

ZONIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE MICROCUENCAS: UNA HERRAMIENTA ÚTIL PARA ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Jorge E. Patiño Q.¹, Juan J. Montoya M.¹, Michel Hermelin A.¹ y Verónica Botero F.²

1. Departamento de Geología, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

2. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia

j74@dr.com

Recibido para evaluación: 03 de Agosto de 2004 / Aceptación: 09 de Noviembre de 2004 / Recibida versión final: 18 de Noviembre de 2004

RESUMEN

Se presenta una zonificación geomorfológica enfocada al análisis hidrológico de microcuencas, con el objetivo de generar mapas de producción de escorrentía superficial que sean útiles para determinar la amenaza por inundación en las corrientes principales de las microcuencas. El estudio se realizó en 10 microcuencas de afluentes del río Medellín, 4 de ellas en la vertiente occidental del Valle de Aburrá. Para la zonificación se usaron tres capas de información: mapa de pendientes, mapa de uso del suelo y mapa de formaciones superficiales. El objetivo de la zonificación es determinar zonas con mayor o menor producción de escorrentía superficial a partir de eventos extremos de precipitación, de acuerdo con el tipo de material presente en superficie (formación superficial), la pendiente del terreno y el uso del suelo, usando un sistema de información geográfica, y la caracterización posterior de la producción de escorrentía superficial en las zonas así determinadas con un simulador de lluvias portátil.

PALABRAS CLAVES: Zonificación, Sistemas de Información Geográfica, Amenaza por Inundación, Ordenamiento Territorial.

ABSTRACT

A geomorphologic zonation of watersheds is presented as a useful tool for hydrologic analysis of watersheds, in order to get useful runoff production maps that can be used to determine flood hazard along their main streams. This research was carried out in 10 creeks of the Aburrá Valley, 4 of them located in its western slope. Three layers of information were used: geomorphology, land use and slope. Geomorphology gives information about surface deposits and residual soils; land use includes vegetation coverage, and provides an insight to dominant erosion and sediment production processes; and slope ranges describe terrain shape and suggest zones exposed to critical erosion and accumulation processes. Linear overlay of this data, through codification of each information layer and map algebra produced a watershed zonation, which is used as an input to hydrologic behavior determination by characterization of runoff production with a portable rain simulator.

KEY WORDS: Geomorphologic Zonation, Geographic Information Systems, Flood Hazard Estimation, Urban Planning.

1. INTRODUCCIÓN

Se presenta aquí una zonificación geomorfológica de una microcuenca localizada al occidente de Medellín, como una herramienta útil para el análisis hidrológico. Esta metodología fue desarrollada durante un proyecto de investigación en el Departamento de Geología de la Universidad EAFIT. El objetivo de la investigación era determinar de manera preliminar las zonas de amenaza por inundación de diez quebradas del Valle de Aburrá y la zonificación geomorfológica se usó como insumo en un modelo hidrológico distribuido diseñado para determinar la producción de escorrentía y su acumulación a lo largo de las quebradas.

El objetivo de la zonificación propuesta es dividir en forma lógica el territorio de las microcuencas en áreas caracterizadas por materiales superficiales, usos del suelo y pendientes similares, ya que estas variables influyen de manera importante en la producción de escorrentía y sedimentos (Fu et al., 2003; Huang et al., 2001). Se supone por lo tanto que estas zonas puedan tener un comportamiento hidrológico y geomorfológico similar.

En el proceso de zonificación se usaron tres capas de información: mapa de formaciones superficiales, mapa de usos del suelo y mapa de pendientes. El mapa de formaciones superficiales da información acerca de la distribución y el tipo de suelos residuales y depósitos superficiales, su composición y textura. El mapa de uso del suelo incluye información acerca de las coberturas vegetales y éstas pueden correlacionarse con la distribución espacial de los procesos de erosión y producción de sedimentos. El mapa de pendientes describe la forma del terreno y puede relacionarse fácilmente con las zonas susceptibles a erosión crítica o zonas de acumulación de sedimentos.

El proceso de zonificación es una superposición lineal de estos mapas, previa codificación de la tipología de cada capa de información, para producir una nueva capa de información denominada Mapa de Zonas Homogéneas, la cual se usa como insumo en un modelo hidrológico distribuido para la estimación de la producción de escorrentía; también puede usarse como insumo para modelos de erosión y producción de sedimentos (Harden, 1992) a escala de microcuencas. La microcuenca objeto del presente estudio está localizada al occidente de la ciudad de Medellín y hace parte del Valle de Aburrá (Figura 1). El Valle de Aburrá mide unos 30 Km en dirección sur – norte, y tiene un ancho máximo de alrededor de 7 Km. Las laderas del Valle de Aburrá están formadas por varios tipos de rocas cristalinas; la parte más baja del mismo está conformada por depósitos aluviales y lacustres asociados al río Medellín y depósitos de vertiente; su origen es probablemente tectónico (Rendón, 2002). El río Medellín es la corriente principal de este valle, donde presenta alturas que van desde los 1600 a los 1400 metros sobre el nivel del mar. El Valle de Aburrá está rodeado por montañas y altiplanos que varían en altura desde los 2400 a los 3200 msnm, donde nacen los tributarios del río Medellín.

La quebrada La Hueso es uno de esos afluentes y está localizada en la parte sur occidental del Valle de Aburrá. Nace en las estribaciones de la cuchilla Los Arrayanes en la cota 2132 msnm y luego de un recorrido de 8.18 Km en dirección oeste - este desemboca en el río Medellín en la cota 1462 msnm. Presenta un patrón de drenaje subdendrítico. El número de orden de la quebrada La Hueso, siguiendo el método de Strahler, es 6 y su microcuenca tiene un área 12.38 Km².

Su parte alta presenta un cauce rectilíneo de cañón poco profundo, el cual se va profundizando en forma de “V”, volviéndose además sinuoso a medida que desciende. Presenta vertientes escarpadas con pendientes hasta del 60% que se suavizan en las demás zonas hasta el 30%. Los retiros de la quebrada se encuentran cubiertos por vegetación de rastrojo altos y bajos.

