siguiente capítulo (**V. Módulos Utilitarios**).

Por otro lado, se necesita a veces medir la densidad de un tema, así como definir diversos tipos de estiramiento. Dos softwares realizan estos tipos de tratamientos (**DENSIDAD\_V2** [Parrot, 2014] y **PINS\_V2** [Parrot, 2011]). Como lo mencioné, el software **TLALOC** contiene, en la sección relativa al cálculo de los parámetros de superficie, una rúbrica que concierne al uso de una ventana circular móvil (Fig. IV.51).

No obstante, falta información en el resultado de esta aplicación. Por esta razón y porque se necesita complementar el software **TLALOC** en lo que concierne a esta rúbrica, se desarrolló provisionalmente un módulo ejecutable que pueda responder a la problemática. Este módulo **Se** se llama **Terrain\_Analysis.exe**.

Como en el caso de todos los programas descritos en este fascículo, el programa **Terrain\_Analysis.exe** pide indicar donde se encuentra el MDE (archivo y sub-archivo), así como su tipo. El nombre genérico de los archivos resultantes puede ser idéntico al nombre del archivo de entrada, o bien el usuario puede definir otro nombre. El programa toma en cuenta archivos de tipo *ascii* o *raster* (Fig. IV.52). Si se trata de un archivo *ascii*, no se necesita ninguna información complementaria, pero si se trata de un archivo *raster*, se requiere precisar el número de bits que caracteriza al MDE.

Una vez definido el nombre de la serie de imágenes que el programa va a crear, se requiere definir el radio de la ventana móvil circular (valor en número de píxeles). Y después se necesita elegir el tratamiento deseado:

- elevación media
- diferencia con la elevación media
- desviación estándar de elevación



Figura IV.51. Menú del software TLALOC. (Atributos primarios)

- rango de elevación
- desviación de la elevación media
- percentil

También existe una sexta opción que permite tomar en cuenta la totalidad de los tratamientos sin tener que especificar el tipo de tratamiento requerido (Fig. IV.53).

Una vez seleccionada la opción, se inicia el tratamiento; en el ejemplo de la figura IV.54, se tomó en cuenta la totalidad de los tratamientos; se sigue la progresión del tratamiento antes de llegar al final de los diversos procesos (Fig. IV.54).

Las figuras siguientes ilustran los resultados obtenidos. Se debe aclarar que todos los resultados son imágenes raster porque en el archivo descriptivo relacionado se mencionan los valores mínimo y máximo de la dinámica y los límites de la normalización entre 0 y 255, lo que no aparece cuando corresponde a un documento *ascii* o *bitmap*.



Figura IV.52. Inicio del programa.

| Name of the File to be created (without any extension) ? prueba |  |
|---|--|
| radius (in pixels) of the calculating circle ? 10               |  |
| type of treatment :   |  |
| 0 ====> mean elevation  |  |
| 1> difference from mean elevation                               |  |
| 2> standard deviation of elevation                              |  |
| 3> elevation range  |  |
| 4> deviation from mean elevation                                |  |
| 5 ====> percentile  |  |
| 6> all treatments   |  |

Figura IV.53. Elección de los tipos de tratamiento.

| Treatm | ent 0                           |
|--------|---------------------------------|
|        | mean elevation                  |
|        | line 565                        |
| Treatm | ent 1                           |
|        | difference from mean elevation  |
|        | line 565                        |
| Treatm | ent 2                           |
|        | standard deviation of elevation |
|        | line 565                        |
| Treatm | ent 3                           |
|        | elevation range                 |
|        | line 565                        |
| Treatm | ent 4                           |
|        | deviation from mean elevation   |
|        | line 565                        |
| Treatm | ent 5                           |
|        | percentile                      |
|        | line 565                        |

Figura IV.54. Tratamiento global.



Figura IV.55. Elevación media (MDE en tonos de gris).





Figura IV.56. Elevación media (MDE de las capas de altitud en color).



Figura IV.57. Normalización (0, 255) de los valores entre 23644 y 118418 centímetros.

Min = 23644 Max = 118418



Figura IV.58. Diferencia con la elevación media (MDE en tonos de gris).

Min = 0 Max = 5044



Figura IV.59. Diferencia con la elevación media (MDE de las capas de altitud en color).



Figura IV.60. Diferencia con la elevación media Normalización (0, 255) de los valores entre 0 y 5044 centímetros.

Min = 0 Max = 5044



Figura IV.61. Desviación estándar de elevación (MDE en tonos de gris).

Min = 12 Max = 6863



Figura IV.62. Desviación estándar de elevación (MDE de las capas de altitud en color).



Figura IV.63. Rangos de elevación (MDE en tonos de gris).



Figura IV.64. Rangos de elevación (MDE de las capas de altitud en color).



Figura IV.65. Rangos de elevación Normalización (0, 255) de los valores entre 75 y 25791 centímetros.

Min = 75 Max = 25791

Figura IV.66. Desviación de la elevación media (MDE en tonos de gris).

Min = -175 Max = 217 cm



Figura IV.67. Desviación de la elevación media (MDE de las capas de altitud en color).



Figura IV.70. Percentile (MDE de las capas de altitud en color).

Figura IV.68. Desviación de la elevación media. Normalización (0, 255) de los valores entre - 175 y +217

Min = -175 Max = 217



Min = 0 Max = 99

7 certimeters 15 certimeters 22 certimeters 30 certimeters 38 certimeters 53 certimeters 60 certimeters 76 certimeters 83 certimeters 91 certimeters 91 certimeters 91 certimeters



Figura IV.71. Percentile Normalización (0, 255) de los valores entre 0 y 99.

Min = 0 Max = 99

# Capítulo V. Red de drenaje

Un capítulo del libro trata sobre la red de drenaje y la información geomorfológica proporcionada por la disposición estructural que describe una red fluvial.

Primero, esta red debe extraerse de la representación tridimensional de la superficie terrestre. Hay muchos enfoques que abordan este problema. Por lo que nos concierne, se adoptó un enfoque empírico que siempre nos ha dado buenos resultados y que se pueden mejorar utilizando cualquier editor de pantalla.

Se consideran aquí dos aspectos esenciales que corresponden por un lado a la definición bidimensional y tridimensional de los conjuntos de píxeles que describen una red de drenaje, y por otro lado, al cálculo de parámetros que describen la red fluvial y que permiten caracterizar el entorno en el cual se formaron estos conjuntos (ver Tabla V.1).

| Iconos           | Nombre                                       | Autores (Año)                       | Descripción somera   |
|------------------|--|-------------------------------------|--|
|                  | Rio4.exe                                     | Parrot (2002)<br>Actualización 2018 | Extracción de la red<br>de drenaje.  |
| $\gamma_{3}^{1}$ | Stream_Order.exe                             | Parrot (2008)<br>Actualización 2019 | Ordenes de Strahler.   |
| Str.             | New_Dissec.exe                               | Parrot (2004)<br>Actualización 2018 | Cálculo de la<br>longitud de la<br>red fluvial y de<br>la densidad de<br>disección     |
|                  | New_fractal_<br>drainage_<br>analysis_v2.exe | Parrot, Ramírez-<br>Núñez (2013)    | Diferenciación<br>meandros y red<br>dendrítica. Índice<br>TACO y dimensión<br>fractal. |

Tabla V.1. Tratamientos concernientes a la red de drenaje.

#### a) Rio4.exe

El módulo ejecutable **Rio4.exe** asegura la extracción de los cauces a partir de la superficie de un MDE. Esta extracción se basa en la hipótesis siguiente; se considera que un píxel corresponde a un punto situado en un cauce cuando más del 55% de sus vecinos dentro de una ventana de tamaño  $m \times m$ , tienen una altitud más elevada que el píxel estudiado; esta observación es estadísticamente verificable, especialmente en áreas montañosas. El programa realiza un barrido del MDE (Fig. V.1) para elegir los píxeles que satisfacen a esta condición (Fig. V.2).

Los primeros pasos del tratamiento no solamente buscan los píxeles que cumplen con las condiciones anteriores creando una imagen binaria de estos puntos, sino también se realiza un adelgazamiento similar a la esqueletización propuesta por O'Gorman (1999) para seleccionar únicamente los píxeles que dibujan el lecho del río. En el ejemplo de tratamiento reportado en la figura V.3, la esqueletización selecciona 13781 píxeles sobre los 33363 obtenidos al inicio.

Como se observa en la figura V.1B, la red fluvial es discontinua y existen diferentes segmentos que la segunda etapa trata de juntar. El algoritmo desarrollado para resolver en parte este problema busca cuál de las extremidades de un segmento tiene la altitud mínima; de esta manera, se obtiene un catálogo de todos los puntos bajos que caracterizan los segmentos; por ejemplo, los píxeles binarios provenientes del adelgazamiento se reparten en 664 segmentos que presentan 425 puntos bajos.

Figura V.1. Ejemplo de tratamiento. A. MDE sombreado de una zona ubicada en al Geoparque de la Mixteca Alta. B. Etapa 1: Extracción de elementos de la red fluvial.





Figura V.2. A. Etapa 2: unión de los segmentos. B. Etapa final: Eliminación de algunos defectos como, por ejemplo, presencia de píxeles de esquina.



Figura V.3. Resultados. A. Sobreposición de la red fluvial sobre el aspecto. B. Sobreposición de las curvas de nivel con un intervalo hipsométrico de 30 metros y de la red fluvial sobre el aspecto.



El programa toma en cuenta estos puntos bajos para buscar en una zona de  $25 \times 25$  píxeles las extremidades segmentales que no corresponden a puntos bajos, son más cercanas y tienen una altitud menor, para realizar una unión entre segmentos. La imagen V.2A ilustra el resultado así obtenido.

En la etapa final, se eliminan píxeles de esquina y píxeles adicionales de los confluentes (Fig. V.2B).

La posibilidad de sobreponer el resultado sobre una imagen del aspecto (Fig. V.3A), añadiendo o no curvas de nivel (Fig. V.3B), permite hacer las últimas correcciones utilizando un editor de pantalla.

Cuando se abre el programa (Fig. V.4), se requiere dar el nombre del subarchivo (*File Folder*) que se encuentra en el archivo (*Directory*) C:\*images*.

También se necesita definir el nombre del MDE y su tipo (2 octetos o 4 octetos).

El programa abre el MDE e indica cual es el número de líneas y número de columnas, así como el mínimo y máximo de la dinámica.

Una vez definido el umbral superior a 51, mejor a 55, y elegido el tamaño de la ventana de cálculo, el proceso empieza permitiendo seguir las diversas etapas del tratamiento (Fig. V.5).

|          | (Version 4)  |
|----------|--|
|          | Jean-François FARROT<br>(July 2002)  |
|          | Actuslization 2010   |
| lane of  | the File Folder located in the Directory C:\images : moch                              |
| lane of  | Digital Elevation Hodel (raw data without extension) ? moch_cont                       |
| type of  | DEH :<br>0> 10 bits<br>1> 12 bits  |
| THE DIG  | ITAL ELEVATION MODEL HAS:<br>405 LINES<br>AND 438 COLLMNS                              |
| Dynamic  | Scale:<br>Min - 285756 Mex - 287434  |
| Nano ol  | the resulting image:   |
|          | 0> Taking into account the generic name noch_corte/<br>1> Creation of a new File/<br>1 |
| lane of  | the file to be created (without extension .raw)? much                                  |
| Ihresho: | lding (between 51 and 100 ) ? 55   |
| Half Wi  | ndow Size of the greater dilation ? 2  |

Figura V.4. Inicio del programa.

```
Number of initial binarized pixels : 33363
Number of initial binarized pixels after soueletization: 13/81
Treatment
          Step 1
           Number of binarized pixels : 13781
          Number of segments = 664
Number of low points : 425
          Step 2
          Number of binarized pixels : 14796
          Number of segments = 358
Number of low points : 156
          Step 3
          Number of binarized pixels : 14917
          Number of segments - 315
Number of low points : 116
          Sten 4
          Number of binarized pixels : 14929
          Number of segments = 310
Number of low points : 111
          Step 5
           Number of binarized pixels : 14930
          Number of segments - 310
Number of low points : 111
Cleaning
Number of modifications - 505
Exit : Press any key
```

Figura V.5. Etapas del tratamiento.

### b) Stream\_order.exe

El orden de corriente de Strahler (1952) permite clasificar las corrientes de los diversos afluentes que se encuentran en una red de drenaje. El número de Strahler o número Horton-Strahler es una medida numérica de la complejidad de la ramificación. Así, se define el tamaño de un curso de agua en función de la jerarquía de los afluentes.

El proceso de este programa consiste en definir en primer lugar los puntos que corresponden a las cabeceras del sistema fluvial y seguir a partir de estos puntos la corriente hasta encontrar un confluente. En términos algorítmicos, las cabeceras corresponden a los pixeles que tienen un solo vecino. El programa atribuye el valor 2 a esos píxeles y un valor 3 a los píxeles que tienen más de un vecino y firman la presencia de un confluente (Fig. V.6).

Siguiendo los píxeles a partir de las cabeceras hasta un confluente conduce a extraer las porciones de la red fluvial que corresponden a segmentos de código 1.

El programa mide la longitud de cada segmento, calculando dentro de cada píxel la longitud en función de la posición de los píxeles vecinos. La figura V.12 de la sección siguiente que concierne al programa **New\_Dissec.exe** explica la base de este cálculo.

Una vez dibujados los segmentos de código 1, se eliminan estos segmentos de la imagen original (Fig. V.7), lo que permite realizar el cálculo del rango siguiente.



Figura V.6. Primeras etapas del tratamiento. A. imagen binaria de la red de drenaje. B. Cabeceras (puntos rojos) y confluentes asociados (puntos negros).



Figura V.7. Etapas siguientes del tratamiento. A. Segmentos de código 1. B. Red fluvial sin los segmentos de código 1.

Al final se obtiene la imagen de la red fluvial con los códigos de todos los segmentos (Fig. V.8).

