

Amenaza hidrogeomorfológica

en microcuencas de la vertiente sur del Parque Nacional Waraira Repano, Distrito Capital, Venezuela

Hydro-geomorphological hazard in catchments of the Waraira Repano National Park south hillside, Distrito Capital, Venezuela

William Méndez¹⁻²

Larry Rivas¹

Eduardo Fernández¹

Ybrahim Díaz¹

Marielis Arévalo¹

Noraima Correa¹

¹ Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Caracas, Centro de Investigación 'Estudios del Medio Físico Venezolano', Caracas (Distrito Capital), Venezuela.

² Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Instituto de Investigación Científica, Desarrollo y Transferencia Tecnológica. Portoviejo, Manabí, Ecuador

williamsmendez@gmail.com
rivaslarry@gmail.com
fernandez_ej@hotmail.com
yddp_8@hotmail.com
marielisvanesa@hotmail.com
noraima-c@hotmail.com

Resumen

Recurrentemente las crecidas ocurridas en las quebradas Catuche, Anauco y Gamboa y en el río Cotiza, han afectado severamente a los barrios y urbanizaciones asentados sobre sus abanicos aluviales. De allí la necesidad de evaluar la amenaza hidrogeomorfológica en sus microcuencas, y en particular la generación de crecidas. La metodología consideró la evaluación de las condiciones hidráulicas de los cauces principales y grados de intervención antrópica, fotointerpretación geomorfológica, caracterización del régimen pluviométrico, mediciones y cálculos de parámetros morfométricos de las microcuencas, estimación de los tiempos de concentración, análisis de eventos extremos de precipitación y estimación de caudales picos de crecientes. Las respuestas hidrológicas violentas están controladas por los parámetros morfométricos de las microcuencas y de sus redes de drenaje, así como por las dimensiones de las tormentas y la intensidad y duración de las lluvias, que generan caudales pico en las crecientes de magnitudes importantes para distintos períodos de retorno.

Palabras clave: amenaza, hidrogeomorfología; microcuenca; creciente; Parque Nacional Waraira Repano.

Abstract

Repeatedly, the flashfloods occurred in the Catuche, Anauco and Gamboa creeks and in the Cotiza river have severely affected neighborhoods and urban areas settled on their alluvial fans. Hence, it is necessary to assess the hydro-geomorphological hazard in their catchments and particularly the generation of flashfloods. The methodology considered the evaluation of the hydraulic conditions of the main channels and levels of human intervention, geomorphological photo-interpretation, characterization of rainfall patterns, measurements and calculations of morphometric parameters of the catchments, estimation of the concentration times, analysis of extreme rainfall events and estimation of flashflood peak discharges. Sudden hydrological responses are controlled by the morphometric parameters of the catchments and their drainage networks, as well as the dimensions of storms and the intensity and duration of rainfalls, which form significant flashflood peak discharges for different return periods.

Key words: hazard, hydrogeomorphology; catchment; flash-flood; Waraira Repano National Park.

1. Introducción

El crecimiento demográfico y urbano que ha experimentado Caracas, nuestra ciudad capital, desde su fundación en el período colonial, y en particular de la manera vertiginosa como comenzó a desplegarse (metropolización) a partir de la segunda década del siglo XX (De Lisio, 2001), hasta nuestros días, han propiciado paralelamente el emplazamiento de desarrollos ocupacionales en áreas inestables desde el punto de vista geológico, geotécnico y geomorfológico.

La inexistencia de suficientes espacios relativamente más estables, ha obligado al asentamiento de urbanizaciones y barrios en áreas morfodinámicamente activas, como por ejemplo al norte del río Guaire, donde las comunidades están ubicadas sobre depósitos aluvio-torrenciales que han sido transportados por las quebradas que drenan desde la vertiente sur de 'El Ávila'. Tal es el caso que nos ocupa de las quebradas Catuche, Anaúco Gamboa y del río Cotiza, cuyas comunidades han sido impactadas en repetidas ocasiones por crecidas y aludes torrenciales (Singer *et al.*, 1983; Singer, 2010).

En tal sentido, señala Cilento (2002), que el paso de las localidades del Área Metropolitana de Caracas (AMC) de espacios contenidos, a territorio contenedor del ecosistema 'El Ávila', está claramente expresado en el hecho de que todos los lechos de los ríos y quebradas de su vertiente sur atraviesan la ciudad, incluso por debajo. De esta forma, apunta nuevamente Cilento (2002), 'El Ávila' no sólo representa el llamado 'pulmón vegetal' de Caracas, sino también la fuente de mayor amenaza para sus habitantes.

Es por ello necesario evaluar las condiciones de amenaza hidrogeomorfológica presentes en las microcuencas de estos cursos de agua, a fin de comprender su comportamiento hidrológico y morfodinámico, con la finalidad de recomendar algunas medidas para prevenir y/o mitigar los efectos de eventos naturales (crecidas y aludes torrenciales) sobre las comunidades asentadas en las áreas de influencia.

Entre algunos de los aportes que se han realizado en términos de evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica en cuencas ubicadas en el Parque Nacional Waraira Repano, caben mencionar los llevados a cabo por: Córdova y González (2003); Artigas *et al.* (2004); Aguirre y Jáuregui (2006); Bello *et al.* (2006); Fangqiang *et al.* (2006); Hernández (2006); Hong *et al.* (2006); López *et al.* (2006a); López *et al.* (2006b); Salcedo (2006); Shucheng *et al.* (2006); Méndez *et al.* (2007); Artigas y Córdova (2010); Córdova y González (2010); y Méndez (2014).

2. Área de estudio

El área de estudio está situada geográficamente en la Región Centro Norte del territorio venezolano, específicamente en el sector noroeste de la ciudad de Caracas; fisiográficamente se ubica en el extremo occidental de la vertiente sur del macizo 'El Ávila' (Figura 1). Político-administrativamente se circunscribe a la jurisdicción del municipio Libertador del Distrito Capital, así como a la del Área Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE) Parque Nacional 'Waraira Repano'. La localización geoastronómica está definida por las coordenadas $10^{\circ}31'17''$ y $10^{\circ}33'20''$ de latitud Norte y $66^{\circ}52'20''$ y $66^{\circ}55'40''$ de longitud Oeste.

