



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS
IMPLEMENTADAS EN LA ZONIFICACIÓN DE
AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN LA
GESTIÓN DE RIESGO EN COLOMBIA**

Luisa Fernanda Alvarado Reyes

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, Escuela ambiental,
Especialización en manejo y gestión del agua
Medellín, Colombia
2020



ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS IMPLEMENTADAS EN LA ZONIFICACIÓN
DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN LA GESTIÓN DE RIESGO EN
COLOMBIA

Luisa Fernanda Alvarado Reyes

Trabajo de monografía presentado como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en manejo y gestión del agua

Asesor (a):

Jenny Machado Charry

Ing. Geóloga

Esp. Gestión Ambiental

Msc. Medio Ambiente y Desarrollo

Doctora Ingeniera – Recursos Hidráulicos

Línea de Investigación:

Gestión del recurso hídrico y manejo del agua

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental, Especialización en manejo y gestión del agua

Medellín, Colombia

2020

ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS IMPLEMENTADAS EN LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN LA GESTIÓN DE RIESGO EN COLOMBIA

Resumen:

Los eventos de avenidas torrenciales en Colombia han tenido grandes impactos negativos en términos de pérdidas humanas y económicas dado su gran poder destructivo, lo que implica la importancia de elaborar la zonificación de esta amenaza para incorporarla en el ordenamiento territorial de los municipios. El estudio de las avenidas torrenciales constituye una de los fenómenos naturales más complejos a analizar en donde convergen distintas disciplinas y gran cantidad de insumos a escalas detalladas para lograr comprender su comportamiento. El presente trabajo plantea las distintas definiciones usadas en el país para describir el fenómeno, analiza diferentes metodologías implementadas en estudios de caso realizados en Colombia para zonificación de amenaza y contrasta lo elaborado en los estudios y lo exigido en la normativa. A partir de lo anterior se analizan las limitaciones y dificultades que se pueden presentar durante el proceso de zonificación para dar cumplimiento a la norma definida por el Decreto 1807 de 2014.

Palabras clave: Amenaza, avenidas torrenciales, flujos, gestión de riesgo, normatividad.

Abstract:

The debris flow events in Colombia have had great negative impacts in terms of human and economic losses because of their great destructive power. For this reason, it is necessary to develop the zoning of this hazard to incorporate it into the territorial planning of the municipalities. The study of debris flow constitutes one of the most complex natural phenomena to analyse, where different disciplines and a large number of inputs converge at detailed scales to understand their behaviour. This paper presents the different definitions used in the country to describe the phenomenon, analyses different methodologies implemented in case studies made in Colombia for hazard zoning, as well as contrasts that are elaborated in the studies and what is required in the regulations. Based on the aforementioned, the limitations and difficulties that might happen during the hazard zoning process of debris flow were analysed to comply with the standard defined by Decree 1807 of 2014.

Keywords: Hazard, debris flow, flows, risk management, regulation.

1 INTRODUCCIÓN

Las catástrofes asociadas a amenazas naturales en el país han estado ligadas a la falta de conocimiento del territorio en cuanto a los riesgos a los que se ven expuestos los asentamientos humanos, identificando áreas sin una zonificación de amenaza que permita restringir la ocupación de zonas propensas a dichos riesgos. Es por esto que en los últimos años se ha venido reglamentando la incorporación de la gestión de riesgo de desastres en el ordenamiento territorial de los municipios, por medio del Decreto 1807 de 2014 (compilado por el Decreto Nacional 1077 de 2015), el cual abarca directrices que deben ser usadas para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, inundación por desbordamiento y avenidas torrenciales.

En especial, la zonificación de las amenazas por eventos de avenidas torrenciales plantea retos en cuanto a conocimiento e implementación de esta metodología, ya que la complejidad del fenómeno implica insumos difíciles de obtener lo que según MADS&UNAL (2013) ha apuntado a que la mayoría de las metodologías utilizadas sean frecuentemente geomorfológicas y de criterio experto, debido a la necesidad de información y la complejidad para el uso de modelos numéricos o analíticos.

Las características de los eventos de avenidas torrenciales han tenido especial atención dado que se catalogan como una amenaza natural de gran poder destructivo. Para dimensionar los efectos que generan estos eventos, es importante considerar que los flujos producto de este fenómeno se transportan a gran velocidad debido a la morfometría entallada y de alta pendiente que tiene la corriente del cauce, sumado al hecho que el caudal líquido puede aumentar tras intensas lluvias dado que estos eventos se desarrollan mediante pulsos, los cuales generalmente tienen una acumulación de material de gran tamaño tipo bloque en el frente de onda (GEMMA, 2007).

En Colombia de acuerdo a la base de datos de DesInventar (Corporación OSSO, s.f.), se tiene un registro de 1.363 eventos asociados a avenidas torrenciales en el último siglo, siendo los casos más relevantes por los impactos negativos generados los ocurridos en los municipios de El Playón (Santander) en 1979, Salgar (Antioquia) en 2015 y Mocoa (Putumayo) en 2017 perdiendo tras los eventos 200, 93 y 332 vidas humanas respectivamente. De acuerdo a (Hungry et al, 2001) *“una fracción significativa de muertes durante desastres regionales, causados por tormentas o terremotos, se debe a la ocurrencia de flujos y avalanchas de detritos en zonas de topografía abrupta”*.

Dada la problemática asociada a este tipo de fenómenos se pretende plantear un análisis crítico a partir de la compilación y revisión de los casos de estudio que se consideran más relevantes hechos en el país para la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales, y a su vez, analizar frente al marco normativo colombiano las metodologías aplicadas en los casos de estudios y lo exigido para dicha categorización.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Analizar las metodologías implementadas para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en Colombia en el marco del decreto 1807 de 2014.

2.2 Objetivos específicos

- Revisar los conceptos asociados a las definiciones del fenómeno de avenidas torrenciales.
- Analizar las metodologías aplicadas para avenidas torrenciales en casos de estudio del territorio colombiano.
- Analizar frente al marco normativo colombiano las metodologías aplicadas en los casos de estudio.

3 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del análisis de las metodologías implementadas en la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en Colombia, se realizan tres pasos (Figura 1):

Paso 1. Revisión de los conceptos asociados a las definiciones de avenidas torrenciales con respecto al desarrollo del significado del fenómeno. Para esto se hace una recopilación cronológica de los artículos, guías y libros que desarrollan el significado de este fenómeno a partir de diferentes variables, en especial en literatura colombiana que permita comprender la definición que se maneja a nivel nacional. Además, como resultado de este análisis conceptual se enunciarán las características del fenómeno, así como sus detonantes, su comportamiento, los tipos de flujos asociados y la clasificación planteada en Colombia.

Paso 2. Revisar y analizar casos de estudios colombianos, previo a la revisión de frecuencia de eventos registrados en el país para seleccionar las zonas a elegir los estudios de caso, para comparar las metodologías planteadas durante la evaluación de avenidas torrenciales, obteniendo como resultado una matriz que refleja los aspectos o variables tenidos en cuenta por cada caso.

Paso 3. A partir del análisis realizado a las metodologías implementadas en los casos de estudios de amenaza por avenida torrencial, éstas se analizan a la luz del marco normativo colombiano, teniendo en cuenta los requerimientos exigidos para la zonificación de amenaza del Decreto 1807 del 2014. Y se plantean lineamientos o recomendaciones sobre la implementación de este Decreto, en función de las escalas, insumos y productos.

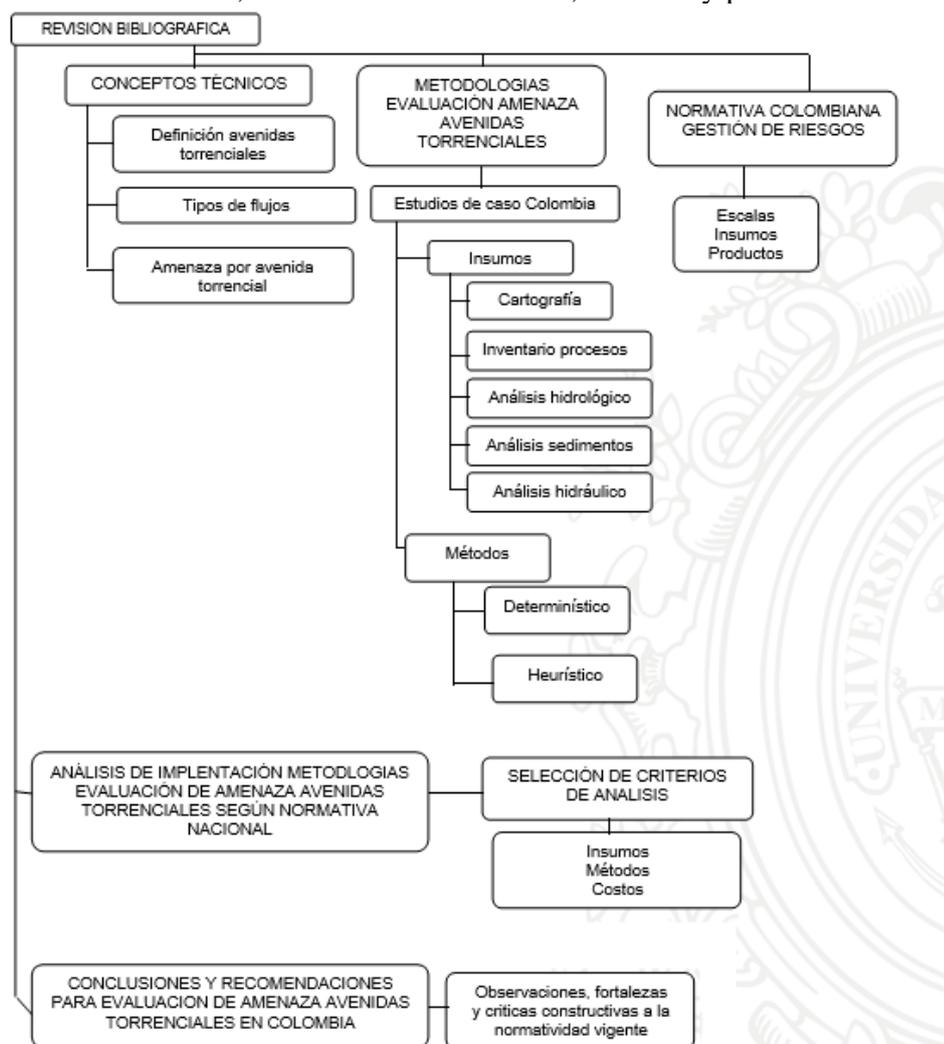


Figura 1. Metodología para el análisis de los métodos implementadas en la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en la gestión de riesgo en Colombia. Fuente: elaboración propia.

4 REVISIÓN CONCEPTUAL

El marco conceptual retoma varias definiciones del fenómeno de avenida torrencial enunciados por diferentes instituciones nacionales en documentos de carácter técnico, las cuales se basan en fuentes internacionales para desarrollar este concepto. Se analiza el comportamiento del flujo asociado a este fenómeno y las características con relación a las concentraciones de sólidos en el mismo. Finalmente, se plantea la clasificación propuesta para las avenidas torrenciales para los Andes colombianos y se expone la definición que se usará para describir este fenómeno natural en el marco de este documento.

4.1 LAS AVENIDAS TORRENCIALES

El concepto del fenómeno ha sido discutido desde varios enfoques y unificar la terminología es un tema que cobra relevancia, en especial con el concepto de tipo flujos que permiten caracterizar adecuadamente este fenómeno natural conocido como avenidas torrenciales (Aristizábal, Arango, & García, 2018). Los autores de orden internacional que cobran relevancia en estas investigaciones son:

- Grupo de Estándares para Movimientos en Masa – GEMMA con la publicación del año 2007 del libro “Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas”.

- El PhD Oldrich Hungr, experto en evaluación de riesgos de deslizamientos, con su artículo de 2001 denominado “A review of the classification of the landslides of the flow type. Environmental & Engineering Geoscience”.

- Tamotsu Takahashi autor de varios libros sobre el comportamiento de flujo de detritos destacando la segunda edición del libro “Debris flow _ mechanics, prediction, and countermeasures” publicado en el año 2014.

- Jimmy S. O'Brien desarrollador del software Flo2D, que permite modelar este fenómeno y el cual, a través del manual del programa, plantea el marco conceptual del comportamiento de los tipos de flujo.

Para el caso colombiano, este concepto se ha trabajado con base en estas referencias internacionales, a través de documentos y guías técnicas elaboradas por instituciones estatales como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, el Servicio Geológico Colombiano - SGC, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGR, de acuerdo a su objeto misional.

Por ejemplo, el IDEAM (2013), cataloga este fenómeno como crecientes súbitas en cauces de montaña, las cuales son producto de eventos de precipitación de altas intensidades, de corta duración y, por tanto, alto caudal pico y flujo rápido, cuyo fenómeno puede subdividirse de acuerdo al material de arrastre que transporte la corriente.

La Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA) del MADS (2014), plantea las avenidas torrenciales de forma similar al IDEAM (2013), definiéndolas como: “*crecientes súbitas que por las condiciones geomorfológicas de la cuenca están compuestas por un flujo de agua con predominio de materiales sólidos de arrastre, con un gran potencial destructivo debido a su alta velocidad*”.

De acuerdo al MADS (2014), este tipo de eventos son de corta duración, tienen un área de influencia de menor extensión con un alto caudal pico y las causas asociadas pueden ser tormentas de alta intensidad, suelos susceptibles a movimientos en masa y erosión en lugares con pendientes pronunciadas y, se pueden clasificar según el material de arrastre que se tenga.

La Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000, del SGC (2017), estableció que las avenidas torrenciales pueden definirse como: “*flujos de detritos y flujos de lodos que tienen unas características geomorfológicas propias de la cuenca que favorecen una alta acumulación de sedimentos en el cauce, además, de*

cambios drásticos en el gradiente del afluente, alta densidad de drenaje y eventos de precipitación”.

La Comisión Nacional Técnica Asesora para el Conocimiento del Riesgo – CNTACR en el 2017, describe al fenómeno según Hungr (2001), como: *“un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (Índice de plasticidad menor que 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada”.*

Ampliando los conceptos teóricos citados por los documentos de carácter institucional con las referencias citadas por investigadores, GEMMA (2007) establece que las avenidas torrenciales o flujo torrencial son los que se conocen como *“flujos de detritos”* o *“Debris Flow,”* diferente al *“flujo de lodo”* o *“Mud Flow”*, por la reología del material que da la arcilla en este último tipo de flujo. De esta forma GEMMA (2007) define los flujos de detritos como un *“Flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos, que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce empinado...el agua del cauce se incorpora al cuerpo del flujo de detritos, incrementando su contenido de agua. Por otra parte, el caudal pico que presentan estos flujos puede ser hasta 40 veces mayor que aquellos que causan una inundación”.*

En cuanto al comportamiento del fenómeno Hungr citado por GEMMA (2007) plantea que estos flujos tienen *“...una forma de depositación del material sólido: cuando el flujo de detritos alcanza el ápice del abanico de depositación, el canal se amplía y los clastos más gruesos son expulsados hacia los lados para formar una especie de jarillones o albardones y el frente es sobrepasado por el material fino que viajaba tras ellos hasta detenerse tomando una forma lobulada gruesa.”*

De esta forma, las avenidas torrenciales corresponden a un flujo de detritos (GEMMA, 2007), en el cual el comportamiento está asociado a un flujo no newtoniano donde la reología es uno de los factores determinantes en dicho comportamiento. Los flujos no newtonianos son flujos que, a diferencia del agua, presentan una relación no lineal entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación (Takahashi, 2014).

Con relación a las características en cuanto a la concentración de sólidos en volumen total que presenta el flujo, Takahashi (2014) plantea un tipo de clasificación de flujos como se muestra en la figura 2. Según el autor los flujos son inmaduros cuando las concentraciones de sólidos varían entre 0,2 (C_5) y 0,4 (C_4), para concentraciones mayores a 0,4 (C_4) pero menores a 0,57 (C_3) se denominan flujo de detritos propiamente dicho, y para concentraciones entre 0,57 (C_3) a 0,67 (C_2) se clasifican como detritos cuasi-estático.

En la figura 2, se observa que dependiendo de las concentraciones se tiene un comportamiento de los esfuerzos que actúan, concentraciones mayores a 0,57 (C_3) está dominado por esfuerzo estáticos y concentraciones menores a este valor predominan los esfuerzos dinámicos, esto va depender por el grado de distanciamiento entre las partículas que lo configuran. Estos tipos de esfuerzos para los diferentes estados se analizan mediante números adimensionales como Bagnold y Reynolds realizando balances entre los esfuerzos estáticos y dinámicos que actúan en un medio (Takahashi, 2014). Según el autor, las concentraciones por encima de 0,67 se pueden clasificar como un sólido por el grado de espaciamento que se tiene entre partículas y la movilidad de este.

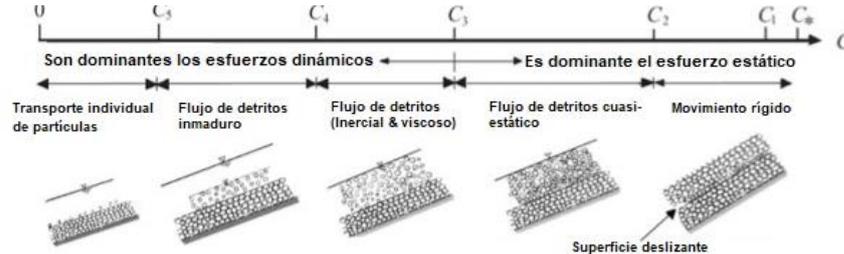


Figura 2. Clasificación de los flujos según concentración de sólidos. Fuente: Tomado de Takahashi (2014)

Otro tipo de clasificación de flujo según la concentración de sólidos en volumen la presenta (O'Brien, 2006) en el manual del software Flo2D (Tabla 1). En esta clasificación teniendo en cuenta lo planteado por (Takahashi, 2014), el comportamiento del flujo de detritos está asociado a un flujo de lodo, por las concentraciones de sólidos en volumen que lo gobiernan.

Tabla 1. Comportamiento del flujo de sedimentos como función de la concentración de sedimentos Fuente: Tomado de O'Brien citado por Rogelis (2009)

Tipo de flujo	Concentración de Sedimento		Características del flujo
	En Volumen	En Peso	
Deslizamiento	0.65 - 0.80	0.83 - 0.91	No fluye; falla por deslizamiento.
	0.55 - 0.65	0.76 - 0.83	Falla por deslizamiento con deformación interna, creep lento anterior a la falla.
Flujo de lodos	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flujo evidente, creep lento; deformación plástica bajo el peso propio del material; cohesivo, no se extiende en superficie nivelada.
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	El flujo se extiende sobre superficie nivelada; flujo cohesivo; algo de mezcla.
Creciente de lodos	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra propiedades de fluido en deformación; se extiende en una superficie horizontal, pero mantiene una superficie del fluido inclinada; contiene partículas de tamaño considerable; aparecen ondas, pero se disipan rápidamente.
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Marcado asentamiento de gravas; se extiende casi completamente en una superficie horizontal; superficie líquida con dos fases del fluido; hay ondas que viajan en la superficie.
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Las ondas viajan fácilmente; la mayoría de la arena y grava se mueven como carga de lecho.
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Presencia de ondas; superficie fluida; todas las partículas se encuentran en el lecho.
Agua	< 0.20	< 0.41	Creciente de agua con carga en suspensión y de lecho.

Actualmente, a nivel nacional en la región Andina, Aristizábal & otros (2018), clasificaron las avenidas torrenciales en tres tipos: (i) flujos de escombros canalizados, (ii) inundación de escombros e (iii) inundaciones súbitas. Según los autores las avenidas torrenciales se definen como los flujos cuya composición es agua y sedimentos en donde las concentraciones difieren (0-70%), su movimiento es rápido y transitan en cauces de montaña y por ende de alta pendiente. Los detonantes pueden ser lluvias intensas, enjambre de movimientos en masa, sismo y, rotura de presas.

Para este trabajo se adoptará la definición de avenidas torrenciales, de acuerdo a lo anterior, como crecientes de corta duración en cuerpos de agua con pendientes pronunciadas, que tienen características morfométricas y geomorfológicas que favorecen tanto el incremento de velocidad de flujo como acumulación de material en el cauce, y en donde se presentan eventos de precipitación de corta duración. Las concentraciones de sedimento en volumen se tomarán entre los límites por encima de agua clara y por debajo de lo considerado como deslizamiento, es decir entre 0.2 y 0.55%.

Las avenidas torrenciales representan mayor riesgo para la infraestructura y las poblaciones que los fenómenos asociados a inundación con bajas concentraciones, convirtiéndose en una amenaza que requiere de amplia investigación para una adecuada gestión del riesgo. Por lo anterior, para la evaluación de esta amenaza se hace necesario zonificar el área de estudio ante la magnitud del fenómeno, lo que puede derivar varias metodologías de trabajo.

Para este estudio se entiende por amenaza lo estipulado en la Ley 1523 de 2012 (Artículo 4) como: *“Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales”*.

5 ESTUDIOS DE CASO

En Colombia se han realizado varios estudios de caso que caracterizan y posteriormente analizan el fenómeno de avenidas torrenciales. Para la revisión de estudios de caso se analizó tomando como punto de partida la recurrencia de estos eventos a nivel nacional, para posteriormente centrar la búsqueda a nivel departamental y municipal y seleccionar los estudios a analizar de acuerdo a la recurrencia de estos eventos. Además de este criterio de selección se tuvo en cuenta estudios que fueran elaborados antes y después de la entrada en vigencia del Decreto 1807 de 2014, y que implementaran diferentes metodologías, determinadas principalmente por los insumos disponibles, con el fin de comparar el trabajo realizado por los distintos estudios. En el Anexo I se presentan los flujogramas de las metodologías planteados por cada uno de los autores de los estudios de caso analizados.

5.1 REGISTROS DE EVENTOS A NIVEL NACIONAL

De acuerdo al inventario histórico nacional de desastres registrado en la base de datos disponibles en el Sistema de Inventario de Efectos de Desastres denominado DesInventar (Corporación OSSO, s.f.), existen 1.363 registros de eventos asociados a avenidas torrenciales en Colombia para el período comprendido de 100 años entre 1919 y 2019. Para este periodo fallecieron 2.595 personas y 23.694 viviendas fueron afectadas. En la figura 3, se encuentra el comportamiento de registros por departamento en Colombia, evidenciado que los departamentos de Antioquia y Valle del Cauca, registran los mayores casos reportados. Específicamente según la base de datos, Antioquia cuenta con 191 registros, seguido de Valle del Cauca con 169, Huila con 104 y Cundinamarca con 124.

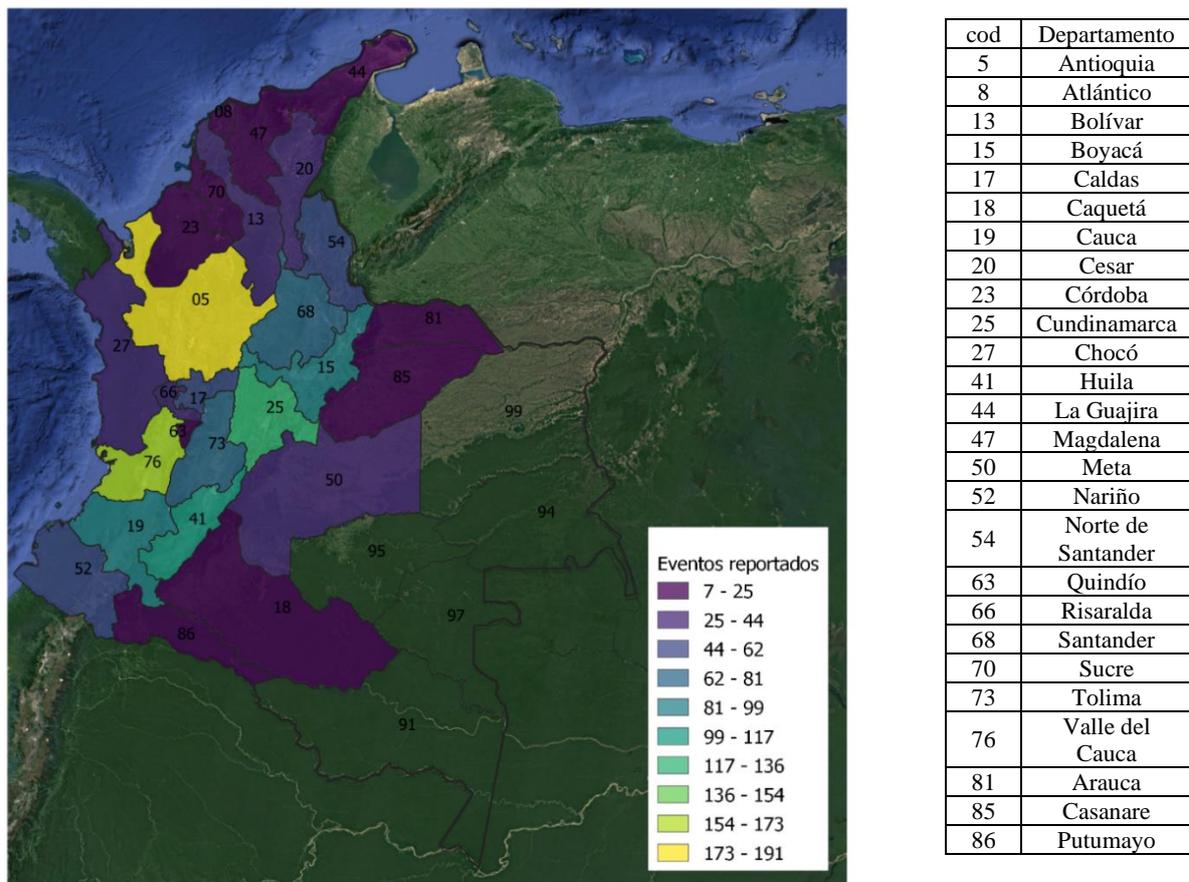


Figura 3. Registro de eventos de avenidas torrenciales pro departamento.. Fuente: Elaboración propia basado en Corporación OSSO (s.f.)

