

ANÁLISIS HIPSOMÉTRICO, FRECUENCIA ALTIMÉTRICA Y PENDIENTES MEDIAS A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

Juan M.G. RACCA



**Boletín
del Instituto de
Fisiografía y Geología**

Racca J.M.G., 2007. Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología 77(1-2)*: 31-38. Rosario, 01-10-2007. ISSN 1666-115X.

Resumen.- Se presentan las técnicas y la herramientas en forma de un programa informático que permiten realizar el análisis hipsométrico y obtener la frecuencia altimétrica y curva de pendientes medias de áreas de la superficie terrestre, en especial de cuencas hidrográficas, a partir de modelos digitales del terreno. Se incluye el ejemplo correspondiente a la cuenca total antropizada del Arroyo del Medio (provincias de Santa Fe y Buenos Aires).

Palabras clave: Cuencas hidrográficas, Hipsometría, Frecuencia altimétrica, Pendientes medias, Modelos digitales del terreno, Programa informático.

Abstract.- *Hypsometric analysis, altimetric frequency and mean slopes obtained from digital terrain models.* The techniques and software tools which allow the realization of the hypsometric analysis and to obtain the altimetric frequency and mean slopes curve of areas of the earth surface, particularly of hydrographic basins, operating on digital terrain models, are presented. The example of the total anthropized basin of the Arroyo del Medio (Santa Fe and Buenos Aires provinces), is included.

Palabras clave: Hydrographic basins, Hypsometry, Altimetric frequency, Mean slopes, Digital terrain models, Software.

Juan Manuel Gonzalo Racca [correo-e: racca@fceia.unr.edu.ar]: *Instituto de Fisiografía y Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario, Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina.*

El programa instalador del programa informático descrito en este artículo, así como versiones ampliadas y/o en color de las figuras pueden descargarse como Material Suplementario Digital (MSD) de la página web del *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*: <http://www.fceia.unr.edu.ar/fisiografia/publicaciones.htm>.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de Geomorfología cuantitativa o de morfometría motivo de la presente comunicación, fueron desarrolladas a mediados del siglo veinte y ampliamente utilizadas para la realización de investigaciones básicas y aplicadas, a pesar de lo laborioso de la captura de los datos utilizando opisómetro y planímetro compensador sobre cartografía topográfica, al prolongado tiempo que demandan estas operaciones y a la obtención de los resultados por medio de instrumentos de cálculo y técnicas de dibujo tradicionales.

Pueden citarse numerosos ejemplos de aplicación de las técnicas en diferentes estudios de realización reciente. Entre otros, y sólo mencionando algunos casos, Soares & Riffle (2006) las utilizaron para cartografiar paleosuperficies correlacionadas con eventos de erosión particulares en el sudeste de Brasil; Luo (2000) cuantifica a partir de ellas geofomas debidas a la depleción de capas de aguas subterráneas; Rowbotham et al. (2005) las usaron para identificar cuencas de torrentes de detritos; Liang & Yu (2004) realizaron un análisis de la energía potencial disponible para el escurrimiento hídrico superficial en base a estas técnicas; Rivera & Casassa (1999) obtuvieron, a partir de ellas, los cambios de volumen (años 1975-1995) en un glaciar de la Patagonia chilena; Montgomery et al. (2001) las utilizaron para mostrar que las variaciones climáticas a escala hemisférica son un control de primer orden en la morfología de los Andes. Por último, cabe hacer referencia a aplicaciones en morfometría extraterrestre: Luo (2002) realizó el análisis hipsométrico de redes de valles marcianos con implicaciones referidas a los cambios climáticos y a la posible evolución de la vida en ese planeta.

A partir de la década de los setenta se desarrollaron programas informáticos sólo para realizar los cálculos involucrados pero siempre tomando como base los datos obtenidos de forma manual (Racca 1984). Con el advenimiento de la Geoinformática y de sus herramientas y técnicas, comenzaron a ser de utilización corriente los modelos digitales del terreno, importantes bases cuantitativas para la realización de diferentes análisis.

Se presentan en esta comunicación los procedimientos y un programa informático, desarrollados por el autor en el año 2000, que permiten obtener la información pertinente para realizar el análisis hipsométrico y para graficar la frecuencia altimétrica y la curva de pendientes medias de áreas de la superficie terrestre, en particular de cuencas hidrográficas de llanura, a partir de modelos digitales de elevaciones y de gradientes de pendientes del terreno. Además, se incluyen los resultados que corresponden a la cuenca total antropizada del Arroyo del Medio (provincias de Santa Fe y de Buenos Aires).