La parte media que comprende las cotas 1700 y 1500 msnm posee pendientes variables entre el 30 y el 15%. Las vertientes se han desarrollado sobre el Batolito de Altavista, roca granítica altamente fracturada y meteorizada, lo que permite en algunas partes su utilización como material pétreo. Se reportan movimientos en masa debido a la alta meteorización y sobresaturación de agua en los suelos, reptación, deslizamientos antiguos y recientes causados principalmente por acción antrópica (canteras y banqueros). Esta microcuenca se encuentra modificada debido a la urbanización intensa que incluso ha invadido sus retiros en ciertas zonas.

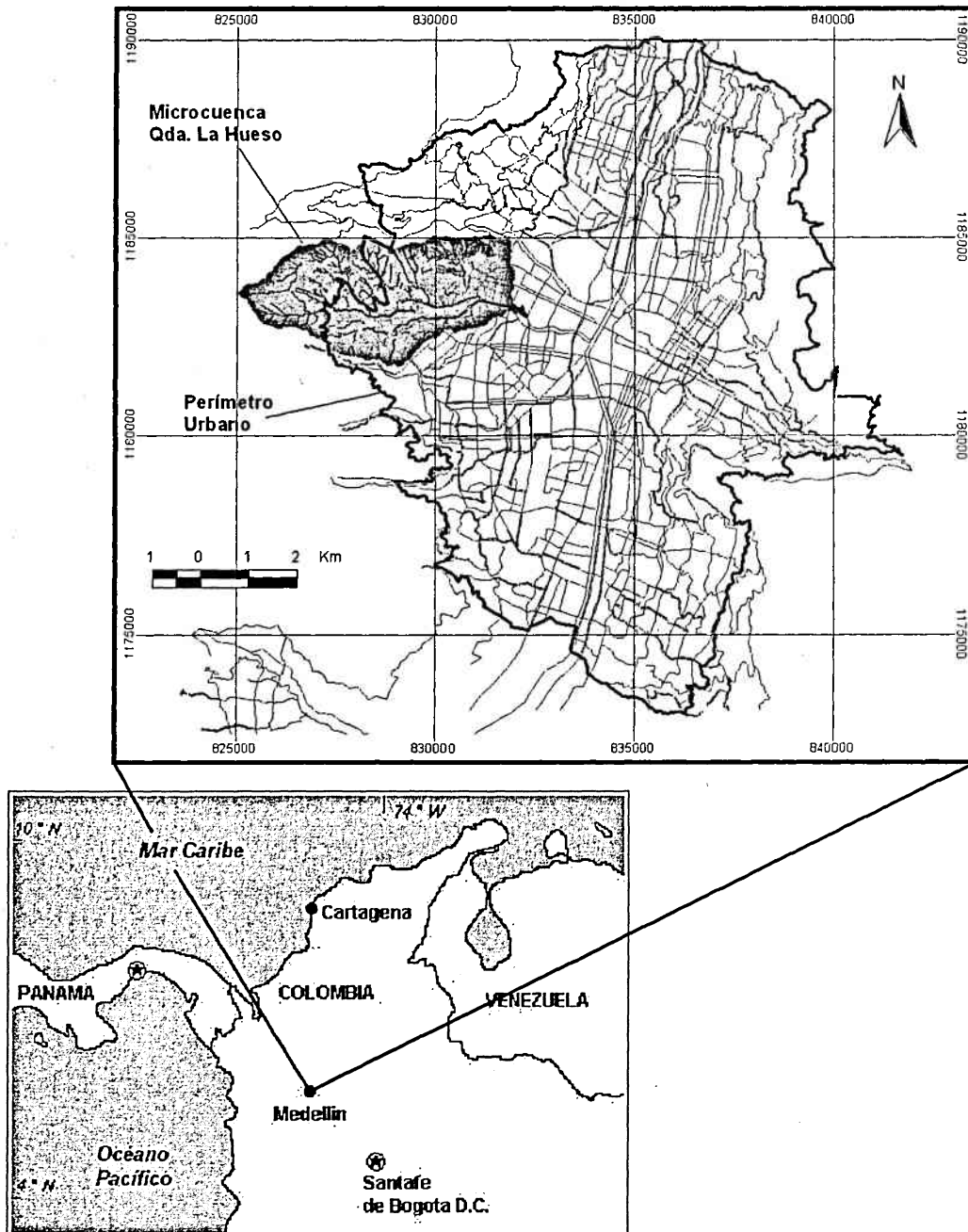


FIGURA 1.
Localización de la microcuenca de la quebrada La Hueso en el contexto urbano de la ciudad de Medellín.

En la parte baja de la microcuenca se localizan los depósitos aluviales y posee rangos de pendiente entre 3% y 15%; allí el desarrollo urbano ha transformado por completo los cauces naturales por medio de canalizaciones. En esta microcuenca se han presentado dos eventos recientes con efectos negativos: el 20 de octubre de 1984, cuando se presentó un fuerte aguacero con una duración de 90 minutos y una precipitación de 56 mm, según los datos de la estación pluviométrica de San Cristóbal perteneciente a Empresas Públicas de Medellín. La gran cantidad de escorrentía generada sobrepasó la capacidad de las obras de canalización, causando desbordamiento y daños en los barrios Santa Lucía, Antonio Nariño y El Socorro

(Correa, Montoya et al., 1984, citados por Mi Río, Municipio de Medellín, PNUD, 1995). Posteriormente, hubo otro evento de grandes proporciones donde se desbordaron varias quebradas de la zona suroccidental en el año de 1988.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se usaron tres capas de información: mapa de uso del suelo, mapa de formaciones superficiales y mapa de pendientes. El mapa de uso del suelo fue elaborado a partir de la interpretación de fotografías aéreas de 1998 en escala 1: 10.000 y 1: 20.000; el mapa de pendientes fue obtenido a partir de un modelo digital de elevación de alta calidad generado a partir de información topográfica digital, curvas de nivel y puntos de cota, a escala 1: 5.000 y 1: 2.000, levantada en la década de los 90; el mapa de formaciones superficiales fue tomado del Mapa de Formaciones Superficiales en escala 1: 10.000 publicado en 1999 en el Plan de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Medellín (Secretaría de Planeación Municipio de Medellín, 2000). Toda la información se procesó en el sistema de información geográfica ArcInfo 8.0™ para obtener mapas en formato raster codificados para cada tipo de cobertura o uso del suelo, intervalo de pendientes y formación superficial.