En la tabla 1, se encuentran los eventos a nivel municipal que han tenido un mayor impacto negativo en cuanto a número de muertes, desaparecidos y viviendas afectadas. El primer lugar lo ocupa el municipio de Mocoa (Putumayo) con el evento ocurrido el 31 de marzo, en donde fallecieron 332 personas producto de la avenida torrencial, seguido por El Playón (Santander) con 200 muertes y, Salgar (Antioquia) ocupa el puesto 3 y 4 con dos eventos reportados en los años 1960, los cuales han sumado la pérdida de 173 vidas humanas.

Tabla 2. Eventos registrados con mayor incidencia en pérdida de vidas. Fuente: Corporación OSSO (s.f.)

Año	Mes	Departamento/Municipio	Muertes	Desaparecidos	Viviendas Afectadas
2017	3	Putumayo/Mocoa	332	77	1200
1979	11	Santander/El Playón	200	0	0
2015	5	Antioquia/Salgar	93	11	243
1960	5	Antioquia/Salgar	80	0	0
1991	6	Antioquia/Ciudad Bolívar	68	27	0
1970	11	Cesar/Chiriguana	60	120	0
1993	4	Antioquia/Andes	56	0	0
1993	12	Antioquia/Dabeiba	55	13	166
1963	4	Boyacá/Paz de Río	50	41	0
1972	1	Norte de Santander/Labateca	50	0	0

Los municipios con mayor número de registros son Medellín, Cali y Bogotá (Tabla 3), de esta forma los estudios de caso analizados se enfocarán en los departamentos de Antioquia y Cundinamarca, por contar con mayor información asociada a estos eventos

Tabla 3. Número mayor de registros asociados a eventos de avenidas torrenciales por municipio. Fuente: Corporación OSSO (s.f.)

Nº	Departamento/Municipio	Registros	Muertes	Desaparecidos	Viviendas Afectadas
1	Antioquia/Medellín	53	90	4	58
2	Valle del Cauca/Cali	33	26	13	20
3	Cundinamarca/Bogotá	23	49	0	14
4	Tolima/Ibagué	23	36	5	765
5	Valle del Cauca/Buenaventura	21	20	3	0
6	Huila/Neiva	21	5	0	31
7	Caldas/Manizales	20	53	1	21
8	Valle del Cauca/Tuluá	19	1	1	415
9	Meta/Villavicencio	16	13	0	38
10	Atlántico/Barranquilla	12	4	7	1038
11	Cauca/Corinto	11	6	2	225
12	Antioquia/Dabeiba	8	62	15	166
13	Cauca/Inzá	8	27	0	20
14	Cauca/Toribio	8	21	0	67
15	Norte de Santander/Cúcuta	8	15	15	0

5.2 Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada Doña María (Montoya et al, 2009)

La cuenca en estudio se localiza en el departamento de Antioquia, entre los municipios de Medellín, Itagüí y La Estrella. Su corriente principal, la quebrada Doña María, es afluente del río Aburrá también conocido como río Medellín. En zonas de algunas de las microcuencas del área de estudio se han registrado eventos de avenidas torrenciales, y en general, entre sus características morfológicas se destacan sus altas pendientes. La metodología usada para la

zonificación de amenaza por avenidas torrenciales se realiza a partir de un enfoque cualitativo mediante un sistema de información geográfica, donde se realiza la ponderación de los factores pendiente, red de drenaje acumulada, distancia a los cauces, geología, geomorfología e índice de Melton identificando zonas con mayor probabilidad de amenaza.

La metodología para este estudio de caso se realiza mediante un análisis multicriterio de diversos parámetros, los cuales reflejan posibles zonas propensas a amenaza por avenidas torrenciales, por lo cual este análisis no realiza una descripción completa del fenómeno propiamente dicho. El método de análisis multivariado se basa en Ordóñez & Martínez (2003), el cual propone el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) específicamente mediante el software IDRISI Kilimajaro para análisis de riesgos naturales, en donde se superponen varias capas y se calcula pesos relativos de las variables.

Como parte de los insumos utilizados se encuentra el modelo digital de elevación de 10x10 metros a partir de curva de nivel, del cual se obtuvo variables como la red de drenaje acumulada mediante la herramienta Flow en el SIG. Otra variable considerada en el estudio fue el índice de Melton por microcuenca, utilizado frecuentemente como índice de torrencialidad cuyo cálculo utiliza las cotas de altura máxima y mínima en la microcuenca y el área de esta. Se plantea que si el índice es mayor a 0,5 la cuenca es torrencial.

Para poder combinar los seis factores descritos se necesitó de un proceso de normalización el cual consideró los rangos de 0 a 1, siendo 0 no favorable para amenaza por avenidas torrenciales y 1 muy favorable para esta amenaza. Para la normalización de las variables pendiente, red de drenaje acumulada y distancia a los cauces se usó funciones sigmoidales crecientes o decrecientes. Y para las otras tres, geología, geomorfología e índice de Melton, se calificó según criterio de experto.

El software IDRIS plantea una matriz de doble entrada, teniendo para filas y columnas las mismas capas temáticas, con el fin de hacer una comparación por pares, e identificar cuales tienen mayor peso. Para el estudio, se realiza un análisis de sensibilidad con diferentes ponderaciones, en específico se plantean 6 escenarios con diferentes pesos por capa, obteniendo a su vez seis mapas de amenaza distintos.

Mediante cuatro puntos de control dentro de la cuenca, se compararon los resultados de los diferentes mapas de amenaza por medio del análisis multicriterio estableciendo qué tan sensible es un parámetro según el peso establecido en cada uno de los escenarios. Se concluye que la amenaza alta se encuentra en sectores de la parte media baja de la cuenca, consecuentemente con la evidencia de depósitos aluviotorrenciales y en donde las pendientes favorecen la depositación.

Se plantea como base el mapa del escenario uno donde las ponderaciones son iguales para todas las capas, y se relaciona con evidencias históricas. Se analiza la distribución espacial de amenaza en porcentaje, estableciendo amenaza baja para rangos entre 0 y 0,5, amenaza media entre 0,5 y 0,7 y amenaza alta entre 0,7 y 1. Este resultado se verifica mediante una comparación con los resultados producto de una modelación hidráulica usando el software HEC-RAS para flujo uniforme y permanente. Este modelo considera solo caudal líquido y por tanto se establece un aumento de este en un 40% para un TR de 100 años con el fin de incrementar la mancha simulando el comportamiento al contener sólidos. La matriz de amenaza se basa en (López, García, & Bello, 2002) relacionando lamina y velocidad de flujo.

El mapa final de amenaza por avenidas torrenciales realiza una combinación de los dos mapas resultado de análisis multicriterio y modelo hidráulico. En las zonas montañosas y de piedemonte se acogió al análisis multicriterio, y a las zonas de llanura aluvial se agregaron los resultados de ambos análisis, teniendo siempre dominio la amenaza alta sobre las otras dos amenazas.

Por último, se realizó visitas de campo a las zonas de amenaza alta del mapa resultante con el fin de verificar o contrastar los resultados obtenidos, concluyendo que las evidencias encontradas durante el recorrido tienen indicios de un comportamiento torrencial.

5.3 Actualización de la zonificación de amenaza de inundación y avenidas torrenciales de la quebrada Limas localidad de Ciudad Bolívar (Rogelis, 2009)

La Quebrada Limas se localiza al sur de la ciudad de Bogotá D.C., en la localidad de Ciudad Bolívar, y es afluente del río Tunjuelo. La cuenca en estudio tiene un área aproximada de 17 km², en donde la parte media y baja han sufrido fuertes procesos de transformación antrópica por actividades como explotación de canteras y construcción de urbanizaciones, incluso se tienen modificaciones en el cauce lo que conlleva a un cambio en el comportamiento hidráulico de su corriente principal. En dos zonas de la cuenca se cuenta con registros de dos eventos, en los años 2003 y 2004.

La metodología empleada realizó en primera medida un análisis hidrológico de la zona. Este análisis incluye la duración de la tormenta, mediante una evaluación de los eventos de lluvias más representativos, encontrando que una lluvia de 2 a 3 horas era la indicada. Posteriormente, se utilizaron las curvas de Intensidad Duración Frecuencia - IDF de la estación Quiba perteneciente a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB, obteniendo las precipitaciones para diferentes TR. Con esta información se procedió a calcular los hietogramas para los TR de 10 y 100 años, usando dos métodos bloque alterno (Chow et al,1994) y utilizando un patrón según las precipitaciones registradas en la cuenca para 120 y 180 minutos

Se construye un modelo de lluvia escorrentía utilizando el software Hec-HMS, en donde se utiliza el método de número de curva (Chow et al,1994). Se corrió el modelo para TR10 y TR100 años, y para duración de tormenta de 120 y 180 minutos con los dos métodos evaluados. Se eligieron para el análisis los hidrogramas más críticos que correspondían al método de patrón de precipitación para una duración de 180 min.

El análisis geomorfológico se concentra en identificar las zonas de producción, transporte y depositación, analizando las pendientes a lo largo de los tramos del cauce principal de la cuenca y sus tributarios principales, encontrando que la pendiente más alta de la quebrada Limas no se localiza en la parte más alta de la cuenca. Del análisis morfométrico, se identifica que el índice de Melton es bajo, lo cual no corresponde con los registros históricos de eventos en la zona, lo que puede deberse a los cambios altos en la cuenca por actividades antrópicas.

Para la modelación matemática del fenómeno se usa el software Flo2D estableciendo diferentes escenarios que permitan estudiar el comportamiento del fenómeno. Para esto se utiliza como insumo un Modelo Digital de Terreno de 15 x15 metros cuya construcción surge a partir de curvas de nivel cada 5 metros, 1 metro y, topografía del cauce (cauce y zona de inundación) realizada en 2006 cuyos insumos fueron suministrados por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias-DPAE.

Los escenarios considerados se dividen en lo que se considera un modelo simplificado por solo modelar agua clara bajo concentraciones de 0%, 20% y 40% para TR10 y TR100, y un modelo que considera agua y sedimento para lo cual se cambian las condiciones reológicas y de concentración. Para el modelo simplificado con concentraciones de 0% y para el modelo de agua más sedimentos, se consideraron en la zona de planicie vías y puentes, y se modifica los factores de reducción de ancho y de área para representación de muros y edificios.

Para el modelo de agua y sedimento, dado que no se conoce información del posible aporte de sedimento proveniente de diferentes fuentes en la quebrada Limas, se realiza un análisis de sensibilidad, asumiendo un coeficiente de fricción de Manning de 0,4 y una concentración normal de 0,2 y variándola hasta llegar a picos de 0,3, 0,4, y 0,5. El máximo será 0,5 porque es el límite inferior para un evento tipo deslizamiento. Las reologías usadas fueron

Aspen Pit 2 (O'Brien, 2006) y Glenwood 4 (O'Brien, 2006), ya que sus parámetros son valores extremos lo que permite simular el comportamiento del flujo bajo materiales distintos.

Se calcula un volumen potencial de aporte de sedimentos en la cuenca mediante ecuaciones empíricas referenciadas por Sodnik y Miko (2006), en donde a partir de información de pendiente promedio de la corriente principal, área y volumen de escorrentía, se halla una posible magnitud del flujo de detritos. Conociendo este valor se obtiene el rango promedio de concentraciones de sedimento en el cuerpo de agua, rango que se usa para las modelaciones del fenómeno.

Por medio de la metodología de Grisotto & Cappelletti (s.f.) se obtienen los sedimentogramas contemplados en el modelo, cuyas premisas están basadas en que el detonante es la lluvia intensa de corta duración, los sedimentos son limitados en el cauce, el pico del flujo de detritos está asociado a agua clara más un material granular saturado (el cual puede calcularse con ecuaciones que relacionan el caudal líquido y concentración), y existe un caudal detonante. Estos valores son usados para el cálculo de los tributarios o condiciones de entrada al modelo.

Se contrastó los resultados de los diferentes escenarios tanto para modelo simplificado como con sedimentos para TR10 y TR100, y para las diferentes concentraciones y reologías, y se evidencia que el modelo de Glenwood 4 con concentración pico de 0,4 tiene una mejor representación en el comportamiento del flujo según los eventos históricos asociados y la geomorfología propia de la cuenca.

Se analiza también la trayectoria de flujo para tener una guía de evacuación ante el evento como parte del sistema de alerta temprana a implementar. De manera adicional se modela el rompimiento de una presa natural simulando una obstrucción en el cauce en la zona de mayor pendiente cuyos resultados no superaron la mancha envolvente de todos los escenarios anteriormente simulados.

