
Construcción de modelos digitales de terreno para la evaluación de tierras

Construction of Digital Elevation Models for Land Evaluation

David G. Rossiter¹ y Maria Fernanda Rodríguez²

¹Asesor Técnico, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Dirección de Conservación y Evaluación de Tierras. Dirección actual: Cornell University, Department of Soil, Crop, & Atmospheric Sciences, Ithaca, NY 14853 EE UU.

²Especialista en Sistemas de Información, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Dirección de Conservación y Evaluación de Tierras

RESUMEN

Se comparan varios métodos de construir Modelos Digitales de Terreno puntuales con respeto a su adaptabilidad para la evaluación de tierras en áreas montañosas. Los parámetros considerados son la equidistancia entre curvas de nivel, la resolución de la malla y la generalización cartográfica. Se evaluaron los siguientes tipos de mapas derivados: elevaciones, pendientes, orientaciones y cuencas hidrográficas.

Palabras Clave: modelos digitales de terreno, sistemas de información geográfica, cuencas hidrográficas, evaluación de tierras

ABSTRACT

Various methods of constructing raster-based Digital Elevation Models (DEM) were investigated for their applicability to land evaluation in mountainous areas. The following parameters were compared: distance between contour lines, grid resolution, and cartographic generalization. The following derived maps were used for the evaluation: elevation, slope, aspect, and watershed.

Index words: digital elevation models, geographical information systems, watersheds, land evaluation.

INTRODUCCIÓN

Se puede definir un Modelo Digital de Terreno (MDT) como una representación digital de la variación continua del relieve en el espacio (Burrough, 1986; Rossiter, 1992). Siendo digital, el MDT puede ser usado por un Sistema de Información Geográfica (SIG) para derivar una variedad de mapas secundarios.

Los MDT y SIG considerado en este estudio son del tipo discreto o 'raster', es decir, que se divide el área a ser mapeada en celdas (pequeñas áreas cuadradas) que contienen cada una un solo valor para toda el área de la celda.

Los MDT son fundamentales para la evaluación de tierras en áreas montañosas, ya que muestran la elevación de cada celda sobre el nivel de mar, la cual afecta directamente su aptitud agroclimatólogica para varios usos. Del MDT el SIG puede calcular el grado de pendiente de cada celda, que es otra variable que por supuesto influye sobre los usos posibles de la tierra además de los factores físicos tales como las tasas de escurrimiento y erosión hídrica. Del MDT el SIG también puede calcular la orientación (el azimut) de cada celda y de ahí la delineación de las cuencas hidrográficas.

En Venezuela hasta la fecha, hay pocos ejemplos del uso de MDT en estudios de recursos naturales. Zinck y Valenzuela (1990) emplearon un MDT de un área de 16 km² en el valle del río Guarapiche, Edo. Monagas, como parte de un ejemplo de la aplicación del sistema Illwis a la geografía de suelos. Martelo y col. (1991) aplicaron un MDT en un estudio de zonificación agrícola de una franja N-S desde la península de Paraguaná hasta los llanos occidentales a una escala pequeña.

En Venezuela no existen los MDT a la venta pública, como si los hay en otros países, por ejemplo los Estados Unidos. Entonces, para emplear un MDT en un estudio dentro del territorio venezolano, el analista tendrá que construir su propio modelo. Este proceso no debe ser demasiado extenso, fastidioso o costoso, caso contrario no es práctico hacerlo.

El objetivo de este estudio fue determinar normas para la construcción de modelos de terreno para su uso en la evaluación de tierras en zonas montañosas, con el menor esfuerzo y costo, y con la mayor aplicabilidad a la tarea. Las normas a desarrollarse fueron de tres tipos: (1) intensidad de muestreo de datos de elevación (curvas de nivel), (2) resolución del mapa raster y (3) método de procesamiento. Los mapas derivadas del MDT a ser evaluados fueron de tres tipos: (1) elevación sobre el nivel del mar, (2) grado de pendiente y (3) cuenca hidrográfica.

MATERIALES Y METODOS

1. Sistema automatizado

Se emplearon los equipos de computación siguientes: (1) una microcomputadora tipo PC/AT, Procesador Intel 386DX/25, con coprocesadora matemática Intel; (2) una tabla digitalizadora modelo Summasketch II 12"x18" (Summagraphics Inc., Stamford CT EE UU) con una resolución de 0.025mm. El sistema operativo era MS-DOS 4.01 (Microsoft Inc., Redmond WA EE UU), con el manejador multitarea DesqView-386 V2.3 (Quarterdeck Office Systems EE UU).