Como lo muestra la figura V.9, existen tres tipos posibles para la imagen de la red de drenaje (*raster, bitmap* y *ascii*). Cuando se abre una imagen *bitmap*, se necesita precisar el tamaño del píxel.

La imagen resultante cuyo nombre puede o no utilizar el nombre de entrada ya que las extensiones se definen dentro del programa, pueden igualmente ser de uno de estos tres tipos. Se necesita aclarar que, si se elige el formato *ascii*, el



Figura V.8. Resultado del tratamiento.



Figura V.9. Inicio del programa.

programa pide las coordenadas UTM *Xmin* y *Ymin*, si la imagen de entrada no tiene el formato *ascii*.

Una vez elegido el formato de la imagen de salida, el módulo ejecutable pide el valor de tono de gris de la red fluvial en la imagen de entrada y el rango del último orden (estimación del usuario).

El programa empieza de inmediato y se para cuándo encuentra el último segmento, genera una imagen con extensión *\_strahler.raw*, o *\_strahler.bmp* o *\_strahler.asc* en función de la elección del usuario (Fig. V.10).

```
Order = 1

Number of segments : 207

total length of the sum of these segments = 32172.004009

Order = 2

Number of segments : 52

total length of the sum of these segments = 22636.358749

Order = 3

Number of segments : 9

total length of the sum of these segments = 11260.115793

Order = 4

Number of segments : 1

length of this segment = 6431.391770

Total drainage network length = 72500.670401 meters

Name of the resulting file : c:\images\mixteca\rio1_strahler.bmp
```

Figura V.10. Últimas etapas del tratamiento.

Tabla V.2. Ilustración parcial de la información contenida en el informe descriptivo con extensión \_*strahler\_info.txt* 


También se genera un archivo descriptivo con extensión *\_strahler\_info.txt* (Tabla V.2) donde se reporta el número de segmentos para cada orden, así como la longitud de cada segmento (píxeles y metros).

Toda la información que concierne a la imagen de la Figura V.11 abarca 6 páginas completas. Por esta razón, en la Tabla V.2 solo se han informado algunos fragmentos.

De hecho, el primer orden está compuesto por 207 segmentos, el segundo orden contiene 52 segmentos, el tercer orden 9 segmentos y finalmente el último segmento está compuesto por un solo segmento de 6.431 km.

La imagen de la figura V.11 corresponde al tratamiento realizado sobre la imagen del "río del Pueblo" que se ubica al norte de Villa Tejúpam de la Unión (Edo. Oaxaca).

## c) New\_Dissec.exe

#### 1. Generalidades

El módulo ejecutable **New\_Dissec.exe** corresponde a la última versión del panel de programas que se relacionaban con el estudio de la densidad de disección, cálculo que se realiza a partir del dibujo cartográfico de la red fluvial. En primer lugar, el programa calcula:

## 1.1. la longitud de la red fluvial:

- longitud que en primera aproximación corresponde al número de píxeles que componen la red, número que se multiplica por el valor métrico del lado del píxel.



Figura V.11. Ejemplo de tratamiento.

- longitud real de la red en el espacio bidimensional. Este cálculo necesita considerar dos distancias diferentes entre el centro de un píxel y los centros de sus vecinos en relación con la configuración que presentan los píxeles en una ventana de  $3 \times 3$ , centrada en cada píxel de la red de drenaje: la distancia *D* de enlace es igual a  $\sqrt{2}$  cuando se trata de píxeles cardinales y a 1 cuando los píxeles vecinos corresponden a píxeles diagonales. Dentro de la superficie de los píxeles, estas distancias son respectivamente iguales a  $\frac{1}{2}$  y a  $\sqrt{2/2}$  (Fig. V.12) multiplicado por el valor *P*<sub>s</sub> del lado del píxel
- longitud de la red fluvial en el espacio tridimensional. En realidad, es necesario considerar el espacio tridimensional para obtener un valor más preciso de esta longitud. Se supone que el valor tridimensional del elemento de red de drenaje proyectada sobre la superficie de un píxel corresponde a la hipotenusa de un triángulo rectángulo, cuya base es igual a  $l_{z1}$  ( $\frac{1}{2} \times P_s$ ) o bien a  $l_{z2}$  ( $\sqrt{2/2} \times P_s$ ) en función de la posición de los píxeles vecinos. El segundo lado del triángulo rectángulo es igual a la mitad de la diferencia de altitud *H* entre el centro del



Figura V.12. Valor de la longitud de la red fluvial dentro de un píxel en relación con la posición de los pixeles vecinos que dibujan dicha red.



Figura V.13. Cálculo de l3D en relación con la orientación de lz.

píxel y los centros de los diferentes píxeles vecinos (Fig. V.13). Así, la longitud de estos elementos locales ( $l_{3D1}$  y  $l_{3D2}$ ) es respectivamente igual a:

$$l_{3D1} = \sqrt{(l_{Z1})^2 + (H/2)^2} y l_{3D2} = \sqrt{(l_{Z2})^2 + (H/2)^2}$$

El programa **River\_length.exe** y las primeras etapas del programa **New\_ Dissec.exe** calculan estas dos longitudes, lo que permite definir la relación  $SD = [(L_{3D}-L_{2D})/L_{2D}] \times 100$  que traduce el porcentaje de aumento de la longitud cuando se toma en cuenta el relieve.

 la visualización de la relación entre estas dos longitudes requiere multiplicar el resultado del cálculo de la longitud tridimensional por un factor de exageración. El programa reporta en cada píxel de la red su valor SD (Fig. V.14). Como lo ilustra esta figura, el valor de SD crece cuando la red se encuentra en las zonas montañosas donde este parámetro alcanza el valor 13.29 (valor igual a 254 en la imagen normalizada donde los colores van del azul al rojo pasando por el verde y el anaranjado).

## 1.2. Cálculo del promedio de SD en una ventana móvil.

Se reporta el valor del promedio de *SD* en una ventana móvil considerando todos los píxeles de la red fluvial que se encuentran en dicha ventana (Fig. V.15).

El diagrama de la figura V.16 muestra cual es el valor del *ratio* en la imagen de la figura V.15. El valor máximo de *SD* en este caso es de 10.73.

## 1.3. Cálculo de la densidad de disección

Considerando los valores de longitud de la red que se mide de entrada durante el proceso, el programa **New\_Dissec.exe** permite calcular la densidad de disección. Se calcula este índice de diferentes maneras:



Fig. V.14. Detalle de una zona de estudio en el geoparque de la Mixteca.



Figura V.15. Distribución del factor SD al nivel de toda la zona.





- en primer lugar, se puede hacer la suma de los píxeles  $(N_P)$  que pertenecen a la red de drenaje dentro de un cuadrante o de una ventana móvil de tamaño  $m \times m$ . El número de píxeles que pertenecen a la red de drenaje corresponde a una estimación aproximada de la longitud, ya que, en el mundo *raster*, una línea se presenta como la superficie de todos los píxeles que la componen. Este índice se calcula como sigue:  $Dd_1 = (N_P / N_{TP}) \times 100$ , donde  $N_{TP}$  es el número total de píxeles en la superficie  $m \times m$ .
- el segundo índice considera la longitud  $L_z$  de la red de drenaje y la superficie  $S=m^2 \times P_s$  de la ventana donde la red se encuentra. La medida resultante es la siguiente:  $D_{d2}=(L_z/S) \times 100$
- el mismo cálculo también se puede aplicar al espacio tridimensional. En este caso, la relación corresponde a  $D_{d3}=(L_{3D}/S) \times 100$ , donde  $L_{3D}$  corresponde a la longitud tridimensional de la red de drenaje.

 existe un acercamiento suplementario que consiste en aumentar la escala hipsométrica, esto para evidenciar en un histograma bidimensional la diferencia que existe entre la medida bidimensional y la medida tridimensional.

Antes de mostrar cómo se utiliza el programa **New\_Dissec.exe** para medir la densidad de disección, se necesita aclarar que existen dos tipos de tratamiento. El primero se refiere a un cálculo que utiliza cuadrantes fijos (Fig. V.17) y el segundo se realiza en una ventana móvil (Fig. V.18).

Se necesita aclarar que, en el caso de los cuadrantes, se genera un borde al este y al sur cuando el tamaño del cuadrante no es un múltiplo de las líneas y/o columnas de la imagen.

En el caso de la ventana móvil, se crea alrededor de la imagen, un borde que corresponde al valor del rango de la ventana móvil; el rango R de la ventana móvil define el tamaño m del lado de esta ventana, siguiendo la fórmula  $m=(R\times 2)+1$ .

#### 2. Uso del programa

Como se mencionó anteriormente, el programa **New\_Dissec.ex**e realiza dos tipos de tratamiento: un estudio estadístico de la evolución de la relación *SD* y el cálculo de la densidad de disección.

#### 2.1 Caracterización de la red de drenaje

Cuando se inicia el programa (Fig. V.19), se necesita definir, en primer lugar, el nombre del subarchivo que contiene las imágenes de entrada y que se ubica en el archivo *C:\images* del disco duro de la computadora.

El nombre de la imagen de la red de drenaje puede presentarse con tres formatos diferentes (*raster, bitmap* o *ascii*). El programa indica cuál es el tamaño de



Figura V.17. Densidad de disección en cuadrantes.



Figura V.18. Densidad de disección en una ventana móvil.



Figura V.19. Inicio del programa.

la imagen antes de pedir el nombre del Modelo Digital de Elevación (MDE) sobre el cuál se sobrepone la red fluvial.

Hay dos formatos de la red fluvial disponibles: *raster* o *ascii*. Después de leer el MDE se verifica si su tamaño es el mismo que el tamaño de la imagen de la red de drenaje y también se menciona el tamaño en líneas y columnas del MDE.

Una vez estos dos archivos abiertos, le programa pide (Fig. V.20) dar un nombre genérico a la serie de archivos que él va a crear (imágenes e histogramas), así como el tipo de formato que se va a utilizar para registrar los datos generados (*raster, bitmap* o *ascii*).

Sigue la introducción de los tipos de tratamiento a efectuar y la definición de parámetros.

Después de definir el valor del tono de gris correspondiente al código de la red fluvial, se requiere indicar cuál será el tratamiento: estudio estadístico sobre la longitud de la red o bien cálculo de la densidad de disección.

En el ejemplo de la figura V.20, se eligió estudiar la longitud de la red. Se requiere definir el valor del rango de la ventana que se va a utilizar para hacer el cálculo. El programa señala a que corresponde en número de píxeles y superficie la aplicación de este rango.

Si el usuario confirma su elección, el tratamiento empieza, en primer lugar, para atribuir a cada píxel de la red de drenaje su valor *SD* (ver figura V.14) y después para repartir globalmente este valor en relación con el tamaño de la ventana.

Antes de salir del programa, se indica el valor máximo de *SD* de la red fluvial (13.29) y al nivel global (10.73).

Por otro lado, se genera un archivo informativo con extensión *\_info.txt* que recapitula las etapas del tratamiento y los resultados obtenidos (Fig. V.21).

El histograma se reportó anteriormente en la figura V.16.

| Generic name of the file series to be created (without any extension)? geo_parque |
|---|
| Image type:   |
| 0 ====> raster  |
| 1 ====> bitmap  |
| 2 ====> ascii   |
| 1   |
| Value of the gray tone used to define the drainage network? 1                     |
| Type of treatment:  |
| 0 ====> statistical study of the river network length                             |
| 1 ====> dissection density  |
| 0   |
| Window or quadrant range? 33  |
| Applying the former values,   |
| the size of window side (67 pixels) will be equal to 1.005000 kilometers          |
| Is that correct ?   |
| 0 ====> no  |
| 1 ====> yes   |
| 1   |
| Drainage Network Treatment  |
| line 1800   |
| Maximum value = 13.298540   |
| Global Treatment  |
| line 1800   |
| Maximum value = 10.731367   |

Figura V.20. Ejemplo de tratamiento relacionado con la medida de la longitud de la red de drenaje.



Figura V.21. Archivo descriptivo.

#### 2.2. Densidad de disección

Después de abrir la imagen de la red de drenaje (*raster*, *bitmap* o *ascii*) y el MDE (*raster* o *ascii*), se necesita dar un nombre genérico a la serie de imágenes e histogramas que genera el tratamiento. El hecho de elegir el formato *ascii* para esta serie de imágenes, desactiva la función "normalización" porque el uso de cualquier software de visualización (*QGis* por ejemplo) no necesita esta transformación.

Como anteriormente, después de precisar el tipo de formato y definir el tono de gris de la red de drenaje, se elige el tratamiento que corresponde al cálculo de la densidad de disección (Fig. V.22).

En este caso, se necesita definir las diversas etapas del proceso en función del tipo de tratamiento elegido; en este caso, densidad de disección. El programa propone proporcionar información sobre el tratamiento, antes de precisar si el proceso utiliza cuadrantes fijos o ventana móvil.

De hecho, como se precisa en la nota informativa, el valor de la relación longitud del río/cuadrante (km/km<sup>2</sup>) disminuye a medida que aumenta el tamaño del cuadrante.

#### 2.2.1 Cuadrantes

Además, se señala que el uso de cuadrantes fijos a menudo cubre parcialmente toda el área de estudio, si el tamaño del cuadrante no corresponde estrictamente a un múltiplo de las líneas y columnas de la imagen.

Ya que los valores de la densidad de disección no son muy fuertes, la visualización requiere de una normalización de esos valores entre 0 y 254 (el valor 255

| Generic name of the file series to be created (without any extension)? geo_par | que |
|--|-----|
| Image type:  |     |
| 0> raster  |     |
| 1> bitmap  |     |
| 2> ascii   |     |
| 1  |     |
| Value of the gray tone used to define the drainage network? 1                  |     |
| Type of treatment:   |     |
| 0> statistical study of the river network length                               |     |
| 1> dissection density  |     |
| 1  |     |
| Dissection density:  |     |
| Some information about this treatment?   |     |
| 0> yes   |     |
| 1> no  |     |
| 0  |     |
| Note that the value of the ratio river length/square quadrant (km/km2)         |     |
| decreases as the size of the quadrant increases.                               |     |
| Horsover, the use of fixed quadrants often only partially covers               |     |
| the entire study area, if the size of the quadrant does not strictly           |     |
| correspond to a multiple of lines and columns of the image.                    |     |
| Trestment  |     |
| 0> using quadrants   |     |
| 1> using moving window   |     |
| 8  |     |
| Creation of an additional normalized image between 0 and 255 ?                 |     |
| 8> yes   |     |
| 1> nc  |     |
| e  |     |

Figura V.22. Tratamiento para el cálculo de la densidad de disección con cuadrantes.

se reserva para el fondo de la imagen). También, como en el caso del estudio de la longitud de la red de drenaje, se requiere definir el rango del tamaño de los cuadrantes (Fig. V.23).