Para el cálculo de amenaza se utiliza la matriz que implementa la DPAE para inundaciones por desbordamiento pero ajustando la clasificación de intensidad por los efectos que puede tener los sedimentos en el flujo, así que para la categorización de la intensidad se usa la propuesta por García & otros (2003), en donde se tiene en cuenta la velocidad y la profundidad del flujo, tal como se observa en la figura 4. Se concluye que factores como la obstrucción en estructuras hidráulicas son causantes de desbordes importantes por lo que se sugiere un monitoreo continuo y control de limpieza en el cauce. Además de evidenciar que el uso de un modelamiento del flujo puede ser una herramienta para estudiar el comportamiento del mismo, teniendo una alta sensibilidad ante los parámetros de concentración y reologías.

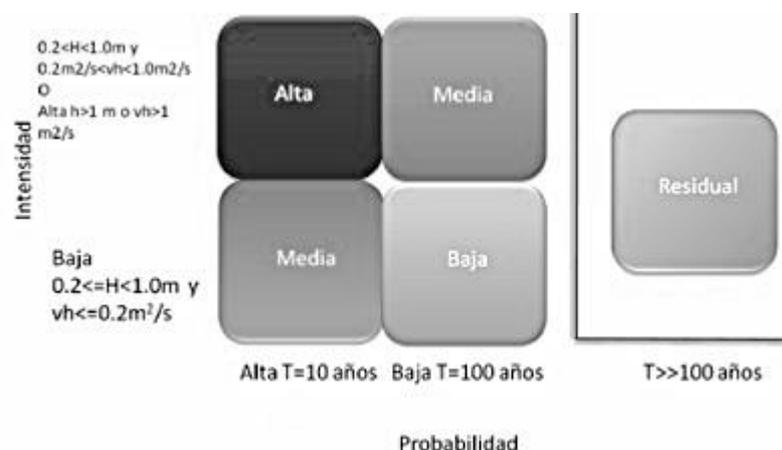


Figura 4. Clasificación de amenaza de inundación y avenidas torrenciales de la quebrada Limas siendo H altura y V velocidad del flujo. Fuente: Tomado de Rogelis (2009)

5.4 Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión. Libro II. Amenaza (UNAL, 2009)

El Valle de Aburrá presenta condiciones especiales de ocupación de suelo ya que, dada sus características de valle, el suelo ofrecido para asentamientos urbanos en planicie ha sido agotado, encontrando dentro de las zonas de vertientes del valle la alternativa para el suelo de expansión urbana. Esto ha ocasionado que se presenten cambios significativos en los suelos de esas zonas, presentando incluso ocupaciones de cauces por viviendas, además de estructuras no planificadas y depósitos de residuos sólidos lo que conlleva posibles obstrucciones en el cuerpo de agua, además de los cambios en el suelo facilitando procesos erosivos que incrementan la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de avenidas torrenciales.

En este estudio las avenidas torrenciales son consideradas en un gran grupo de flujos entre los cuales están el flujo de lodos y/o escombros, avalanchas, lahares, lavas, flujos hiperconectados o superconcentrados, lava torrencial, entre otros, que no se pueden diferenciar por falta de estudios detallados de este tipo en la zona. Al revisar los eventos históricos según Desinventar, se encuentra que este fenómeno no se considera entre los más frecuentes de la región, siendo las inundaciones y los movimientos en masa las principales amenazas en el Valle de Aburra, pero dada su alta intensidad y riesgo sobre la población se hace relevante su estudio en la zona.

Es de anotar que varias quebradas de la zona en estudio han sufrido estos eventos, y se evidencia que los factores que pueden producir avenidas torrenciales están prácticamente en todas las cuencas concluyendo que tienen una probabilidad alta de ser torrenciales, en especial las que tienen mayores pendientes y están en zonas de saprolitos arenosos. Para el análisis de amenaza se consideró juntamente el estudio de avenidas torrenciales e inundaciones rápidas, debido entre otras cosas a su semejanza en el alto poder destructivo en comparación con inundaciones lentas y a la falta de información sobre los eventos registrados que pueden confundir estos dos tipos de eventos.

En la revisión de estudios previos, se evidenció que, aunque existen estudios detallados en grandes zonas del Valle de Aburra, es escasa la información que se puede tener de las quebradas, por falta de ella o por el difícil acceso de la misma. La metodología elegida basada en la heterogeneidad de la información recopilada, consistió en análisis geomorfológico encontrando zonas susceptibles dadas sus características topográficas, geológicas e hidrológicas. Análisis completado con fotointerpretación y trabajo de campo de puntos críticos o de interés, cuyos resultados se limitaron a encontrar áreas de amenaza alta ante estos eventos.

La metodología inicia con la recopilación de información secundaria centrada en centros de documentación, universidades, planotecas, entre otras. En dicha recopilación se pudo hacer una revisión de los estudios de Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios que hacen parte del área metropolitana del Valle de Aburra, siendo estos los estudios más recientes y los que se consideran como herramienta fundamental en el ordenamiento territorial. Por lo general se encontró que los estudios no analizan a profundidad las avenidas torrenciales ni las inundaciones rápidas, algunos no especifican métodos de análisis de amenaza, sin embargo, los municipios de Bello y Barbosa si cuentan con descripciones detalladas de las zonas de amenaza y riesgo con polígonos de gran precisión.

Se realiza un análisis geomorfológico por medio de fotointerpretación de fotografías aéreas o imágenes satelitales entre 1986 y 2000, con el objetivo de encontrar zonas susceptibles a presentar inundación o avenidas torrenciales, para esto se evalúan aspectos como el origen, mecanismos de generación, tipos de material, modo de evolución, volumen de material, área que puede llegar a ser afectada y velocidad probable según relación con el sistema hídrico.

El mapa de susceptibilidad se elabora aplicando lógica difusa por medio de un SIG. El método de lógica difusa planteó la combinación cualitativa de mapas temáticos de cuatro

variables: formaciones superficiales (asociadas a depósitos aluviales), ángulo de la pendiente, forma de la pendiente (convexa, cóncava, plana) y acumulación de flujo. Para estas tres últimas variables se logra obtener los mapas temáticos a partir de herramientas del SIG ArcGIS y usando un modelo de elevación digital – MDT construido con curvas de nivel cada 10 m, el cual ofrece un insumo poco detallado y sin actualizar. Como parte del proceso a cada mapa temático se le asignó un peso según el grado de incidencia en el fenómeno a criterio de experto. Este método fue usado por Ortiz (2007) para el municipio de Medellín.

El mapa de susceptibilidad ofrece manchas muy amplias no solo por ser a escala regional sino por el nivel detalle de los insumos, pero son útiles para centrarse en zonas más susceptibles en donde debe hacerse una geomorfología más detallada. Se construye un mapa preliminar por municipio basado en la información secundaria y en análisis geomorfológico base, el cual se lleva a los recorridos en campo para la realización de los estudios geomorfológicos más detallados de las zonas, y de esta forma verificar, complementar y/o modificar los mapas preliminares.

La amenaza por inundaciones rápidas y avenidas torrenciales se determinó relacionando la información secundaria y los análisis geomorfológicos tanto de fotointerpretación como trabajos de campo centrados según mapa de susceptibilidad, obteniendo mapas de amenaza a escala 1:5.000 para Medellín y 1:10.000 para el Valle de Aburra, además de la identificación de puntos críticos relacionados a cambios bruscos de pendiente y sección del cauce, presencia abundante de escombros o basuras y obras con insuficiencia hidráulica. La verificación de los resultados se hizo por medio de la comparación con los mapas POT, realizando reuniones con funcionarios expertos de los municipios para incluir observaciones y algunas visitas a campo para verificar límites de los polígonos obtenidos.

5.5 Evaluación y zonificación de riesgos y dimensionamiento de procesos erosivos en los 26 municipios de la jurisdicción de Cornare (Cornare, 2012)

Este estudio plantea el análisis partiendo de las características relevantes que se considera debe tener una cuenca torrencial las cuales son: cuencas jóvenes y pequeñas menores a 200 km², cuencas en regiones montañosas y escarpadas, alta pendiente del canal central y de la pendiente media de la cuenca, gran capacidad de socavación e incisión del cauce, abundante material detrítico a ser arrastrado, capacidad de transporte de material heterométrico, cuencas con valles o cañones estrechos en V, gran variabilidad del caudal máximo y mínimo en la cuenca, geoforma alargada de la cuenca, variaciones extremas en los valores pico de precipitación y alta susceptibilidad ante procesos de remoción en masa.

Para el análisis de amenaza se tienen en cuenta los parámetros morfométricos y factores geólogos y geomorfológicos, y como detonante la lluvia intensa de corta duración. Partiendo de esto, se plantea la construcción de mapas temáticos basados en cinco variables: clasificación morfométrica, geomorfología, precipitación, coberturas y material superficial. Para estas tres últimas se usaron los mismos mapas temáticos planteados para el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, en donde se tiene información cartográfica de la zona en formato ráster o vector y se clasifica según la incidencia en el fenómeno con valores entre 1 a 10, siendo 10 mayor ventaja de ocurrencia del fenómeno. La espacialización de la precipitación se tiene en formato ráster y se asocia la precipitación media anual de la zona.

La clasificación morfométrica utiliza para su análisis tres factores ponderados de la siguiente manera: coeficiente de compacidad (25%), densidad de drenaje (25%) y pendiente media de la cuenca (50%). Para cada factor se asignó una clasificación entre muy baja a muy alta susceptibilidad a presentar torrencialidad.

Para el análisis se incluyó el mapa de geomorfología a nivel de unidades y macrounidades de relieve, teniendo en cuenta que los frentes montañosos y zonas escarpadas son las que más tienden a tener torrencialidad, por lo cual se asigna también valores a cada macrounidad geomorfológica encontrada en la zona. Como etapa final se plantean pesos a cada

mapa temático y se realiza el análisis por medio de álgebra de mapas. Los pesos establecidos para cada mapa se plantearon de la siguiente manera: clasificación morfométrica (30%), geomorfología (20%), precipitación (20%), materiales superficiales (15%) y cobertura superficial (15%). El análisis no toma en cuenta periodos de retorno del fenómeno ya que no se tiene información de recurrencia de eventos anteriores.

Después del procesamiento se evidencia que los insumos utilizados al no tener el mismo nivel de detalle, distorsiona los resultados obtenidos, por ejemplo, para la clasificación morfométrica se usa un modelo digital de elevación - DEM de 30x30 metros con formato ráster, mientras que la información de materiales superficiales se encuentra en formato vector a escala 1:100.000. Lo anterior llevo a no asumir estos resultados de manera sectorial sino resultados por cuenca, realizando un análisis estadístico zonal tomando el valor promedio del índice de amenaza obtenido, por tanto, el mapa de amenaza por avenidas torrenciales se cataloga a nivel de cuenca.

5.6 Estudios básicos para la delimitación de amenazas naturales y zonificación de áreas con condición de amenaza y riesgo a partir de investigación aplicada en once municipios de la jurisdicción de Corantioquia. Municipio de Donmatías (CORANTIOQUIA - EAFIT, 2015)

Se presenta el estudio básico de amenaza para el municipio de Donmatías, localizado en la subregión Norte del departamento de Antioquia, sobre la vertiente occidental de la cuenca del río Porce. La quebrada Donmatías ha presentado históricamente eventos de avenidas torrenciales, como el que ocurrió en el mes de noviembre de 2014 dejando afectaciones en la vía de ingreso a la zona urbana del municipio, así como a varias estructuras hidráulicas. La metodología describe una primera aproximación en campo de las problemáticas relacionadas a las corrientes hídricas. Luego un análisis hidrológico que incluye morfometría y obtención de caudales para la cuenca que se transitará en un modelo hidráulico, cuyos resultados son contrastados con geomorfología levantada con trabajo de campo.

El estudio hidrológico se puede dividir en dos partes. La primera consiste en delimitación de las cuencas y parámetros morfométricos usando el software HidroSIG, obteniendo mapas raster de pendientes máximas, direcciones de drenaje, áreas acumuladas y red de drenaje, los cuales fueron usados para el análisis morfométrico y la estimación de caudales.

La segunda parte del estudio hidrológico consistió en implementar diferentes metodologías de modelos lluvia escorrentía como hidrógrafas unitarias sintéticas de Williams & Hann, Soil Conservation Service y Snyder, y el método racional probabilístico (Chow, Maidment, & Mays, 1994), dado que no se cuenta con registros de caudal en los cuerpos de agua de interés por lo cual se realiza el análisis de las series de precipitación de la estación más cercana. Se definió tomar para el cálculo de crecientes el promedio de las hidrógrafas unitarias que tenía un resultado similar para los TR 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años y descartar el resultado del método racional ya que su resultado tiene un valor mucho mayor a los otros métodos

El modelo hidráulico consistió en transitar el caudal de creciente para un TR100, calculado en el paso anterior, incrementado este caudal en un 40% con el objetivo de contemplar el arrastre de sedimentos, lodo y empalizadas según lo recomendado en el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá. Para este modelo se usó como insumos la topografía (secciones transversales y modelos de terreno), condiciones de frontera de régimen mixto y coeficientes de rugosidad de Manning asociado a un material de arrastre tipo arenas y gravas. La calibración se hizo mediante la aplicación del concepto de banca llena (Posada, 1994), transitando un caudal para un TR de 2,33 cuyos resultados arrojaron niveles de lámina de agua coherentes con las características geomorfológicas del cauce y las márgenes de la quebrada.