El objetivo de la superposición fue generar zonas homogéneas, con igual formación superficial, igual cobertura vegetal y uso del suelo e igual intervalo de pendiente, para luego relacionarlas con la producción de escorrentía mediante la caracterización del coeficiente de escorrentía en cada zona. El coeficiente de escorrentía es la relación entre la cantidad de precipitación y la cantidad de escorrentía generada a partir de esa precipitación para una zona en particular (Chow et al., 1988) y sus valores varían entre 0, que quiere decir que la lluvia no produce escorrentía, y 1, que quiere decir que toda la lluvia que cae se convierte en escorrentía.

A continuación se presenta la caracterización de los mapas de uso del suelo y coberturas vegetales, formaciones superficiales y pendientes.

2.1. Mapa de Uso del Suelo y Coberturas Vegetales

El uso del suelo y la cobertura vegetal son considerados un factor importante en el comportamiento hidrológico del terreno (Fu et al., 2003; Huang et al., 2001), ya que la cobertura vegetal influye directamente en la relación entre precipitación y escorrentía generada por un evento en particular. Este mapa fue clasificado en los siguientes tipos de cobertura y uso del suelo:

Uso urbano y sub-urbano: áreas en donde prevalecen las construcciones y obras de infraestructura, tales como viviendas y vías, con pavimento impermeable o casi impermeable. Estas zonas presentan un coeficiente de escorrentía muy alto.

Bosques: son áreas donde predominan los bosques, ya sea naturales o plantados, los que en el área de estudio están constituidos principalmente por coníferas. La cobertura vegetal de estas áreas es densa, con predominio de árboles y en menor medida arbustos, por lo que presentan alta interceptación de la lluvia y poca escorrentía, de aquí que tengan un coeficiente de escorrentía muy bajo.

Pastos: esta tipología incluye todas las clases de pastos, tanto naturales como manejados, los cuales son usados principalmente para ganadería extensiva. Estas zonas presentan un coeficiente de escorrentía mayor que las zonas de bosques.

Cultivos: áreas dedicadas a la agricultura, sin diferenciar entre tipos de cultivos. En estas zonas la producción de sedimentos y la generación de escorrentía depende más del manejo de los cultivos que del tipo de especies cultivadas. En la investigación se supuso que estas zonas presentan un coeficiente de escorrentía medio, entre pastos y bosques.

Suelo desnudo: áreas degradadas por minería o movimientos de masa. No tienen cobertura vegetal y presentan un coeficiente de escorrentía muy alto y son la principal fuente de sedimentos en la microcuenca.

Este mapa fue levantado a partir de la interpretación de fotografías aéreas en escalas 1: 10.000 y 1: 20.000 tomadas en 1998. La Figura 2 presenta el mapa de uso del suelo para la microcuenca de la quebrada La Hueso.

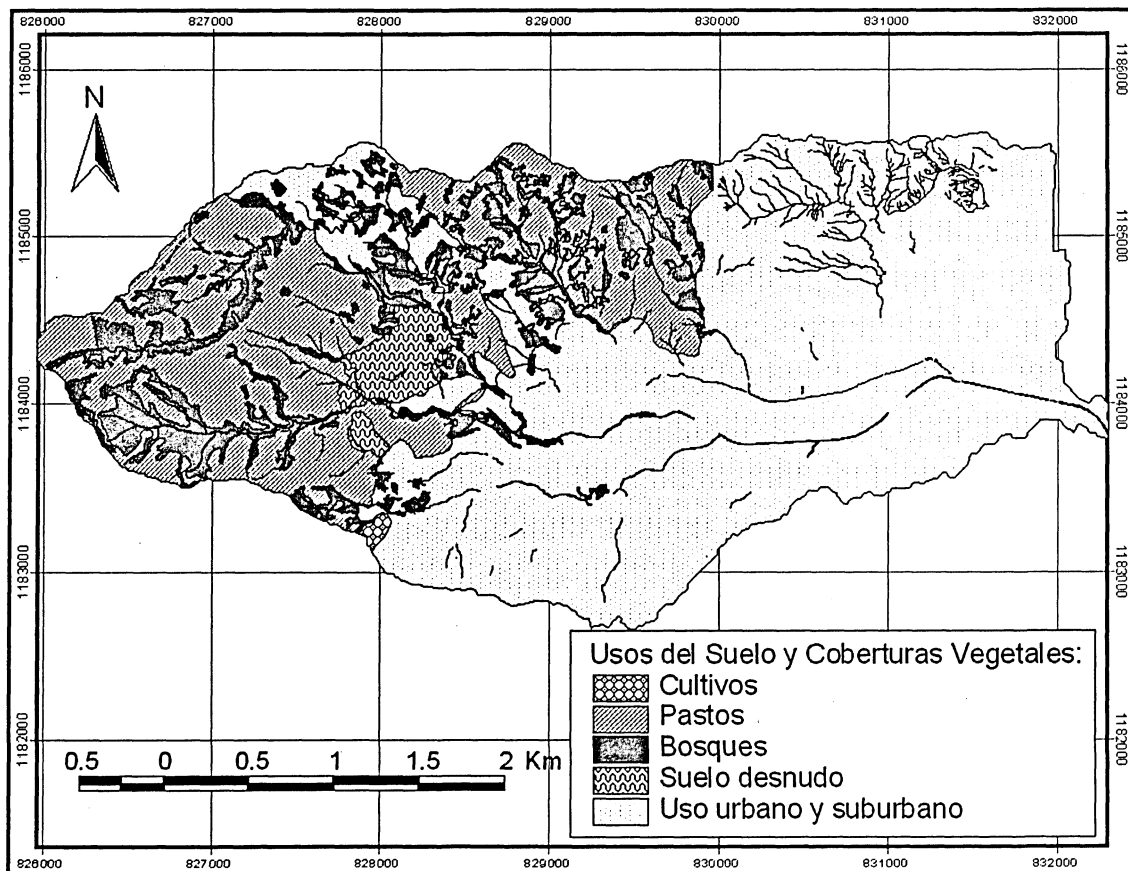


FIGURA 2.
Mapa de uso del suelo y coberturas vegetales de la microcuenca de la quebrada La Hueso.