Una vez aceptado el tamaño de los cuadrantes y luego haber indicado el coeficiente de exageración vertical, el tratamiento empieza señalando para cada uno de los cuatro procesos el valor máximo de la densidad de disección calculado. En este caso, se genera igualmente un archivo descriptivo con extensión *\_info.txt* (Fig. V.24) que menciona el número y el nombre de cada imagen creada, así como el número y nombre de los histogramas que se relacionan con estas imágenes.

| Window or                | quadrant range? 33  |
|--------------------------|---|
| Applying t               | he former values,   |
| the size o               | f window side (67 pixels) will be equal to 1.005000 kilometer                           |
| Is that co               | rrect ?   |
| 0                        | > no  |
| 1                        | ====> yes   |
| 1                        |   |
| Vertical e               | xaggeration factor (decimal value)? 2.5   |
| Treatment                |   |
| and Normal               | ization   |
| Dissection               | density calculated from pixels  |
| Maximum                  | 8.80  |
| Dissection               | density calculated using river length   |
| Maximum                  | 7.20  |
| 3D dissect               | ion density calculated using river length   |
| Maximum                  | 7.30  |
| 3D dissect<br>and a vert | ion density calculated using river length<br>ical exaggeration factor equal to 2.500000 |
| Maximum 1                | 1.00  |

Figura V.23. Cálculo de la densidad de disección en cuadrantes.



Figura V.24. Archivo informativo.

#### 2.2.2 Ventana móvil

El tratamiento que concierne al uso de una ventana móvil obedece a las mismas reglas: definición del rango de la ventana, normalización y coeficiente de exageración vertical.

Una comparación entre los diferentes histogramas muestra que la curva obtenida con la ventana móvil es más suave.

#### d) New\_fractal\_drainage\_analysis\_v2.exe

Este módulo ejecutable corresponde a la versión Ms\_Dos del mini-software **TACO** [Tortuosity And Confluent Organization] (Parrot y Ramírez-Núñez, 2013). A menudo, porque el tratamiento no requiere de una visualización, el tiempo de ejecución se reduce considerablemente.

Cuando se abre el programa, aparece un texto (Fig. V.25) que explica cuáles son las principales líneas del tratamiento:

"El cálculo de este nuevo parámetro toma en cuenta la longitud *L* de la red de drenaje dentro de una ventana móvil ( $m \times m$ ), el número  $N_C$  de confluentes y el tamaño del lado de la ventana *m*, de acuerdo con la siguiente fórmula:  $R = 200 - (P \times 100)$ , donde  $P = (L/(N_C + 1)) / m$ . Esta fórmula mide el nivel de dendritismo, pero cuando el valor de  $N_C = 0$  y cuando L > m, el algoritmo calcula la Tortuosidad del Meandro según la fórmula:  $R = 100 - (Coef \times (L/m))$ .

Este procedimiento permite distinguir meandros de las estructuras dendríticas; el valor de los meandros está comprendido entre 0 y 100 (línea recta) y las estructuras dendríticas entre 100 y 200.



Figura V.25. Abertura del programa.

El programa genera 6 imágenes: *\_FDP\_DN* (Parámetro de Dimensión Fractal de la Red de drenaje; *FDP\_RI* (Interpolación regional); *\_TAC\_DN* (Tortuosidad y Confluencia de la Red de Drenaje); *\_TAC\_RI* (Interpolación Regional); *\_FDP\_DN2* (Dimensión Fractal de la Red de Drenaje calculada a partir del segundo tamaño de la ventana móvil); *\_FDP\_RI2* (Regionalización de *\_FDP\_DN2*).

Nota: Esta versión calcula la dimensión fractal tomando o no en cuenta el primer tamaño de ventana móvil."

Muchos detalles sobre el algoritmo del programa se pueden encontrar en la sección **IV.3.2. Red de drenaje y Dimensión Fractal** del libro **"Geomorfología tridimensional para el análisis del relieve mexicano"**.

La figura V.26 muestra de manera sintética cuales son los rangos de valores que caracterizan las estructuras fluviales.

Luego de proporcionar información sobre el procesamiento, el programa solicita el nombre del archivo ubicado en el directorio *C:\images*, así como el nombre de la imagen raster de la red hidrográfica a estudiar (Fig. V.27).

Después, el programa indica el tamaño de la imagen de entrada (en filas y columnas), antes de preguntar por el nombre de la serie de imágenes e histogramas resultantes.

Es posible utilizar el nombre de la imagen de entrada o definir un nuevo nombre.

Entonces es necesario especificar el tipo de tratamiento deseado:



Figura V.26. Caracterización de la red de drenaje a través del índice TACO. Configuración de la red de drenaje A. meándrica, B. paralela, y C. dendrítica.

```
Name of the File Folder located in the Directory C:\images : mixteca
Name of the River File (whithout extension .raw) ? rio1
THE RIVER FILE HAS :
            194 LINES
       AND 376 COLUMNS
Resulting File :
        0 ----> Using the generic name rio1 ?
        1 ----> Creating a new file ?
Generic Name of the file out (without any extention) ? rio puebla
Type of Treatment :
        0 ----> Only TACO Treatment
        1 ----> FD and TACO Treatments
        1
Size of Window side used to calculate Fractal Dimension :
        0 ----> 13
        1 ----> 25
        2 ----> 37
        3 ----> 49
        4 ====> 61
        5 ----> 73
        6 ----> 101
        7 ====> 121
        8 ----> 181
        9 ====> 211
        10 ----> 241
11 ----> 661
        1
```

Figura V.27. Inicio del programa.

```
Size of Window side (odd number) used for regional value :
        8 ----> 13
        1 ----> 25
        2 ====> 37
        3 ----> 49
        4 ====> 61
        5 ----> 73
        6 ----> 101
        7 ----> 121
        8 ----> 181
        9 ====> 211
        10 ----> 241
        11 ----> 661
        2
Maximum number of confluents in a meander (max 3) ? 2
First Calculation
        line 150
Saving Fractal Dimension
Regional calculation of first type
line 150
Regional calculation of second type
        line 150
Saving TACO Parameter
        Step = 37
```

Figura V.28. Inicio del tratamiento.

- cálculo del índice TACO

- o cálculo de la dimensión fractal y del índice TACO.

Ya que se necesita elegir el tamaño de la ventana de cálculo móvil utilizada al nivel local, el programa propone 11 posibilidades (Fig. V.27).

También, se necesita elegir el tamaño de la ventana móvil utilizada para realizar el cálculo al nivel regional. Existen 11 posibilidades (Fig. V.28).

Los cálculos se activan después de ingresar el número máximo de confluentes que se pueden encontrar en un meandro (3 máximo).

Los 6 histogramas siguientes muestran cuales son los resultados obtenidos (Fig. V.29, Fig. V.30 y Fig. V.31).

La dimensión fractal depende del tipo de estructura estudiada. De manera general, una línea tiene una dimensión igual a 1, una superficie a 2 y un volumen a 3.



Figura V.29. Dimensión fractal calculada con el primer tamaño de ventana móvil: (A) local y (B) regional.



Figura V.30. Dimensión fractal calculada con el segundo tamaño de ventana móvil: (A) local y (B) regional.

En el caso de la red fluvial, es evidente que el valor de esta dimensión debe ubicarse alrededor de 1. Valores inferiores a 1 significan que dentro de la ventana móvil de cálculo se encontraron segmentos inferiores al tamaño del lado de esa ventana. Un valor ligeramente más grande que 1, traduce la irregularidad del dibujo de la red fluvial.

El cálculo al nivel regional disminuye la diferencia entre los valores mínimo y máximo.

La Figura V.26 muestra cuáles son los valores teóricos de la red fluvial según su estructura (meandros, red lineal, red dendrítica). Como lo muestra la figura V.31, se encuentran dos tipos de estructura en la imagen estudiada (red lineal y red dendrítica).

Los resultados de las figuras V.32 y V.33 corresponden al cálculo de la dimensión fractal.



Figura V.31. Dimensión fractal calculada con el segundo tamaño de ventana móvil: (A) local y (B) regional.



Figura V.32. Dimensión fractal calculada con el segundo tamaño de ventana móvil: (A) local y (B) regional.

Las paletas de las figuras A van del amarillo anaranjado para la red lineal hasta el color rojo y morado para la red dendrítica. En el caso del resultado al nivel regional (figuras B), los colores van del azul oscuro azul claro para la red lineal hasta el verde para las estructuras dendríticas. Se reporta la red original sobre las imágenes de tipo B.

En el caso del índice TACO, la gama de colores al nivel de la red fluvial va del azul al rojo y morado pasando por el verde, amarillo y anaranjado. La secuencia al nivel regional va del azul al verde.



Figura V.33. Dimensión fractal calculada con el segundo tamaño de ventana móvil: (A) local y (B) regional.



Figura V.34. Evolución del índice TACO. A. nivel de la red de drenaje. B. nivel regional.

# Capítulo VI. Modulos utilitarios

En este capítulo, se reporta toda una serie de módulos ejecutables (Tabla VI.1).

| Tabla | VI.1. | Módulos | utilitarios. |
|-------|-------|---------|--------------|
|-------|-------|---------|--------------|

| Iconos       | Nombre                   | Autores (Año)                          | Descripción somera  |
|--------------|--------------------------|--|---|
| ١            | DEM_Mask.exe             | Parrot (2018)                          | selección de zonas en un<br>modelo digital de elevación                                 |
| ×.           | Extract.exe              | Parrot (2003)<br>Actualización<br>2019 | Extracción de zonas en una<br>imagen o MDE.   |
|              | Extract_<br>courbes4.exe | Parrot (2003)<br>Actualización<br>2019 | Extracción de las curvas de<br>nivel  |
|              | Fast_Ilum.exe            | Parrot (2005)                          | Iluminación durante <i>n</i> días   |
|              | Geol_Plan.exe            | Parrot (2004)<br>Actualización<br>2016 | Traza de la intersección de<br>los planos de falla o de capas<br>geológicas con el MDE. |
|              | Gorman.exe               | Parrot (2020)                          | Esqueletización de una forma<br>utilizando el algoritmo de<br>O'Gorman (1990)           |
|              | RMS_Error.exe            | Parrot, Ramírez-<br>Núñez (2014)       | Cálculo de la media<br>cuadrática.  |
| RMS<br>rough | RMS_<br>Roughness.exe    | Parrot, Ramírez-<br>Núñez (2014)       | Cálculo de la rugosidad a<br>partir de la media cuadrática.                             |

Tabla VI.1. Continúa.

| Iconos               | Nombre                  | Autores (Año)                          | Descripción somera  |
|----------------------|-------------------------|--|---|
| Rms                  | RMS_Slope.exe           | Parrot (2012)                          | Cálculo de la media<br>cuadrática de la pendiente.                      |
|                      | Select_Dem_<br>Zone.exe | Parrot (2016)                          | Selección de una zona en un<br>MDE.                                     |
| <mark>€_&gt;.</mark> | Sombra.exe              | Parrot (2005)<br>Actualización<br>2019 | Generación de imágenes del<br>sombreado.                                |
| <u>G</u>             | Stereo.exe              | Parrot (2007)                          | Creación de pares<br>estereoscópicos.                                   |
| <u>}</u>             | Visib.exe               | Parrot (2003)                          | Cálculo de la visibilidad a<br>partir de todos los puntos de<br>un MDE. |
| 2                    | Visib_p.exe             | Parrot (2003)                          | Cálculo de la visibilidad a<br>partir de un punto de un<br>MDE.         |

De hecho, se requieren a veces transformar, transferir, modificar parcialmente, extraer zonas o realizar diferentes tratamientos que no se relacionan directamente con los diferentes programas mencionados en el texto principal del libro, pero que ilustran la diversidad de las herramientas que necesita el tratamiento de imágenes.

## a) DEM\_Mask.exe

El módulo ejecutable **DEM\_Mask.exe** permite seleccionar una zona del Modelo Digital de Elevación (DEM por su nombre en inglés) con la ayuda de una máscara. Se define el tono de gris de la zona interna de la máscara (en general 1) y el tono de gris de la zona externa (generalmente se atribuye el valor 255).

En la versión presentada aquí, el programa toma en cuenta solamente MDE de tipo *raster* (Fig. VI.1A) e imágenes de la máscara también con un formato *raster* (Fig. VI.1B).

Cuando se abre, el programa pide el nombre del archivo (*File Folder*) ubicado en la carpeta *C:\images*. Dentro de este archivo, se encuentran el MDE y la imagen de la máscara. El MDE resultante se encontrará también en el mismo archivo (Fig. VI.2).

Una vez indicados los diversos nombres de los datos de entrada y el nombre del MDE de salida, se necesita definir el valor del tono de gris que se va a utilizar en la imagen de la máscara (máscara *sensu stricto* o bien fondo).



Figura VI.1. Datos de entrada. A. MDE sombreado (Chichón). B. Máscara (extraída a partir de la curva de nivel de 800 metros).



Figura VI.2. Inicio del programa.

En el ejemplo de la figura VI.3, se eligió el valor que corresponde a la superficie de la zona (código 1) y se indica después a que valor de altitud corresponde esta zona (800 metros).

El resultado correspondiente al primer tratamiento (uso del valor de la máscara) se reporta en la figura VI.4A.

Si se utiliza el valor de la zona externa (código 255), se obtiene el resultado reportado en la figura VI.4B.