Se lleva a cabo un trabajo de campo para analizar las zonas urbanas más afectadas o de especial atención dados los resultados obtenidos por el modelo hidráulico, encontrado problemáticas asociadas a estructuras hidráulicas de paso, así como a la reducción de área de la quebrada Donmatías antes de la llegada al casco urbano condicionando el flujo y su capacidad de respuesta. Para este estudio se realiza el mapa geomorfológico del municipio producto de trabajos de oficina y campo que permitieron identificar formas de origen aluvial asociadas a la quebrada y zonas que se consideran inundables para periodos de máximas precipitaciones. En el casco urbano se ajusta las zonas inundables según lo reportado por la comunidad e información documental dado que la quebrada ha sido transformada por las adecuaciones urbanísticas y la misma canalización que ha tenido el cuerpo de agua.

La zonificación de amenaza está asociada a inundaciones y crecientes torrenciales, y se basa en los resultados obtenidos por el modelo hidráulico TR POMCA y a la condición geomorfológica, primando uno de los dos métodos según las condiciones identificadas en campo. La amenaza por avenidas torrenciales está asociada más a un evento de tipo creciente súbita, puesto que según el reporte del evento del 2014 y la evidencia de depósitos dejados por la creciente torrencial el material transportado es tipo arena gruesa, además según la población el material depositado en las calles era tipo lodo. La obstrucción de estructuras hidráulicas es uno de los inconvenientes relevantes en este tipo de evento en la zona.

5.7 Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales para las quebradas El Chulo y El Tablón en la zona urbana del municipio de Gachetá, Cundinamarca (Sierra Hernández, 2018)

El municipio de Gachetá se localiza en la zona sureste del departamento de Cundinamarca, en él se encuentran cuatro quebradas El Matadero, La Polvera, El Chulo y El Tablón, estas dos últimas corrientes son el objeto de análisis, las cuales tienen 1,9 km y 3,5 km, y pendientes medias de 26% y 35%, respectivamente, ambas afluentes del río Gachetá. Los eventos reportados están asociados a la quebrada El Chulo en los años 1998 y 2008.

Para el análisis de la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales se usa el software Flo2D, que permite el transporte del flujo según la topografía y resistencia al flujo, que estarán asociados a los parámetros que se establezcan en el modelo. La metodología se describe de manera general como un método cuantitativo bajo un enfoque descriptivo y para ello se recolectó información hidroclimática, geotécnica, fisiográfica y cartográfica de la zona, para continuar con procesamiento que permita tener datos base para el modelo, simulando diferentes escenarios variando intensidad, duración y periodos de retorno.

Se plantean a partir del análisis de la información geomorfológica y de precipitación los hidrogramas unitarios por el método de Mockus (1957). Para esto se tuvo en cuenta pendientes, longitud del cauce, área de la cuenca, entre otros, con el fin de calcular los tiempos de concentración, tiempos de retardo, tiempo pico, entre otros parámetros usados para el cálculo de los hidrogramas para TR20 y TR100 años. Solo se especifica que para el cálculo de tiempo de concentración se usa la ecuación de Kirpich (1940), los otros valores obtenidos no se referencia autor.

Según las gráficas presentadas también se tienen hidrograma de sólidos los cuales no se especifica explicación de su cálculo, pero según lo observado presenta una concentración máxima de 0.4 y sigue la forma del hidrograma líquido calculado con anterioridad, por tanto, parece ser un factor del caudal líquido empleado.

El modelo utilizó una malla de 5x5 metros, no se menciona la fuente del modelo digital de elevación usado como insumo para identificar el nivel de detalle. El resultado de la modelación arroja mapa de velocidad, profundidad y zonificación de amenaza, aunque para este último no se especifica claramente que se obtenga del software se cree que es así porque no se detalla categorización de ningún tipo. Según los resultados de velocidades, profundidades de flujo y el comportamiento a lo largo de la quebrada y su zona de modelación, se especifica una

zona de protección establecida por medio de una ronda hidráulica para la quebrada El Chulo y El Tablón, para TR100 años de 100m y 200m respectivamente.

Más allá de un análisis hidráulico usando un software no se puede concluir mayores apreciaciones de la metodología y sus resultados porque no son explicadas dentro del estudio o simplemente no se han tenido en cuenta.

5.8 Estudios básicos de amenazas por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial (UNAL, 2018)

El estudio básico de amenaza por avenidas torrenciales se elabora como herramienta para la incorporación de la gestión del riesgo de desastres en la planificación territorial de los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, exceptuando a los municipios de Medellín que incorporó sus estudios básicos en el año 2015, y Sabaneta y Girardota que contrataron sus propios estudios desde 2017. Se han registrado eventos de avenidas torrenciales dentro del área de influencia, entre los más representativos se encuentran los ocurridos en la quebrada Doña María municipio de Itagüí en 2013, en la quebrada La Ayurá en el municipio de Envigado en 1988 y, en la quebrada El Chocho en el municipio de Barbosa en 2016.

La metodología está direccionada según lo planteado por Díez Herrero (2002) en cuanto a la evaluación de amenaza siendo ésta resultado de una serie de técnicas que se combinan y complementan, y que pueden ser divididas en tres tipos de métodos: históricos y paleo - hidrológicos, geológicos - geomorfológicos, e hidrológicos – hidráulicos. Contemplando que para las zonas donde el método geológico - geomorfológico no fuera posible su aplicación se adoptaría los resultados por el método hidrológico – hidráulico.

El método histórico consistió en realizar una revisión de los eventos históricos registrados en la base de datos de DesInventar, tratando de incorporarlos espacialmente según la información reportada. Esto permitía tener un conocimiento previo de la susceptibilidad del fenómeno por cuenca, además por solo tener estos registros en una escala temporal del último siglo se plantea como criterio adicional para las zonas que sean urbanas y de expansión y que según el mapa geológico del Valle de Aburrá disponible (AMVA, 2007) estén sobre depósitos torrenciales se catalogarán como susceptibles a este tipo de fenómenos.

El método geológico - geomorfológico consistente en tres aspectos: morfometría, morfodinámica y morfoevolutivo. El análisis morfométrico determina formas del relieve que pueden generar torrencialidad a partir del cálculo de índices que darán un estimativo de la susceptibilidad de la cuenca a ser torrencial. Los índices analizados fueron número de drenajes, la tasa de meandricidad, la constante de mantenimiento de canal, el relieve y el índice de Melton, por ser los que mejor pueden determinar la susceptibilidad de estos fenómenos en los Andes colombianos (Aristizábal, Arango, & García, 2018). La unidad de análisis son cuencas con áreas entre 0,7 y 15 km², siendo el rango adecuado para que el desarrollo del fenómeno. Posteriormente, se realiza un análisis discriminante a partir de ecuaciones propuestas por (Aristizábal, Arango, & García, 2018), catalogando la cuenca como de carácter aluvial o de carácter torrencial.

El aspecto morfodinámico se analiza en dos etapas, la primera corresponde a un trabajo de oficina donde se establece el posible aporte de sedimentos gruesos granulares en ladera usando geología de la zona y modelos físicos y la segunda etapa se realiza un trabajo de campo para verificar presencia de depósitos de origen torrencial con su respectiva caracterización. Esta etapa clasifica las cuencas por su régimen torrencial (avenida súbita, flujo de escombros canalizados o inundación de escombros) combinando índice morfométrico y tipo de potencial aporte de sedimentos. El aspecto morfoevolutivo consiste en realizar análisis geomorfológico para delimitación de depósitos aluviotorrenciales por medio de fotointerpretación y visitas a

campo para la caracterización morfológicas, de los drenajes seleccionados para tránsito hidráulico.

El método hidrológico – hidráulico se implementa en cuencas susceptibles a presentar flujo de escombros canalizados o inundación de escombros y que se hayan identificado depósitos aluviotorrenciales. Para esto se necesitó un levantamiento topográfico de los cauces priorizando los cuerpos de agua que han tenido registro de eventos en DesInventar o en estudios en la zona. Además, se realiza un análisis de las series de precipitación y de erosión de las subcuencas susceptibles a presentar este tipo de eventos. Los resultados correspondieron a la mancha generada para un TR de 500 años, con caudales incrementados en un 40% y los cuales fueron estimados a partir de las IDF proyectadas con el escenario de cambio climático, y analizando las obstrucciones de obras hidráulicas de cruce en los cuerpos de agua. El escenario de cambio climático contempla un análisis de las series históricas para cada una de las estaciones de EPM evaluando el comportamiento de los extremos de precipitación.

La amenaza es el resultado de la envolvente de las manchas producto de los métodos geológico - geomorfológico e hidrológico - hidráulico prevaleciendo la de más amplitud. En zonas donde no fue posible levantar información se usó el modelo HAND con el objetivo de delimitar los niveles de terraza y alturas a partir de información de campo.

5.9 Estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales en perspectiva de cambio climático para Bogotá (IDIGER, 2019)

El estudio inicia con un análisis geomorfológico a escala 1:2.000 obtenido a partir de trabajos de campo e información secundaria, identificando unidades origen fluviotorrencial determinado zonas susceptibles a la depositación y acumulación de flujo, las cuales serán validadas con los resultados del modelo hidráulico.

Se realiza un análisis hidrológico que consistió en dos etapas, la primera asociada a la delimitación de las cuencas aportantes a la corriente en análisis y la segunda a la obtención de un modelo lluvia escorrentía que proveerá los hidrogramas de entrada al modelo hidráulico. La delimitación de las cuencas a analizar se hace a partir del DEM de 1x1m en zona urbana y 12x12m en zona rural, y la cartografía del sistema hídrico suministrada por entidades territoriales con el fin de ajustar las cuencas lo mejor posible a sus condiciones reales de drenaje. Para esto se usa varias herramientas del SIG ArcGIS obteniendo ráster de dirección y acumulación de flujo. A partir de los ráster anteriores se plantea un número de celdas tal que pudiese generar un cuerpo de agua obtenido después de realizar pruebas de sensibilidad el valor de 0,5 km². Finalmente, con el valor de 0,5 km² y el ráster de acumulación se obtienen las corrientes hídricas que permiten la delimitación automática de las cuencas por medio de herramientas SIG.

Se plantea un análisis de las características morfométricas de las cuencas en estudio con el fin de obtener un índice de susceptibilidad a fenómenos de avenidas torrenciales por cuenca, como etapa previa al análisis de amenaza. Posteriormente, para el modelo lluvia escorrentía se utilizan los hietogramas obtenidos a partir de las curvas de Intensidad Duración Frecuencia – IDF ya establecidas para las estaciones de la EAAB y el método de bloque alterno (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Además, se incluyen las abstracciones resultado de la aplicación del método de número de curva (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Este modelo establece los hidrogramas producto de la escorrentía superficial.

Para el análisis de sedimentos se estableció dos consideraciones con el fin de establecer el comportamiento del flujo usando el software Flo2D: la concentración y la reología. Para la selección de la concentración se usó el mapa de procesos geomorfológicos obtenido por los trabajos de campo, analizando las zonas que se localizan en inmediaciones al cauce, con el fin de atribuir una concentración de sedimentos a cada tipo de proceso. Esto pudo hacerse a partir de la revisión de literatura especializada y criterio de experto, analizando las zonas de aporte de

depósitos o tipo de suelo, la información disponible de la formación entre otras consideraciones. Este procedimiento permitió obtener por cuenca una concentración de sedimento en volumen.

La reología aplicada es la de Kang & Zhang (O'Brien, 2006), dado que fue usada por estudios previos en Bogotá, donde se tenía una mejor aproximación del fenómeno por tener eventos previos que permitían calibrar el modelo bajo distintos escenarios usando varias reologías.

El modelo hidráulico se desarrolló a partir del modelo digital de terreno, los hidrogramas obtenidos y los parámetros reológicos establecidos, obteniendo alturas y velocidades máximas del flujo, lo que permitió categorizar las zonas en amenaza alta, media y baja según la matriz expuesta en la tabla 4, obteniendo el mapa de amenaza por avenidas torrenciales. El estudio deja como resultado la priorización de cuencas para realizar estudios detallados, en especial quebradas de la zona de los cerros orientales en la parte sur de la ciudad.

Tabla 4. Matriz para la zonificación de amenaza basado en Matjaž, 2013. Fuente: Tomado de IDIGER, 2019.