2.2. Mapa de Pendientes

El mapa de pendientes fue generado a partir de un modelo digital de elevaciones con tamaño de celda de 5 metros. Para generar este modelo se usó información topográfica e hidrográfica, es decir, curvas de nivel, puntos de cota y drenajes de agua, en el subprograma *topogrid* del programa Arc Info 8.0™. Esta información fue obtenida de mapas topográficos a escala 1: 2.000 para la zona urbana y 1: 5.000 para la zona rural. La Figura 3 muestra en tres dimensiones el modelo digital de elevaciones de la microcuenca de la quebrada La Hueso.

La información de pendientes fue generada usando la función *slope* de ArcInfo 8.0™. Este mapa, en formato raster, presenta el valor de la pendiente en cada celda en relación con los 8 celdas que la rodean, y su cálculo está basado en la distancia entre los centroides de las celdas y la diferencia entre los valores de elevación. Para cada celda el proceso tiene en cuenta un vecindario de 3 x 3 y determina la máxima pendiente con base en la técnica de promedio máximo.

Distribución de valores de pendiente en la microcuenca y determinación de intervalos de pendientes

Con la información del mapa de pendientes de la microcuenca se construyó un histograma de frecuencias antes de la clasificación en intervalos, con el fin de determinar los intervalos basados en los valores reales presentes en la cuenca

y eliminar arbitrariedad en el proceso. El histograma de frecuencias (Figura 4) muestra la distribución natural de los valores de pendientes en la microcuenca y es una gráfica de número de celdas, que significa porcentaje de área, vs. valor de pendiente.

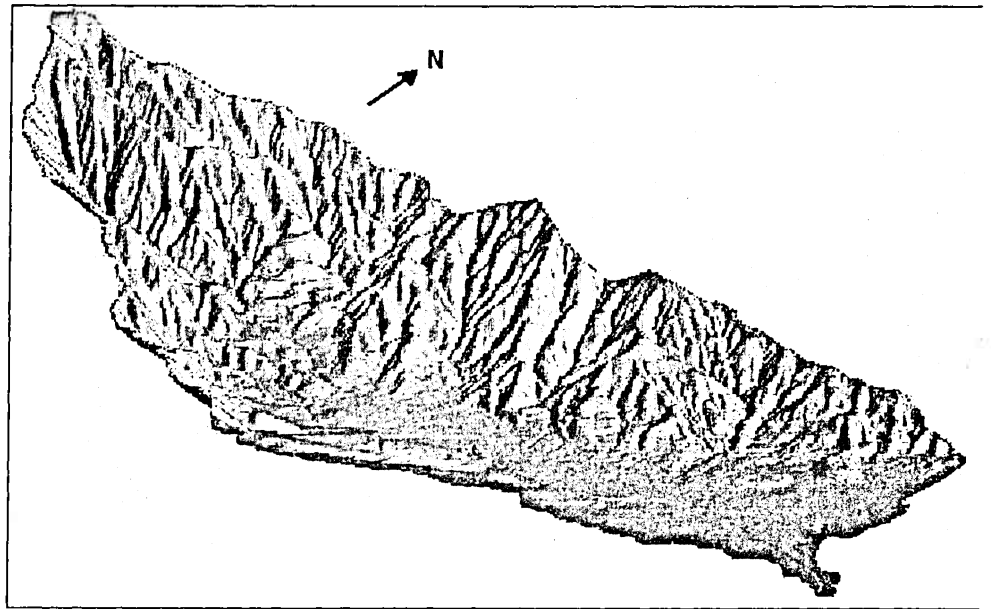


FIGURA 3.

Vista 3D del modelo digital de elevaciones de la microcuenca de la quebrada La Hueso.

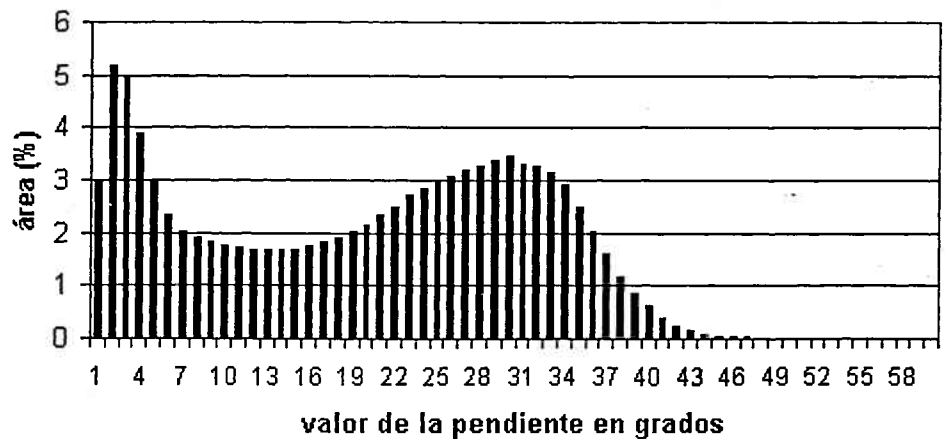


FIGURA 4.

Histograma de pendientes de la microcuenca de la quebrada La Hueso.

Una vez obtenido el histograma de frecuencias, se probaron diferentes métodos de clasificación para observar cuál método refleja mejor el comportamiento natural de la pendiente dentro de la microcuenca y si existía algún agrupamiento natural de los datos. Se decidió clasificar en intervalos usando el método de Quiebres Naturales (*Natural Breaks*) ya que corresponde a una diferenciación natural de los valores de pendiente en varios intervalos. Este método muestra las tendencias naturales de agrupación presentes en el conjunto de datos y así los intervalos obtenidos expresan mejor la

morfometría de la microcuenca; además es menos subjetivo que otras clasificaciones que se basan en la selección arbitraria de intervalos. Las clases se obtienen a partir de agrupaciones naturales y patrones presentes en los datos, luego el conjunto de datos se divide en clases escogiendo los límites donde hay diferencias relativas más grandes en los valores (Minami *et al.*, 1999). Los intervalos determinados de esta forma se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1.

Intervalos de pendientes definidos para la microcuenca de la quebrada La Hueso con el método de los Quebres Naturales.

Intervalos de pendientes
0° a 10°
11° a 22°
22° a 32°
33° a 60°

A partir de estos intervalos se generó un nuevo mapa raster, que representa la distribución espacial de los cuatro intervalos seleccionados, mediante la reclasificación del mapa de pendientes.