## b) Extract.exe

El módulo **Extract.exe** asegura la extracción de una zona en una imagen (*raster*, *bitmap* o *ascii*) o en un MDE (*raster* o *ascii*).

Una vez introducido el nombre del archivo (*File Folder*) donde se encuentra el documento (*File*) que se va a cortar, el programa pide si se trata de una imagen o de un MDE (Fig. VI.5).



Figura VI.4. Resultados. A. Zona interna. B. Zona externa.



Figura VI.3. Parámetros.

```
*****
                     EXTRACT
                                  J.-F. PARROT
                                   (Julio 2003)
                      Actualization september 2019
        Name of the File Folder located in the Directory C:\images ? cp
Name of File to cut ? cp10_shadow
Type of file format :
      0 ====> image
      1 ====> Digital Elevation Model
      6
      Note: Image type in and image type out will be the same
      0 ----> raster
      1 ----> bitmap
      2 ----> ascii
      0
Pixel Size (in meters) ? 10
THE FILE HAS:
1131 LINES
AND 1110 COLUMNS
Name of the resulting file : cp10_shad_extract
```

Figura VI.5. Inicio del programa.

| Extraction parameters | S                   |
|-----------------------|---------------------|
| Coordinates i, j, of  | the area to extract |
| First line            | ? 401               |
| First column          | ? 301               |
| Last line             | ? 700               |
| Last column           | ? 800               |
| 300 lines and         | d 500 columns       |
| 0> start treatme      | ent                 |
| 1> do another cu      | it.                 |
| 0                     |                     |
|                       |                     |
| line 700              |                     |
| Hit any key to exit t | the program         |
|                       |                     |

Figura VI.6. Parámetros de extracción para una imagen raster o un bitmap.

Cuando se trata de una imagen, se necesita indicar cuál es el tipo (*raster*, *bitmap* o *ascii*). Si la imagen es un *raster* o un *bitmap*, es preciso decir cuál es el tamaño del píxel.

Las preguntas que siguen dependen del tipo de imagen. Son las mismas si se trata de una imagen *raster* o de un *bitmap* (Fig. VI.7), pero si el documento es de

tipo *ascii* se presentan dos tipos de preguntas en función de la elección del usuario (Fig. VI.8 o bien Fig. VI.9).

En el caso de una imagen *ascii*, es posible utilizar las coordenadas *i,j* o las coordenadas UTM.

En el primer caso, la introducción de coordenadas *i,j* provoca el despliegue de las coordenadas UTM (Fig. VI.7) y viceversa, la introducción de las coordenadas UTM se acompaña del despliegue de los equivalentes *i,j* (Fig. VI.8).

```
Extraction parameters
        θ ====> use of coordinates in lines (i) and columns (j)
         1 ====> using UTM coordinates
         .....
i, j coordinates of the area
         First line ? 401
         First column ? 301
Last line ? 700
Last column ? 800
Corresponding UTM coordinates :
         Y_max - 3587300.000000 X_min - 641692.000000
Y_min - 3584310.000000 X_max - 646682.000000
The image to create will have:
         300 lines and 500 columns
0 ----> start traetment
1 ====> do another cut
0
line 700
         line 299
Hit any key to exit the program
```

Figura VI.7. Extracción utilizando las coordenadas i,j.

```
Extraction parameters

0 ====> use of coordinates in lines (i) and columns (j)

1 ===> using UTM coordinates

1

UTM coordinates of the File in :

X_min 638682.000000 X_max 649782.000000

Y_min 3580000.000000 Y_max 3501310.000000

UTM coordinates of the File out :

X_min ? 641692

Y_min ? 3584310

X_max ? 646682

Y_max ? 3587300

Corresponding i,j coordinates :

first line = 401 first column = 301

last line = 700 last column = 800

The image to create will have:

300 lines and 560 columns
```

Figura VI.8. Extracción a partir de las coordenadas UTM.

En todos los casos, después de señalar cuál será el tamaño de la imagen resultante, es posible iniciar el tratamiento o definir otro tamaño para realizar la extracción. En el segundo caso, el programa regresa a la definición de los valores de extracción.

Cabe señalar que el tipo y la extensión del documento de salida depende del tipo de la imagen de entrada: un documento *raster* genera un documento *raster*, un *bitmap* genera un *bitmap* y un documento *ascii* genera un documento *ascii*.

Por otro lado, vimos que las preguntas relativas a la extracción dependen del tipo de documento de entrada.

Cuando se extrae una zona a partir de un MDE, existen solamente dos tipos: *raster* y *ascii*. Los datos *raster* pueden ser de 2 o 4 bytes (*unsigned short* o *int*).

Los parámetros de extracción son similares a los que se emplean para las imágenes.

#### c) Extract\_courbes4.exe

El programa **Extract\_courbes4.exe** asegura la extracción de curvas de nivel a partir de un MDE de tipo *raster* o *ascii*.

Después de abrir el MDE y definir el tipo (*raster* o *ascii*), el programa indica cuál es el tamaño en líneas y columnas del archivo de entrada (Fig. VI.9) y pide el nombre y el tipo de archivo de salida (*raster* o *bitmap*).

En la figura siguiente (Fig. VI.10), se indica en primer lugar cuál es la escala dinámica del MDE. Es preciso aclarar que, si el archivo de entrada es un documento *ascii*, los valores de altitud están en metros (valores decimales); si se trata de un MDE de tipo *raster*, el programa pide el tipo de unidad utilizado para registrar



Figura VI.9. Abertura.

```
Dynamic scale in meters
          Min. = 2019.990800
                                          Max. = 2880.000000
Contour line extraction :
          Minimum altitude ? 2020
          First gray tone value (0 or 1) ? 1
Hypsometric interval required (decimal value in meters) ? 20
          Maximum altitude ? 2880
According to the minimum altitude value
and the hypsometric values defined
the resulting image will have 44 contour lines
Altitude Values Units in the Gray tones/Altitude Table :
          0 ====> meters with decimal values
1 ====> meters (integer value)
          2 ----> decimeters (integer value)
3 ----> centimeters (integer value)
4 ----> millimeters (integer value)
Treatment
          Gray tone 44 Altitude 2880.000000
saving bitmap c:\images\mixteca\parque_curvas1.bmp
Hit any key to exit the program
```

Figura VI.10. Proceso.

el modelo digital (metros, decímetros, centímetros o milímetros) para darles un valor métrico decimal.

En este punto, se definen los valores de los parámetros que se van a utilizar para realizar el tratamiento.

En primer lugar, se necesita indicar cuál será la altitud de base y el tono de gris de la curva de nivel correspondiente; el programa ofrece utilizar dos valores: 0 o 1. Si el usuario se equivoca, el mensaje reportado en la figura VI.11 aparece y de nuevo se pide el valor del primer tono de gris.

También, se requiere definir el valor del intervalo altimétrico y la altitud máxima tomada en cuenta.

En función de estos valores, el programa calcula el número de curvas de nivel que se van a crear y pide cuál será la unidad que se va a utilizar para atribuir a un tono de gris su altitud. Esta correspondencia se registra en una tabla con extensión *\_tab.txt* (ver descripción en el módulo ejecutable **Crear\_tabla.exe**).

A veces, el número de curvas de nivel es superior a 250. En este caso (Fig. VI.12), se regresa a la rúbrica "*Contour line extraction*" para modificar el valor de los parámetros.

```
Contour line extraction :

Minimum altitude ? 2020

First gray tone value (0 or 1) ? 5

Wrong value

First gray tone value (0 or 1) ? 1

Hypsometric interval required (decimal value in meters) ? 20
```

Figura VI.11. Definición del tono de gris de la primera curva.

En este caso, es posible dividir en dos o tres imágenes (Fig. VI.13), diferentes conjuntos de curvas de nivel. De hecho, el programa **Brod4\_mx\_v2.exe** puede crear una imagen de las curvas de nivel a partir de diferentes archivos.

#### d) Fast\_Ilum.exe

Este módulo calcula la iluminación durante un periodo, en relación con la latitud de la zona estudiada.

Este módulo utiliza solamente datos *raster* y los modelos digitales de elevación deben tener la extensión  $_m2.raw$  o  $_m4.raw$  en función del número de bytes en el archivo (2 o 4). Se necesita precisar el tipo de unidad de la escala altimétrica (Fig. VI.14).



Figura VI.12. Número excedente de curvas.



Figura VI.13. Separación de las curvas de nivel en dos paquetes.



Figura VI.14. Inicio del programa.

Después de dar el valor del tamaño del píxel (Fig. VI.15), se definen: la latitud, la atenuación de la sombra proyectada (generalmente 50%, pero es posible elegir otra ponderación en función de la problemática de la investigación), el tipo de normalización (porcentaje o estiramiento), y finalmente el periodo de iluminación desde un primer día hasta un último. En el ejemplo de tratamiento se eligió un periodo corto que va del primero de enero hasta el 5 de enero comprendido.

| Pixel : | size (decimal value in meters) ? 10              |
|---------|--|
| Please. | . enter your parameters :                        |
|         | Latitud / 17.36                                  |
|         | Cast shadow attenuation (per cent; i.e. 50) : 50 |
|         | Normalization :                                  |
|         | 9> raw data                                      |
|         | 1> per cant                                      |
|         | 2> grey tones (0, 255)                           |
|         | 1  |
|         | Period of illumination :                         |
|         | first day :                                      |
|         | day ? 1  |
|         | month ? 1  |
|         | last day :                                       |
|         | day ? 5  |
|         | month ? 1  |
| first_o | late 1 last_date 5<br>of_days 5 num_spot 55      |

Figura VI.15. Parametrización.

El proceso empieza en seguida y se menciona la posición del Sol cada hora para cada día. El proceso se detiene cuando se toma en cuenta la última fecha (Fig. VI.16 y Fig. VI.17).

| Date                       | 1   |              |            |  |
|----------------------------|---|--------------|------------|--|
| hour -<br>Shadou<br>Cast : | 7 elevation 11.372<br>7 computation<br>8 computation<br>1 ast column  | 14 azimuth   | 118.728125 |  |
| hour -<br>Shadon<br>Cast s | <ul> <li>8 elevation 22.391;<br/>i computation<br/>shadow computation<br/>last column</li> </ul>              | 272 azimuth  | 124.873585 |  |
| hour -<br>Shadou<br>Cast : | 9 elevation 32.596<br>computation<br>hadow computation<br>last column   | 254 azimuth  | 133,317900 |  |
| hour -<br>Shadon<br>Cast s | <ul> <li>10 elevation 41.28<br/>computation<br/>shadow computation<br/>last column</li> </ul>                 | 1805 azimuth | 145.037506 |  |
| hour :<br>Shadow<br>Cast : | 11 elevation 47.38<br>a computation<br>shadow computation<br>last column                                      | 264 azimuth  | 160.851206 |  |
| hour -<br>Shadoi<br>Cast s | <ul> <li>12 elevation 49.628</li> <li>computation</li> <li>shadow computation</li> <li>last column</li> </ul> | 1363 azimuth | 188.888800 |  |
| hour :<br>Shadon<br>Cast : | 13 elevation 47.38:<br>a computation<br>shadow computation<br>last column                                     | 264 azimuth  | 199.148794 |  |
| hour -<br>Shadon<br>Cast : | 14 elevation 41.28<br>computation<br>hadow computation<br>last column   | 1805 azimuth | 214.962494 |  |

Figura VI.16. Inicio del proceso.

hour - 10 elevation 41.555851 azimuth 144.709504 Shadew computation Cast shadow computation last column hour = 11 elevation 47.720391 azimuth 160.642187 Shadaw computation Cast shadow computation Last column hour - 12 clevation 40.993308 azimuth 180.000000 Shadow computation Cast shadow computation I ast column hour - 13 elevation 47.720391 azimuth 199.357813 Shadow computation Cast shadow computation last column Hour = 14 elevation 41.555851 azimuth 215.290496 Shadaw computation Cast shadow computation last column hour - 15 elevation 32.794182 azimuth 227.052258 Shadow computation Cast shadow computation last column hour - 16 elevation 22.518715 azimuth 235.505354 hour - 16 elevation 22. Shadow computation Cast shadow computation last column hour - 17 elevation 11.434509 azimuth 241.652250 Shadow computation Cast shadow computation last column ana 199.087887 dmin 0.000000 ddif 199.087887 Final treatment

Figura VI.17. Fin del tratamiento.

El módulo **Fast\_Ilum.exe** genera una imagen en tonos de gris con formato raster (Fig. VI.18) y el archivo descriptivo adjunto (Fig. VI.19) indica cuáles fueron el azimut y la elevación del Sol a cada hora de cada uno de los días de tratamiento.



Figura VI.18. Iluminación cotidiana entre el primero y el 5 de enero.



Figura VI.19. Archivo descriptivo de la imagen resultante.

La escala de color de la figura VI.18 se aplicó a los 10 tonos de gris que corresponden al número de horas de exposición a la radiación solar.

## e) Geol\_Plan.exe

En función de las medidas hechas en el terreno, el geólogo trata de seguir en el espacio tridimensional la traza de un plan que puede corresponder a un plan de falla o a la base de una capa geológica. El módulo **Geol\_plan.exe** ayuda a precisar el valor del ángulo de pendiente, la orientación del rumbo, o la extensión al nivel local.

Se necesita definir las coordenadas del punto de medida y los valores de los parámetros pendiente, aspecto o dirección de la pendiente y la superficie donde se realiza la medida (Fig. VI.20 y Fig. VI.21).

En función de la problemática, es posible modificar el valor de los diferentes parámetros (Fig. VI.22).

Se reporta el valor de los parámetros en el archivo descriptivo que acompaña la imagen resultante.

## f) Gorman.exe

Este módulo ejecutable adelgaza los rasgos utilizando el algoritmo desarrollado por O'Gorman (1990).

El programa (Fig. VI.24) pide cuál es el tipo de imagen de entrada (*raster*, *bitmap* o *ascii*); el formato de la imagen de salida con extensión \_*reg* será lo mis-



Figura VI.20. Inicio del tratamiento.