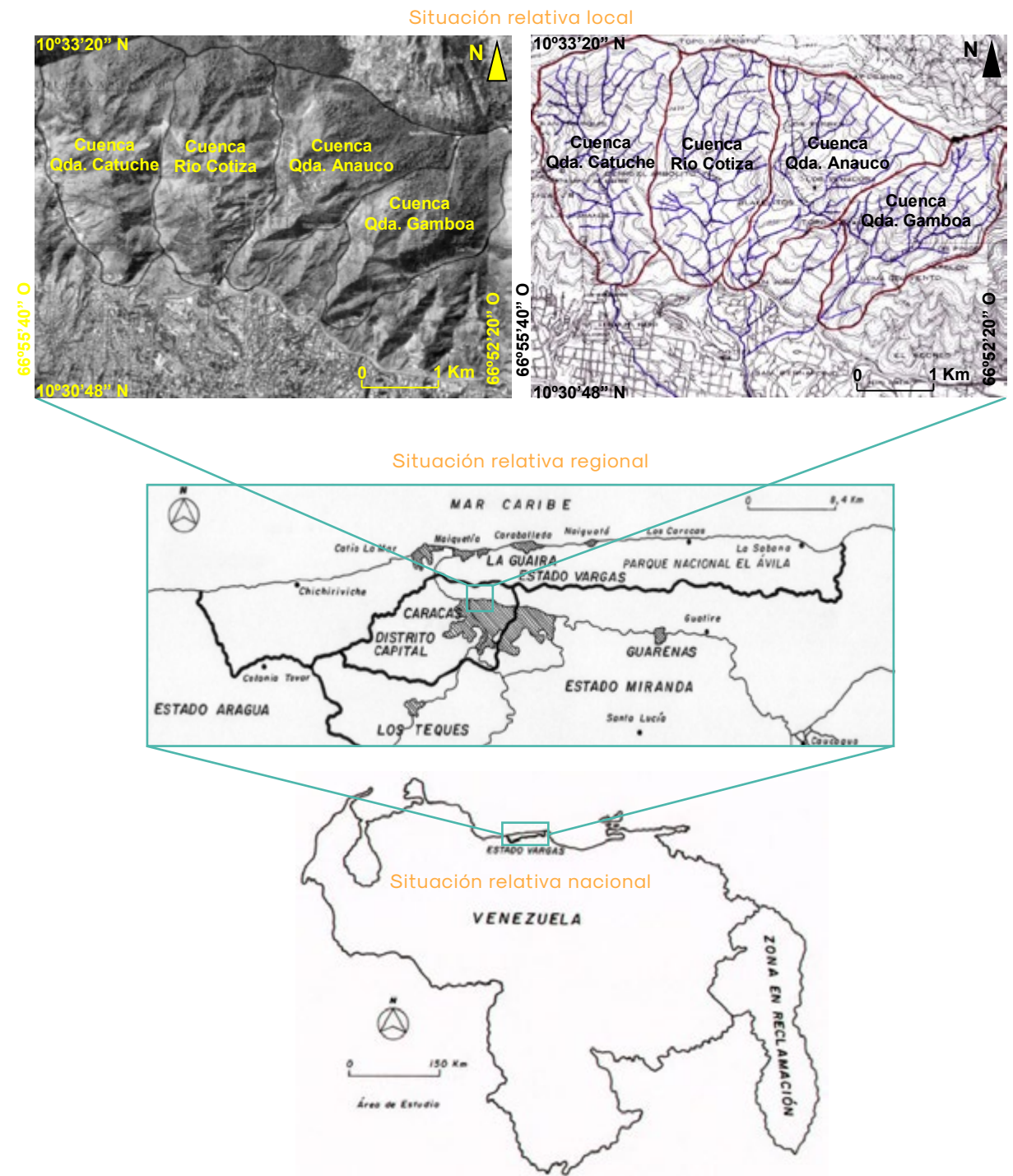


Figura 1. Localización de las microcuencas de las quebradas Catuche, Anaúco y Gamboa y del río Cotiza, vertiente sur del Parque Nacional Waraira Repano, Caracas, Distrito Capital, Venezuela. Fuente: Dirección de Cartografía Nacional [DCN], 1979; Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional [SAGECAN], 1995

Desde el punto de vista geológico-estructural, en la parte baja del área se extiende la traza principal de la falla de El Ávila con rumbo promedio N83°O y alta inclinación promedio hacia el sur (Audemard *et al.*, 2000). La litología está compuesta por unidades de rocas metamórficas correspondientes a los litodemos Augengneis de Peña de Mora, Complejo San Julián, Esquisto Las Mercedes y Anfibolita de Nirgua, y por los depósitos fluvio-torrenciales que conforman a los abanicos aluviales (Urbani y Rodríguez, 2004).

El relieve se caracteriza por presentar una topografía abrupta y escarpada en el sector montañoso del área, con vertientes de fuertes pendientes superiores a 45 %, y alturas entre 957 msnm y 2.113 msnm; en contraste con una topografía más suavizada en la parte baja del área (abanicos aluviales), con pendientes no mayores al 10 %, y alturas entre 870 msnm y 957 msnm.

El clima presenta rangos pluviométricos promedios anuales entre 1.379,3 mm y 732,9 mm (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMEH], 2010), con temperaturas medias anuales entre 15 °C y 21 °C. Los tipos climáticos imperantes corresponden a los de Tropical Lluvioso de Sabana (Awi) y Templado Moderado Lluvioso (Cwh, Cwi y Cwk), (Álvarez *et al.*, 1968).

Los suelos en general son ácidos con pH entre 4,3 y 5,2, de baja fertilidad, y pertenecientes a los órdenes Inceptisoles y Oxisoles. La vegetación varía en función de la altitud, reconociéndose las formaciones: bosques tropófilos o deciduos, bosques semideciduos, sabanas y herbazales, bosques transicionales, bosques siempre verdes montanos (bosques nublados) y bosques de galería (Carrero *et al.*, 1983; Petróleos de Venezuela, S.A., 1993).

Las actividades económicas en el sector montañoso se concentran en algunos enclaves agrícolas así como en el turismo, además de estar protegida mayoritariamente el área bajo la figura de Parque Nacional. Por el contrario, en la parte baja del área, dominada por la dinámica urbana, y representada por desarrollos residenciales e informales, destacan las actividades correspondientes al comercio, servicios, industria y economía informal.

3. Materiales y métodos

La metodología comprendió inicialmente, la ejecución de un trabajo de campo en el área de estudio, para observar y registrar información referente a: características de los materiales depositados en los cauces de las quebradas y el río, condiciones hidráulicas de los cauces principales y evidencias de intervención antrópica.

La cartografía base consistió de cartas topográficas a escala 1:25.000 [Dirección de Cartografía Nacional (DCN), 1979] y planos topográficos a escala 1:5.000 [DCN, 1958; Gobernación del Distrito Federal (GDF), 1984], los cuales se digitalizaron con apoyo en el software *ArcGIS 9.2* y sus módulos *ArcHydro* y *Spatial Analysis* para SIG. Se realizó el trazado de perímetros y realce de las redes de drenaje de las microcuencas.

Se llevó a cabo una interpretación geomorfológica preliminar con apoyo en imágenes *Google Earth* (2014), ortofotomapas a escala 1:25.000 [Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional (SAGE-CAN), 1995], y la cartografía base.

El estudio de la distribución espacio-temporal de las precipitaciones se basó en el tratamiento, análisis e interpretación de datos pluviométricos (totales y prome-

dios mensuales y anuales) correspondientes a las estaciones Hotel Humboldt (período 1958-1974), San Bernardino (período 1964-1974) y Los Venados (período 1994-2006), cuya información fue suministrada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH, 2010). Se estimaron previamente los datos faltantes en las series de precipitación, mediante el método racional (Guevara, 1987).

Se midieron y calcularon los parámetros morfométricos básicos de las microcuencas y redes de drenaje, y se construyeron perfiles topográficos con apoyo en la herramienta para SIG. Los valores de otros parámetros se obtuvieron de la lectura directa sobre la base cartográfica o aplicando las ecuaciones matemáticas que los definen.

Los tiempos de concentración de las microcuencas se estimaron en las salidas de los cursos de agua principales en el frente de montaña (ápices de los abanicos aluviales), empleando la ecuación de Kirpich (1940):

$$t_c = 0,01947L^{0,7} S^{-0,385}$$

donde t_c es el tiempo de concentración (min), L es la longitud el cauce principal (m) y S es la pendiente media del cauce principal (m/m). La velocidad media del flujo se calculó en la misma sección hidráulica de interés.

La estimación de las magnitudes de eventos extremos de precipitación, se llevó a cabo desarrollando un análisis de frecuencia de profundidades de láminas máximas anuales de precipitación de la estación San José de El Ávila [Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Dirección de Hidrología y Meteorología (MARN-DHM), 2010] para distintas dura-

ciones de la lluvia, mediante el ajuste del modelo de Valores Extremos Tipo I (Gumbel, 1941), según el método de Kite (1985).