ANÁLISIS HIPSONOMÉTRICO

La curva hipsométrica (Strahler 1952) permite conocer la distribución de masa en la cuenca desde arriba hacia abajo. Se obtiene colocando en las ordenadas los valores correspondientes a las diferentes alturas de la cuenca referidos a la máxima de la misma y, en las abscisas, los valores de área que se encuentran por encima de las alturas correspondientes, referidos al área total de la cuenca. De

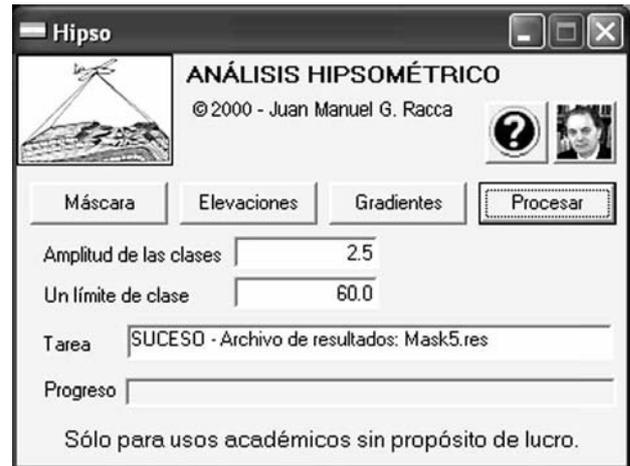


Figura 1. Panel de control del programa que opera sobre los modelos digitales para obtener la información que permite realizar los análisis.

esta forma se utilizan valores relativos (porcentuales), lo que hace posible comparar curvas de diferentes cuencas, prescindiendo de las dimensiones absolutas. Normalmente su forma es sigmoidal, cóncava hacia arriba en la parte superior y convexa en la parte baja; el grado de sinuosidad es muy variable, lo mismo que la pendiente en el punto de inflexión.

Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, ello puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos. El valor del área relativa que yace bajo la curva (integral hipsométrica) es indicativo del estado de desarrollo de la cuenca; valores superiores al 60 % indican desequilibrio manifiesto en el funcionamiento de la cuenca (juventud en el sentido davisiano), valores rondando el 47 % representan equilibrio (madurez), e inferiores a 30% implican fase de "monadnock" (senectud).

La técnica tradicional para la construcción de la curva hipsométrica involucra -la mayoría de las veces- medir las áreas comprendidas entre isohipsas adyacentes que difieren en una equidistancia, con planímetro compensador. Lo ideal sería, si las dimensiones del área total considerada lo permiten, realizar las mediciones por áreas progresivas, siempre desde el punto más alto, hasta las sucesivas curvas de nivel de cota decreciente, para disminuir el efecto de la acumulación de errores de medición de áreas parciales. Luego, por cálculo manual, se obtienen las ordenadas y abscisas de los puntos de pasaje de la curva y la integral hipsométrica.

El procedimiento desarrollado para obtener los datos a partir del modelo digital de elevaciones en formato matricial o "ráster", consiste en recorrer sistemáticamente las celdas del mismo, realizando el conteo de dichas celdas -de acuerdo con su elevación- para cada una de las clases de altitud previamente establecidas. Las celdas, todas cuadradas y de igual dimensión, poseen área determinada por la resolución espacial del modelo digital utilizado en cada caso. El programa informático que se presenta en este trabajo realiza los cálculos necesarios para obtener los valores que permiten el graficado de la curva y para calcular el valor de la integral hipsométrica.

Tabla 1. Ejemplo de la salida de presentación de resultados del programa que opera sobre los modelos digitales para obtener la información necesaria para la realización de los análisis.

ANALISIS HIPSOMETRICO
 (Intervalos cerrados por izquierda y abiertos por derecha)