Se emplearon los programas de computación siguientes: (1) el programa de digitalización vectorial ROOTS (Corson-Rikert 1990); (2) el SIG IDRISI (Eastman 1992). Estos fueron elegidos por su adaptabilidad al problema, por ser poco exigentes con respecto a equipo y por su bajo costo (\$1.500 y \$580, respectivamente) comparado con otros programas, estando así al alcance de investigadores o grupos de trabajo. IDRISI consiste en un juego de aproximadamente 100 módulos, de los cuales se usaron los siguientes:

Módulo	Propósito
COLOR	Desplegar un mapa raster
CONTRACT	Hacer más gruesa la malla de un mapa raster
FILTER	Suavizar un mapa raster
HISTO	Analizar la frecuencia de valores en un mapa
INITIAL	Crear un mapa raster en blanco
INTERCON	Hacer un MDT de curvas de nivel
LINERAS	Pasar líneas vectoriales a un mapa raster
OVERLAY	Combinar o sobreponer dos mapas raster
PLOT	Desplegar o imprimir mapas vectoriales
POLYRAS	Pasar polígonos vectoriales a un mapa raster
RECLASS	Reclasificar un mapa con nuevos valores
SURFACE	Calcular mapas de pendientes y orientaciones
WATRSBED	Determinar cuencas hidrográficas

2. Área de estudio

Se seleccionó un área de estudio (Figura 1) de 5km x 5km (2.500 ha) ubicada cerca de la Colonia Tovar en las cabeceras de los ríos Aragua y Tuy, Edo. Aragua, comprendida entre las coordenadas UTM 683000E - 688000E y 1146000N - 1151000N (zona 19). La zona está ubicada en la hoja Colonia Tovar (6747-III-SE) a 1:25.000, y la hoja Los Teques (6747) a 1:100.000 de Cartografía Nacional. El intervalo de elevación es 1080 a 2220msnm. La zona constituye una cabecera en forma de anfiteatro orientada hacia el sur, comprendiendo el cauce superior del río Atravesado o San Carlos (curso alto del río Aragua) que fluye hacia el sur en una garganta angosta entre laderas orientales y occidentales fuertes. Se escogió esta área por sus pendientes fuertes y complejas además de sus formas de relieve variadas, que son típicas de las cuencas altas del país. Además, existen dos estudios geomorfológicos (Aubert 1986, Jaimes 1986) del área, que describen su ambiente físico desde puntos de vista diferentes. Sobre el mapa 6747-III-SE aparecen las curvas principales, que tienen una equidistancia de 100msnm, además de las curvas secundarias, que tienen una equidistancia de 20msnm. Sobre el mapa 6747 aparecen las curvas principales, que tienen una equidistancia de 200msnm, además de las curvas secundarias, que tienen una equidistancia de 40m.

3. Digitalización de curvas de nivel 1:25.000

En varias oportunidades se registró el mapa 6747-III-SE con la tabla digitalizadora con cuatro puntos de control correspondientes a las esquinas del área de estudio. ROOTS calculó un error máximo de 3.5m para los puntos, y un error de ajuste máximo de 6.35m raíz del promedio cuadrado (RMS), siendo esta la precisión máxima del proceso de digitalización. Sin embargo, se especificó una tolerancia (distancia mínima entre puntos distintos a ser digitalizados) de 12.5m, que corresponde a 0.5mm sobre el mapa, basándose en los National Map Accuracy Standards (Anderson y Mikhail 1988, p. 42), que especifican que al menos el 90% de los puntos bien definidos en un mapa a la escala 1:25.000 tienen que ser determinados con una precisión mayor de 0.5mm.

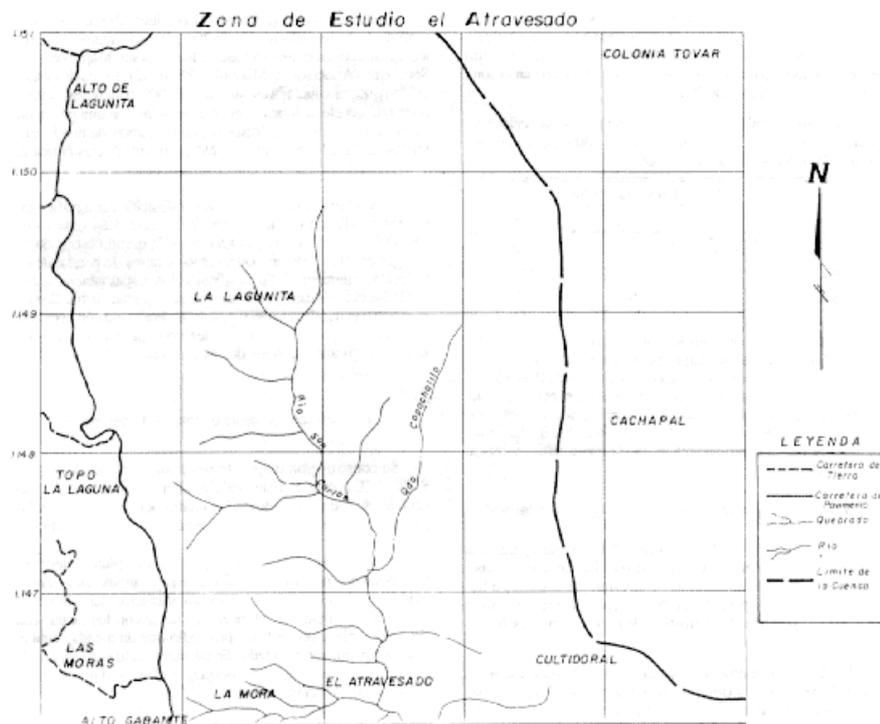


Figura 1. Zona de estudio "El Atravesado"