Posteriormente, se calcularon las intensidades máximas (i) (mm/h) anuales de precipitación para distintas duraciones de la lluvia y períodos de retorno, mediante la expresión matemática convencional. A su vez, estos valores de intensidad se ajustaron y/o suavizaron, por medio de la aplicación de la ecuación de intensidad de la lluvia de Wenzel (1982):

$$i = \left(100 \left(\frac{\frac{c}{T_d^e + f} - i_0}{i_0} \right) \right)^2$$

donde c e f son coeficientes que varían con el lugar y el período de retorno, e i_0 es la intensidad máxima anual de precipitación (mm/h) para la misma duración de la lluvia y el mismo período de retorno dado, obtenidas previamente. Luego se recalcularon las intensidades máximas anuales de precipitación aplicando nuevamente la ecuación de Wenzel, de la manera como se expresa a continuación:

$$i = \frac{c}{T_d^e + f}$$

Estos valores de intensidades máximas anuales de precipitación se transformaron nuevamente en láminas máximas anuales de precipitación.

Con estos valores de láminas máximas anuales e intensidades máximas anuales de precipitación, se construyeron las curvas de profundidad-duración-frecuencia (PDF) y de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Posteriormente, se estimaron de manera gráfica sobre las curvas las intensida-

des máximas para los distintos períodos de retorno considerados, y para una duración de la lluvia igual a los tiempos de concentración.

Finalmente, se estimaron los caudales pico (Q_p) (m^3/s) de las crecientes para los distintos períodos de retorno considerados, mediante el empleo del método Racional (Chow *et al.*, 1994), y cuya ecuación se expresa como:

$$Q_p = \frac{CiA}{3,6}$$

donde C es el coeficiente de escorrentía que depende de las características de la superficie de la cuenca (tabla de valores estándares), y A es el área de la cuenca (km^2).

4. Análisis y discusión de los resultados

En los cauces principales de los cursos de agua estudiados, así como en sus áreas de desbordes contiguas sobre los sectores de abanicos aluviales en las partes bajas, se observa una fuerte intervención antrópica (Figura 2), lo cual confina a sus canales artificiales (embaulamientos) debido a los desarrollos informales principalmente, obstaculizando de esta manera la dinámica natural de sus secciones hidráulicas bajo eventos hidromorfológicos. Así mismo, estos canales están obstruidos por depósitos de basura, y en el sector montañoso por escombros de crecidas y aludes pasados, lo cual es material susceptible a ser transportado por nuevos eventos.

Esta situación conlleva a su vez a que en escenarios de crecientes y aludes torrenciales, las construcciones que se interponen a los flujos actúen como barreras dispersoras que desvían a los mismos, incrementando la posibilidad de ocurrencia

de avulsiones en los ápices de los abanicos y el poder destructivo de estos fenómenos. La superficie de los abanicos aluviales están completamente intervenidas, lo que determina una situación de riesgo permanente para las comunidades asentadas sobre ellos, considerando que son áreas morfodinámicamente inestables, debido a que en ellas se depositan los sedimentos transportados por las crecientes y aludes torrenciales.

Las microcuencas de las quebradas Catuche, Anauco y Gamboa y del río Cotiza, definidas así por poseer superficies no mayores a $20 km^2$, corresponden a sistemas de drenaje naturales típicos de ambientes montañosos, en los que claramente se pueden distinguir:

1. Áreas de captación o recepción de precipitaciones (cuenca propiamente dicha), modeladas en el sector montañoso, caracterizadas por la presencia de laderas y sistemas de canales de fuertes pendientes y topografía en general accidentada, así como procesos geomorfológicos propios de vertientes (procesos de remoción en masa).
2. Cauces o canales de desagües principales de los sistemas de drenaje, los cuales ocupan el fondo de estrechos valles terminales (cañones montañosos profundos de escarpadas vertientes que culminan en el frente de montaña, definido éste por un escarpe de falla) que sus corrientes han modelado, y que funcionan como ductos de evacuación de aguas y sedimentos de las crecientes.
3. Y el área piedemontina, distinguida por el desarrollo de abanicos aluviales que evidencian la predominancia de una morfodinámica depositacional de natu-



Figura 2. Vistas de la elocuente intervención antrópica en las inmediaciones (recorridos de los cursos de agua sobre las áreas de abanicos aluviales) de los cauces principales de las quebradas y río (a) Catuche, (b) Cotiza, (c) Anauco y (d) Gamboa

raleza principalmente fluvio-torrencial, tal como se aprecia en sus depósitos característicos, y por una topografía más suave con pendientes de valores significativamente bajos.

Las microcuencas estudiadas son sistemas hidrogeomorfológicos de muy pequeñas dimensiones con orientaciones cuasi-perpendiculares al eje urbano principal de la ciudad de Caracas, y cuyos parámetros morfométricos relacionados con sus tamaños y geometría (área, perímetro, longitud, ancho y diámetro) (Cuadro 2), determinan condiciones particulares que favorecen la ocurrencia de crecidas con hidrogramas de picos pronunciados y corta duración y menores tiempos de concentración de estos sistemas, en presencia de tormentas significativas en intensidad, duración y dimensiones.

La distribución altimétrica (altitudes mínima, máxima y media) acusa desniveles e incrementos de gradientes topográficos importantes (relieve máximo y radio del relieve), que determinan la existencia de laderas con inclinaciones superiores a 45 % (Cuadro 2 y Figura 4), y cauces principales de las quebradas y río con pendientes promedio altas (Figura 5) para recorridos de escasa longitud, lo cual genera condiciones favorables para la activación de procesos erosivos y de arrastre de materiales, así

De acuerdo con la distribución espacio-temporal de las lluvias en el área, los menores montos pluviométricos mensuales (entre 21,6 mm y 97,5 mm) se observan en su parte baja, y los mayores en el sector montañoso, destacándose que las lluvias más copiosas se reciben en las partes medias hacia las altas de las microcuencas, principalmente en los profundos y estrechos valles de los cauces principales, donde se represan y ascienden los flujos de aire (Cuadro 1 y Figura 3).

Los mayores montos mensuales (entre 57,8 mm y 39,2 mm) se concentran entre los meses de mayo y noviembre. En las series temporales se observan picos sobresalientes de montos mensuales de precipitaciones, que se desvían notoriamente por encima de la línea 2σ, los cuales pudieran estar vinculados con eventos de crecidas (Figura 3).

Cuadro 1. Datos de precipitación (P) (mm) (promedios mensuales y anuales) correspondientes a las estaciones Hotel Humboldt, Los Venados y San Bernardino.

Fuente: INAMEH, 2010

Estación	Meses												Anual
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Hotel Humboldt	33,2	24,3	69,8	68,4	73,7	85,3	126,7	127,8	112,9	115,8	97,9	60,3	996,1
Los Venados	77,3	51,1	30,6	71,9	111,7	150,4	164,0	106,4	209,8	211,2	139,2	55,6	1.379,3
San Bernardino	34,8	21,6	37,2	61,1	57,8	68,5	76,6	91,4	75,0	97,5	63,4	48,0	732,9