ZONIFICACIÓN	DEFINICIÓN
Zonas en amenaza alta	Zona de desborde del cauce delimitada para el caudal del periodo de retorno de 100 años, con una profundidad de flujo superior a 1,0 y/o una velocidad de flujo superior a 1,5 m/s.
Zonas en amenaza media	Zona de desborde del cauce delimitada para el caudal del periodo de retorno de 100 años, con una profundidad de flujo entre 0,4 m y 1,0 m y/o una velocidad de flujo entre 0,4 y 1,5 m/s.
Zonas en amenaza baja	Zona de desborde del cauce delimitada para el caudal del periodo de retorno de 100 años, con una profundidad de flujo igual o mayor que 0 m e inferior a 0,4 m, y/o una velocidad de flujo igual o mayor que 0 m/s e inferior a 0,4 m/s.

6 ANÁLISIS DE LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA EN FUNCIÓN DE LOS ESTUDIOS DE CASO ANALIZADOS

La ley 388 de 1997 plantea la línea base legal en cuanto al ordenamiento territorial en donde se establece como determinante para la elaboración e implementación de los planes territoriales municipales y distritales lo que refiere a *“las políticas, directrices y regulaciones sobre prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de las áreas de riesgo para asentamientos humanos, así como las estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos naturales”*. Las zonas de amenaza y riesgo según lo planteaba la Ley 9 de 1989 y la Ley 2 de 1991 son las afectados por sitios anegadizos o inundables, o sujetos a derrumbes y deslizamientos.

En la Ley 1523 de 2012 se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se determina que *“los alcaldes y la administración municipal o distrital, deberán integrar en la planificación del desarrollo local, acciones estratégicas y prioritarias en materia de gestión del riesgo de desastres, especialmente, a través de los planes de ordenamiento territorial, de desarrollo municipal o distrital y demás instrumentos de gestión pública”*.

El Decreto 19 de 2012 en su artículo 89 establece que el Gobierno Nacional reglamentará las condiciones y escalas de detalle para la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y con condición de riesgo. Por lo anterior se expide el Decreto 1807 de 2014 del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio *“Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones”* el cual se compila en el Decreto Único Reglamentario 1077 de 2015 en donde se encuentran las normas del sector administrativo de vivienda, ciudad y territorio (Consejo Nacional de Política Economía y Social, 2016).

El Decreto 1807 establece los criterios que deben tenerse en cuenta para la elaboración de los estudios técnicos, dependiendo si se trata de estudios básicos o detallados, esto teniendo presente el principio de gradualidad expuesto en la Ley 1523 de 2012, en la cual se plantea que para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial o la expedición de nuevos planes, se harán estudios básicos, y en la fase de ejecución deben realizarse los estudios detallados (MVCT, 2014). Dependiendo de los dos tipos de

estudio, así como del uso de suelo (urbano, expansión urbana y rural), se establecen las escalas mínimas de estos estudios, las cuales estarían entre 1:2.000 y 1:25.000.

Específicamente para los estudios básicos de avenidas torrenciales, el Decreto señala que los suelos urbanos, de expansión urbana y rural, deben tener como mínimo lo siguiente: para el área de estudio se debe realizar la identificación de todos los drenajes con tendencia a avenidas torrenciales dependiendo de sus condiciones topográficas y que se consideran con incidencia en el municipio. Por otra parte, para los insumos se debe tener la geomorfología en la zona de estudio, un análisis hidrológico de la cuenca para flujos torrenciales que incluya además el ciclo de sedimentos, un análisis hidráulico que incorpore detonantes asociados a este fenómeno y, se debe utilizar una base cartográfica 1:2.000.

Estos estudios tendrán el objetivo de categorizar la amenaza por avenidas torrenciales en alta, media y baja dependiendo los eventos presentados en el área de estudio, así como el comportamiento del flujo en cuanto a lámina y velocidad de flujo, además, del tipo de material transportado. El análisis debe ser estadístico, determinístico o probabilístico, y debe estar en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y la disponibilidad de información (MVCT, 2014).

En el citado Decreto no se realizan especificaciones en cuanto a estudios detallados de avenidas torrenciales, como sí se exponen para movimientos en masa e inundación, sin embargo, se explica que los estudios detallados en general, buscan categorizar el riesgo en la zona y establecer las medidas de mitigación a las que haya a lugar.

Los estudios de caso analizados antes de la implementación del Decreto optaban por análisis heurísticos, con mayores escalas a las contempladas en la nueva reglamentación actual, esto debido a la escasa información disponible o detallada de la mayoría de las zonas del país. La forma más adecuada en su momento era el análisis multicriterio de mapas temáticos asociados a parámetros que según la literatura están directamente relacionados a evento de tipo torrencial, sin embargo, el peso de cada uno es por lo general a criterio de experto. Esta evaluación era mejorada con análisis geomorfológicos obtenidos por medio de trabajos de campo y fotointerpretación de fotografías aéreas o imágenes satelitales.

El uso de modelos hidráulicos para modelar agua y sedimento fue implementado en uno de los estudios de caso analizados antes del Decreto, pero la base para la construcción de los sedimentogramas está soportada solo por bases teóricas, sin un estudio geológico y geomorfológico detallado para caracterizar adecuadamente el tipo de material que puede ser aportado al cauce ante este tipo de fenómenos. Sin embargo, al tener un evento precedente con indicios de sus afectaciones permitía de alguna forma calibrar el modelo analizado bajo varios escenarios de caracterización del flujo.

En uno de los casos de estudio CORNARE (2012), donde la información no permite tomar un criterio de zonificación dado su variabilidad en escalas de los insumos base y la falta de información primaria, se plantea una zonificación a nivel de cuenca lo que puede suponer más un análisis de la susceptibilidad de las cuencas a presentar avenidas torrenciales.

Todos los casos analizados posteriores al Decreto, presentan un análisis geomorfológico y un análisis hidrológico de la cuenca con el fin de transitar un caudal por medio de un modelo hidráulico, sea agua con un aumento del caudal para simular el material de arrastre o un caudal líquido y sólido. Para realizar este tipo de modelos se debe tener una batimetría de los cauces y se ajustan la mancha de los resultados producto del modelo con la geomorfología detallada y verificaciones en campo. A partir de los estudios de caso presentados con anterioridad, se realizó un análisis comparativo de las variables que se consideran relevantes para la implementación de una metodología de zonificación de amenaza por avenidas torrenciales, como se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Análisis comparativo estudios de caso evaluación de amenaza por avenidas torrenciales. Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIOS DE CASO							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Autor estudio de Caso	Montoya et al, 2009	Rogelis, 2009	UNAL, 2009	Cornare, 2012	Corantioquia-Eafit, 2015	Sierra, 2018	UNAL, 2018	IDIGER, 2019
Zona objeto de estudio (Cuenca/ Municipio)	Quebrada Doña María	Quebrada Limas	Área Metropolitana Valle Aburrá	26 municipios de la jurisdicción de Cornare	Municipio Donmatías	Quebradas El Tablón y El Chulo	Municipios Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa	Ciudad de Bogotá D.C.
Departamento	Antioquía	Cundinamarca	Antioquía	Antioquía	Antioquía	Cundinamarca	Antioquía	Cundinamarca
Definición Avenida Torrencial	USGS, 1984 Castillo, 2006 Suárez, 2001 OSSO, 1999	O'Brien, 2006 Takahashi, 1981	I) Costa, 1988; Medina, 1991; Cousot y Meunier, 1996; Lavigne y Suba, 2004; Díaz-Onofre, 2008. II) Urrea, 1996, Rendón, 1997; OSSO – La Red, 2003; Castro, 2007	Urrea, 1996, Rendón, 1997; OSSO – La Red, 2003; Castro, 2007	INGEOMINAS-CVC, 2001 Parra, 1998	Hungr, et. al., 2001 Caballero, 2011	Díez-Herreto, et al., 2008 Borga, Stoffel, Marchi, Marra, & Jakob, 2014	Gemma, 2007
Escala base cartográfica	*S.E.	*S.E.	1:10.000	Varias. 1:100.000	Varias 1:100.000 1:10.000	*S.E.	1:2.000 1:5.000	1:5.000 1:25.000
Metodologías	Heurístico	Determinístico	Heurístico	Heurístico	Combinado	Determinístico	Combinado	Combinado
Levantamientos topográficos	No	Si (información secundaria)	No	No	Si	*S.E.	Si -Lidar 1:1000 (Cauces priorizados)	Algunos cauces
Escala de trabajo	*S.E.	*S.E.	1:10.000 Valle Aburrá 1:5.000 Medellín	1:25000	1:2.000 1:10.000	*S.E.	1:2.000	1:5.000 urbano 1:25.000 rural
DEM/DTM (m)	10x10	15x15	*S.E.	30x30	25x25	*S.E.	2x2 5x5	1x1
Geomorfología	Si (*S.E.)	Si (General)	Si (Fotointerpretación-trabajo de campo detallado)	Si (General)	Si	Si (General)	Si	Si
Variables Amenaza	- Pendientes - Red de drenaje acumulada - Geología - Geomorfología - Distancia a los cauces - Índice de Melton por microcuenca	-Lamina de Flujo -Velocidad de Flujo -TR	-Formaciones superficiales. -Angulo de la pendiente. -Forma de la pendiente. -Acumulación de flujo	-Clasificación morfométrica. -Precipitación. -Coberturas. -Material superficial. -Geomorfología.	-Geomorfología -Lamina de flujo -TR	-Lamina de Flujo -Velocidad de Flujo -TR	-Geomorfología -Lamina de flujo -TR	-Lamina de Flujo -Velocidad de Flujo -TR
Frecuencia (TR años)	No	10 y 100	No	No	100	20 y 100	500	100

	ESTUDIOS DE CASO							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Autor estudio de Caso	Montoya et al, 2009	Rogelis, 2009	UNAL, 2009	Cornare, 2012	Corantioquia-Eafit, 2015	Sierra, 2018	UNAL, 2018	IDIGER, 2019
Análisis hidrológico	Si (*S.E.)	Modelo lluvia-escorrentía Hec-HMS	No	Básico. Precipitación media multianual espacializada por isoyetas.	Modelo lluvia-escorrentía hidrógrafa unitaria	Método Mockus	Si (Modelo lluvia-escorrentía hidrógrafas unitarias)	Modelo lluvia-escorrentía. *S.E. método
Volumen sedimentos Análisis ciclo sedimentos	No	Basado en fórmulas empíricas (Sodnik and Miko, 2006)	No	No	No	Hidrograma de sólidos (*S.E. método)	Si. Modelos (SHALSTAB)	Basado en inventario de procesos y análisis geomorfológicos con aporte de criterio de expertos
Análisis hidráulico	Hec-RAS (QLíquido+40%)	Flo2D	No	No	Hec-RAS (QLíquido+40%)	Flo2D	HecRAS (1D) - Iber (2D) (QLíquido+40%)	Flo2D
Características flujo: Reología y valores de concentración	No	Reología: Glenwood 4 y Aspen Pit 2; Concentraciones: 0,2-0,55	No	No	No	*S.E.	No	Reología: Kang & Zhang; Concentraciones: 0,4-0,5
Susceptibilidad	No	No	Si	Si	Si	No	Si	Si
Calibración	-Modelo hidráulico -Campo	Puntos de control eventos históricos	Trabajos de campo puntos críticos y zonas de interés	No	Trabajo de campo	No	Trabajos de campo	Trabajo de campo
Escenario cambio climático	No	No	No	No	No	No	Si	No
Limitaciones	Falta información cartográfica y del aporte de sedimentos.	Sin trabajo de campo geológico-geomorfológico Falta de información base para análisis real de aporte de sedimentos en la cuenca. Limitada evaluación geológica.	Baja calidad información cartográfica, en especial en drenajes. Dificultada para acceder a información de entidades.	Mapas temáticos con gran diferencia en el nivel de detalle. Resultados de amenaza a nivel de cuenca.	Modelo hidráulico basado en caudales líquidos incrementados	Sin trabajo de campo y análisis real de aporte de sedimentos. Sin información geológica.	Topografía lidar sólo en cauces priorizados. Modelo hidráulico basado en caudales líquidos incrementados.	Sin análisis real de aporte de sedimentos.
Cumple con Decreto 1807	No	Parcialmente	No	No	Si	No	Si	Si

*S.E.: Sin especificar.

La escala de trabajo es una de las principales variables que generan confusiones, ya que según lo expuesto en el Artículo 5 del Decreto, se plantea para los estudios básicos las escalas de trabajo de 1:5.000 para suelo urbano y de expansión y 1:25.000 para suelo rural. En cuanto a los estudios detallados se plantea 1:2.000 y 1:5.000 para estos dos grupos respectivamente. Sin embargo, en el Artículo 10 del Decreto, donde especifican las condiciones para la elaboración de estudios básicos de avenidas torrenciales, los insumos deben incluir cartografía 1:2.000. Lo que ha implicado que algunos estudios obtengan productos a escala 1:2.000 como es el caso del estudio de UNAL (2018) y otros a escala 1:5000 como IDIGER (2019), sin saber con certeza cuál es la escala adecuada para la norma. En general, como se plantea en la última fila de la tabla 5, en la mayoría de los casos analizados no se cumple a cabalidad con los requisitos exigidos por el Decreto 1807.