Archivos: Mask5.rst - AMTRF.rst - dtmg1000.rst

INTERVALO EN ALTITUD (m)	FREC. ALTIMETRICA		PENDIENTES MEDIAS			CURVA HIPSOM.		
	A(Km2)	AREA %	Ancho	Wac.	Gr.o/oo	X %	Y %	
107.05	107.05					0.00	100.00	
107.05	105.00	1.101	0.05	0.69	0.69	2.98	0.05	97.88
105.00	102.50	5.290	0.23	1.26	1.95	1.99	0.28	95.31
102.50	100.00	10.661	0.47	1.28	3.23	1.95	0.76	92.73
100.00	97.50	13.898	0.62	1.36	4.59	1.84	1.37	90.15
97.50	95.00	11.050	0.49	0.96	5.54	2.61	1.86	87.57
95.00	92.50	120.610	5.34	4.40	9.94	0.57	7.20	84.99
92.50	90.00	55.638	2.46	2.07	12.01	1.21	9.66	82.42
90.00	87.50	91.053	4.03	2.49	14.50	1.00	13.70	79.84
87.50	85.00	72.650	3.22	2.70	17.20	0.92	16.91	77.26
85.00	82.50	25.405	1.13	1.45	18.65	1.72	18.04	74.68
82.50	80.00	92.027	4.08	1.85	20.50	1.35	22.11	72.10
80.00	77.50	170.008	7.53	1.56	22.06	1.61	29.64	69.52
77.50	75.00	130.002	5.76	0.93	22.98	2.70	35.40	66.95
75.00	72.50	127.899	5.66	0.76	23.75	3.28	41.06	64.37
72.50	70.00	126.181	5.59	0.66	24.40	3.80	46.65	61.79
70.00	67.50	115.206	5.10	0.54	24.95	4.62	51.75	59.21
67.50	65.00	103.014	4.56	0.49	25.43	5.15	56.32	56.63
65.00	62.50	102.986	4.56	0.52	25.95	4.80	60.88	54.06
62.50	60.00	100.760	4.46	0.51	26.46	4.88	65.34	51.48
60.00	57.50	78.888	3.49	0.46	26.92	5.48	68.83	48.90
57.50	55.00	83.149	3.68	0.50	27.42	5.04	72.51	46.32
55.00	52.50	81.478	3.61	0.51	27.93	4.89	76.12	43.74
52.50	50.00	79.002	3.50	0.54	28.47	4.65	79.62	41.17
50.00	47.50	59.518	2.64	0.49	28.95	5.11	82.26	38.59
47.50	45.00	64.914	2.87	0.54	29.49	4.66	85.13	36.01
45.00	42.50	53.166	2.35	0.50	29.99	4.99	87.49	33.43
42.50	40.00	47.501	2.10	0.49	30.49	5.05	89.59	30.85
40.00	37.50	38.205	1.69	0.51	31.00	4.88	91.28	28.28
37.50	35.00	30.592	1.35	0.52	31.52	4.80	92.64	25.70
35.00	32.50	30.381	1.35	0.64	32.16	3.92	93.98	23.12
32.50	30.00	32.166	1.42	0.84	33.00	2.97	95.41	20.54
30.00	27.50	29.658	1.31	1.03	34.03	2.43	96.72	17.96
27.50	25.00	24.674	1.09	1.15	35.18	2.17	97.81	15.39
25.00	22.50	22.584	1.00	0.94	36.12	2.66	98.81	12.81
22.50	20.00	14.312	0.63	0.79	36.92	3.14	99.45	10.23
20.00	17.50	8.453	0.37	0.72	37.64	3.45	99.82	7.65
17.50	15.00	3.008	0.13	0.55	38.19	4.51	99.95	5.07
15.00	12.50	0.853	0.04	0.24	38.44	10.28	99.99	2.50
12.50	10.00	0.211	0.01	0.18	38.61	13.69	100.00	0.00

INTEGRAL HIPSOMETRICA = 57.57 %

AREA TOTAL 2258.149 Km2
 ALTITUD MAXIMA 107.052 m
 ALTITUD MINIMA 10.080 m
 ALTITUD MEDIA 65.928 m
 PENDIENTE MEDIA 3.404 o/oo