2.3. Mapa de formaciones superficiales

El mapa de formaciones superficiales presenta la delimitación de zonas con procesos morfogenéticos y materiales parentales similares. El mapa de formaciones superficiales no presenta información de tipos de suelos ni de las propiedades de los suelos, que son las cualidades más importantes en los procesos hidrológicos de producción de sedimentos y escorrentía. Ya que no existe cartografía detallada de suelos para la zona de estudio, el comportamiento hidrológico se infirió a partir de la información de las formaciones superficiales, suponiendo que el tipo de suelo es aproximadamente homogéneo para cada formación superficial y teniendo en cuenta que para cada formación superficial el material parental también es aproximadamente homogéneo en toda su extensión así como los procesos de morfogénesis que dan origen a la formación de suelos, entre otros.

Para la presente investigación se usó el Mapa de Formaciones Superficiales a escala 1: 10.000 publicado en 1999 en el Plan de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Medellín (Secretaría de Planeación Municipio de Medellín, 2000). Este mapa muestra dos tipos principales de formaciones superficiales: las derivadas como resultado de los procesos de meteorización y formación de suelos *in situ* a partir de materiales parentales (suelos residuales) y las que fueron formadas como resultado de la deposición de materiales que han sido transportados por procesos aluviales o de vertiente (depósitos).

Suelos residuales: comprenden los suelos residuales derivados de rocas diferentes presentes en el área de estudio, así como aquellos derivados de depósitos antiguos de vertiente, de antiguos flujos de escombros y de antiguos flujos de lodos.

Depósitos: comprenden los depósitos recientes en los cuales la formación de suelo es prácticamente inexistente. Estos están agrupados en depósitos de vertiente, depósitos de flujos de lodos, depósitos de flujos mezclados de lodos y escombros y depósitos aluviales.

3. RESULTADOS

Una vez recopilada la información de los tres mapas, los atributos de cada capa de información fueron codificados numéricamente como se presenta en las Tablas 2, 3 y 4 y después se procedió a hacer cambio de formato, de vector a raster, con base en dichos códigos.

TABLA 2.
Códigos de los tipos de formación superficial.

Símbolo	Tipo de Formación superficial	Código
Qrvs/Kvs	Suelo residual / Afloramiento rocoso del la F. Quebrada Grande (R.V.)	01
Qrgd/Jgr	Suelo residual / Afloramiento rocoso del Gabro de Romeral	02
Qrnp/Pnp	Suelo residual / Afloramiento rocoso del Neis de Palmitas	03
Qrus/Jus	Suelo residual / Afloramiento rocoso de Rocas Ultramáficas de Romeral	04
Qrs/Ks	Suelo residual / Afloramiento rocoso de Serpentina	05
Qra/Pa	Suelo residual / Afloramiento rocoso de Anfibolita	06
Qrgl/Kgls	Suelo residual / Afloramiento rocoso de Gabro de Loreto	07
Qrdg/Kgd	Suelo residual / Afloramiento rocoso del Stock de Altavista	08
Qre/Pes	Suelo residual / Afloramiento rocoso de esquistos y esquisto feldespático	09
Qrk/Kev		
Qrod/Kod	Suelo residual / Afloramiento rocoso del Batolito Antioqueño	10
Qrni/Pni	Suelo residual / Afloramiento rocoso del Neis de la Iguana	11
Ra	Rocas ultramáficas	12
Pa + Qc	Suelo residual / Afloramiento rocoso de anfibolita intercalada con depósitos coluviales	13
Qf	Depósitos de flujos	14
Qc	Depósitos coluviales	15
Qal	Depósitos aluviales en general	16
Qa	Depósitos artificiales o antrópicos	17
Qrvq/Kvq	Suelo residual / Afloramiento rocoso de la F. Quebrada Grande (M.S.)	18

TABLA 3.
Códigos de los intervalos de pendientes en grados.

Intervalo	Código
0° - 10°	1000
11° - 22°	2000
23° - 32°	3000
33° - 64°	4000

TABLA 4.
Códigos de uso del suelo y coberturas vegetales.

Categoría	Tipo de uso del suelo	Código
Bosque	Vegetación densa y alta (bosques plantados, naturales, rastrojo alto)	100000
Pasto	Vegetación baja (pastos nativos, manejados, mejorados, rastrojo bajo)	200000
Cultivo	Cultivos	300000
Urbano	Urbano	400000
Suelo degradado	Suelo degradado (explotaciones de material, suelo erosionado)	500000

Luego de la codificación se llevó a cabo la superposición de los mapas en formato raster, con el objetivo de delimitar espacialmente las zonas con igual formación superficial, igual intervalo de pendiente e igual uso del suelo y cobertura vegetal. Los códigos de las zonas así obtenidas, denominadas zonas homogéneas, corresponden a la suma de los códigos de cada capa de información para cada celda. Por ejemplo, para una celda en la microcuenca de la quebrada La Hueso:

Capa de información:	Atributo:	Código:
Usos del suelo y cob. vegetales	Bosques	100000
Intervalos de pendiente	11° - 22°	2000
Formaciones superficiales	Suelo residual del Stock de Altavista	08
Zona Homogénea (código resultado de la suma)		1002008

El resultado del proceso de superposición es el Mapa de Zonas Homogéneas, es un mapa muy fragmentado, muestra las zonas que presentan características similares en cuanto a formaciones superficiales, intervalos de pendiente y usos del suelo.

Con el Mapa de Zonas Homogéneas se llevó a cabo un análisis de la importancia relativa en cuanto a la superficie de cada tipo de zona homogénea dentro la microcuenca, con el objetivo de identificar las zonas con mayor cubrimiento. Dichas zonas son las más importantes en la caracterización de la microcuenca porque indican cuáles son los tipos de zona homogénea con mayor ocurrencia y por lo tanto, como enfocar los ensayos de cuantificación de la producción de escorrentía con el simulador de lluvias (McQueen, 1963) que es la parte del trabajo más costosa y dispendiosa.

Los tipos de zona homogénea seleccionados para la caracterización con el simulador de lluvias fueron escogidos con base en el porcentaje de área acumulada en cada tipo de zona con respecto al área rural de la microcuenca: se seleccionó como área umbral representativa el 5% del área rural y se caracterizaron todos los tipos de zona homogénea que estuvieran por encima de este porcentaje. En la Figura 5 se presenta el histograma de frecuencias de las zonas homogéneas de la microcuenca de la quebrada La Hueso.