Se digitalizaron las curvas de nivel del mapa 6747-III-SE con ROOTS, programa el cual representa curvas con una serie de segmentos rectos entre puntos. Se especificó un punto cada vez que la cota cambiara de dirección, pero con una distancia mínima entre puntos de 12.5m. La resolución de la tabla corresponde a 0.625m a la escala 1:25.000, siendo 20 veces más precisa que la tolerancia, entonces la tabla no pudo introducir errores significativos.

Se prepararon tres mapas de curvas de nivel: (1) curvas principales y secundarias de los altos y bajos extremos (topes, salidas de ríos y filas de la zona de estudio); (2) curvas principales y secundarias; (3) curvas con una equidistancia de 40msnm, empezando en la cota 0, además de los extremos altos y bajos. El mapa (2) fue elaborado partiendo del mapa (1), agregando las curvas secundarias. El mapa (3) fue elaborado partiendo del mapa (2), borrando cada dos cotas. La siguiente tabla presenta los códigos y algunas características de estos mapas vectoriales.

Mapa	Equidistancia	Código	Cadenas	Vértices	Densid. vért/km	Intensidad ha/vért.
1	100	C100	117	1.624	65.0	1.539
3	40	C40	225	3.968	158.7	0.630
2	20	C20	440	7.447	297.9	0.336

El tiempo estimado de preparación de los mapas fue de 8 horas para el mapa C100, de 16 horas el mapa C40 y de 40 horas el C20. Se puede observar que la densidad de vértices, la cual está más o menos relacionada con el tiempo de digitalización, para el mapa C40 es el 53% del mapa C20, y que la relación para el mapa C100 es 22% del mapa C20 y 41% del mapa C40. Es decir, se ahorra la mitad del trabajo si se pueden digitalizar curvas cada 40m en vez de cada 20m, y casi 80% del trabajo si se puede digitalizar cada 100m. Cabe destacar que estos estimados de ahorro son bajos, porque el digitalizar el mapa en terreno accidentado con las curvas casi pegadas en el mapa es mucho más difícil si se tiene que digitalizar cada curva en vez de cada 2 o 5 curvas.

Se exportaron estos mapas desde ROOTS al formato vectorial IDRISI. Se quitaron las líneas con etiqueta cero (los límites del mapa) con el programa STRIP0 hecho por el autor para este propósito. Se hicieron tres mapas en blanco del área de estudio con INITIAL, a las siguientes resoluciones, las cuales forman una serie geométrica con razón 2:

Código	Resolución m lineal	Celdas/km	Celdas/km
R16	62.5	16	256
R32	31.25	32	1.024
R64	15.625	64	4.096

Se pasaron las curvas de nivel a las imágenes en blanco con LINERAS, creando así seis mapas. En los casos cuando más de dos líneas entraron en una celda, LINERAS tomó como el valor de elevación de la celda el valor de la última curva exportada de ROOTS, no estando esto bajo el control del analista. Esta situación es poco deseable.

A estas resoluciones se puede representar las siguientes pendientes máximas, sin que más de una curva entre en una celda:

Resolución	Equidistancia (m)		
	C100	C40	C20
R16	160	64	32
R32	320	128	64
R64	640	256	128

Esta tabla fue derivada de la relación: $(\text{Pendiente, \%}) = [(\text{equidistancia, m}) / (\text{resolución lineal, m})] * 100$ suponiendo el peor caso, cuando las cotas son paralelas a uno de los ejes de la malla raster. De esta tabla se puede esperar a priori que las combinaciones R16/C40, R16/C20 y R32/C20 no serían adecuadas para mapas de pendientes, dado que en la zona predominan pendientes de 30 a 120%.

La siguiente tabla muestra el porcentaje de las celdas de cada mapa que tuvieron un valor de elevación después que se pasaron las curvas de vector a raster

Resolución	Equidistancia (m)		
	100	40	20
R16	29.7	64.5	88.8
R32	14.5	33.5	60.0
R64	13.9	16.6	32.7

Valores altos, como en los casos R16/C20, R16/C40 y R32/C20 implican que no había espacio entre curvas de nivel. Valores bajos, como en los casos R64/C100, R64/C40 y R32/C100 implican que hay mucho espacio entre curvas, lo que hace menos preciso la interpolación. A priori las mejores combinaciones son R16/C100, R32/C40 y R64/C20. En estas combinaciones la equidistancia se ajusta mejor a la resolución de la malla.