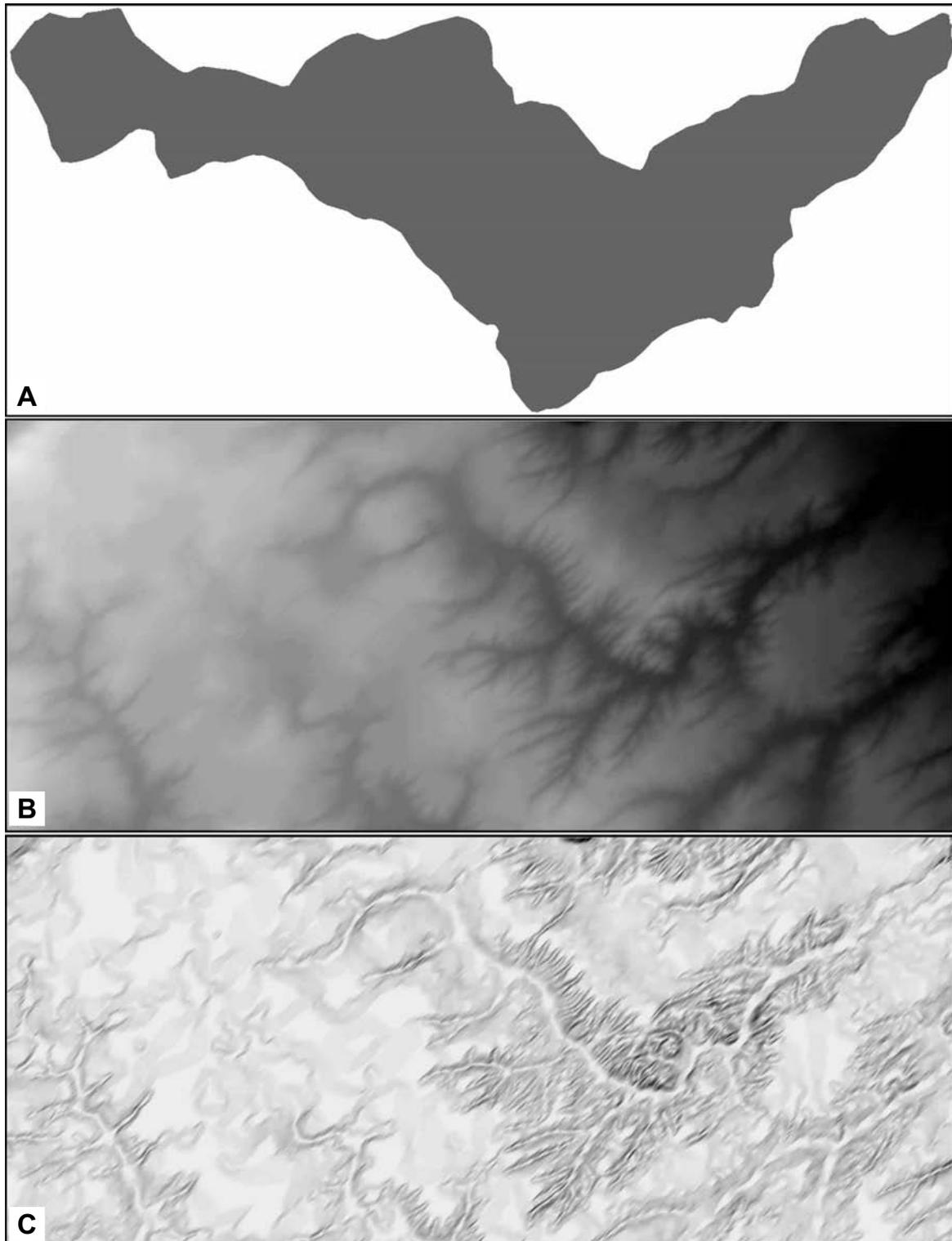


Figura 2. Modelos digitales del área de la Cuenca del Arroyo del Medio. **A:** Máscara que limita la cuenca. **B:** Imágen del modelo digital de elevaciones. **C:** Imágen del modelo digital de gradientes por mil.

FRECUENCIA ALTIMÉTRICA

El análisis de frecuencia altimétrica se utiliza para describir, en altitudes sucesivas, las frecuencias de ciertos niveles, como ser altitud de sitios, puntos más altos en mallas cuadradas de muestreo, altitudes de cumbres o la de áreas de llanos o depresiones tales como hombreras, bancos y collados (Clarke 1968).

El procedimiento tradicional de base para hallar la frecuencia altimétrica es el mismo que para la obtención de los datos que permiten construir la curva hipsométrica: el planimetrado -sobre cartas topográficas- de las áreas existentes entre curvas de nivel de cotas sucesivas. Estas áreas constituyen las frecuencias altitudinales, expresadas en valores absolutos o relativos, correspondientes a cada intervalo de elevación. Asimismo, los datos para la realización de este análisis se obtienen del modelo digital de elevaciones de manera similar que para el análisis hipsométrico

CURVA DE PENDIENTES MEDIAS

Las curvas de pendientes medias permiten observar la distribución de las pendientes en relación con las altitudes. Las pendientes medias variarán de acuerdo con las geformas y con las características propias del sistema de avenamiento (Strahler 1952).