Figura VI.21. Parametrización.



Figura VI.22. Paleta de modificaciones.

mo. También se requiere definir el valor o el umbral del objeto a "esqueletizar" (adelgazar).

El algoritmo es suficientemente preciso para extraer el único punto que corresponde al centro de un círculo (Fig. VI.25)



Figura VI.23. Ejemplo de resultado. A. Horst este de la Laguna Salada. B. Trazas en función de la pendiente de la falla: Amarillo: 10°; Rojo: 20°; Verde: 30°; Azul: 40°.

|          |  | 1           |
|----------|--|-------------|
| 1        |  | -           |
| -        | REGIME   | -           |
| 1        |  |             |
| 1        | based on O'Gorman algorithm                          | 0           |
| <u>.</u> |  |             |
| *        | JF. PARROT and H.TAUD (February 1991)                | *           |
|          |  |             |
| <u>.</u> | C++ Version (JF. PARROT June 2002)                   |             |
| <u>.</u> | Actualization February 2020                          |             |
|          |  |             |
| *******  | ***************************************              |             |
| Name of  | the File Folder located in the Directory C:\images ? | gorman      |
| Format   | type :   |             |
|          | Note: the extensions and the size of all images must | be the same |
|          | 0 ====> raster                                       |             |
|          | 1 ====> bitmap                                       |             |
|          | 2 ====> ascii  |             |
|          | 1  |             |
| Name of  | input File (without any extension) ? gorman2         |             |
| THE TMA  | SE HAS   |             |
|          | SAR LINES  |             |
|          | AND 380 COLUMNS                                      |             |
|          |  |             |
| Name of  | the resulting file :                                 |             |
|          | 0> Taking into account the generic name gorman       | 2 ?         |
|          | 1> Creation of a new File ?                          |             |
|          | 1  |             |
|          |  |             |
| Name of  | the File to be created (without any extension) ? gor | manz        |
|          |  |             |
| Thresho  | lding :  |             |
| Thresho  | lding :<br>Min (included) ∂ 1                        |             |

Figura VI.24. Menú del programa.



Figura VI.25. Tratamiento sobre un círculo. A. Superficie. B. Centro.

El algoritmo tiene muchas aplicaciones, entre otros, para transformar en una línea de camino 8 los rasgos provenientes de una binarización (Fig. VI.26).

#### g) RMS\_Error.exe

El cálculo del error cuadrático medio (*root mean square erro*r, en inglés) es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable, y corresponde a un criterio de validación del MDE que consiste en compararlo con una superficie más precisa. Tres métodos permiten evaluar la precisión de un MDE: a) el error cuadrático medio (ECM); b) el error cuadrático medio de la rugosidad (ECMR); c) el criterio de homogeneidad (H) calculado por líneas, columnas y en toda la imagen.

En el ejemplo de tratamiento que sigue, se compara un MDE proveniente de datos lídar (*Chichon\_corte\_lidar\_m4.raw*) con un MDE creado a partir de una interpolación multidireccional (*Chichon\_corte\_jfp\_m4.raw*).

El módulo ejecutable **RMS\_Error.exe** también se puede aplicar a imágenes en tonos de gris (Fig. VI.27).

Cuando se trata de MDE, el programa pide el número de bytes (o número de bits) que se usaron para registrar el modelo digital. Como ya lo vimos muchas veces, la extensión *\_m4.raw* significa que el MDE es de tipo *integer* (4 bytes o 32 bits).

Una vez leídos los dos MDE, el programa realiza una prueba para ver si estos dos MDE tienen o no el mismo tamaño. Si el tamaño es diferente, el programa se para, si no, se precisa el número de líneas y columnas de estas dos entidades.

En la etapa siguiente (Fig. VI.28), se da el nombre del archivo de salida y se define la escala hipsométrica de los MDE (metros, decímetros, centímetros o milímetros).



Figura VI.26. Ejemplo de tratamiento. A. Imagen sintética de rasgos lineales. B. Resultado del tratamiento.

| •   |  |
|---|--|
| · BMS FRACE                               |  |
|   |  |
| <ul> <li>Calculation using two</li> </ul> | c inaces *   |
|   |  |
|   |  |
| * JF. PARROT .                            | and C. RANTREZ-MARIEZ *                                |
|   | (September 2014) *                                     |
|   |  |
|   |  |
| This program devoted to DEM (16 or 32     | bits) rms error calculation                            |
| can be eventually applied to morphone     | tric variables (8 bits image)                          |
| Name of the File Folder located in the    | e Directory c:\images\ ? chichon_comp                  |
| Type of data :                            |  |
| R man > Digital Elevation Red             | el [DEN]   |
| 1 mann 2 bits Trace                       | en feerd   |
| e   |  |
| Name of the first DTM File (without a     | ny extension _m2.naw or _m4.naw) ? chickon_corte_lidar |
| ture of DEN -                             |  |
| type of ben .                             |  |
| 1 mmm > 37 hits                           |  |
| 1   |  |
| Name of the second DTM File (without -    | any extension _m2.raw or _m4.raw) ? chichon_corte_jfp  |
| type of DEM :                             |  |
| 8> 16 bits                                |  |
| 1> 32 bits                                |  |
| 1   |  |
|   |  |
| THE TWO FILES HAVE :                      |  |
| 1000 A THEE                               |  |

Figura VI.27. Inicio del programa.

| The results will be registered in a txt file :<br>Name of this file (without any extension) / chichon_compi                    |  |
|--|--|
| Hypiometric scale of the first DEM :<br>Min = 37657<br>Max = 110456  |  |
| Are these values :   |  |
| Hypsometric scale of the second DEH :<br>Him = 37657<br>Hem = 119771   |  |
| Are these values :<br>0 ====: in meters<br>1 ====: 0, certificaters<br>2 ====: 0, certificaters<br>3 ====: in millimeters<br>2 |  |

Figura VI.28. Escala dinámica de los dos MDE.

| First Treatment  |   |
|--|---|
| line 1000  |   |
| Input Values   |   |
| Sun X - 762498317.771861   | Sun Y = 705254793.849977  |
| Sun XY = 575315386834.854248   | Sun X2 - 572477494612.224854  |
| Equation 1   |   |
| Nog Sun X - 762408317.771861   | Sun Y by Nog Sun X = 533585402969298364.6666666   |
| N_by Nog Sun X = -818182612746   | 143.756666 Sun X by Nog Sun X • -581463684663607664.888988  |
| Equation 2   |   |
| Sun_XY_by_N = 6112333920711678<br>Sun_X2_by_N = 5082183139369752   | 72.600000 Sun_X_by_N = B10102612746143.750000<br>32.000000  |
| hole : N corresponds to the total number   | er of points  |
| Differences  |   |
| DIF_XY_Y = 37727899181859588.88  | BBBBB Dif_x3_x = 25814524111277588.000000   |
| rainclation of UN and UN   |   |
| III - Dif XY Y/Dif X2 K  |   |
| 00 = (Sun_Y-(Sun_X*81))/9  |   |
| B1 = 1.034059 B0 = -21.849898  |   |
| $ \begin{array}{l} \label{eq:second} \text{Securitor 1} \\ & \log \; \text{Sum} \; X = \; 762408317, 771601 \\ & N \; by \; \text{Meg} \; \text{Sum} \; X = \; 318182612740 \\ \mbox{Equation 2} \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; by \; \text{M} = \; 6112333928711676 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; by \; \text{M} = \; 6112333928711676 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; by \; \text{M} = \; 6112333928711676 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; by \; \text{M} = \; 6112333928711676 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; by \; \text{M} = \; 6112333928711676 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; by \; \text{M} = \; 6112333928711676 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; by \; \text{M} = \; 6112333928711676 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; by \; \text{M} = \; 77777889181183986768 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; y \; y = \; 777778891811889668 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; b \; \text{M} = \; 777778891811889686 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; b \; y \; \text{M} = \; 777778891811889686 \\ & \mbox{M} = \; 1 \; b \; (10659 \; 100 \; s \; - 21, 1659896 \\ & \mbox{Sum} \; X^{\prime} \; b \; b \; s \; - 21, 1659896 \\ \end{array}$ | Str. Y by Hog Sun X + 53354540260201364.666666<br>143.756666 Sun X by Hag Sun X + 55145564683607664.33333<br>72.666666<br>er of points<br>RRMRR Dif_XO_X + 2481450411D777.48.exempt |

Figura VI.29. Resultados del primer tratamiento.

| Second Treatment                                   |                           |
|--|---------------------------|
| linc 1888  |                           |
| Sum Y estim = 768165151.731661                     | Sun_orr = 14508667.979464 |
| sum_err/ = 1652639548.455659<br>min_err = 8.888811 | max_err = 348.243276      |
| Variance = 1555,527939                             |                           |
| Var 00 - 0.011210                                  |                           |
| Ver_01 0.000000                                    |                           |
| Lev_51_00 = 0.102245                               |                           |
| Err_St_01 = 0.000240                               |                           |
| 80_Calc = -857.913959                              |                           |
| 01_Calc = 10777915.027432                          |                           |
| Third Treatment                                    |                           |
| 11nc 1000  |                           |
| Press any key to save the resul                    | ts                        |
|  |                           |

Figura VI.30. Fin del programa.

Treatment on the image c:\images\chichon\_comp\chichon\_corte\_lidar\_m4.raw and on the image c:\images\chichon\_comp\chichon\_corte\_jfp\_m4.raw These two images have 1008 lines and 1054 columns Hypsometric scale of the first DEM : Min = 37637Max = 110456Scale in centimeters Hypsometric scale of the second DEM : Min = 37637Max = 119771Scale in centimeters Treatment applied to the whole image St. Dev. = 17.411820 Min. 3.613779 Max. 94.942563 Slope = 1.005062r = 0.978335Min. 0.910470 Max. 1.130202 Min. 0.836619 Max. 0.998591 Min. 0.699932 Max. 0.997185  $r^2 = 0.959168$ RMS\_Error = 36.828820 Sum\_X = 762498317.771061 Sum\_Y = 765254793.840077 Sum\_XY = 575315306834.854248 Sum\_X2 = 572477404612.224854 B1 = 1.034059 B0 = -21.849096 Sum\_Y\_estim = 768105151.731081 Sum err = 14598667.979464  $Sum_{err}^2 = 1652639548.455659$ min\_err = 0.000011 max\_err max\_err = 340.243276 cf. diagram variance = 1555.527939 Var B0 = 0.033210 Var\_B1 = 0.000000 Err St B0 = 0.182235 Err St B1 = 0.000248 B0 Calc = -657.913959 B1\_Calc = 16777915.627432

Figura VI.31. Archivo descriptivo creado por el programa RMS\_Error.



Figura VI.32. Diagramas: A. Desviación Estándar; B. Pendiente; C. Coeficiente de correlación (r); D. Coeficiente de determinación (r<sup>2</sup>).

El proceso empieza inmediatamente y los valores de las diversas variables resultantes del primer tratamiento aparecen (Fig. VI.29), así como las que dependen del segundo y tercer tratamiento (Fig. VI.30).

Un clic sobre cualquier tecla guarda los diversos resultados y se genera un archivo con extensión *\_rms\_error.txt* (Fig. VI.31)

En este archivo se reportan todas las etapas del tratamiento, así como dos archivos Excel, el primero con extensión *\_rms\_error.xls* (Fig. VI.32) y el otro con extensión *\_rms\_error\_regres\_lin.xls* (Fig. VI.33).

#### h) RMS\_Roughness.exe

El módulo ejecutable **RMS\_Roughness.exe** define la rugosidad de una superficie (superficie del terreno, en el caso de un Modelo Digital de Elevación; estructura proveniente del arreglo de los tonos de gris de una imagen). Estos tratamientos se basan en el análisis de la textura, lo que permite evaluar la rugosidad. Así, la rugosidad se mide por ejemplo a lo largo de un perfil, usando la media de la raíz cuadrada o la variación de la pendiente.

En este caso, no se utilizan dos MDE como en el módulo anterior, comparando un resultado de interpolación con un modelo considerado como una referencia.

Cuando el programa se abre (Fig. VI.34), se precisa que es posible aplicar el tratamiento a un MDE o a una imagen en tonos de gris. Si se trata de un MDE se necesita precisar si los datos fueron registrados con 16 o 32 bits.

Después de una lectura, se indica el número de líneas y columnas del archivo en proceso y se pide el nombre del archivo de salida. El programa pide en la etapa siguiente (Fig. VI.35) cuál es la unidad métrica de la escala dinámica y el tratamiento se realiza de inmediato.

La totalidad de los valores obtenidos durante el tratamiento (RMS\_line, RMS\_column, RMS\_image, Desviación estándar, Homogeneidad, así como el cál-



Figura VI.33. Regresión lineal.



Figura VI.34. Inicio del tratamiento.



Figura VI.35. Tratamiento.

culo del RMS utilizando el proceso de Felicisimo [1994]) se reporta en un archivo con extensión *\_rms\_roughness.txt* (Fig. VI.36).

Como ejemplo, el diagrama de la figura VI.37 muestra la evolución, para cada línea *i* del valor *R* de la ecuación  $R_i = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{j=n} (val_{i,n} - \overline{D})\right)^2}$ , donde *j* corresponde a las columnas que van de 1 hasta *n*, *val* a la altitud del pixel (*i*, *n*) y  $\overline{D}$  al promedio de la altitud. En este caso, RMS\_line es igual a  $RMS = \sum_{i=1}^{i=m} R_i / m$ , donde *m* corresponde al número de línea.


Figura VI.36. Resultados.



Figura VI.37. Evolución de R<sub>i</sub> siguiendo las líneas.

### i) RMS\_Slope.exe

El programa **RMS\_Slope.exe** calcula el error cuadrático medio (RMS) de la pendiente de un MDE y transforma la imagen original en una imagen del valor normalizado del RMS.

Al inicio del tratamiento (Fig. VI.38), el programa pide el nombre del MDE con su extensión  $_m4$ , lo que significa que se utiliza un MDE de formato integer 4.