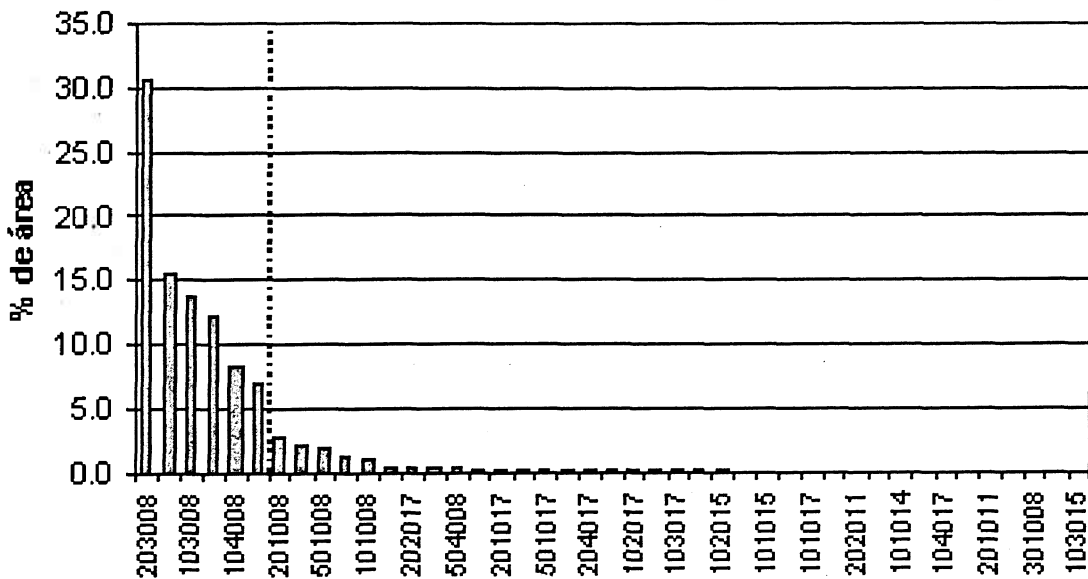


FIGURA 5.

Histograma de frecuencias para el porcentaje de área de las Zonas Homogéneas en la microcuenca de la quebrada La Hueso. Los códigos en las abscisas corresponden a los códigos de las zonas homogéneas; la línea roja indica el umbral del 5% del área rural de la microcuenca.

La caracterización de la producción de escorrentía en las zonas seleccionadas se hizo mediante el uso de un simulador de lluvia portátil similar al diseñado por McQueen (1963). Los ensayos llevados a cabo con el simulador de lluvias consisten en la aplicación controlada de una lluvia simulada, de intensidad y duración conocidas, sobre una porción del terreno, y la medición de la escorrentía producida durante el ensayo. Así, a partir de los datos del ensayo, se relaciona la intensidad de la lluvia con el coeficiente de escorrentía.

Además de las zonas seleccionadas, se efectuaron ensayos con el simulador de lluvias en zonas homogéneas que cumplen las siguientes características:

- Uso silvopastoril, pendiente 8° y formación superficial depósito de flujos.
- Bosque de pinos, pendiente mayor de 32° y formación superficial suelo residual de esquistos.
- Bosque nativo, pendiente 10° y formación superficial cenizas volcánicas sobre suelo residual de Anfibolita.
- Suelo desnudo, pendiente de 18° y formación superficial suelo residual del Stock de Altavista.

Lo anterior se hizo con el fin de tener un valor estimado para comparar entre pastos y uso silvopastoril para la misma pendiente y misma formación superficial, para tener un indicativo de cuál es el orden del coeficiente de escorrentía en los bosques medido con el simulador de lluvias y para tener un valor del coeficiente de escorrentía en zonas con suelo desnudo y comparar con zonas de pastos en el mismo intervalo de pendiente y para la misma formación superficial.

Las zonas que no fueron caracterizadas en campo fueron extrapoladas siguiendo los siguientes criterios:

- Los cultivos presentan un coeficiente de escorrentía con valores intermedios entre los obtenidos en pastos y en suelos desnudos, debido a que en su mayoría los cultivos poseen partes del suelo protegidas por la especie vegetal que se está cultivando y partes del suelo que se encuentran desnudas.
- Una zona homogénea que comparta el mismo uso del suelo y la misma formación superficial que otra, presenta un coeficiente de escorrentía mayor en cuanto su pendiente sea mayor.
- Para las zonas homogéneas que se encuentran sin cobertura vegetal (suelo desnudo) se utilizaron los datos del ensayo efectuado en el Stock de Altavista.
- En las zonas homogéneas que se encuentran bajo bosque se asignó un coeficiente de escorrentía que varía entre 0.01 y 0.06 de acuerdo con los resultados obtenidos bajo bosque nativo y pendiente de 10
- Para las zonas que se encuentran en uso urbano se determinó un coeficiente de escorrentía que varía entre 0.85 y 0.95. Esta variación está asociada al período de retorno de las lluvias.

Por último, se generó el Mapa de Producción de Escorrentía (Figura 6) para la microcuenca de la quebrada La Hueso mediante reclasificación del mapa de Zonas Homogéneas con los resultados de los ensayos de caracterización de la escorrentía con el simulador de lluvias.