Tradicionalmente los datos necesarios para obtenerla son las longitudes de las curvas de nivel de cada cota, medidas con opisómetro o "curvímetro" sobre las cartas topográficas, y las áreas comprendidas entre aquéllas, medidas con planímetro compensador. Para cada faja de terreno existente entre dos isohipsas sucesivas, las longitudes de la curva superior y de la inferior se promedian, obteniendo una longitud para dicha faja; dividiendo el área de cada faja por su largo medio se consiguen los valores de sus anchuras planimétricas medias. El gradiente de pendiente promedio de cada faja se obtiene dividiendo la amplitud del intervalo altitudinal (normalmente la equidistancia entre curvas de nivel) por la anchura media de la faja. La curva de pendientes medias puede graficarse por coordenadas; las ordenadas corresponden a las cotas de las isohipsas o de los puntos acotados y las abscisas a los anchos medios de faja acumulados, desde la elevación máxima hasta la mínima.

La estrategia para obtener los datos necesarios para el trazado de la curva de pendientes medias y los valores de los gradientes promedio, a partir de los modelos digitales del terreno, es diferente. Consiste en recorrer sistemáticamente, al unísono, las celdas homólogas de los modelos digitales de elevaciones y de gradientes de pendientes; los valores de los gradientes presentes en las celdas se van sumando y contando para cada intervalo altitudinal de los previamente establecidos, de acuerdo con la cotas almacenadas en las celdas homólogas del modelo digital de elevaciones. En definitiva, se obtienen los gradientes de pendientes promedio para cada intervalo altitudinal (que corresponden a las fajas de terreno entre isohipsas de cotas sucesivas) a partir de las sumas de gradientes que fueron almacenadas durante la ejecución del procedimiento, divididas por el número de celdas, correspondientes a cada clase. Los valores de los anchos medios de faja, necesarios para el trazado de la curva, se obtienen dividiendo las amplitudes de los intervalos altitudinales por los valores de los gradientes promedio de

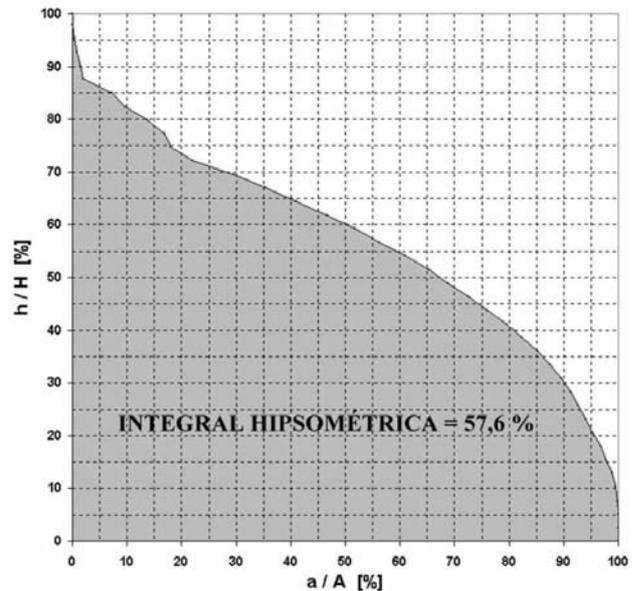


Figura 3. Curva hipsométrica de la Cuenca del Arroyo del Medio total antropizada.

pendientes que les corresponden.

PROGRAMA INFORMÁTICO

Se desarrolló un programa informático cuyo propósito es implementar las técnicas de las maneras anteriormente descritas y que opera sobre los modelos digitales del terreno para extraer la información necesaria para la realización del análisis hipsométrico, la obtención de la frecuencia altimétrica y el trazado de la curva de pendientes medias. Su panel de control se exhibe en la Figura 1.

Requiere de tres fuentes de datos: una máscara que indica el área de terreno sobre la cual van a efectuarse las operaciones, el modelo digital de elevaciones del terreno y el modelo digital de gradientes de pendientes. Los tres modelos matriciales o ráster citados deben poseer la misma cobertura y resolución espacial (en metros) y estar almacenados en el formato Idrisi.

La máscara debe tener formato byte-binario; las celdas que corresponden al área bajo análisis deben poseer en la máscara el valor cero y las restantes cualquier valor distinto de cero. Normalmente se la construye con un editor de gráficos convencional, a partir de modelos analógicos digitalizados o de otras capas temáticas derivadas (la mayoría de las veces cartas topográficas) y se la exporta finalmente al formato Idrisi.

Los dos modelos digitales del terreno (elevaciones y gradientes), en formato real-binario, se suponen haber sido construidos con un sistema desarrollado con anterioridad (Racca, *remitido*). Los gradientes deben estar expresados en metros por kilómetro.