4. Preparación y análisis de modelos digitales de terreno

Se calcularon seis MDT con INTERCON, uno para cada mapa de curvas de nivel. Este proceso es bastante lento sobre imágenes finas, y aún más lento si hay muchos espacios a llenarse. Los tiempos de computación variaron entre aproximadamente 20 minutos (R16/C20) a seis horas (R64/C100).

INTERCON interpola entre curvas de la siguiente manera (EASTMAN 1992). Primero, pide del analista las elevaciones de las cuatro esquinas de la imagen, que se estiman del mapa topográfico. Con estos cuatro valores el programa construye perfiles unidimensionales de los cuatro límites de la imagen.

Luego, barre la imagen en los sentidos E-O, N-S, NE-SO y SE-NO, calculando para cada celda que no tenga una elevación asignada su elevación basada en la pendiente en el sentido de búsqueda, interpolando linealmente entre las celdas con valores que se encuentran próximas en el sentido de búsqueda.

Se desplegaron los MDT en plano y perspectiva, notando su apariencia general y cualquier anomalía. (Figura 2) Se comparó el efecto sobre el MDT de la equidistancia del mapa original a cada resolución con OVERLAY, restando el MDT hecho con curvas de 40m o 100m, según el caso, del MDT hecho con curvas de 20m, considerando esto como lo más preciso. Se desplegaron los mapas de diferencias de elevación, observando cualquier patrón espacial. Se computaron los histogramas de las diferencias, notando su forma, y se clasificaron las diferencias en las siguientes clases de error:

1 : (10m dif. +10m)

2 : (20m dif. 10m) o (+10m dif. +20m)

3 : (40m dif. 20m) o (+20m dif. +40m)

4 : (dif. 40m) o (dif. +40m)

Estas clases corresponden a (1) la mitad, (2) una, (3) dos y (4) más de dos equidistancias de 20m, respectivamente. Se seleccionaron estas clases en base de los National Map Accuracy Standards (Anderson Y Mikhail 1988, p. 42), los cuales especifican que para mapas a escalas de 1:20.000, o menores, el 90% o más de las elevaciones sean determinadas con una precisión de +/- la mitad de la equidistancia de las curvas de nivel. Entonces, la clase 1 representa las celdas sin error de clasificación.

Para determinar el efecto de generalización cartográfica sobre los MDT, se hizo más gruesa la malla de R64 (una y dos veces) y R32 (una vez) con CONTRACT, usando la opción de agregar celdas, es decir, ponderar los valores de pendiente en las celdas a agregarse. Se clasificaron los mapas generalizados según las clases de equidistancia que se explican arriba. Se restó el mapa generalizado del mapa no generalizado con la misma resolución, y se tabuló el número de celdas que tuvieron una clasificación diferente con los dos métodos de construir el MDT.

5. Preparación y análisis de mapas de pendientes

Se construyeron mapas de pendientes de cada MDT con SURFACE opción 1. Este módulo calcula la pendiente, en porcentaje, de cada celda, desde los cuatro perfiles de tres celdas que crucen la celda para la cual se está calculando la pendiente.

Se desplegaron los mapas de pendiente en plano y perspectiva, notando su forma general y cualquier anomalía. Era muy evidente que los mapas contuvieran artefactos del Algoritmo (véase los resultados), entonces, se suavizaron los mapas con FILTER, aplicando un filtro promedio que da a cada celda el valor de pendiente promedio de las nueve celdas alrededor de la celda a ser valorizada. Se desplegaron estos mapas y se notaron sus apariencias.

Se comparó con OVERLAY el efecto sobre el mapa de pendientes suavizadas de la equidistancia del mapa original a cada resolución, restando el mapa hecho con curvas de 40m o 100m, según el caso, del mapa hecho con curvas de 20m. Se calcularon el promedio y desviación estándar de las diferencias.

Se clasificaron los mapas de pendiente según el sistema de Comerma y Arias (1971) de Capacidad de Uso, siendo éste el sistema más empleado en el país. Los límites entre clases de pendiente en este sistema son: 3, 8, 20, 45 y 60%. Se restó el mapa clasificado hecho desde curvas de 40m o 100m, según el caso, del mapa hecho con curvas de 20m, y se tabuló el número de celdas que tuvieron una clasificación diferente a las dos equidistancias.

Para determinar el efecto de la generalización cartográfica sobre los mapas de pendiente, se hizo más gruesa la malla de R64 (una y dos veces) y R32 (una vez) con CONTRACT, usando la opción de agregar celdas, es decir, ponderar los valores de pendiente en las celdas a agregarse. Se clasificaron los mapas generalizados según el sistema de Capacidad de Uso como se explica arriba. Se restó el mapa generalizado del mapa no generalizado con la misma resolución, y se tabuló el número de celdas que tuvieron una clasificación diferente con los dos métodos de construir el mapa de pendientes clasificadas.