El tratamiento inicia después de indicar el valor de normalización y genera una imagen en tonos de gris (Fig. VI.39) del valor normalizado del RMS.

También se genera un archivo informativo (Fig. VI.40) y un histograma en la parte media de la imagen (Fig. VI.41).

### j) Select\_DEM\_Zone.exe

Este módulo asegura la extracción de una zona en un MDE; la zona de extracción se define a partir de una imagen binaria. Por ejemplo, se utiliza la imagen de una



Figura VI.38. Tratamiento RMS\_Slope.



Figura VI.39. Resultado.

| RMS_Slope   |       |
|---|-------|
| Studied DEM: c:\images\mixteca\parque_m4.raw              |       |
| Dynamic scale:  |       |
| Min. 201999 Max. 288000                                   |       |
| Normalization value = 255                                 |       |
| Histogram following the columns on the line 941           |       |
| Name of this histogram: c:\images\mixteca\parque_rms_slop | e.xls |

Figura VI.40. Fila descriptiva.



Figura VI.41. Histograma de los valores normalizados del RMS.

curva de nivel (Fig. VI.42) extraída con el software **TLALOC** a partir del MDE (Fig. VI.43) y se llena el espacio interno que dicha curva delimite (Fig. VI.44).

Las figuras siguientes ilustran las diferentes etapas del tratamiento.

El tratamiento se realiza siguiendo las instrucciones de las Fig. VI.45 y Fig. VI.46.



Figura VI.42. Curva de nivel 810 utilizada para definir la máscara.



Figura VI.43. Curva de nivel 810.



Figura VI.44. Superficie delimitada por la curva de nivel 810 m s.n.m.

| to be a best of the second | CONTRACTOR DATE:                 |
|--|----------------------------------|
|  |                                  |
|  | 2                                |
| SELECT DEM ZONE  |                                  |
|  |                                  |
|  |                                  |
|  |                                  |
|  | Deport                           |
| 3P   | PAREUL F                         |
|  | er 2010)                         |
| *******  | ******                           |
| This program extracts a zone from a Digital Eleva  | tion Hodel                       |
| This zone is defined as a binary mask  |                                  |
| The program can further calculate the volume of t  | the extracted area               |
| The 3D surface can be calculated using the progra  | m surf_2d_3d_jfp.exe             |
| Name of the File Folder located in the Directory   | c:\images\ : chichon             |
| Name of Digital Elevation Model [DEM] (without an  | y extension) ? chichon_10_meters |
| Format Type :  |                                  |
| 0> ascii   |                                  |
| 1 ====> raster   |                                  |
| ĩ  |                                  |
| type of DEM raster :   |                                  |
| 8> 16 bits   |                                  |
| 1> 32 bits   |                                  |
| 1  |                                  |
| Hypermetric dynamic scale:   |                                  |
| Hin = 22009  |                                  |
| Max = 119783   |                                  |
| Are these values   |                                  |
| 0 ====> in meters  |                                  |
| 1> in decimeters   |                                  |
| 2> in centimeters  |                                  |
| 3> in millimeters  |                                  |
| 2  |                                  |

Figura VI.45. Inicio del programa.

| THE DIGIT | AL ELEVATION MODEL HAS :                                |
|-----------|---|
|           | 576 LINES   |
| A         | ND 772 COLUMNS  |
| Name of t | he mask ? chichon_surf810_mask                          |
| Mask Type |   |
| 9         | > bitmap  |
| 1         | > raster  |
| e         |   |
| Mask Code | ? 0   |
| Correspon | ding hypsometric value ? 810                            |
| Name of 1 | the resulting DEM (without any extension) ? chichon_top |
| Format Ty | rpe :   |
| 1         | )> ascii  |
| 4         | > raster  |
| type of I | IEM paster :  |
| cype of a | anna 15 bits  |
|           | > 32 bits   |

Figura VI.46. Última etapa.

La zona extraída depende del código elegido para seleccionarla. Por ejemplo, el código 1 corresponde a la zona negra de la imagen VI.44. Por otro lado, se atribuye un valor de altitud a la zona no extraída; en el presente caso, 810. El resultado aparece en la figura VI.47.

Si el código elegido es igual a 255 (zona blanca de la imagen VI.44), la zona extraída corresponde a la región ubicada alrededor del edificio volcánico (Fig. VI.48)



Figura VI.47. Extracción de la parte superior del volcán.



Figura VI.48. Extracción de la región externa.

La base puede utilizarse para calcular el volumen del cono volcánico (ver el programa **Dif\_DEM\_3D\_V2.exe**). El código utilizado se menciona en el archivo descriptivo (Fig. VI.49).

## k) Sombra.exe

El programa **Sombra.exe** calcula el sombreado en relación con la posición del Sol (azimut y elevación). En la actualización más reciente, el algoritmo toma en cuenta MDE de tipo *raster* o *ascii* (Fig. VI.50).

De la misma manera, el programa genera imágenes de tipo *raster*, *bitmap* o *ascii* (Fig. VI.51).



Figura VI.49. Archivo descriptivo.



Figura VI.50. Elección del MDE y de su tipo (ascii o raster).

| <pre>Pixel size (decimal value in meters) ? 10 Sum position :     Azimuth ? 45     tlevation ? 35 Resulting File : 0&gt; Taking into account the generic name chichon_10 meters ? 1&gt; Creation of a new File ? 1 Name of the File to be created (without any extension) ? chichon_10m Format :     0&gt; bataap     2&gt; bataap     2&gt; bataap     0 </pre>     |  |
|--|--|
| <pre>Sun position :<br/>Aritem P 45<br/>Elevation ? 35<br/>Resulting File :<br/>0&gt; Taking into account the generic name chichon_10_meters ?<br/>1&gt; Creation of a new File ? 1<br/>Name of the File to be created (without any extension) ? chichon_10m<br/>Format :<br/>0&gt; btrasp<br/>2&gt; btrasp<br/>0&gt; btrasp<br/>0&gt; btrasp<br/>0&gt; btrasp</pre> | Pixel size (decimal value in meters) ? 10                            |
| <pre>AImuth 2 45 Elevation ? 35 Resulting File : 0&gt; Taking into account the generic name chichon_10_meters ? 1&gt; Creation of a new File ? 1 Name of the File to be created (without any extension) ? chichon_10m Format : 0&gt; totage 2&gt; bottage 2&gt; bottage 0</pre>  | Sun position :   |
| Elevation ? 35<br>Resulting File :<br>0 > Taking into account the generic name chichon_10_meters ?<br>1> Creation of a new File ? 1<br>Name of the File to be created (without any extension) ? chichon_10m<br>Format :<br>0> btraep<br>2> btraep<br>0> btraep<br>0> btraep  | Azimuth ? 45   |
| Resulting File :<br>0> Taking into account the generic name chichon_10_meters ?<br>1> Creation of a new File ? 1<br>Name of the File to be created (without any extension) ? chichon_10m<br>Format :<br>0> trater<br>1> bitmap<br>2> bitmap<br>0> bitmap   | Elevation ? 35   |
| <pre>0&gt; Taking into account the generic name chichon_10_meters ? 1&gt; Creation of a new file ? 1 Name of the File to be created (without any extension) ? chichon_10m Format : 0&gt; batter 1&gt; batter 2&gt; batter 0&gt; batter 0&gt; batter</pre>  | Resulting File :   |
| <pre>1&gt; Creation of a new file ? 1 Name of the File to be created (without any extension) ? chichon_10m Format: 0&gt; raster 1&gt; btmap 2&gt; btmap 0 0</pre>  | 0> Taking into account the generic name chichon 10 meters ?          |
| Name of the File to be created (without any extension) ? chichon_10m<br>Format :<br>0> raster<br>1> btmap<br>2> ascli<br>0   | 1> Creation of a new File ? 1  |
| Format : 0> raster<br>1> bitmap<br>2> ascii<br>0   | Name of the File to be created (without any extension) ? chichon 10m |
| Format :<br>1 ====> raster<br>1 ====> bitmap<br>2 ====> ascii<br>0   | 2010/00/   |
| 0> naster<br>1> bitmap<br>2> ascii<br>0  | Format :   |
| 1 ===> bitmap<br>2 ===> ascii<br>ə   | 0> raster  |
| 2> ascii<br>e  | 1 ====> bitmap   |
| 8  | 2> ascii   |
|  | 9  |

Figura VI.51. Definición de los parámetros y registro del resultado.

En función de la posición del Sol que se puede definir sin tomar en cuenta la latitud, se revelan estructuras que no aparecen en las imágenes de satélite. Por ejemplo, en México, el Sol nunca se posiciona en el hemisferio norte (boreal o septentrional), de tal manera que las estructuras que tienen una orientación NW-SE o bien NE-SW no se disciernen fácilmente.

Por otro lado, la manipulación de los valores de azimut y elevación permite subrayar diversos accidentes estructurales (Fig. VI.52).

Así, en el ejemplo reportado en esa figura, se observa un desplazamiento lateral este-oeste que afecta el curso de los riachos, revelando la existencia de una falla transcurrente (o de desgarre) de dirección sinistral (o direccional izquierda).



Figura VI.52. Sombreados del MDE del volcán Acoculco, Puebla, generado a partir de datos vectoriales del INEGI (Chignahuapan, E14B13). Tamaño del píxel: 15 metros. A. Acimut 13, Elevación: 18. B. Acimut 109, Elevación 28. C. Acimut 202, Elevación: 24 y D. Acimut 340, Elevación: 17.

#### l) Stereo.exe

El programa **Stereo.exe** que no se menciona en el curso del libro corresponde a un módulo ejecutable muy útil que permite generar pares estereoscópicos a partir de un MDE y de una imagen que corresponde al resultado de un tratamiento (pendientes, aspecto, NDVI, etc.) o a datos exógenos (por ejemplo, mapa geológico, divisiones administrativas, etc.) que se sobrepone en el MDE.

En su forma actual, el programa toma solamente en cuenta imágenes de 8 bits (*raster* o *bitmap*). Si se requiere utilizar imágenes de color (24 bits), se necesita separar anteriormente la imagen de 24 bits en tres imágenes de 8 bits (rojo, verde y azul), hacer el tratamiento y después juntar los tres pares de resultado (imagen de izquierda e imagen de derecha).

El programa pide en primer lugar (Fig. VI.53), el nombre y el tipo de Modelo Digital de Elevación; si se trata de un MDE *raster*, es menester precisar el número de bytes (2 o 4), el tamaño del píxel y las unidades utilizadas en la escala dinámica (metros, decímetros, centímetros o milímetros).

En el caso de la abertura de datos ascii, la escala está en metros decimales.

Después (Fig. VI.54), se requiere el nombre y el tipo de la imagen sobrepuesta en el MDE. Ya que se utiliza solamente imágenes de 8 bits, el programa propone tres formatos diferentes (*raster, bitmap* o *ascii*).



Figura VI.53. Inicio del programa.



Figura VI.54. Proceso.

Las dos imágenes que constituyen el par estereoscópico se registran con el formato *raster* o *bitmap*.

El ángulo de visión depende del tamaño del píxel. Para un tamaño de 20 o 30 metros, se recomienda utilizar un ángulo de 15°. Pero es posible definir valores más fuertes; lo mejor consiste en hacer pruebas visualizando el resultado.

El programa genera dos imágenes: izquierda y derecha. Como lo muestra la figura VI.55, se indica en la esquina superior izquierda que la primera imagen se debe tomar en cuenta como imagen de izquierda utilizando el estereoscopio; al inverso, la indicación se encuentra en la esquina superior derecha.

En la figura VI.56, se reporta un ejemplo de tratamiento.

#### m) Visib.exe

La noción de visibilidad es un punto importante que puede servir en diferentes oportunidades como, por ejemplo, la definición de los mejores puntos donde se puede implementar una red de transmisión óptica, la visión que se puede tener de un paisaje a partir de una carretera o una ruta de ferrocarril.

La base algorítmica es la siguiente:

A partir de cada punto de un MDE, se calcula la distancia y la diferencia de altitud, entre este punto y cada uno de los píxeles de la imagen.

El cálculo se hace entre el píxel estudiado y cada uno de los píxeles de la imagen. En cada sección, se define el valor del intervalo que permite pasar, píxeles por píxeles, del punto inicial al punto final. Siguiendo la línea recta que une estos puntos, se encuentre o no se encuentre un valor de altitud más alto que el valor resultado de la aplicación del intervalo. En el primer caso, esto significa que la visión no alcanza el punto final de la línea (Fig. VI.57B). En el segundo caso, el



Figura VI.55. Información reportada sobre las imágenes resultantes.



Figura VI.56. Ejemplo de resultado.



Figura VI.57. Condiciones de A.- Visibilidad. B.- Ausencia de visibilidad. Nota: en negro, la progresión regular de la altitud entre el punto inicial y el punto terminal; en rojo, las altitudes de los píxeles del MDE original que constituyen la línea recta

punto final de la línea se puede ver desde el punto inicial (Fig. VI.57A). En la matriz donde se consignan los resultados con valores reales, la celda correspondiente a la posición del punto inicial se incrementa.

Terminado el tratamiento, se transforma la matriz con valores reales en una imagen en tono de gris, aplicando la fórmula siguiente:

$$P_{(i,j)} = (V_{(i,j)} / Nbp) \times 100$$

donde i y j son las coordenadas de un punto, P el valor en tono de gris, V el valor resultado del incremento de las celdas de la matriz y Nbp el número total de píxeles en la imagen.

En una futura versión del programa, se prevé definir un radio máximo de visibilidad a partir de un punto de tal manera que el número de píxeles *Nbp* corresponda a la superficie generada en función del valor de este radio. Por otro lado, la visibilidad máxima en una dirección no podrá sobrepasar el valor del radio.

El tiempo requerido para hacer este cálculo es muy elevado. Por ejemplo, en el caso del Modelo Digital de Elevación de la figura VI.48, se necesitaría hacer un tratamiento de 172 horas para realizar el barrido completo de un archivo de 1900 líneas sobre 2720 columnas si se tomara en cuenta la totalidad de los píxeles (5,168,000).