Antes de la operación definitiva hay que establecer los valores de la amplitud de las clases (intervalos altitudinales) y de un límite de clase, ingresándolos con el teclado en las casillas de texto

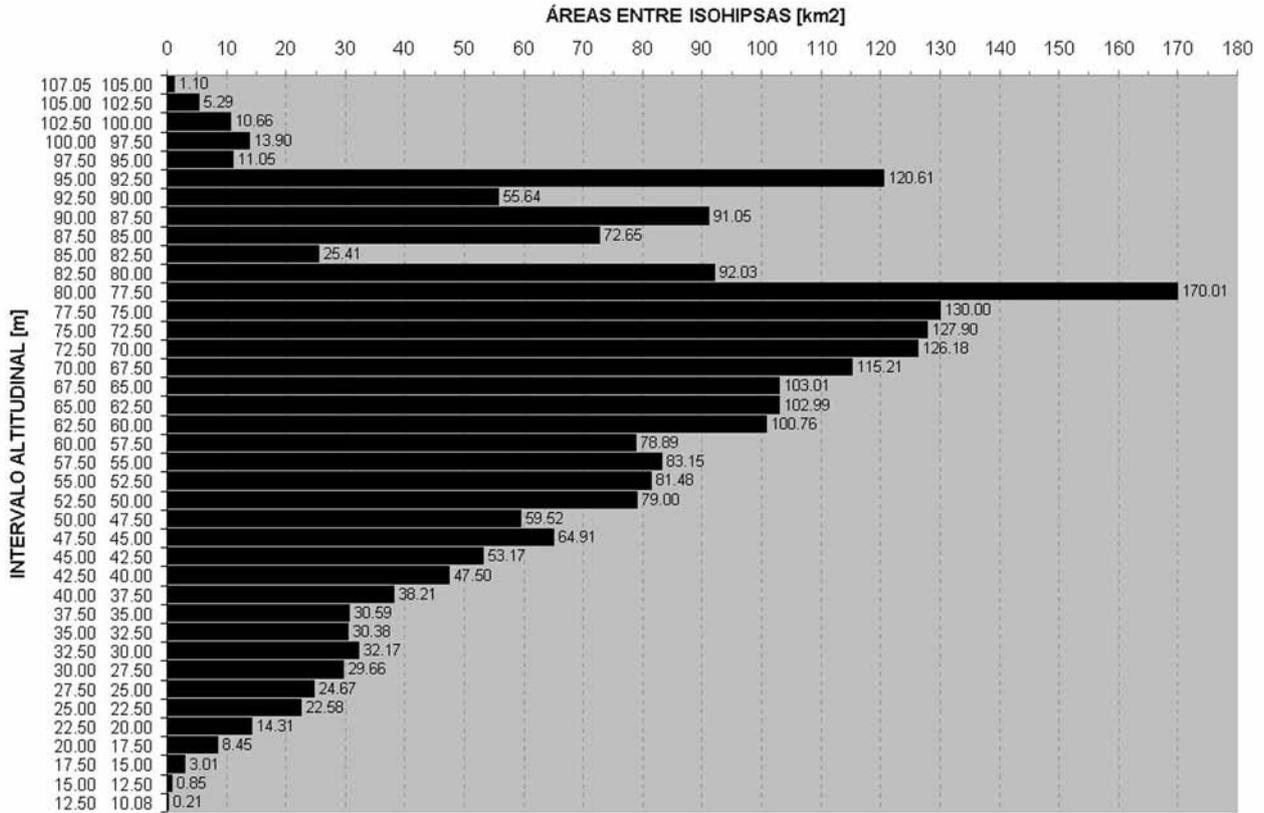


Figura 4. Frecuencias altimétricas de la Cuenca del Arroyo del Medio total antropizada.