6. Preparación y análisis de mapas de orientaciones

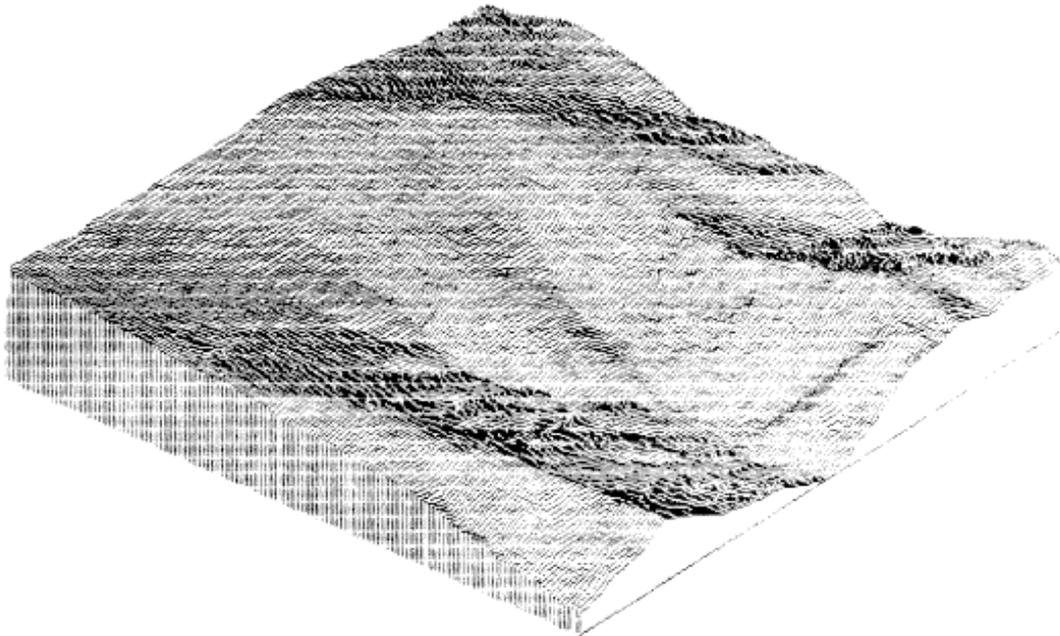


Figura 2. Modelo digital de terreno zona "El Atravesado".

Se construyeron mapas de orientaciones de cada MDT con SURFACE opción 2. Este módulo calcula la orientación, en grados de azimuth, de cada celda, desde los cuatro perfiles de tres celdas (N-S, NE-SO, E-O, SE-NO) que crucen la celda para la cual se está calculando el azimuth.

Se desplegaron los mapas de pendiente en plano y perspectiva. No se notó ninguna anomalía. Se clasificó cada mapa en 32 clases, cada 11.25° de azimuth partiendo desde 0° (norte). Se restó el mapa clasificado hecho desde curvas de 40m o 100m, según el caso, del mapa hecho con curvas de 20m, y se tabuló el número de celdas que tuvieron una clasificación diferente a las dos equidistancias.

7. Preparación y análisis de mapas de cuencas hidrográficas

Para comparar varios métodos de determinar cuencas hidrográficas, se digitalizaron con ROOTS tres "blancos" o mapas iniciales: (1) el punto de salida del área de estudio del río San Carlos, (2) el cauce inferior del río San Carlos (aproximadamente 1.300m lineal en el fondo de la valle) y (3) toda la red hidrológica del río San Carlos dentro del área de estudio. Se pasaron estos mapas a IDRISI formato vectorial, y se convirtieron a mapas formato raster a las tres resoluciones del estudio (R16, R32 y R64) con LINERAS. Estos mapas sirvieron como "blancos" para WATRSBED, que los empleó para determinar la cuenca hidrográfica del río San Carlos de los mapas de orientaciones hecho con SURFACE (véase arriba) además de un mapa de orientaciones hecho de un MDT suavizado una vez con un filtro promedio, tal como recomienda el manual de IDRISI para evitar problemas con bajos locales en la superficie.

Se digitalizaron los límites de esta cuenca con ROOTS sobre el mapa topográfico a 1:25.000, siguiendo las crestas de las filas que eran muy evidentes, y se pasó el mapa de la cuenca al formato raster con POLYRAS. Se evaluaron los mapas calculados con WATRSBED restando con OVERLAY estos del mapa trazado directamente, y se tabuló automáticamente el número de celdas mal clasificados, es decir, celdas que según WATRSBED están fuera de la cuenca pero que de hecho están dentro y viceversa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Efecto de la equidistancia y resolución sobre el MDT

A cada resolución y equidistancia, los MDT se vieron en forma satisfactoria en plano y perspectiva. Por supuesto, a las resoluciones mayores se vieron más detalles. No habían anomalías obvias a la vista.