Por esta razón, después de definir el nombre del MDE, su tipo y el nombre de la imagen resultante (Fig. VI.58), el algoritmo propone reducir el tamaño del MDE original (Fig. VI.59) utilizando un coeficiente que aumenta el tamaño del píxel; por ejemplo, un coeficiente de 4 reduce el tiempo de cálculo a 10 horas y 51 minutos (el tamaño del archivo será de 475 líneas y 680 columnas); un coeficiente de 20 reduce el tiempo de cálculo a 27 minutos (archivo de 95 líneas sobre 136 columnas).

La realización de esta transformación necesita utilizar un coeficiente que corresponda a un divisor de las líneas y de las columnas. El programa controla el valor del coeficiente y pide otro valor si ese coeficiente no es un divisor del número de líneas, del número de columnas o ambos. También el usuario tiene la posibilidad de recortar el MDE utilizando el programa **Extract.exe** (Parrot, 2003) o el software **EXTRACT\_V2** (Parrot, 2011).

Una vez definido el valor del coeficiente de reducción, así como un coeficiente de suavización (Fig. VI.60) que permite disminuir el efecto anguloso del resultado, sobre todo cuando se utiliza un coeficiente de reducción elevado, el tratamiento empieza. Al final del barrido, se pide si se necesita o no una normalización entre 0 y 255 de los valores de visibilidad cuya escala se indica antes (en este caso, 0 hasta 41% de la zona total).

|  | ***************************************   |                |
|--|---|----------------|
| *  |   | *              |
| ×  | VISIB   | *              |
| ×  |   | *              |
| *  |   | *              |
| *  |   | *              |
| •  |   | •              |
| *  | JF. PARROT  |                |
| *  | (19/06/2003)  | *              |
| ×  |   | *              |
| ×  |   | *              |
| ******   | ***************************************   | ****           |
|  |   |                |
| 1>   | Francais  |                |
| 2>   | Espanol   |                |
| 3>   | English   |                |
| 3  |   |                |
|  |   |                |
| Name of  | the File Folder located in the Directory C:\images  | : bar          |
| Name of<br>Name of                                   | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEM File (without any extension _n2.raw or _n4.raw)   | : bar<br>)? mt |
| Name of<br>Name of<br>DEM Form                       | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEM File (without any extension _m2.raw or _m4.raw)<br>mat :  | : bar<br>)?mt  |
| Name of<br>Name of<br>DEM Form                       | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEM File (without any extension _m2.raw or _m4.raw)<br>net :<br>0 ====> 16 bits   | ; bar<br>)?mt  |
| Name of<br>Name of<br>DEM Form                       | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEM File (without any extension _m2.raw or _m4.raw)<br>mat :<br>9 ====> 16 bits<br>1 ====> 2 bits   | : bar<br>)?mt  |
| Name of<br>Name of<br>DEM Form                       | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEM File (without any extension _m2.raw or _m4.raw)<br>net :<br>6 ====> 16 bits<br>1 ====> 32 bits<br>1   | : bar<br>)?mt  |
| Name of<br>Name of<br>DEM Form                       | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEM File (without any extension _m2.raw or _m4.raw)<br>net :<br>0 ====> 16 bits<br>1 ====> 32 bits<br>1<br>FILE MAS :   | : bar<br>)?mt  |
| Name of<br>Name of<br>DEM Form<br>THE DEM            | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEH File (without any extension _m2.raw or _m4.raw)<br>mat :<br>0 ====> 16 bits<br>1 ===> 32 bits<br>1<br>FILE HAS :<br>1000 LINES  | : bar<br>)?mt  |
| Name of<br>Name of<br>DEM Form<br>THE DEM            | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEM File (without any extension _m2.raw or _m4.raw)<br>net :<br>0 ====> 16 bits<br>1 ====> 32 bits<br>1 =====> 32 bits<br>1 ======> 32 bits<br>1 ======> 32 bits<br>1 ======> 32 bits<br>1 ==================================== | : bar<br>)?mt  |
| Name of<br>Name of<br>DEM Form<br>THE DEM<br>Resulti | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEM File (without any extension _n2.raw or _n4.raw)<br>met :<br>0 ====> 16 bits<br>1 ====> 32 bits<br>1 ====> 32 bits<br>1 ====> 32 bits<br>1 ====> 32 bits<br>1 ====================================   | : bar<br>)?mt  |
| Name of<br>Name of<br>DEM Forn<br>THE DEM<br>Resulti | the File Folder located in the Directory C:\images<br>DEH File (without any extension _m2.raw or _m4.raw)<br>net :<br>0 ====> 32 bits<br>1 ====> 32 bits<br>0 ====> 32 bits<br>1 ====> 32 bits<br>0 ====> 32 bits<br>1 =====> 32 bits<br>0 ====> 32 bits<br>1 ====================================   | : bar<br>)? mt |

Figura VI.58. Inicio del programa.

| Name of the File to be created (without any extension) ? mt_4  |
|--|
| The treatment will take 172 h 16 m<br>In order to reduce this time   |
| Use a coefficient of reduction (4 at least) 4  |
| Applying this coefficient, the computing time<br>will be approximatively : 10 h 51 m   |
| 0> starting the computation<br>1> defining a new coefficient<br>1  |
| Use a coefficient of reduction (4 at least) 20   |
| Applying this coefficient, the computing time will be approximatively : 0 h 27 m   |
| 0> starting the computation<br>1> defining a new coefficient<br>0  |
| Smooting coefficient :<br>Note: in relation to the reduction coefficient chosen<br>the minimum recommended smoothing coefficient must be equal to 20 |
| Smooting coefficient value ?   |

Figura VI.59. Definición de las variables.

| Smooting coefficient value ? 20 |
|---------------------------------|
| Treatment. Be patient !         |
| line 95 column 100              |
| Visibility Min 0 Max 41         |
| Normalization                   |
| 0> yes                          |
| 1> no                           |
| 0                               |
| Saving                          |
| line 1250                       |

Figura VI.60. Tratamiento y Resultado.

La imagen resultante (Fig. VI.61) se compone de cuadrantes cuyo tamaño va a depender del coeficiente utilizado, pero la transformación del MDE original utilizada en el programa es suficientemente precisa para que el resultado sea significativo.

De hecho, el algoritmo modifica al último paso del programa la imagen utilizada para realizar el cálculo en una imagen resultante que tenga el tamaño del MDE de entrada.

Así, se obtiene una representación global de la visibilidad dentro de una región.

## n) Visib\_P.exe

Al contrario del caso anterior, este módulo realiza el cálculo de la visibilidad tomando en cuenta la totalidad de los píxeles que cubren la imagen y el Modelo Digital de Elevación (MDE), el programa **Visib\_P.exe** define la visibilidad a partir de un punto en todas las direcciones del espacio.

Las principales líneas del algoritmo son las mismas.

Cuando se abre el programa, como en el caso anterior, el programa pide la locación, el nombre y el tipo del MDE (Fig. VI.62). Indica el tamaño del MDE y también pide el nombre de la imagen de salida que tiene la extensión *\_visib\_p.raw*.

En el archivo descriptivo adjunto que tiene la extensión  $\_visib\_p.txt$  se reporta el número de líneas y columnas, el número de bytes (aquí 1), la dinámica y el tamaño del píxel. También se reportan las coordenadas *i*, *j* del punto de observación, así como el valor del fondo (0 o 255) de la imagen binaria.

Estos parámetros se definen en el curso del tratamiento (ver Fig. VI.63). El proceso empieza después de definir el valor que el usuario quiere dar al fondo. La salida del programa se produce cuando se acaba la lectura de todas las líneas.



Figura VI.61. Visibilidad en algunos barrancos de la Ciudad de México. A. Modelo lídar sombreado. B. Visibilidad global (de baja en azul hasta alta en rojo).



Figura VI.62. Inicio del programa.



Figura VI.63. Parámetros y Tratamiento.

La figura VI.64 ilustra un tratamiento que se hizo en la región de la barranca del río Magdalena (Ciudad de México).

El punto de referencia (línea 475, columna 1010) se encuentra en la zona del parteaguas, un área de alta visibilidad (41% en la figura VI.64).



Figura VI.64. Visibilidad a partir del punto en estudio.

# Lista alfabética de los módulos ejecutables

Liga de descarga: https://www.geografia.unam.mx/geoigg/investigacion/lage/ Metodos\_espacial/parrot5.html



| Programa | Nombre                      | Autores                             | Función  |
|----------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| <b>~</b> | Basic_Level_<br>Calculation | Parrot (2019)                       | Este programa reemplaza<br>los valores nulos por el<br>valor mínimo del MDE.   |
| <u>4</u> | Brod5_mx                    | Parrot (2017)                       | Creación de una imagen<br>de 4 bytes con la altitud<br>de las curvas de nivel<br>(a partir de la imagen<br>de las curvas en tonos<br>de gris y la tabla de<br>correspondencia) |
|          | Cloud_sorting_xyz           | Parrot (2013)<br>Actualización 2019 | Generación de modelos y<br>transformación del MT<br>provisorio.  |
|          | Crear_Tabla                 | Parrot, Ramírez-<br>Núñez (2012)    | Creación de una tabla de<br>correspondencia entre los<br>tonos de gris y la altitud<br>(en metros, decímetros,<br>centímetros, etc.)   |
|          | Cut_xyz_zone                | Parrot, Ramírez-<br>Núñez (2018)    | Extracción de una zona<br>dentro de un archivo xyz<br>y creación del archivo xyz<br>de extracción.   |

| Programa | Nombre                   | Autores   | Función   |
|----------|--------------------------|---|---|
|          | Dem_Lidar                | Parrot (2013)   | Generación de modelos<br>de elevación a partir de<br>una nube de puntos.                            |
|          | Dem_Mask                 | Parrot (2018)   | Selección de zonas en<br>un modelo digital de<br>elevación  |
|          | Dem_resamp               | Parrot (2003)<br>Actualización 2020                                     | Remuestreo de un<br>Modelo Digital de<br>Elevación  |
|          | Dif_dem                  | Parrot (2006)<br>Actualización 2019                                     | Cálculo de la diferencia<br>de altitud entre 2 MDE<br>(absoluta, negativa,<br>positiva)             |
|          | Dif_dem_3d_<br>roughness | Parrot (2006)<br>Actualización Parrot,<br>Ramírez-Núñez (2017-<br>2018) | Cálculo de la rugosidad<br>como relación superficie<br>2D-3D  |
|          | Dif_dem_3d_v2            | Parrot (2006)<br>Actualización Parrot,<br>Ramírez-Núñez (2017)          | Cálculo del volumen de<br>la diferencia de altitud<br>entre 2 MDE (absoluta,<br>negativa, positiva) |
| 2        | Dilat_curves             | Taud, Parrot (1997)<br>Actualización Parrot<br>(2017)                   | Generación del Modelo<br>Digital de Elevación por<br>dilatación de curvas.                          |
| <b>*</b> | Elim_pit                 | Parrot (2019)   | Este algoritmo elimina<br>en el MDE valores<br>considerados como "pits".                            |
| K        | Extract                  | Parrot (2003)<br>Actualización 2019                                     | Extracción de zonas en<br>una imagen o MDE.   |
|          | Extract_courbes4         | Parrot (2003)<br>Actualización 2019                                     | Extracción de las curvas<br>de nivel  |
|          | Fast_Ilum                | Parrot (2005)   | Iluminación durante n<br>días   |

| Programa     | Nombre                                   | Autores   | Función   |
|--------------|--|---|---|
|              | Geol_Plan                                | Parrot (2004)<br>Actualización 2016                   | Traza de la intersección<br>de los planos de falla o de<br>capas geológicas con el<br>MDE.                      |
| 6            | Gorman                                   | Parrot, Taud (1991)<br>Actualización<br>Parrot (2020) | Esqueletización de una<br>forma utilizando el<br>algoritmo de O'Gorman<br>(1990)                                |
|              | Hiatus                                   | Parrot (2012)<br>Actualización 2019                   | Eliminación de los hiatos<br>en las curvas de nivel.  |
| log<br>Slope | Log_Slope                                | Parrot (2012)<br>Actualización 2020                   | Cálculo de la pendiente<br>logarítmica. Estudio de<br>zonas con pendientes<br>débiles.                          |
| L'í          | Net_curve2                               | Parrot (2003)<br>Actualización 2019                   | Eliminación, en las<br>curvas de nivel, de los<br>pixeles de esquina, para<br>obtener una curva de<br>camino 8. |
| È,           | Net_curv_final                           | Parrot (2004)   | Ebarbulación  |
| Str.         | New_Dissec                               | Parrot (2002)<br>Actualización 2020                   | Cálculo de la longitud<br>de la red fluvial y de la<br>densidad de disección                                    |
|              | New_fractal_<br>drainage_analysis_<br>v2 | Parrot, Ramírez-<br>Núñez (2013)                      | Diferenciación de<br>meandros y red<br>dendrítica. Índice TACO<br>y dimensión fractal.                          |
| 1            | Newmiel_v2                               | Parrot (2012)   | Generación del Modelo<br>Digital de Elevación por<br>medio de la interpolación<br>multidireccional.             |
|              | Param_vol4                               | Parrot (2004)<br>Actualización 2018                   | Definición y cálculo de<br>parámetros característicos<br>de un edificio volcánico.                              |
|              | Rio4                                     | Parrot (2002)<br>Actualización 2018                   | Extracción de la red de<br>drenaje.   |