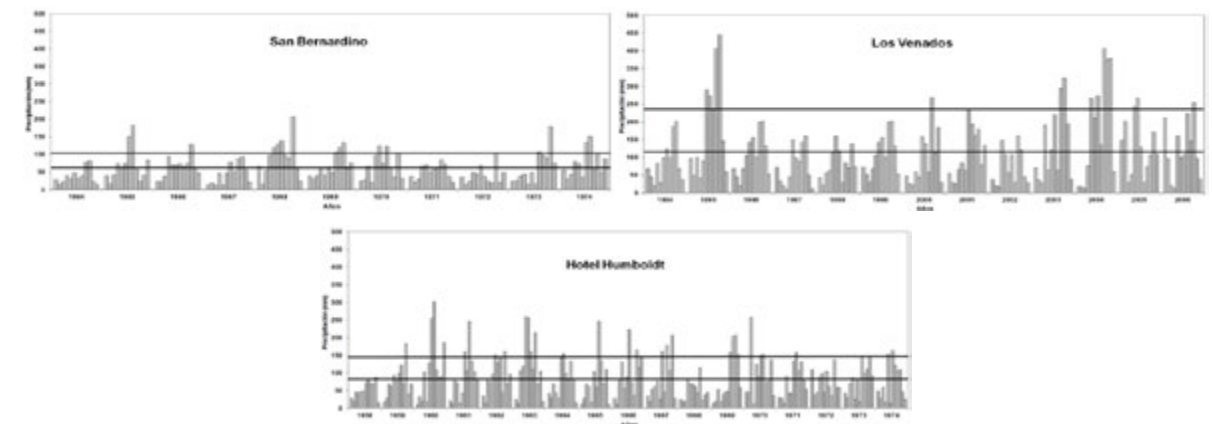
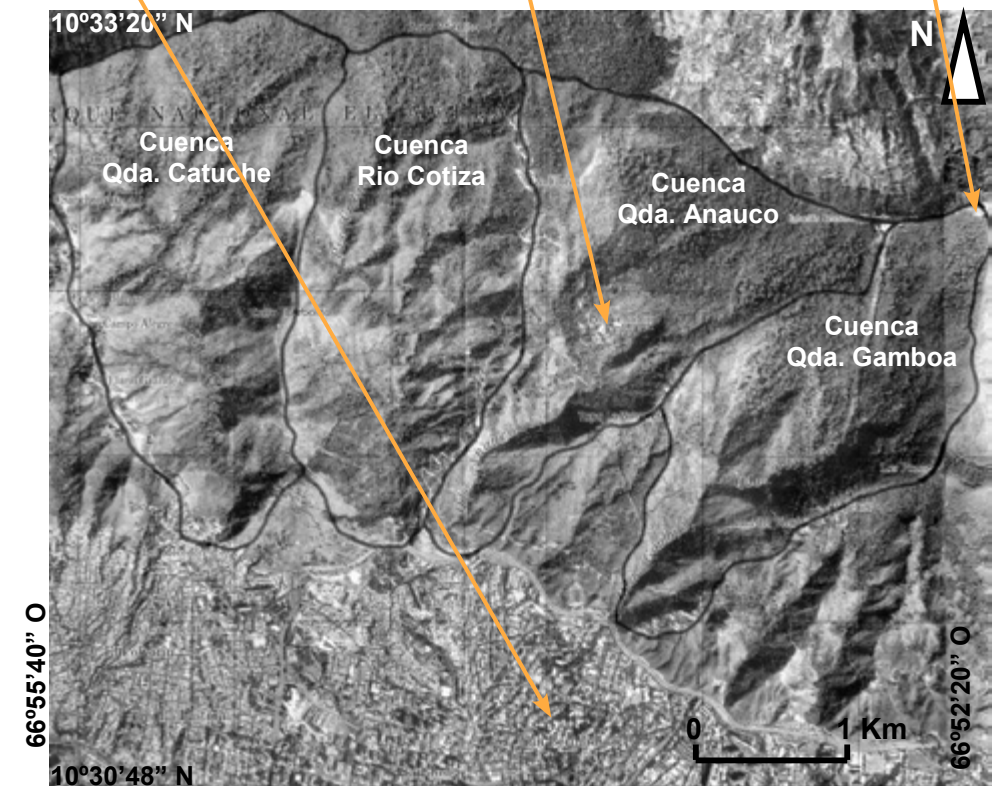
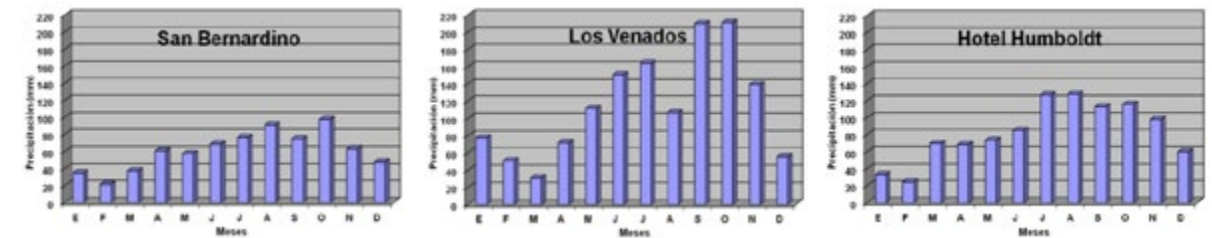
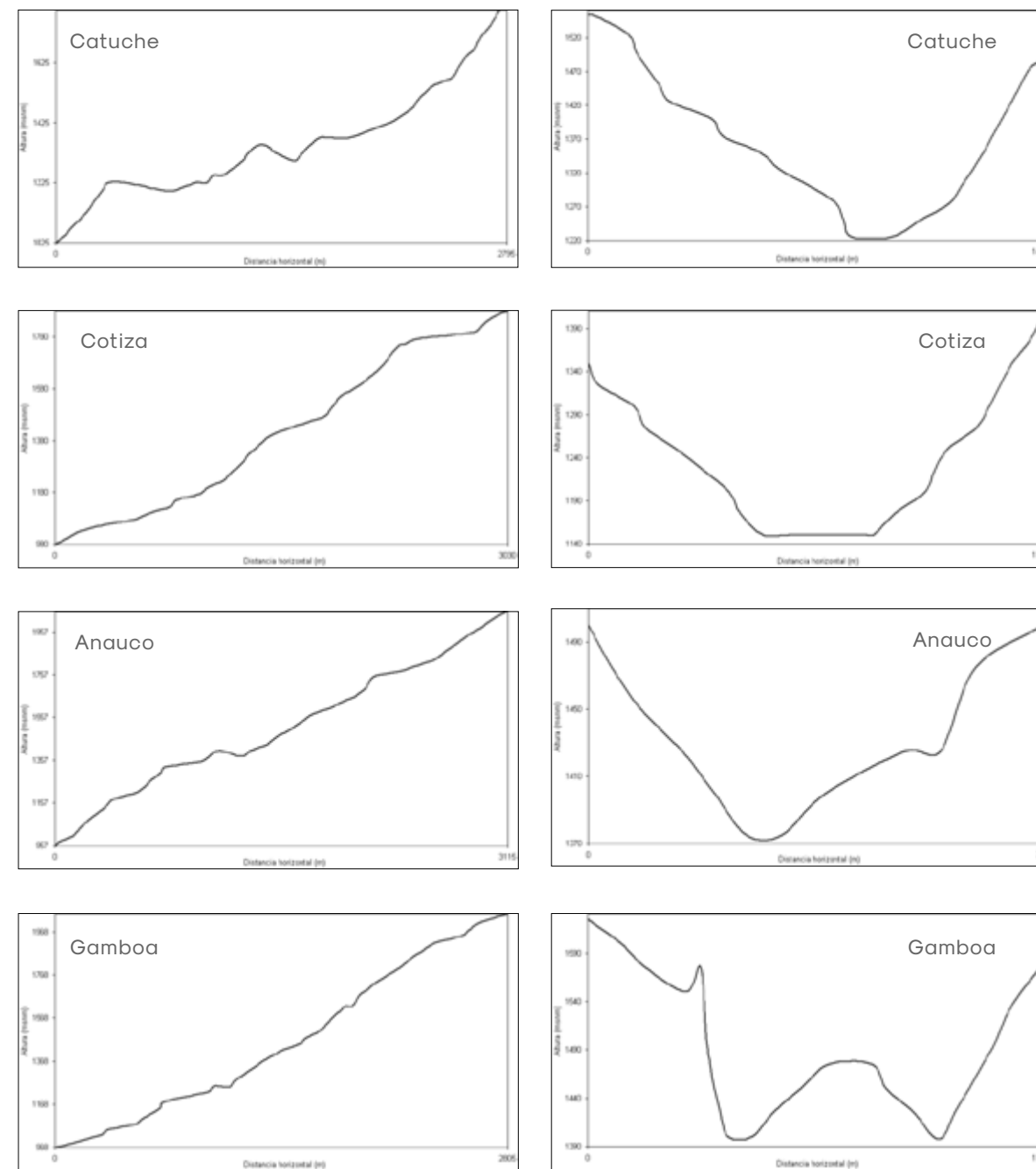


Figura 3. Distribución espacio-temporal de las precipitaciones en las microcuencas de drenaje

Cuadro 2. Parámetros morfométricos de las microcuencas de drenaje de las quebradas Catuche, Anauco y Gamboa y del río Cotiza.