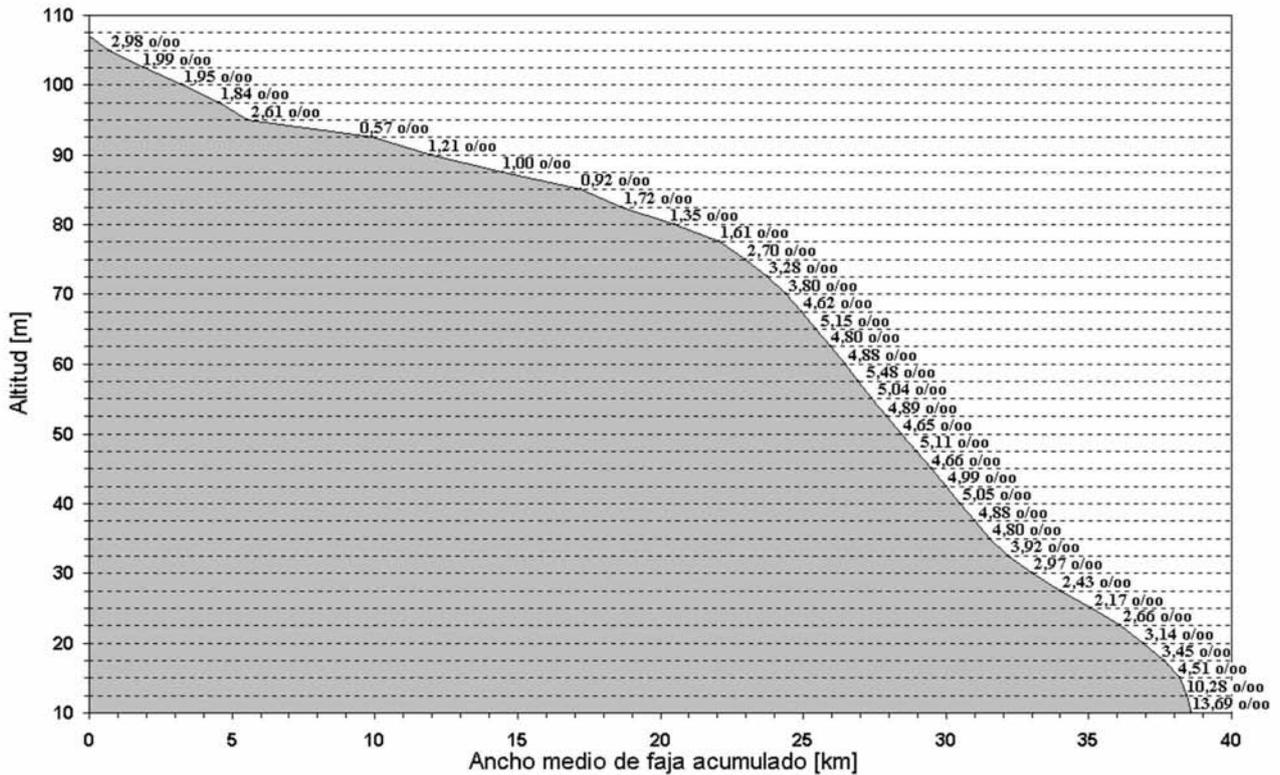


Figura 5. Curva de pendientes medias de la Cuenca del Arroyo del Medio total antropizada.

correspondientes. El programa se encarga de determinar todas las clases de elevación basándose en los dos valores ingresados y en las cotas máxima y mínima del área indicada por la máscara: todas tendrán igual amplitud salvo las clases superior e inferior que quedarán limitadas por las cotas máxima y mínima del área, respectivamente. Los intervalos de clase altitudinales estarán cerrados por izquierda (límite superior de la clase) y abiertos por derecha (límite inferior de la clase), salvo el último o inferior que estará cerrado por ambos extremos.

Cuando termina su operación, el programa almacena los resultados en un archivo de texto cuyo nombre es igual al de la máscara empleada, pero con extensión “.res”; un ejemplo de salida del programa se exhibe en la Tabla 1. Las columnas de la tabla, presentes en el archivo de resultados, permiten el trazado de la curva hipsométrica, del diagrama de frecuencia altimétrica y de la curva de gradientes medios de pendientes. Pueden utilizarse los comandos “copiar” y “pegar” sobre dichas columnas para transferirlas a una planilla de cálculo informática y aprovechar sus facilidades de graficación para obtener los diagramas correspondientes (Figuras 3, 4 y 5).

Además, el programa arroja los valores de la integral hipsométrica, del área total bajo análisis (obtenida por conteo de celdas), de las cotas máxima y mínima (halladas por exploración del modelo digital de elevaciones), de la altitud media (calculada por promedio de las cotas presentes en las celdas del modelo digital de elevaciones) y del gradiente de pendiente medio de toda el área (promediando los valores de las celdas del modelo digital de gradientes de pendientes). Todos los valores corresponden al área abarcada e indicada por la máscara empleada.

CUENCA DEL ARROYO DEL MEDIO

Se hicieron los análisis para la cuenca total antropizada del Arroyo del Medio, situada en las provincias de Santa Fe y Buenos Aires, en ocasión del desarrollo del estudio geomorfológico integral del área de la mencionada cuenca, realizado por el autor de la presente comunicación durante los años 2000 y 2001. La Figura 2 exhibe las imágenes de la máscara que delimita la cuenca, del modelo digital de elevaciones y del modelo digital de gradientes de pendientes; el área rectangular cubierta por cada uno de los tres modelos (que poseen resolución espacial de 40 metros) es de 5.551,728 km² (3.469.830 celdas) y la de la cuenca bajo análisis es de 2.258,149 km² (1.411.343 celdas).