Los mapas de diferencias de MDT hechos con equidistancias de 100msnm vs. 20msnm mostraron un patrón muy evidente de ajustes paralelos a las curvas de nivel suplementarias que no fueron usadas en el modelo de 100m. Se notó este fenómeno más en la medida que se aumentó la resolución, pero mucho menos los mapas con curvas a cada 40m y 20m.

Las tablas siguientes muestran el efecto de emplear una equidistancia de 100m o 40m, en vez de 20m sobre el MDT, a las tres resoluciones, suponiendo que el MDT hecho con una equidistancia de 20m es lo más confiable.

C100 vs C20

	Clase de error % de celdas)				cambio de elevación	
	1	2	3	4	prom(m)	d.s.(m)
Resolución						
R16	60.9	24.7	8.9	2.4	1.2	16.5
R32	70.2	21.1	7.7	1.0	2.0	14.0
R64	75.9	18.2	5.0	1.0	2.2	13.9

C40 vs C20

	Clase de error % de celdas)				cambio de elevación	
	1	2	3	4	prom(m)	d.s.(m)
Resolución						
R16	64.2	19.7	15.8	0.4	-0.6	13.4
R32	76.2	9.6	4.2	0.0	-0.3	10.0
R64	94.3	5.0	0.7	0.0	-0.0	9.8

A cada resolución los modelos hechos con una equidistancia de 100msnm o 40msnm casi siempre tuvieron un error absoluto menor de 40msnm (clase de error 1, 2 o 3). Sin embargo, solamente el modelo hecho con una equidistancia de 40m y una celda de 64/km lineal (R64/C40) alcanzó los National Map Accuracy Standards (90% en clase 1).

2. Efecto de generalización sobre el MDT

Suponiendo que se requiere un MDT raster a una resolución dada, surge la pregunta si se debe hacer este mapa directamente a esta resolución, o si sería mejor hacerlo a una resolución más fina y luego generalizarlo para llegar al mapa final.

La tabla siguiente muestra la diferencia entre los MDT generalizados (con CONTRACT) desde MDT con mallas finas, y los mapas hechos desde el principio con la resolución final, para la equidistancia de 20m.

C20

	Clase de error (% de celdas)				cambio de elevación	
	1	2	3	4	prom(m)	d.s.(m)
Generalización						
R64->>R32	91.7	7.8	0.5	0.0	0.3	11.5
R64->>R16	71.9	22.1	5.9	0.1	0.5	14.4
R32->>R16	71.9	23.6	4.4	0.1	0.3	13.1

Se puede ver que la generalización desde R64 hasta la malla dos veces más gruesa es satisfactoria: más de 90% de las celdas no cambian su clase de elevación, y no hay cambios grandes ni sistemáticos. Las generalizaciones hasta la malla más gruesa (R16) no son satisfactorias, ya que más de un cuarto de las celdas cambian su clase de elevación.

3. Efecto de la equidistancia sobre el mapa de pendientes

Cuando se desplegaron los mapas de pendientes, se notaron varios artefactos del proceso de cálculo que no corresponden al terreno. En los mapas R64/C100, R32/C100 y R32/C40 se vieron líneas perpendiculares a las cotas, como si hubiesen estribaciones pequeñas. En todo los mapas R16 y los mapas R32/C20 y R64/C20 se vieron bandas paralelas a las cotas. En los mapas R64/C40 y R32/C40 se vieron ambos tipos de artefactos. Estos artefactos resultaron de la interpolación, siendo perpendiculares cuando la malla es demasiado fina comparada con la equidistancia. Todos los mapas de pendientes parecieron muy "ruidosos" vistos en perspectiva, es decir, las pendientes en celdas adyacentes variaron mucho.

Después de haberse aplicado una suavización a los mapas de pendientes, solamente el mapa R64/100, con el mayor desequilibrio entre equidistancia y malla, quedó con artefactos, en este caso siendo perpendicular a las cotas. Los mapas R32/C20, R64/C20, R32/C40 y R64/C40 mostraron bandas paralelas a las cotas, pero no exagerados y se considera que no son artefactos sino la forma actual de terreno. Todos los mapas de pendientes parecieron suaves vistos en perspectiva, es decir, el proceso de suavización eliminó el ruido.

El resto del análisis se hizo sobre los mapas suavizados.

Las tablas siguientes muestran el efecto de emplear una equidistancia de 100m o 40m, en vez de 20msnm, sobre el mapa de pendientes, a las tres resoluciones, suponiendo que el MDT hecho con una equidistancia de 20msnm es lo más confiable.