7 CONCLUSIONES

Los eventos de avenidas torrenciales constituyen una de las amenazas naturales con más poder destructivo en Colombia, causando en el último siglo 2.595 muertes, de allí su importancia en la zonificación de la amenaza como determinante en el ordenamiento territorial de los municipios.

Las avenidas torrenciales son un tipo de fenómeno bastante complejo cuyo estudio debe realizarse bajo el enfoque de varias disciplinas, y puede ser los distintos enfoques en que se ha trabajado el fenómeno lo que no ha permitido que se genere un consenso técnico en cuanto a la definición se refiere.

En general las avenidas torrenciales pueden definirse como crecientes de corta duración en cuerpos de agua con pendientes pronunciadas, que tienen características morfométricas y geomorfológicas que favorecen tanto el incremento de velocidad de flujo como acumulación de material en el cauce, y en donde se presentan eventos de precipitación de corta duración. Los detonantes pueden ser lluvias intensas, enjambre de movimientos en masa, sismo y, rotura de presas.

Las distintas causas que originan una avenida torrencial aumentan su complejidad, ya que debe realizarse análisis hidrológico en especial en la cuenca alta asociado a altas precipitaciones y de ser posible incluir escenarios climáticos para el comportamiento de estas. Además, debe llevarse a cabo un análisis de los posibles movimientos en masa que pueden desencadenar un aporte de material dentro del cauce, y cuyos detonantes puede ser precipitaciones intensas, saturación de suelos por precipitaciones diarias recurrentes y sismos, entre otros.

La complejidad del análisis de las avenidas torrenciales también radica en la difícil caracterización del flujo transitado. La implementación de modelos hidráulicos incluye caudales líquidos y sólidos que permiten una mejor aproximación del comportamiento de los flujos no newtonianos que al transitar solo agua clara, pero implica asumir parámetros reológicos basados en análisis experimentales con muestras de flujo de otros países e incluso análisis teóricos que no corresponden a datos propios de las características de la zona. Por lo anterior, resulta de suma importancia completar los resultados modelados con un análisis geomorfológico detallado y si es posible con las evidencias de eventos registrados en la zona.

La mayoría de los estudios de caso implementados en Colombia tienen dificultad en la obtención de los insumos para realizar los análisis hidrológicos, geomorfológicos, de sedimentos e hidráulico para una escala 1:2.000, ya que implica registros de hidrológicos en el área de influencia y que en varias zonas del país no siempre se cuenta con estaciones de medición de caudales. Adicionalmente, la cartografía disponible (base de datos nacionales), no cuentan con información a esa escala detalle por tanto debe levantarse en campo, así como debe contarse con una batimetría de todos los cauces que se requiere realizar un modelo hidráulico, y estos insumos requieren de una inversión económica alta.

En el ámbito de la planificación territorial para municipios de categoría media y baja, y considerando los limitantes anteriores, no es muy viable exigir los alcances e insumos estipulados por el Decreto, considerando que los recursos en información y presupuesto son escasos y no se logra obtener los productos solicitados. Estas limitaciones permiten pensar que es conveniente implementar estudios a escala mayor a nivel de cuenca encaminados a obtener una susceptibilidad al fenómeno y sobre zonas críticas, realizar estudios detallados de cauces priorizados que incluyan análisis de registros de eventos.

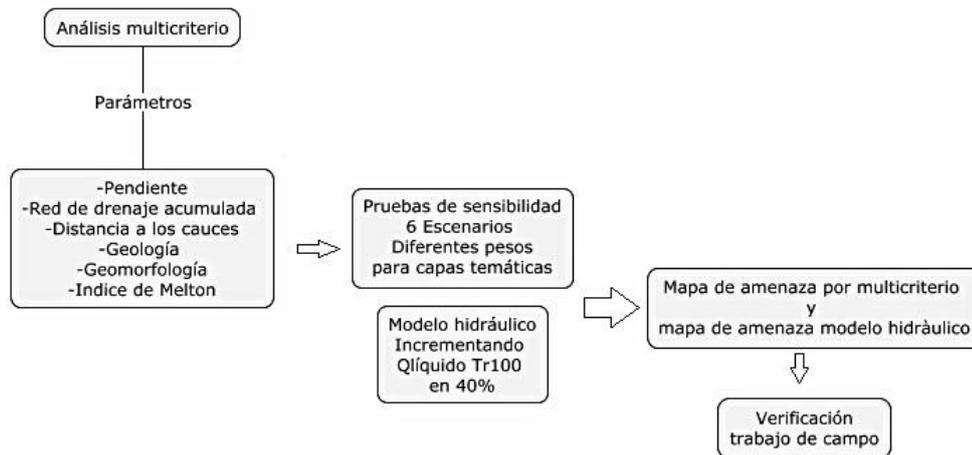
8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2007). *Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado*.
- Aristizábal, E., Arango, M., & García, I. (2018). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 242-258.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Consejo Nacional de Política Economía y Social. (2016). *CONPES 3870 Programa Nacional para la formulación y actualización de Planes de Ordenamiento Territorial POT Modernos*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.
- CORANTIOQUIA - EAFIT. (2015). *5.6 Estudios básicos para la delimitación de amenazas naturales y zonificación de áreas con condición de amenaza y riesgo a partir de investigación aplicada en once municipios de la jurisdicción de Corantioquia. Municipio de Donmatías*.
- Cornare. (2012). *5.5 Evaluación y zonificación de riesgos y dimensionamiento de procesos erosivos en los 26 municipios de la jurisdicción de Cornare*.
- Corporación OSSO. (s.f.). *Desinventar*. Obtenido de <https://www.desinventar.org/es/database>
- Díez Herrero, A. (2002). *Aplicaciones de los sistemas de información geográfica al análisis del riesgo de inundaciones fluviales*. En: *Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión de los Riesgos Geológicos y el Medio Ambiente*. Madrid: Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.
- García, R., López, J., Noya, M., Bello, M., Bello, M., González, N., . . . O'Brien, J. (2003). *Hazard mapping for debris-flow events in the alluvial fans of northern Venezuela. Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment*.
- Grisotto, S., & Cappelletti, S. (s.f.). *Debris flow in the Val Della Vecchia cathment: process analysis and hydraulic-forest controlmeasures*.
- Grupo de Estándares para Movimientos en Masa - GEMMA. (2007). *Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Canada: Publicación Geológica Multinacional.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the Flow Type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 221-238.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*. Bogotá.
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER. (2019). *5.9 Estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales en perspectiva de cambio climático para Bogotá*. Bogotá.
- Kirpich, Z. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Journal of Civil Engineering*.

- López, J., García, R., & Bello, M. (2002). Analysis and Mapping of Debris Flow in Alluvial Fans (Part I: Methodology Description). *XX Congreso latinoamericano*. La Habana.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (2014). *Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Bogotá.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS & Universidad Nacional de Colombia - UNAL. (2013). *Informe Final: Metodología para la Evaluación del Riesgo en los POMCAS*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio - MVCT. (2014). *Decreto 1807. Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones*. Bogotá.
- Mockus, V. (1957). *Use of storm and watershed characteristics in synthetic unit hydrograph analysis and application*. U.S. Soil Conservation Service.
- Montoya, L., Silva, S., & González, J. (2009). 5.2 Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada Doña María. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 11-29.
- O'Brien, J. S. (2006). *Simulating mud flows guidelines. F. D. manual*.
- Ordóñez, C., & Martínez, R. (2003). *Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones prácticas con IDRISI KILIMANJARO al análisis de riesgos naturales y problemáticas*. Madrid: RA-MA Editorial.
- Ortíz, J. (2007). *Zonificación Geológica – Geotécnica del barrio María Cano Carambolas comuna tres municipio de Medellín por deslizamientos e inundaciones. Trabajo de grado*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Posada, L. (1994). *Transporte de Sedimentos. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Rogelis, M. C. (2009). *Actualización de la zonificación de amenaza de inundación y avenidas torrenciales de la quebrada Limas localidad de Ciudad Bolívar*. Bogotá: Dirección de Prevención y Atención de Emergencias - DPAE.
- Servicio Geológico Colombiano - SGC. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000*. Bogotá.
- Sierra Hernández, E. (2018). Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales para las quebradas El Chulo y El Tablón en la zona urbana del municipio de Gachetá, Cundinamarca. *Espacios*, 13.
- Sodnik, J., & Miko, M. (2006). Estimation of magnitudes of debris flows in selected torrential watersheds in Slovenia. *Acta geographica Slovenica*, 93-123.
- Takahashi, T. (2014). *Debris flow : mechanics, prediction and countermeasures 2nd Edition*. London: CRC Press.
- Universidad Nacional de Colombia - UNAL. (2009). 5.4 Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. *Formulación de propuestas de gestión. Libro II. Amenaza*. Medellín.
- Universidad Nacional de Colombia - UNAL. (2018). *Estudios básicos de amenazas por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo*. Medellín.

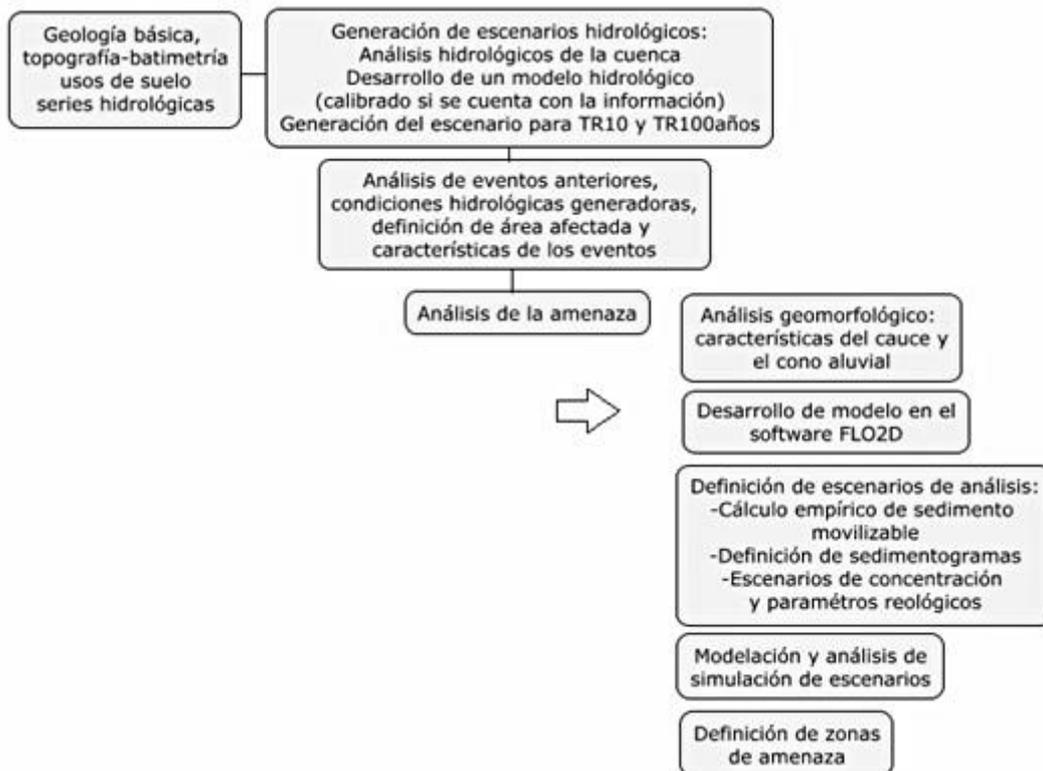
ANEXO I
FLUJOGRAMAS DE LAS METODOLOGÍAS DE LOS ESTUDIOS DE CASO
ANALIZADOS

1 Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada Doña María (Montoya et al, 2009)



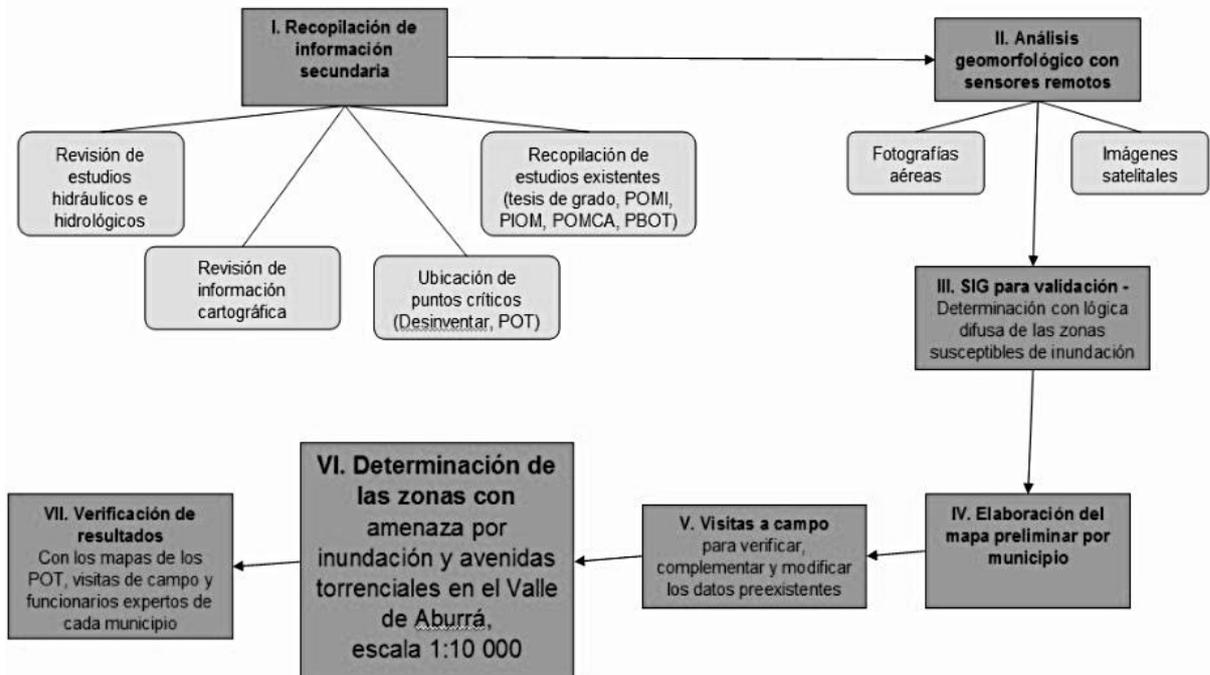
Fuente: Elaboración propia basado en Montoya (2009)