Escala de la cuenca (área km ²)					
Estadístico	Área	Rectángulo equivalente	Vertiente mayor	Vertiente menor	
Valor máximo	3,92	7,61	2,92	1,40	
Valor mínimo	2,59	5,00	1,52	0,54	
Media	3,04	5,96	2,02	1,02	
Estadístico	Perímetro (km)	Longitud (Km)	Ancho promedio (km)	Ancho máximo (km)	Diámetro (km)
Valor máximo	9,85	3,44	1,21	2,52	2,23
Valor mínimo	8,30	3,02	0,79	1,64	1,82
Media	9,00	3,19	0,95	1,88	1,96
Gradiente y forma del relieve de la cuenca (msnm)					
Estadístico	Altitud mínima	Altitud máxima	Altitud media	Relieve máximo	Radio del relieve
Valor máximo	1.025,00	2.113,00	1.540,50	1.145,00	372,85
Valor mínimo	957,00	1.880,00	1.430,00	893,00	274,62
Media	982,50	1.998,38	1.490,44	1.015,88	318,85
Estadístico	Integral hipsométrica	Coefficiente de masividad (msnm/km ²)	Coefficiente orográfico	Relieve relativo (msnm/km)	Número de rugosidad de Melton
Valor máximo	0,50	586,87	892.046,33	137,13	0,70
Valor mínimo	0,50	375,32	552.187,90	93,95	0,45
Media	0,50	504,57	754.255,12	113,46	0,59
Forma de la cuenca					
Estadístico	Elongación	Perímetro relativo de crenulación	Coefficiente de compacidad	Índice de alargamiento	Índice de homogeneidad
Valor máximo	0,61	37,46	1,71	2,06	0,71
Valor mínimo	0,48	4,04	1,34	1,20	0,34
Media	0,55	22,68	1,46	1,76	0,53
Forma de la cuenca					
Estadístico	Índice de simetría	Factor forma	Alargamiento de Coquot	Radio de elongación	Radio de circularidad
Valor máximo	3,80	0,37	2,09	0,69	0,55
Valor mínimo	1,09	0,23	1,64	0,54	0,34
Media	2,31	0,30	1,85	0,62	0,48
Extensión y forma de la red de drenaje (Km)					
Estadístico	Longitud de la corriente principal (desembocadura)	Longitud de la corriente principal (ápice del abanico)	Longitud media del valle de la corriente principal	Longitud total de las corrientes de la red de drenaje	Sinuosidad total de la corriente principal
Valor máximo	7,26	4,19	3,79	34,05	1,35
Valor mínimo	3,82	3,77	3,39	24,23	1,18
Media	5,51	3,92	3,54	29,59	1,25
Estadístico	Sinuosidad topográfica de la corriente principal	Sinuosidad hidráulica de la corriente principal	Densidad de drenaje (km ² /km ²)	Coefficiente de mantenimiento del canal (km ² /km)	Extensión media de la escorrentía superficial (km)
Valor máximo	1,22	1,13	11,66	0,12	0,03
Valor mínimo	1,06	1,09	8,37	0,09	0,02
Media	1,13	1,11	9,85	0,10	0,03
Orden y magnitud de la red de drenaje					
Estadístico	Orden de la corriente	Número total de corrientes	Longitud total, red de drenaje	Relación de bifurcación media	
Valor máximo	5	142	34,05	4,70	
Valor mínimo	4	85	24,23	3,26	
Media	4,25	116,25	29,74	4,11	
Estadístico	Relación de longitud media	Relación de pendiente media	Frecuencia media de las corrientes	Coefficiente de torrencialidad	
Valor máximo	2,45	1,46	48,63	38,70	
Valor mínimo	1,96	1,35	32,82	24,32	
Media	2,23	1,41	38,41	29,42	



Perfiles longitudinales

Perfiles transversales

Figura 4. Perfiles topográficos longitudinales y transversales (cuencas medias) de las microcuencas de drenaje

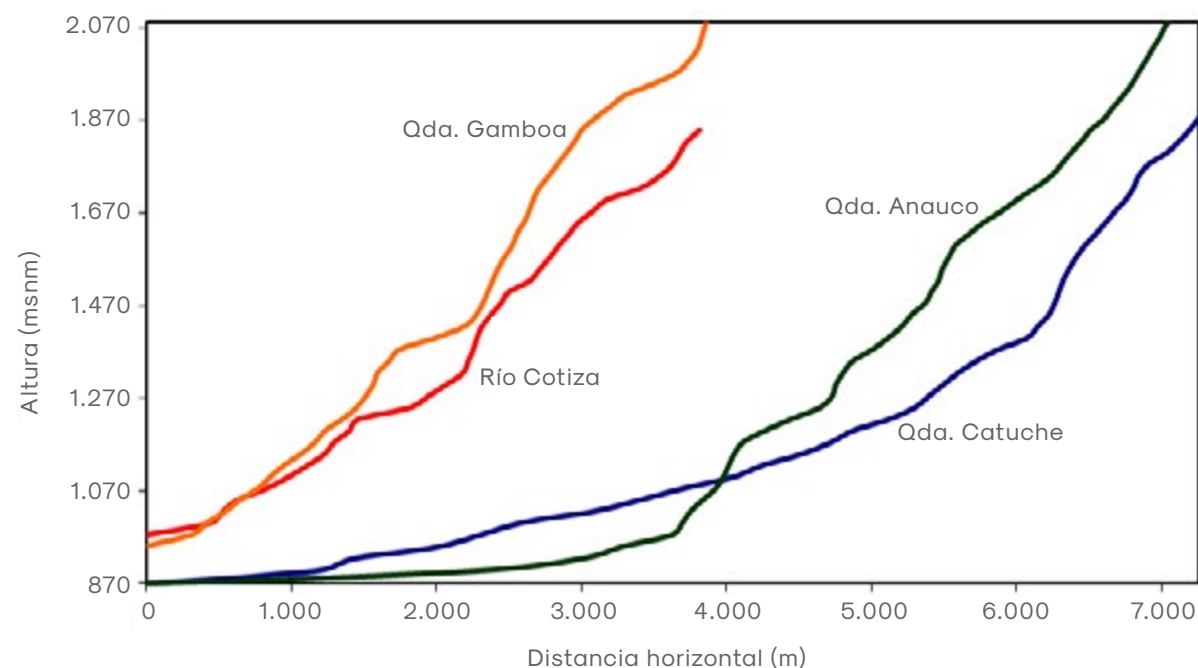


Figura 5. Perfiles topográficos longitudinales de los cauces de las quebradas y río principales de las microcuencas de drenaje

como crecidas importantes con caudales picos pronunciados y corta duración.