C100 vs. C20

	Cambio de clases (% de celdas)				Cambio de pendiente		
	0	+/-1	+/-2	+/-3	prom. (%)	d.s. (%)	max (abs.%)
Resolución							
16	78.8	20.6	0.5	0.0	-0.4	12.5	48.0
32	69.7	27.7	1.3	0.3	-0.5	14.9	121.6
64	60.5	32.3	5.2	0.9	-1.6	27.7	243.5

C40 vs C20

	Cambio de clases (% de celdas)				cambio de pendiente		
	0	+/-1	+/-2	+/-3	prom. (%)	d.s. (%)	max (abs.%)
Resolución							
16	83.3	16.6	0.1	0.0	-0.2	11.6	24.9
32	80.0	19.6	0.4	0.0	0.2	12.4	39.4
64	73.4	24.6	1.8	0.3	0.6	14.1	74.9

Hay errores significativos (nunca hay más que 83.3% de la celdas correctamente clasificadas) de clasificación a cada resolución y equidistancia, siendo peor en la medida que aumenta la resolución.

4. Efecto de generalización sobre el mapa de pendientes

Suponiendo que se requiere un mapa de pendientes a una resolución dada por las necesidades de un proyecto, surge la pregunta si se debe hacer este mapa directamente a esta resolución, o si sería mejor hacerlo a una resolución más fina y luego generalizarlo para llegar al mapa final.

La tabla siguiente muestra la diferencia entre los mapas de pendientes generalizados (con CONTRACT) desde mapas con mallas finas, y los mapas hechos desde el principio con la resolución final, para las equidistancias de 100m y 20m.

C100

	Cambio de clases (% de celdas)				cambio de pendiente		
	0	+/-1	+/-2	+/-3	prom. (%)	d.s. (%)	max (abs.%)
Generalización							
R64->>R32	80.0	18.9	1.1	0.1	2.2	13.9	144.0
R64->>R16	70.5	23.9	3.4	0.1	4.5	15.7	136.6
R32->>R16	77.0	22.1	0.7	0.0	2.3	12.8	76.7

C20

	Cambio de clases (% de celdas)				cambio de pendiente		
	0	+/-1	+/-2	+/-3	prom. (%)	d.s. (%)	max (abs.%)
Generalización							
R64->>R32	74.6	24.6	0.8	0.0	1.1	13.4	53.7
R64->>R16	67.6	30.3	2.1	0.0	3.3	14.7	60.6
32->>R16	75.3	24.4	0.4	0.0	2.3	12.6	39.0

Se puede ver que el generalizar después del cálculo de mapa de pendientes da resultados bastante diferentes del hacer el mapa a la resolución más gruesa al principio, aunque la gran mayoría de los cambios a ambas resoluciones son de una sola clase, es decir, no hay errores grandes de clasificación. Un resultado interesante es que los mapas generalizados siempre tienen pendientes mayores, y los cambios de clases al generalizar son mayormente disminuciones.

No hay cómo verificar cual método da los resultados que mejor concuerdan con la realidad.

5. Efecto de la equidistancia sobre el mapa de orientaciones

Las tablas siguientes muestran el efecto de emplear una equidistancia de 100m o 40m, en vez de 20msnm, sobre el mapa de orientaciones, a las tres resoluciones, suponiendo que el MDT hecho con una equidistancia de 20msnm es el más confiable.

C100 vs. C20

	cambio de clases de 11.25° de azimut (% de celdas)				
	0	+/-1	+/-2	+/-3	+/-4 o peor
Resolución					
16	47.5	27.0	13.0	4.8	7.7
32	42.4	23.1	15.1	7.5	12.0
64	39.9	20.3	15.1	15.7	15.7

C40 vs. C20

	cambio de clases de 11.25° de azimut (% de celdas)				
	0	+/-1	+/-2	+/-3	+/-4 o peor
Resolución					
16	50.2	24.5	15.2	4.1	6.0
32	55.8	21.3	12.3	3.9	6.7
64	57.6	21.0	10.5	4.5	6.4

Hay errores significativos de clasificación a cada resolución y equidistancia. Nunca hay más que 57.6% de la celdas correctamente clasificadas dentro de un error de +/-11.25° o sea 1/16 del círculo, ni menos de 6.4% con errores de a lo menos 45% o sea 1/4 del círculo. Esto tiene implicaciones fuertes para modelos de simulación que requieren la orientación para calcular la insolación. El MDT hecho de curvas cada 40m es más confiable que el modelo hecho de curvas cada 100m a cualquier resolución, especialmente con respecto a los errores graves.

6. Efecto del "blanco" y equidistancia sobre la determinación de la cuenca hidrográfica

Nunca se logró determinar más de 36% de la cuenca con el "blanco" (imagen de puntos desde la cual se calcula la cuenca) del punto de salida del río, y esto solamente a R16, aún suavizando el MDT antes de calcular el mapa de orientaciones. Usando toda la red hidrográfica, se logró determinar la cuenca con un error de menos de 1.5% usando cualquier combinación de resolución y equidistancias, siendo un resultado de incertidumbre cerca de las divisoras de aguas en las filas. En el caso intermedio, del blanco hecho del curso inferior del río, hubo diferencias en los resultados dependiendo de las resoluciones y equidistancias.