La Figura 3 muestra la curva hipsométrica de la cuenca; su parte superior presenta al comienzo elevada pendiente y a continuación marcadas irregularidades, todo ello debido a la anexión de un sector drenado por canales que no pertenece a la cuenca natural. No existe un punto de inflexión bien definido, pero a partir de las irregularidades -en el 75 % de su trazado inferior- la curva muestra convexidad hacia arriba; el valor de la integral hipsométrica es elevado. Todo lo mencionado anteriormente indica un importante desequilibrio morfológico en la cuenca, que se considera producto de eventos neotectónicos muy recientes.

La Figura 4 exhibe el diagrama de frecuencias altimétricas; se nota que la distribución es bimodal, correspondiendo la moda de las altitudes mayores al sector

anexado por canalizaciones y la inferior a la cuenca natural del arroyo del Medio.

La Figura 5 muestra la curva de pendientes medias. Pueden apreciarse en ella varios tramos, a distintas altitudes, diferenciados por los valores de los gradientes: en el primero, entre las cotas 107 m y 95 m, el área involucrada corresponde a la fracción de ribete elevado que rodea el área hundida donde se halla la laguna Melincué, en el sector anexado por canalizaciones a la cuenca del Arroyo del Medio; a partir de allí las pendientes medias disminuyen considerablemente -en áreas que pertenecen a la parte final del sector anexado y al tramo superior del valle del arroyo del Medio- hasta llegar aproximadamente la cota 80 m. Desde esta última altitud y hasta la cota 35 m los gradientes medios se incrementan en gran medida, involucrando las vertientes del tramo medio del valle y de la parte inicial y media del tramo final del mismo; a partir de la cota 35 m y hasta la finalización, las pendientes medias decrecen primero y aumentan luego en las áreas pertenecientes al tercio final del tramo inferior del valle del arroyo.

CONCLUSIONES

Las técnicas y el programa informático desarrollados permiten obtener de los modelos digitales del terreno, en tiempo real, la información necesaria para la realización del análisis hipsométrico y el trazado del diagrama de frecuencias altimétricas y de la curva de pendientes medias de áreas de la superficie terrestre, en particular de cuencas hidrográficas, eludiendo la laboriosa, prolongada e imprecisa captura manual de datos sobre cartografía topográfica, que se realiza para la aplicación de las técnicas de la manera tradicional.

Al operarse sobre los modelos digitales del terreno, los análisis no quedan constreñidos a emplear los límites y amplitudes de clase altitudinales determinados por las características y valores de las curvas de nivel de las cartas topográficas. Estos límites y amplitudes pueden variarse, todas las veces que sea necesario, de acuerdo con los diferentes objetos de estudio que se presenten.

Agradecimientos

E. Popolizio y otro revisor anónimo realizaron valiosas sugerencias para la presentación final del manuscrito original como árbitros de la revista.

REFERENCIAS

- Clarke J.I., 1968. Altimetric frequency curve. In: R.W. Fairbridge (ed.): *The Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold Book Co., 1114 p.
- Liang C. & Yu Z., 2004. Theoretical analysis of potential runoff energy. *Nature and Science* **2(1)**: .
- Luo W., 2000. Quantifying groundwater-sapping landforms with a hypsometric technique. *Journal of Geophysical Research* **105**, E1: 1685-1694.
- Luo W., 2002. Hypsometric analysis of Margaritifer Sinus and origin of valley networks. *Journal of Geophysical Research* **107**, E10: 5071.
- Montgomery D.R., Balco, G & Willett, S.D., 2001. Climate, tectonics, and the morphology of the Andes. *Geology* **29(7)**: 579-582.
- Racca J.M.G., 1984. Programas para el cálculo en geomorfología cuantitativa. *Notas del Instituto*

- de Fisiografía y Geología* **B1**: 1-12.
- Rivera A. & Casassa G., 1999. Volume changes on Pio XI glacier, Patagonia: 1975 - 1995. *Global and Planetary Change* **22**: 233-244.
- Rowbotham D., De Scally F. & Louis J., 2005. The identification of debris torrent basins using morphometric measures derived within a GIS. *Geografiska Annaler, Series A (Physical Geography)* **87(4)**: 527-537.
- Soares P & Riffel S., 2006. Hypsometric curves as a tool for paleosurface mapping. *Mathematical Geology* **38(6)**: 679-695.
- Strahler A.N., 1952. Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America* **63**: 1117-1142.