El número de rugosidad de Melton (**Cuadro 2**) arroja valores moderados a altos (microcuencas bastante rugosas), lo que implica una alta probabilidad de que se generen crecidas torrenciales y flujos de detritos, corroborado además, por los elevados desniveles topográficos y altos valores de densidad de drenaje.

De acuerdo con los datos de la integral hipsométrica (**Cuadro 2**), estas microcuencas exhiben valores intermedios de áreas bajo sus curvas hipsométricas, con lo cual se infiere que dichas curvas presentan formas cóncava-convexas a ligeramente convexas, permitiendo interpretar que el potencial erosivo de las redes de drenaje ha sido moderado, así como la ocurrencia de procesos de remoción en masa en laderas,

sobre todo en presencia de eventos de precipitaciones extraordinarias o de intensidades y duraciones suficientes para activar estos procesos hidromorfológicos; y por otro lado, indican un moderado estadio evolutivo y un balance tectónico-erosivo negativo, atribuible a una posible baja tasa de levantamiento. Aun así, tales rasgos definen una topografía muy accidentada, lo que condiciona a su vez, respuestas hidrológicas rápidas y agresivas de estas microcuencas.

Los valores de los parámetros referidos a la forma de las microcuencas (coeficiente de compacidad, factor forma y radio de circularidad), (**Cuadro 2**), indican que se trata de sistemas de morfología o configuración planimétrica alargada, con lo cual se esperarían hidrogramas de crecidas asimétricos con picos más suavizados y de

mayor duración, así como mayores tiempos de concentración y retardo de las microcuencas, y baja frecuencia en la ocurrencia de crecidas; sin embargo, dadas las pequeñas dimensiones de éstas, sus formas no ejercen un fuerte control en sus respuestas hidrológicas, como sí lo ejercen los parámetros referidos al relieve, las dimensiones de la tormenta y la intensidad y duración de las lluvias.

A excepción de la microcuenca del río Cotiza, las otras presentan valores de asimetría relativamente más altos (por ejemplo, microcuenca de la quebrada Anauco), (**Cuadro 2**), con lo cual las vertientes (con relación a los cursos de agua principales) de mayores superficies, poseen mayor extensión de la red de drenaje, y por lo tanto, sus aportes a las crecidas son mayores. Estas asimetrías, probablemente obedecen a un control morfoestructural.

Las redes de drenaje exhiben en líneas generales, patrones sub-paralelos, indicando cierta homogeneidad topográfica del área drenada, así como un control geológico-estructural (patrones de fracturas) en la disposición y orientación espacial de los cauces. Las corrientes principales de estas microcuencas tienen recorridos muy cortos que escasamente alcanzan 4 km (quebrada Catuche), con desniveles importantes superiores a 800 msnm.

Para tratarse de cuencas tan pequeñas, presentan altos valores de densidad de drenaje, orden de la cuenca, frecuencia media de las corrientes y coeficiente de torrencialidad (**Cuadro 2**), elementos que indican que son sistemas de drenaje altamente efectivos en la evacuación de las aguas de lluvia y con un alto potencial erosivo; y por otro lado, muestran relaciones de bifurcación

media, longitud media y pendiente media con valores característicos de cuencas bien drenadas y de rápida evacuación (**Cuadro 2**), lo que incide de igual forma con gran peso, en las características de las respuestas hidrológicas que se han venido señalando, e incrementan el nivel de peligrosidad por crecidas torrenciales.

Los tiempos de concentración y las velocidades promedio de los flujos calculados para las cuencas de drenaje de las quebradas y ríos principales, se muestran en el **Cuadro 3**. Estos tiempos son bastante cortos, correspondiéndose con valores críticos que suponen el tiempo de arribo de una crecida a las secciones hidráulicas de referencia, principalmente en los ápices de los abanicos, a partir de los cuales hacia su desembocadura y bordeando los cauces principales de los cursos de agua sobre los depósitos torrenciales de dichos abanicos, se asienta una proporción importante de la población de la ciudad capital.

El análisis de eventos extremos de la lluvia, indica valores críticos de profundidades de láminas e intensidades máximas anuales para eventos de 1 hora de duración y períodos de retorno de 50 y 100 años, que superan los 65 mm/h y 70 mm/h respectivamente (**Figura 6**), y para duraciones de la lluvia igual al tiempo de concentración de cada una de las microcuencas, se obtuvieron valores máximos todos superiores a los 25 mm para el caso de las profundidades de láminas máximas, y valores todos superiores a los 100 mm/h en el caso de las intensidades máximas (**Cuadro 4**), y principalmente para escenarios de 50 y 100 años de período de retorno.

Las dimensiones de las tormentas y la intensidad y duración de las lluvias, ejer-

Cuadro 3. Tiempos de concentración de las microcuencas de drenaje y velocidad media del flujo de las quebradas Catuche, Anauco y Gamboa y del río Cotiza

Microcuenca	Tiempo de concentración (T _c)			Velocidad media del flujo (V _{mf})	
	h	min	seg	km/h	m/s
Catuche	0,37	22,11	1.326,79	11,36	3,15
Cotiza	0,32	19,03	1.141,70	12,05	3,35
Anauco	0,27	15,93	955,79	13,03	3,62
Gamboa	0,30	18,23	1.093,69	12,87	3,58

Cuadro 4. Profundidades e intensidades de láminas máximas anuales de precipitación de la estación pluviográfica San José de El Ávila, y caudales picos de las crecientes para una duración de la lluvia igual al tiempo de concentración de las microcuencas de las quebradas Catuche, Anauco y Gamboa y del río Cotiza y distintos períodos de retorno

Microcuenca	Profundidad de la lámina máxima anual de precipitación (P) (mm)						
	2,33	5	10	25	50	100	500
Catuche	30,96	36,86	37,33	38,07	38,59	39,07	51,60
Cotiza	28,69	32,33	32,56	33,19	33,51	34,02	46,94
Anauco	26,55	27,24	27,61	28,14	28,41	28,85	41,15
Gamboa	29,01	30,78	31,19	31,90	32,20	32,61	45,57

Microcuenca	Intensidad máxima anual de precipitación (I) (mm/h)						
	2,33	5	10	25	50	100	500
Catuche	84,00	100,00	101,30	103,30	104,70	106,00	140,00
Cotiza	90,47	101,93	102,66	104,66	105,67	107,26	148,00
Anauco	100,01	102,60	104,00	106,00	107,00	108,66	155,00
Gamboa	95,50	101,30	102,66	105,00	106,00	107,33	150,00

Microcuenca	Caudal pico de la creciente (Q _p) (m ³ /s)						
	2,33	5	10	25	50	100	500
Catuche	32,01	42,47	45,22	50,62	54,72	60,02	88,42
Cotiza	25,68	32,24	34,14	38,20	41,14	45,24	69,63
Anauco	25,18	28,79	30,68	34,32	36,95	40,65	64,68
Gamboa	25,25	29,85	31,80	35,70	38,44	42,17	65,73