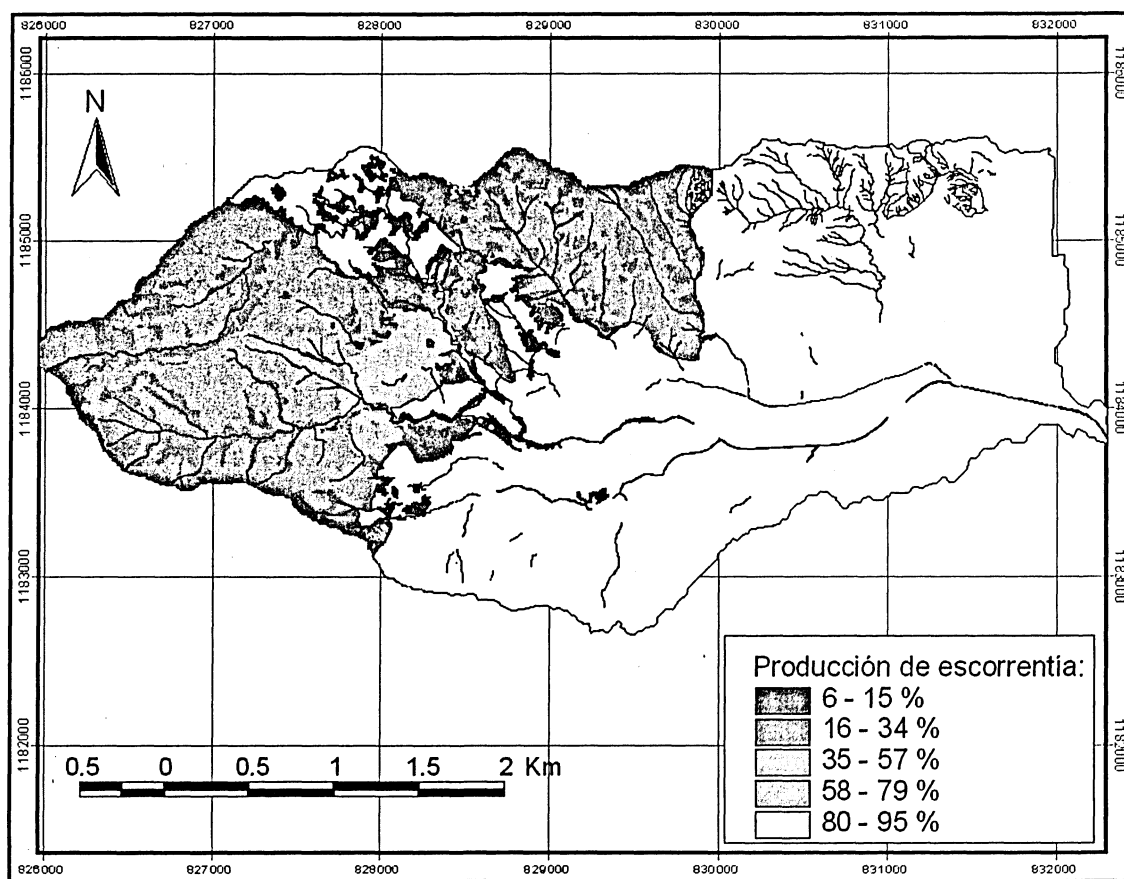


FIGURA 6.

Mapa de Producción de Escorrentía de la microcuenca de la quebrada La Hueso.

4. DISCUSIÓN

El mapa de producción de escorrentía es un instrumento útil para la ordenación del territorio y para la prevención de inundaciones; por ejemplo sirve para minimizar el impacto de lluvias extremas cambiando las políticas de uso del suelo en las áreas con alta producción de escorrentía y puede ser de vital importancia en microcuencas urbanizadas para detectar áreas expuestas a inundaciones torrenciales. Mapas de este tipo se usaron como insumo en un modelo hidrológico distribuido para estimar la producción de escorrentía a través de la microcuenca y su acumulación para eventos de lluvias con un período de retorno de 100 años, con la ayuda de las funciones de dirección de flujo y acumulación de flujo del programa ArcInfo 8TM. Las zonas de inundación asociadas a dichos eventos se determinaron después de modelar el comportamiento hidráulico en el canal principal de la microcuenca. El modelamiento hidráulico incluyó el levantamiento de secciones transversales del canal principal y el procesamiento de los datos obtenidos de caudales máximos distribuidos a lo largo del canal principal y de la geometría del mismo en el programa HEC-RAS. Luego se procesaron los resultados de niveles máximos en cada sección transversal para generar una superficie de nivel máximo para cada evento calculado y a partir de la comparación de dicha superficie con la topografía de las zonas aledañas al canal se determinaron las zonas con amenaza por inundación. La topografía de las zonas aledañas al canal se tomó del modelo digital de elevaciones de la microcuenca; el cual fue obtenido a partir de curvas de nivel de mapas en escala 1: 2.000 para la zona urbana y 1: 5.000 para la zona rural (Montoya y Patiño, 2001).

La zonificación geomorfológica también puede usarse como insumo para determinar las zonas más susceptibles a los

deslizamientos dentro de la microcuenca; las zonas homogéneas dan información acerca de las formaciones superficiales, intervalo de pendiente y cobertura vegetal y estos parámetros se pueden calificar fácilmente en términos de susceptibilidad al deslizamiento. Para obtener mapas de amenaza por deslizamiento de buena calidad, la información de zonas homogéneas debería combinarse con mapas de precipitación que muestren la variabilidad espacial de los eventos máximos de lluvia sobre la microcuenca para determinar de esta manera las áreas con mayor susceptibilidad del terreno al deslizamiento y con la presencia de fuertes precipitaciones que actúen como el factor detonante de los deslizamientos.

El simulador de lluvias portátil también se puede usar para cuantificar la producción de sedimentos (Harden, 1988, 1992) y, combinándolo con el mapa de zonas homogéneas, es posible determinar tasas de erosión o susceptibilidad a la erosión a lo largo de la microcuenca, lo cual sería el primer paso en el modelado de la evolución del paisaje a escala de la microcuenca; puede también usarse para estimar la pérdida de suelo y su variabilidad espacial (Mati et al., 2000).

Ya que la susceptibilidad a las fuerzas erosivas está determinada principalmente por las propiedades del suelo (Bryan, 2000), el mapa de zonas homogéneas también puede usarse como insumo para determinar la variabilidad espacial de los suelos y modelar la erodabilidad y determinar el patrón espacial de la producción de sedimentos y su transporte en las laderas a lo largo de la microcuenca. Con el uso del simulador de lluvias es posible simular una lluvia con intensidad y duración determinada, pero es importante anotar que ningún simulador de lluvias reproduce fielmente las condiciones de las lluvias naturales, por lo que las investigaciones en este sentido deben enfocarse a la implementación de parcelas experimentales de estudio instrumentadas con pluviógrafos, limnógrafos y dispositivos para cuantificar la humedad del suelo y la producción de sedimentos en las que se pueda monitorear y registrar las condiciones de las lluvias naturales y los efectos producidos por las mismas. En la presente investigación se simuló lluvias de intensidades y duraciones diferentes en cada zona homogénea y se calcularon regresiones estadísticas de los datos de coeficiente de escorrentía e intensidad de lluvia para obtener ecuaciones que permitieron estimar los valores de coeficientes de escorrentía para intensidades que no fueron reproducidas con el simulador de lluvias durante los ensayos de campo.