Se dieron dos casos: o se determinó la cuenca con menos de 1.5% de error o no se pudo encontrar una o más subcuencas, resultando errores de 37% a 51% de área de la cuenca. Las únicas combinaciones que dieron resultados aceptables con este blanco fueron R16/C20 con o sin suavización del MDT y R16/C40 y R16/C100 solamente con suavización.

CONCLUSIONES

Para evaluar características o cualidades de la tierra que son funciones de la altura sobre el nivel del mar (por ejemplo, temperatura promedio), una equidistancia de 100msnm y una resolución de 62.5m (R16/C100) son muy adecuadas, y se gana prácticamente nada al incrementar la resolución o la equidistancia.

Con una equidistancia de 20msnm, se puede generalizar desde la resolución de 15.625m (R64) hasta una de 31.25m (R32) sin un cambio significativo en el MDT. No se puede generalizar hasta la resolución de 62.5m (R16) sin obtener diferencias significativas.

Hay una dependencia fuerte entre la resolución del mapa y la equidistancia, cuando se desea hacer un mapa de pendientes. Las combinaciones más adecuadas se dan cuando alrededor de 30% de las celdas de la imagen raster son llenadas con curvas de nivel antes de la interpolación. En el presente estudio las combinaciones más adecuadas fueron R16/C100, R32/C40 y R64/C20. Es decir, si se emplea una resolución gruesa no se debe emplear una equidistancia fina, y viceversa. Otra forma de determinar la equidistancia apropiada por la resolución es determinar la pendiente máxima en la zona de estudio (descartando pendientes extremas que ocupan menos de 1% del área), y calcular la equidistancia según la ecuación: Equidistancia (m) = [(Pendiente, %) / 100] * (resolución lineal, m) Por ejemplo, con pendientes máximas de 80% y una resolución lineal de 62.5m (R16), la equidistancia apropiada sería 50m, siendo más cercana a ésta las curvas cada 40msnm.

El generalizar después del cálculo del mapa de pendientes da resultados bastante diferentes que hacer el mapa a la resolución más gruesa al principio, aunque el proceso de generalización no introduce errores grandes de clasificación.

Los mapas de orientaciones derivados de los MDT hechos a diferentes equidistancias son muy diferentes. Si se requiere orientaciones correctas de cada celda se tendrá que usar el mapa más preciso posible.

Se pueden determinar cuencas hidrográficas con alta precisión a cualquier resolución, partiendo de la red hidrográfica y el MDT original hecho con cualquier equidistancia, suavizado o no. Partiendo del cauce principal, se tiene que suavizar el MDT para tener resultados aceptables, sin embargo estos resultados se dan solamente a resoluciones gruesas (R16). Por el contrario, partiendo del punto de salida de la cuenca del área de estudio, no se puede determinar la cuenca con precisión.

LITERATURA CITADA

- ANDERSON, J.M. y E.M. MIKHAIL. 1988. Introducción a la Topografía. McGraw-Hill, México, 753p.
- AUBERT, J.L. y C. M. FAJARDO. 1990. Estudio geomorfológico de la cuenca alta del río Aragua con fines múltiples. República de Venezuela, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.
- BURROUGH, P. 1986. Principles of Geographical Information Systems for Natural Resources. Clarendon Press, Oxford Inglaterra, 194p.
- COMERMA, J. y L. ARIAS. 1971. Un Sistema para evaluar la Capacidad de Uso de los terrenos de Venezuela. Seminario de Clasificación Interpretativa con fines agropecuarios, Maracay.
- CORSON-RIKERT, J. 1990. The ROOTS program for map digitizing, editing, and verifying. Harvard University Laboratory for Computer Graphics, Cambridge, MA EE UU.
- EASTMAN, R. 1992. IDRISI: A Grid-Based Geographical Analysis System, Version 4 User's Manual and Technical Reference. Clark University Graduate School of Geography, Worcester MA EE UU.
- JAIMES, E. 1985. Análisis de las relaciones Geomorfología-Suelo en las Cuencas altas de los Ríos Aragua y Petaquire, Serranía del Litoral Central, Cordillera de la Costa. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay.
- MARTELO, M.T., C. MENESES, C. RIVAS y L. LEON. 1991. Proyecto piloto de regionalización de parámetros climáticos en una zona al noroeste de Venezuela en el contexto del Sistema de Información Computarizado del Ambiente (SICA). Tercera Conferencia Latinoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica, Viña del Mar, Chile.
- ROSSITER, D.G. 1992. Introducción a los Sistemas de Información Geográfica: Notas de Conferencia, Versión 2. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Postgrado en Ciencias del Suelo, Maracay.
- ZINCK, J.A. y C.R. VALENZUELA. 1990. Soil geographic database structure and application examples. ITC Journal 1990-3, 270-294.