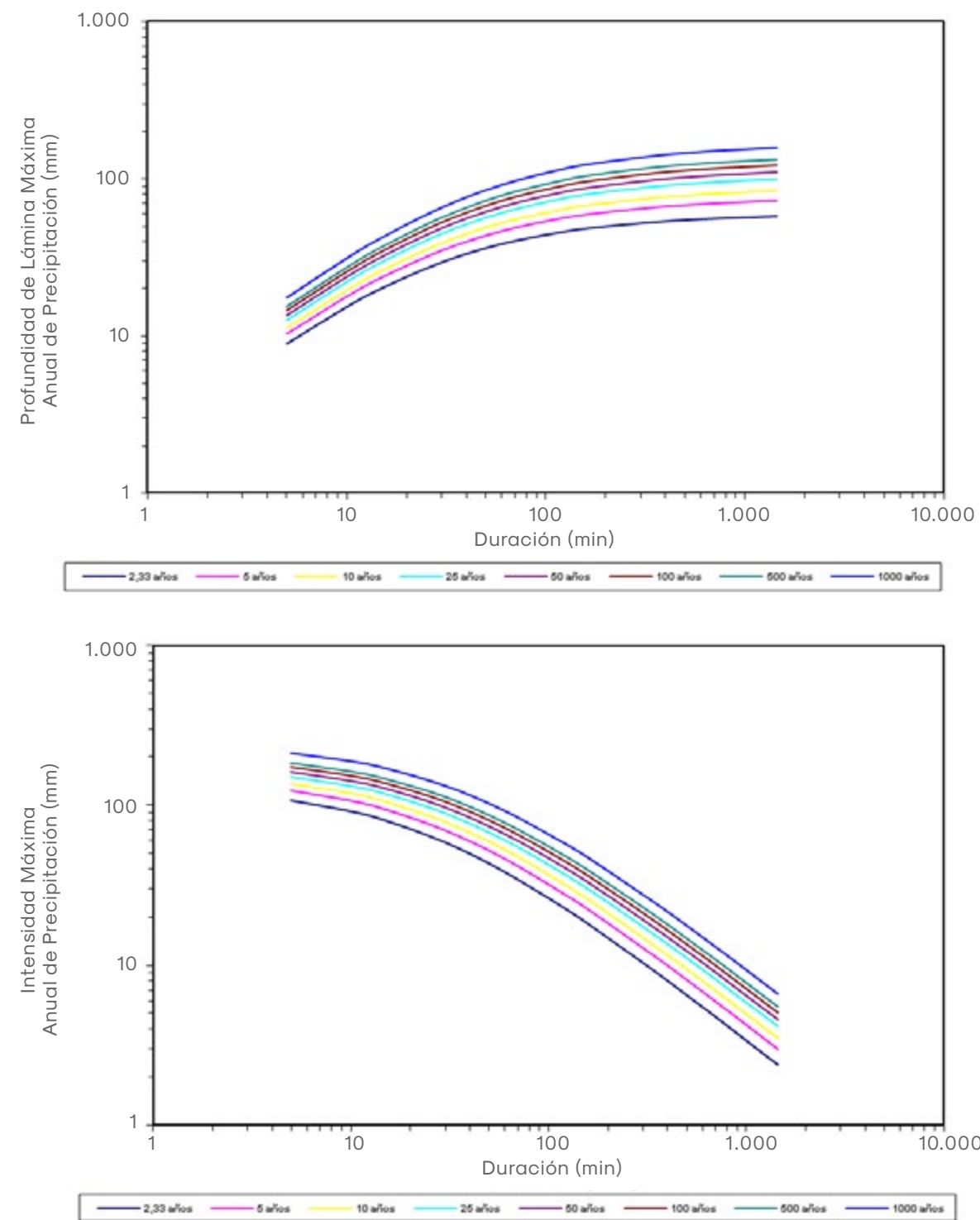


Figura 6. Curvas de Profundidad - Duración - Frecuencia (PDF) y de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) ajustadas por el método de Wenzel para láminas máximas anuales de precipitación de la estación San José del Ávila

cen gran influencia en la activación de estos controles morfométricos, y en la generación de crecientes y aludes torrenciales.

Las magnitudes estimadas para los caudales picos de las crecientes, superan los 25 m³/s para todos los períodos de retorno en las cuatro microcuencas, con los mayores valores en la microcuenca de la quebrada Catuche (todos por encima de 32 m³/s). Para eventos de 50 y 100 años de períodos de retorno, se obtuvieron caudales que superan los 35 m³/s y 40 m³/s respectivamente. Eventos mucho más extremos (período de retorno de 500 años), alcanzan caudales por encima de los 64 m³/s (Cuadro 4). Estas magnitudes, representan crecidas torrenciales de importantes volúmenes de agua.

4. Conclusiones y recomendaciones

Las microcuencas de drenaje analizadas son sistemas cuyas magnitudes de sus respuestas hidrológicas súbitas y agresivas por efecto de eventos extremos de precipitación, así como sus regímenes torrenciales y cortos tiempos de concentración, están controlados principalmente por las pequeñas dimensiones de éstos (área, perímetro, longitud, ancho y diámetro), y su morfología tipo embudo.

También influyen con gran peso en este comportamiento, las marcadas diferencias altitudinales en la topografía, fuertes pendientes en las vertientes y cauces de las áreas de captación, cortas longitudes de los cauces principales, las longitudes totales de los sistemas de drenaje, densidades de drenaje medias a altas, órdenes de cuencas altos (entre 4 y 5) para sistemas tan pequeños, relaciones de bifurcación media entre 3,26 y 4,70, altas frecuencias medias de las

corrientes de las redes de drenaje y altos coeficientes de torrencialidad.

De igual forma, estas respuestas dependen también de las dimensiones de las tormentas que afectan el área, así como de la intensidad y duración de las lluvias, y en particular de los eventos extremos.

En vista de la amenaza hidrogeomorfológica evaluada en las microcuencas del área de estudio, se recomienda:

1. Reactivar y crear nuevas estaciones hidrometeorológicas en toda la extensión superficial de la vertiente sur del macizo 'El Ávila', a fin densificar la red de mediciones.
2. Reactivar e implementar nuevas estaciones con sistemas de alertas tempranas en todas las microcuencas cuyas corrientes principales cruzan la ciudad capital, así como planes de acción y contingencia ante la ocurrencia de crecidas y aludes torrenciales.
3. Ejecutar jornadas de información, preparación y autoprotección de las comunidades en situación de riesgo, frente a la ocurrencia de crecidas y aludes torrenciales de estos cursos de agua.
4. Preparar a las comunidades para la autogestión de sus propios riesgos, así como en la elaboración de mapas de riesgos y recursos comunitarios.
5. Difundir la información relacionada con la dinámica hidrogeomorfológica de las microcuencas de la vertiente sur del Parque Nacional Waraira Repano, a fin de que los organismos competentes y quienes toman decisiones en cuanto a políticas públicas, la consideren como insumos para la revisión y redefinición de los planes de ordenación del territorio a nivel regional y local.