Por otro lado, considerando que la zonificación propuesta se puede usar como insumo para estimar la erodabilidad del suelo, puede ser útil también para calificar y priorizar zonas para rehabilitación después de estimar la erosión potencial del terreno (Gellis et al., 2001).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ilustra la utilidad de la zonificación propuesta. Sólo se necesitan tres capas de información para llevarla a cabo. Esta zonificación fue usada como entrada en un modelo hidrológico distribuido sencillo para estimar eventos de escorrentía máxima y su comportamiento a través de la microcuenca. Paralelamente se determinaron caudales máximos siguiendo otros modelos hidrológicos agregados, tales como el método de las ecuaciones de regionalización (Smith et al., 1997), el método racional probabilístico (Schaake, 1967; Pilgrim, 1972; y French, 1967; citados por Smith et al., 1997), el método del índice de crecientes, el hidrograma unitario sintético del SCS y el hidrograma unitario sintético de Williams y Hann. La comparación de los resultados de los métodos usados no muestra diferencias significativas entre la aproximación usada en este trabajo y los métodos del hidrograma unitario sintético del SCS y el hidrograma unitario sintético de Williams y Hann, mientras que los resultados de los métodos racional probabilístico, del índice de crecientes y las ecuaciones de regionalización arrojaron valores de caudales máximos mucho más bajos.

Con esta zonificación se generaron mapas de producción de escorrentía de la microcuenca y las autoridades locales cuentan ahora con una herramienta útil para el ordenamiento y la prevención y mitigación de eventos extremos de lluvias e inundaciones. Aunque es imposible determinar el cambio de uso del suelo en zonas ya urbanizadas, sí es posible detectar zonas con alta producción de escorrentía en las partes altas de la microcuenca que puedan dedicarse a un uso diferente del actual que implique menos generación de escorrentía superficial: por ejemplo al cambiar el uso de zonas de pastos dedicadas a ganadería asociadas con las zonas de alta producción por uso silvopastoril o de aprovechamiento forestal que son usos asociados a menor producción de escorrentía, que ayuden a disminuir la producción

de escorrentía asociada a eventos de precipitación extremos en la zona rural de la microcuenca y por consiguiente ayuden a disminuir la producción total dentro de la misma.

Esta zonificación puede verse como una forma de sobrepasar la falta de información cuando no se dispone de otros parámetros para determinar la erodabilidad del suelo, o al menos como una forma para indicar las zonas que deben muestrearse para determinar dichos parámetros. Esta zonificación puede usarse también como insumo en la determinación cualitativa de la amenaza por deslizamientos y erosión y como un insumo útil para modelos de evolución del paisaje, ya que se puede localizar fácilmente fuentes de erosión y cuantificarlas por medio de muestreos y ensayos de campo, como con el uso del simulador de lluvias portátil, entre otros.

6. BIBLIOGRAFIA

- Bryan, R. B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, V. 32, p. 385 - 415.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R. y Mays, L. W. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw Hill Book Co. New York. 574 p.
- Gellis, A. C.; Cheama, A y Lalio, S. M. 2001. Developing a geomorphic approach for ranking watersheds for rehabilitation, Zuni Indian Reservation, New Mexico. *Geomorphology*, V. 37, p. 105 – 134.
- Fu, B., Wang, J., Chen, L., y Qiu, Y. 2003. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, V. 54, p. 197 – 213.
- Harden, C. 1988. Mesoscale estimation of soil erosion in the Rio Ambato drainage, Ecuadorian Sierra. *Mountain Research and Development*, Vol. 8. No. 4, p. 331 – 341.
- Harden, C. 1992. A new look at soil erosion processes on hillslopes in highland Ecuador. *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*. IAHS Publ. No. 209. p. 77 – 85.
- Huang, C.; Gascuel-Oudou, C. y Cros-Cayot, S. 2001. Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. *Catena*, V. 47, p. 177 – 188.
- Hutchinson, M. F. 1988. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. *Third International Symposium on Spatial Data Handling*, Sydney. Columbus, Ohio: International Geographical Union.
- Hutchinson, M. F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*: V. 106, p. 211-232
- Lineback, G. M., Marcus, W. A., Aspinall, R. y Custer. S. G. 2001. Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payete River, Idaho. *Geomorphology*, V. 37, pp. 149 – 166.
- Mc Queen. 1963. Development of a Hand Portable Rain Simulator Infiltrometer. U.S. Geological Survey Circular 482.
- Mati, B. M., Morgan, R. P. C., Gichuki, F. N., Quinton, J. N., Brener, T. R. y Liniger. H. P. 2000. Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: a case study of the upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. V. 2, Issue 2, pp. 78 – 86.
- Minami, M; Sakala, M. y Wrightsell, J. 1999. Using ArcMap™. ArcInfo™ 8. Redlands CA. 560 p.
- Montoya M., J. J. y Patiño Q., J. E. 2001. Estudio hidrometeorológico y geomorfológico de diez quebradas del Valle de Aburrá. Programa de Maestría en Ciencias de la Tierra, Departamento de Geología, Medellín. 196 p.
- Municipio de Medellín, Instituto Mi Río, PNUD, 1995. Levantamiento Integrado de Cuencas Hidrográficas del Municipio de Medellín. 328 p.
- Rendón, D. A., 2002. Tectonic and sedimentary evolution of the upper Aburrá Valley, Northern Colombian Andes. M. Sc. Thesis, Shimani University, Japan, 151 p.

Secretaría de Planeación Municipio de Medellín, 2000. Plan de Ordenamiento Territorial: Municipio de Medellín. Varios volúmenes.

Smith, R.; Vélez, M. V.; Acosta, Z. L.; Blandón, J. R.; Posada, J.E.; Botero, A.L.; Campo, J.M.; Montoya, R.D.; Múnera, J.C., Muñoz, S.I.; y Ruiz, C.D., 1997. Hidrología de Antioquia. Ed. Imprenta Departamental de Antioquia. 176 p, anexos.