| Programa        | Nombre          | Autores                          | Función  |
|-----------------|-----------------|----------------------------------|--|
|                 | RMS_Error       | Parrot, Ramírez-<br>Núñez (2014) | Cálculo de la media<br>cuadrática.   |
| RMS<br>rough    | RMS_Roughness   | Parrot, Ramírez-<br>Núñez (2014) | Cálculo de la rugosidad<br>a partir de la media<br>cuadrática.   |
| Rms             | RMS_Slope       | Parrot (2012)                    | Cálculo de la media<br>cuadrática de la<br>pendiente.  |
|                 | Rotation_dem    | Parrot (2018)                    | Rotación horaria y<br>antihoraria de un MDE  |
|                 | Rotation_xyz    | Parrot (2018)                    | Rotación horaria y<br>antihoraria de los valores<br>xyz.   |
| <b>1</b>        | Search_Val      | Parrot (2019)                    | Búsqueda de los pits y<br>creación de un bitmap.   |
|                 | Select_Dem_Zone | Parrot (2016)                    | Selección de una zona en<br>un MDE.  |
| <u>الله</u>     |                 | Parrot (2005)                    | Generación de imágenes   |
| <b>Č</b> .,     | Sombra          | Actualización 2019               | del sombreado.   |
| <u>G</u>        | Stereo          | Parrot (2007)                    | Creación de pares<br>estereoscópicos a partir<br>de MDE.   |
| $\frac{1}{3^2}$ | Stream_Order    | Parrot (2008)                    | Atribución de los órdenes  |
|                 |                 | Actualización 2019               | fluvial.   |
|                 | Sum_cn_ha_dxf   | Parrot (2006)                    | Suma de los archivos<br>cn_dxf (curvas de nivel)<br>y ha_dxf (cuerpos de<br>agua) y generación de un<br>archivo único (cn_ha_<br>dxf). |

| Programa | Nombre                            | Autores            | Función  |
|----------|-----------------------------------|--------------------|--|
| +<br>DXF | Sum_dxf_v2                        | Parrot (2005)      | Suma de varios archivos<br>dxf.  |
|          | Sum_jfp                           | Parrot (2012)      | Suma de varios archivos<br>de tipo jfp.  |
|          | Surface2                          | Parrot (2003)      | Este algoritmo elimina   |
| $\sim$   | Surface2                          | Actualización 2019 | considerados como "pits".  |
| 20 30    | Surf_2D_3D_jfp                    | Parrot (2019)      | Búsqueda de los pits y<br>creación de un bitmap.   |
|          | Terrain_Analysis                  | Parrot (2020)      | Cálculo de varios<br>atributos en una ventana<br>móvil circular  |
|          | Transf_ascii_xyz_<br>dem_lidar_v2 | Parrot (2013)      | Generación de modelos<br>a partir de los datos<br>del INEGI con 5 m de<br>resolución.  |
|          | Transf_dif_dxf_jfp                | Parrot (2014)      | Transformación<br>de archivos dxf de   |
|          |                                   | Actualización 2021 | varios tipos (Polyline,<br>Lwpolyline, etc.) en un<br>archivo jfp.   |
| DXF +    | Transf_dxf_v2                     | Parrot (2005)      | Transformación de<br>un archivo dxf en una<br>imagen en tonos de gris<br>de las curvas de nivel y<br>creación de una tabla de<br>correspondencia tonos de<br>gris / altitud. |
|          | Transf_ha_dxf_jfp                 | Parrot (2012)      | Transformación de<br>archivos ha_dxf en un<br>archivo jfp.   |
| JFP      | Transf_jfp_brod                   | Parrot (2012)      | Creación de una imagen<br>de 4 bytes con los valores<br>de altitud de las curvas<br>de nivel (a partir de datos<br>jfp)  |

| Programa | Nombre             | Autores       | Función   |
|----------|--------------------|---------------|---|
| ě,       | Transf_jfp_extract | Parrot (2017) | Transformación de<br>un archivo jfp en una<br>imagen en tonos de gris<br>de las curvas de nivel y<br>creación de una tabla de<br>correspondencia tonos de<br>gris / altitud.<br>Extracción a partir de<br>coordenadas UTM |
| JFP      | Transf_jfp_raster  | Parrot (2012) | Transformación de<br>un archivo jfp en una<br>imagen en tonos de gris<br>de las curvas de nivel y<br>creación de una tabla de<br>correspondencia tonos de<br>gris / altitud.  |
| <u>}</u> | Visib              | Parrot (2003) | Cálculo de la visibilidad a<br>partir de todos los puntos<br>de un MDE.   |
| 25       | Visib_p            | Parrot (2003) | Cálculo de la visibilidad<br>a partir de un solo punto<br>de un MDE.  |
|          | xyz_stick          | Parrot (2018) | Este algoritmo pega<br>diferentes archivos con<br>extensión xyz.  |

# Referencias

- Borgefors, G. (1984). Distance transformations in arbitrary dimensions. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 27(3): 321-345.
- Braile, L. (1978). Comparison of four random to grid methods. *Computer & Geosciences*, 4: 341-349.
- Delaunay, B. N. (1934). Sur la sphère vide. *Bulletin de l'Académie des sciences URSS class Sci. Math.*, 793-800.
- De Masson d'Autume, G. (1978). Construction du modèle numérique d'une surface par approximations successives. Application aux modèles numériques de Terrain (MNT). *Bulletin de la Société Française de Photogrammetrie et de Télédétection*, n° 71-72, 33-41.
- Dubrule, O. (1984). Comparing splines and kriging. Computers & Geosciences, 10, 327-338.
- Duchon, J. (1975). Fonction « spline » associée avec l'observation d'une fonction aléatoire. *Comptes Rendus Académie des Sciences*, Paris, 280, 949-951.
- Duchon, J. (1976). Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. *RAIRO Analyse Numérique*, 10, 5-12.
- Felicisimo, A. M. (1994), Parametric statistical method for error detection in digital evaluation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 49, no. 4, pp. 29-33.
- García-Zúñiga F., Parrot J.-F. (1998). Analyse tomomorphométrique d'un édifice volcanique récent : Misti (Perou). *CR Acad. Sci.*, Vol. 327, 457-462.
- Laslett, G.M., McBratney A.B., Pahl, P.J., Hutchinson, M.F. (1987). Comparison of several spatial prediction methods for soil pH, *European Journal of Soil Science*, 138(2): 325-341.
- Matheron, G. (1969). Le krigeage universel. Cahiers de Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, fasc. 1.
- Matheron, G. (1981). Splines and kriging: their formal equivalence. Down to Earth Statistics: solutions looking for geological problems. Syracuse University, *Geology Contribution* (8): 77-95.
- Mitas, L., Mitasova, H. (1988). General variational approach to the interpolation problem. *Computers and Mathematics with Applications*, 16, 983 992.

- Mitasova H., Hofierka J. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*, 25, 657-669.
- Mitasova H., Mitas, L. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: I. theory and implementation, *Mathematical Geology*, 25, 641-655.
- O'Gorman, L. (1990). K × K Thinning. Journal of Computer Vision, Graphics and Image Processing. 51(2), 195-215.
- Oliver, M.A., Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographic information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(3): 313-332.
- Parrot, J.-F. (1993). Programa Newmiel\_V2.exe (inédito y reportado en Parrot, 2016).
- Parrot, J.-F. (2002). Programa Newmiel\_V2.exe (actualización inédita y reportada en Parrot, 2016).
- Parrot, J.-F. (2006). Software TLALOC (Tridimensional Landscape Analysis. Local Operating Computation). Numero de certificado UNAM: 03-2006-092112451400-01.
- Parrot, J.-F. (2007). Tri-dimensional parameterisation: an automated treatment to study the evolution of volcanic cones. *Géomorphologie*. 3, 37-47.
- Parrot, J.-F. (2010). Software FROG, UNAM. Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2010-012812384700-01.
- Parrot, J.-F. (2011). Software DEM\_Ascii. Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2011-120112060000-01.
- Parrot, J.-F. (2011). Software Binar\_V2. Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2011-120112041501-01.
- Parrot, J.-F. (2011). Software Extract\_V2. Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2011-120112005800-01.
- Parrot, J.-F. (2011). Software Pins\_V2. Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2011-120112060000-01.
- Parrot, J.-F. (2012). Software DEMONIO (Digital Elevation Models Obtained by Numerical Interpolating Operations). Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2012-120612205000-01.
- Parrot, J.-F., (2014). Software Índices\_V2. Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2014-022712173900-01.
- Parrot, J.-F., (2014). Software Density\_V2. Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2014-022712222200-01.
- Parrot, J.-F., (2014). Software FROG\_V2. Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2014-022712194900-01.
- Parrot, J.-F., (2015). Software BVS (Building, Vegetation and Soils). Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2015-121811590000-01.

- Parrot, J.-F., (2016). Paquete de Módulos Ejecutables de Tipo MS-DOS desarrollados en C++. Generación de Modelos Digitales de Elevación a partir de datos vectoriales. Certificado de registro INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2016-103110072200-01.
- Parrot, J.-F., (2018) Software Select Slices. Número de registro del certificado público de Derecho de Autor: 03-2018-011109492800-01.
- Parrot, J.-F., Ochoa-Tejeda, V. (2014). Generación de Modelos Digitales de Terreno raster. Método de digitalización. Segunda edición, *Geografía para el Siglo XXI, Serie Textos universitarios, Instituto de Geografía UNAM.*, 31 p. ISBN 978-607-02-5843-5.
- Parrot, J.-F., Reyes-Reyes, B. (2018). Forest\_fragmentation. Número de registro del certificado público de Derecho de Autor: 03-2018-013109524300-01.
- Parrot, J.-F., Ramírez-Núñez, C. (2013). Software MULTIDIM\_V2. Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2013-032113464200-01.
- Parrot, J.-F., Ramírez-Núñez, C. (2013). Software TACO (Tortuosity and Confluent Organization). Número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2013-111212561200-01.
- Parrot, J.-F., Ramírez-Núñez, C. (2017). Software COATL (City Organization Analysis Treatments Location). Certificado de registro INDA: 03-2017-090712400400-01.
- Parrot, J.-F., Ramírez-Núñez, C. (2018). Programa Cut\_xyz\_zone.exe (ver programas del Manual).
- Parrot, J.-F., Ramírez-Núñez, C. (2020). Parámetros morfológicos de la cuenca del río Magdalena (Cuenca de México) a partir de modelos digitales de superficie y terreno provenientes de LiDAR, *Terra Digitalis*, 4(1), 1-13, doi.org/10.22201/ igg.25940694.2020.1.68.153
- Parrot, J.-F., Taud, H. (1991). Gorman (módulo ejecutable desarrollado en Fortran).
- Parrot, J.-F., Taud, H. (2004). Modificaciones concernientes a la última versión del programa Newmiel\_V2.exe (programa de uso interno).
- Pettier, J-C., Camillerapp, J. (1993). Segmentation et représentation d'images de traits. [Research Report] RR-2066. <inria-00074606> 71.
- Taud, H., Parrot, J.-F. (1997). Programa Dilat\_curves.exe (primera versión ; reportado en Parrot, 2016).
- Taud, H., Parrot, J.-F. (2005). Measurement of DEM roughness using the local fractal dimension. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 327-338.
- Taud, H., Parrot, J.-F., Álvarez, R. (1999). DEM generation by contour line dilation. *Computers and Geosciences*, 25, 775-783.
- Tsai, V. (1993). Fast topological construction of Delaunay triangulation and Voronoi diagram. *Computers and Geosciences*, 19(10): 1463-1474.
- Voronoï, M. G. (1908). Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. *Journal Reine Angew. Math.*, 134, 198-287.

- Watson, D. F. (1981). Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoï polytopes. *The computer Journal*, 24(2): 167-172.
- Zhang, K., Chen, S.-C., Whitman, D., Shyu, M.-L., Yan, J., Zhang, C. (2003). A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 872-882.
- Zhang, K., Whitman, D. (2005). Comparison of three algorithms for filtering airborne Lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(3): 313-324.

# Datos adjuntos

- 1) Archivos dxf
  - a) Acapulco E14C57cn.dxf E14C57ha.dxf
  - b) Cuenca de México E14A29cn.dxf
    E14A39cn.dxf
    E14A49cn.dxf
    E14B21cn.dxf
    E14B31cn.dxf
    E14B41cn.dxf
  - c) Monarca E14A15cn.dxf E14A16cn.dxf E14A25cn.dxf E14A26cn.dxf E14A35cn.dxf E14A36cn.dxf
- 2) Archivos jfp
  - a) Monarca E14A15.jfp E14A16.jfp E14A25.jfp E14A26.jfp E14A35.jfp E14A36.jfp
  - b) Ori (Pico de Orizaba) cndxf.jfp

*Algorítmica de los módulos ejecutables del libro Geomorfología tridimensional para el análisis del relieve mexicano*, fue editado por el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Corrección de estilo: Raúl Marcó del Pont Lalli. Formación de galeras: Deyanira Ballesteros Bonola y Laura Diana López Ascencio. Algorítmica de los módulos ejecutables del libro Geomorfología tridimensional para el análisis del relieve mexicano

#### J.-F. Parrot

Muchos de los programas presentados en este manual han sido desarrollados durante aproximadamente 15 años. Estos desarrollos informáticos se inscriben en el cuadro del libro que concierne al análisis tridimensional del relieve mexicano. Espero que este trabajo sea de utilidad para la comunidad científica a nivel nacional e internacional. También, para que este manual se pueda usar como una herramienta de enseñanza, todos los módulos ejecutables descritos en las páginas siguientes, así como numerosos ejemplos de datos vectoriales en formato *dxf* o del tipo de nubes de punto provenientes de Lídar no procesados, se ponen a disposición del público.

Siguiendo un capitulo de introducción, un primer capitulo trata de la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) a partir de datos vectoriales. Para realizar la interpolación que genera el modelo, se presentan dos tratamientos originales que se detallan ampliamente: la Dilatación de curvas y la Interpolación multidireccional. En el capítulo tres, se toma en cuenta la generación de MDE a partir de nubes de punto (datos lídar o bien datos provenientes de drones), así como de datos de formato x,y,z. Al final de este capítulo, se presentan algunos tratamientos que permiten verificar la pertinencia de los resultados. En el capitulo cuatro, se trata del cálculo de parámetros a partir de la superficie de los MDE; los módulos ejecutables se distribuyen en dos temas: superficie y volumen. El capítulo cinco corresponde al estudio de la red fluvial y al significado de la información que ofrece para caracterizar el paisaje. Finalmente, en el capítulo seis se encuentra una serie de módulos ejecutables que ayudan a manejar la información espacial.