5. Referencias citadas

- AGUIRRE, J. & E. JÁUREGUI. 2006. "Hydrologic and hydraulic study of Naiguatá and Camurí Grande rivers in Vargas state, Venezuela". En: J. LÓPEZ y R. GARCÍA (eds.). *Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela*. pp. 704-717. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- ÁLVAREZ, R.; KEY, F.; KLANKE, A.; GUERRA, A. y R. CONVIT. 1968. *Atlas climatológico e hidrológico de la cuenca hidrográfica del valle de Caracas*. Ediciones de la Biblioteca, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- ARTIGAS, J. y J. CÓRDOVA. 2010. "Estimación de volúmenes y picos de aludes torrenciales y producción de sedimentos en cuencas del estado Vargas". En: J. LÓPEZ (ed.). *Lecciones aprendidas del desastre de Vargas: Aportes científico-tecnológicos y experiencias nacionales en el campo de la prevención y mitigación de riesgos*. pp. 239-257. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- ARTIGAS, J.; LÓPEZ, J. y J. CÓRDOVA. 2004. Producción de sedimentos en las cuencas de la vertiente sur del Parque Nacional El Ávila. *Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2004*. Caracas, Venezuela (29 de noviembre al 03 de diciembre).
- AUDEMARD, F.; MACHETTE, M.; COX, J.; DART, R. & K. HALLER. 2000. *Map and database of Quaternary Faults in Venezuela and its offshore regions* (Open File-Report 00-018). United States Geological Survey. USA.
- BELLO, M.; O'BRIEN, J.; LÓPEZ, J. & R. GARCÍA. 2006. "Simulation of flooding and debris flows in the Cerro Grande river". En: J. LÓPEZ y R. GARCÍA (eds.). *Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela*. pp. 655-669. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- CARRERO, O.; BARRIOS, D.; BONDUKI, Y.; MARÍN, E., y J. MÁRQUEZ. 1983. *Mapa de la vegetación actual de Venezuela, mapa a escala 1:500.000* (Proyecto VEN/79/001/Sistemas Ambientales Venezolanos). Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Caracas, Venezuela.
- CILENTO, A. 2002. "Sobre la vulnerabilidad urbana de Caracas". *Revista Venezolana de Economía y Ciencias Sociales*, 8(3): 103-118.
- CÓRDOVA, J. y M. GONZÁLEZ. 2003. "Estimación de los volúmenes y caudales máximos que produjeron los aludes torrenciales ocurridos en Diciembre de 1999 en cuencas del Litoral Central del estado Vargas, Venezuela". *Acta Científica Venezolana*, 54(1): 33-48. Disponible en: <http://acta.ivic.ve>.

- CÓRDOVA, J. y M. GONZÁLEZ. 2010. "Evaluación hidrológica y de caudales pico de la tormenta extraordinaria de 1999 en el estado Vargas". En: J. LÓPEZ (ed.). *Lecciones aprendidas del desastre de Vargas: Aportes científico-tecnológicos y experiencias nacionales en el campo de la prevención y mitigación de riesgos*. pp. 95-113. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- CHOW, V.; MAIDMENT, D. y L. MAYS. 1994. *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- DE LISIO, A. 2001. "La evolución urbana de Caracas: Indicadores e interpretaciones sobre el desarrollo de la interrelación ciudad-naturaleza". *Revista Geográfica Venezolana*, 42(2): 203-226.
- DIRECCIÓN DE CARTOGRAFÍA NACIONAL (DCN). 1958. *Hojas IV-9 y V-9, planos topográficos a escala 1:5.000, Proyecto BITUCOTEX*. Caracas, Venezuela.
- DIRECCIÓN DE CARTOGRAFÍA NACIONAL (DCN). 1979. *23 de Enero y Los Chorros, hojas 6847-IV-SO y 6847-IV-SE, cartas topográficas a escala 1:25.000*. Caracas, Venezuela.
- FANGQIANG, W.; KAIHENG, H.; LÓPEZ, J.; PÉREZ, D. & L. SHIJIAN. 2006. "Debris flow risk zoning in Cerro Grande, Venezuela". En: J. LÓPEZ y R. GARCÍA (eds.). *Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela*. pp. 774-785. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- GOBERNACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL. 1984. *Hojas D-43, E-43, F-43, D-44, E-44 y F-44, planos topográficos a escala 1:5.000*. Caracas, Venezuela.
- GUEVARA, J. 1987. *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos* (Colección Monografías 12). Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- GUMBEL, E. 1941. "The return period of flood flows". *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(2): 163-190.
- HERNÁNDEZ, E. 2006. "Flujos de barro y escombros durante las tormentas de los días 15 y 16 de diciembre de 1999 en el edo. Vargas, Venezuela". En: J. LÓPEZ y R. GARCÍA (eds.). *Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela*. pp. 443-453. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- HONG, X.; FANGQIANG, W. & C. PENG. 2006. "Causes and characteristics of the Ávila debris flows in Venezuela". En: J. LÓPEZ y R. GARCÍA (eds.). *Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela*. pp. 686-693. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMEH). 2010. *Datos mensuales de precipitación de las estaciones climatológica Los Venados y pluviográficas Hotel Humboldt y San Bernardino*. Datos no publicados. Caracas, Venezuela.

- KIRPICH, Z. 1940. "Time of concentration of small agricultural watersheds". *Civil Engineering*, 10(6): 362.
- KITE, G. 1985. *Frequency and risk analysis in hydrology*. Water Resources Publications. USA.
- LÓPEZ, J.; BELLO, M.; GONZÁLEZ, N.; ALCALÁ, O. y A. TOYO. 2006a. "Consideraciones sobre el desastre de Carmen de Uria". En: J. LÓPEZ y R. GARCÍA (eds.). *Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela*. pp. 670-685. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- LÓPEZ, J.; PÉREZ, D.; GARCÍA, R. y Z. SHUCHENG. 2006b. "Evaluación hidro-geomorfológica de los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela". En: J. LÓPEZ y R. GARCÍA (eds.). *Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela*. pp. 41-57. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- MÉNDEZ, W.; CÓRDOVA, J.; CARTAYA, S. y H. PACHECO. 2007. "Geomorfología y respuesta hidrológica de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela". *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 22(1): 5-20.
- MÉNDEZ, W. 2014. *Relaciones morfometría-respuesta hidrológica en cuencas de drenaje del estado Vargas, Venezuela: Una escala de peligrosidad por crecientes*. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. Tesis de Doctorado, (inérito).
- MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES (MARN). 2010. *Datos de láminas máximas anuales de precipitación para distintas duraciones de la estación pluviográfica San José de El Ávila*. Datos no publicados. Dirección de Hidrología y Meteorología. Caracas, Venezuela.
- PETRÓLEOS DE VENEZUELA S. A. 1993. *Atlas imagen de Venezuela: Una visión desde el espacio*. Caracas, Venezuela.
- SINGER, A. 2010. "Los aludes torrenciales en Venezuela: Antecedentes". En: J. LÓPEZ (ed.). *Lecciones aprendidas del desastre de Vargas: Aportes científico-tecnológicos y experiencias nacionales en el campo de la prevención y mitigación de riesgos*. pp. 65-80. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- SINGER, A.; ROJAS, C. y M. LUGO. 1983. *Inventario nacional de riesgos geológicos: Estado preliminar, mapa, glosario y comentarios*. Departamento de Ciencias de la Tierra, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. Caracas, Venezuela.
- SALCEDO, D. 2006. "Los flujos torrenciales catastróficos de diciembre de 1999, en el estado Vargas y en el área metropolitana de Caracas: Características y lecciones aprendidas". En: J. LÓPEZ y R. GARCÍA (eds.). *Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela*. pp. 884-929. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.

- SERVICIO AUTÓNOMO DE GEOGRAFÍA Y CARTOGRAFÍA NACIONAL. 1995. *Caracas y Los Chorros, hojas 6847-IV-SO y 6847-IV-SE, ortofotomapas a escala 1:25.000*. Caracas, Venezuela.
- SHUCHENG, Z.; LÓPEZ, J.; GARCÍA, R. & D. PÉREZ. 2006. "Basic characteristics of large-scale debris flow in Vargas region, Venezuela, dec. 16 1999: Cerro Grande and Uria ravines as examples". En: J. LÓPEZ y R. GARCÍA (eds.). *Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela*. pp. 745-758. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- URBANI, F. y J. RODRÍGUEZ. 2004. *Atlas geológico de la Cordillera de la Costa Venezuela: Caracas, Hoja 6847-IV-SO, carta geológica a escala 1:25.000*. Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Fundación Geos. Caracas, Venezuela.
- WENZEL, H. 1982. "Rainfall for urban stormwater design". En: *Urban Storm Water Hydrology* (Water Resources, Monograph 7). American Geophysical Union. USA.

Lugar y fecha de culminación:
Caracas, Venezuela
enero, 2015