2 Actualización de la zonificación de amenaza de inundación y avenidas torrenciales de la quebrada Limas localidad de Ciudad Bolívar (Rogelis, 2009)



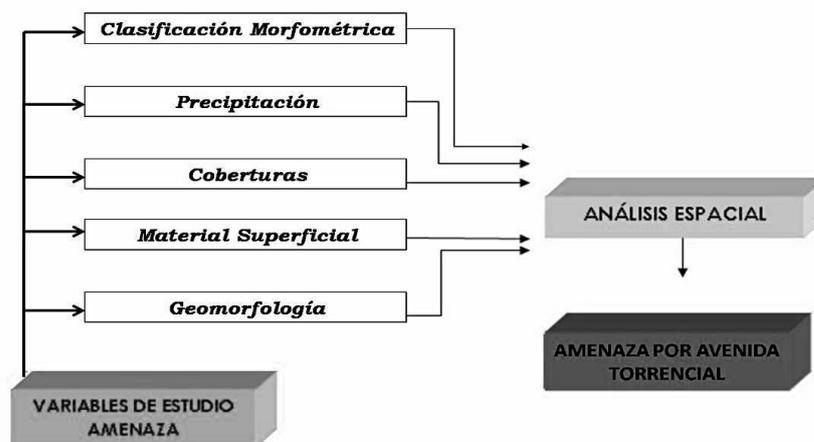
Fuente: Tomado de Rogelis (2009)

3 Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión. Libro II. Amenaza (UNAL, 2009)



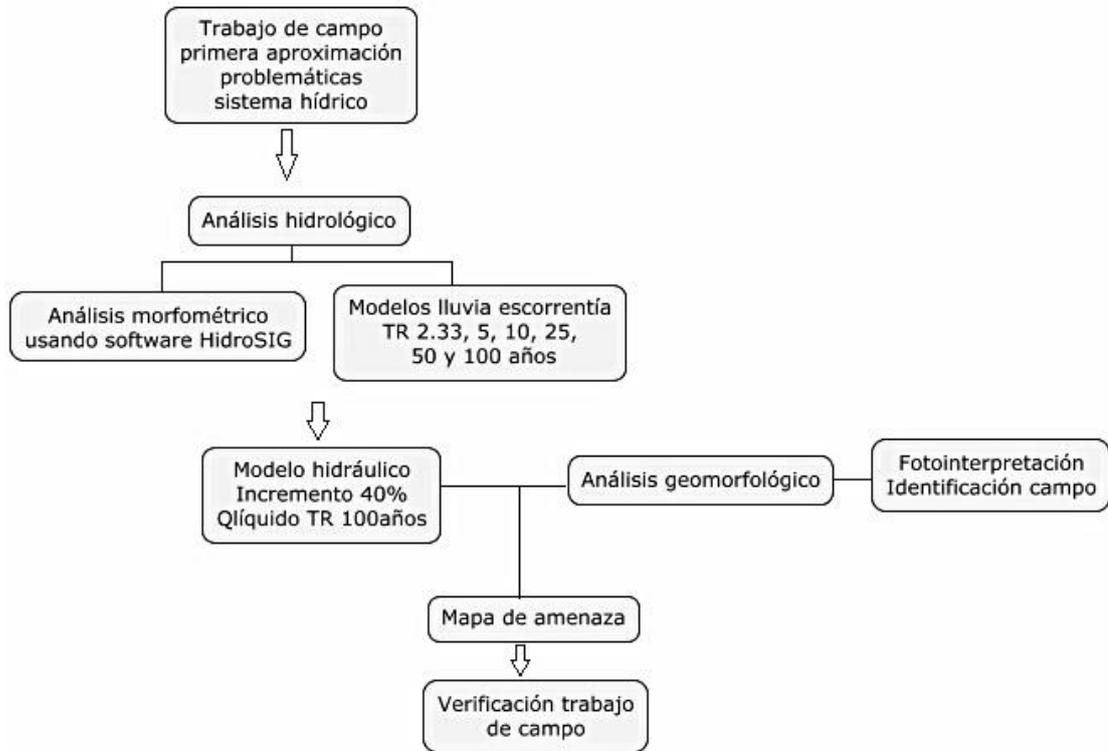
Fuente: Tomado de UNAL (2009)

4 Evaluación y zonificación de riesgos y dimensionamiento de procesos erosivos en los 26 municipios de la jurisdicción de Cornare (Cornare, 2012)



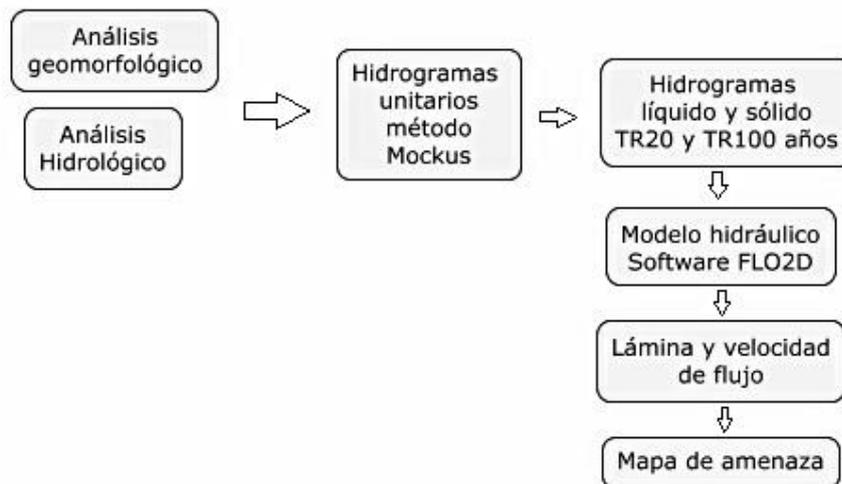
Fuente: Tomado de Cornare (2012)

5 Estudios básicos para la delimitación de amenazas naturales y zonificación de áreas con condición de amenaza y riesgo a partir de investigación aplicada en once municipios de la jurisdicción de Corantioquia. Municipio de Donmatías (CORANTIOQUIA - EAFIT, 2015)



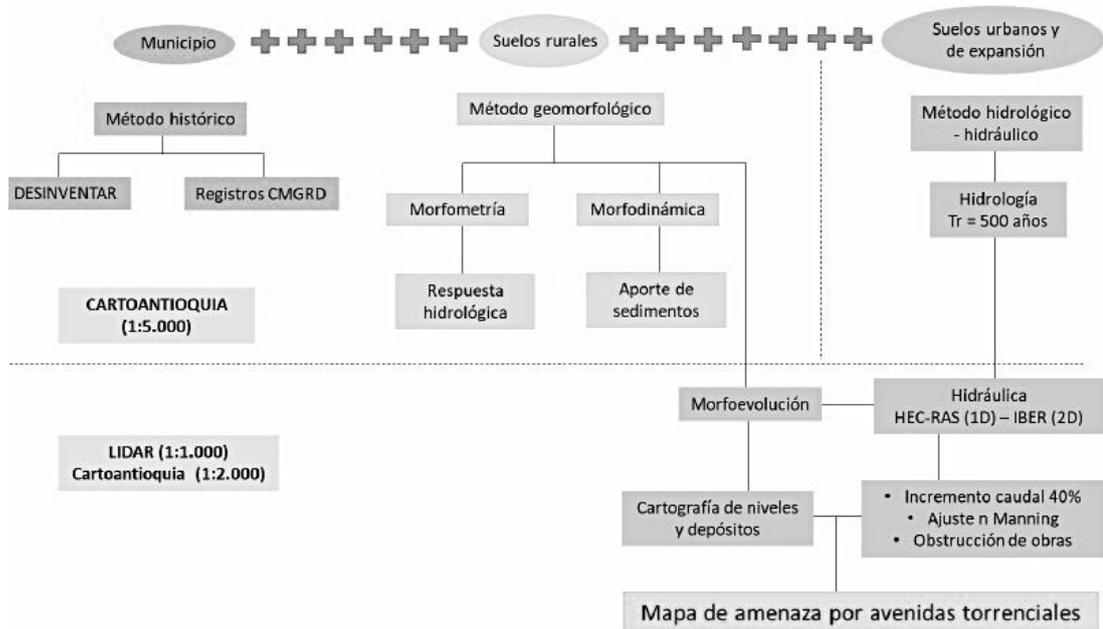
Fuente: Elaboración propia basado en CORANTIOQUIA – EAFIT (2015)

6 Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales para las quebradas El Chulo y El Tablón en la zona urbana del municipio de Gachetá, Cundinamarca (Sierra, 2018)



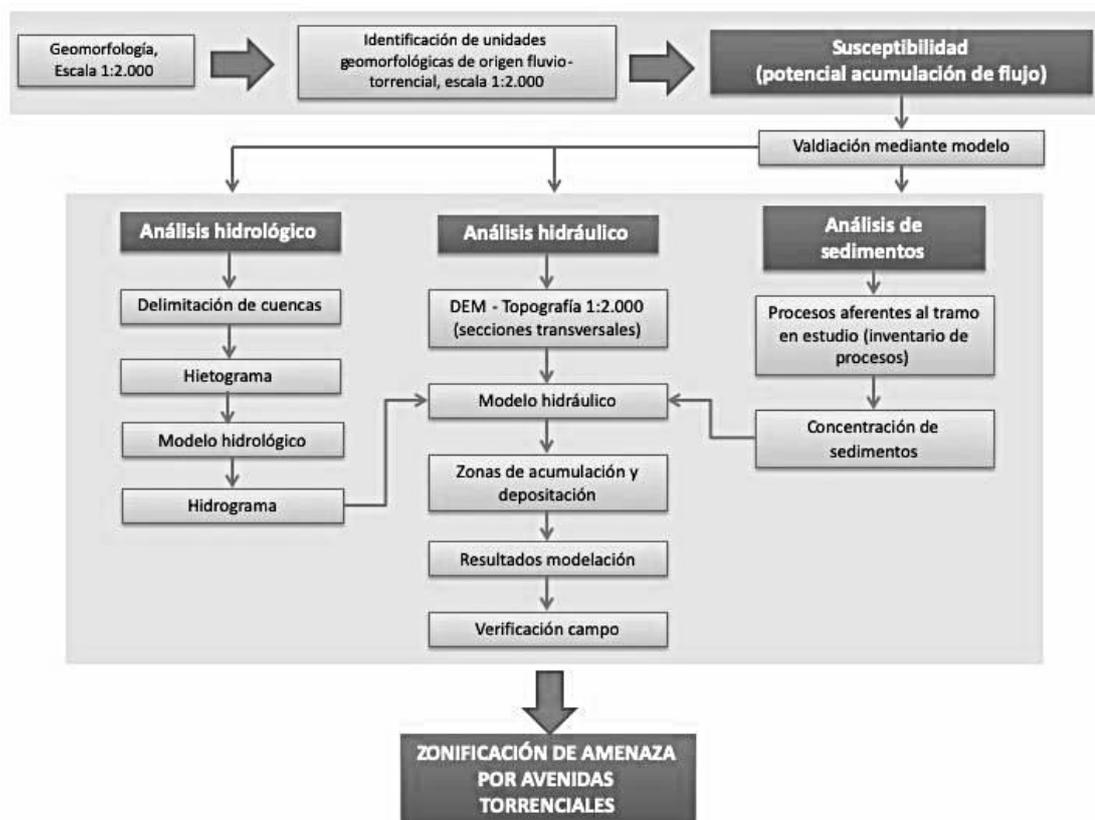
Fuente: Elaboración propia basado en Sierra (2018)

7 Estudios básicos de amenazas por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial (UNAL, 2018)



Fuente: Tomado de UNAL (2018)

8 Estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales en perspectiva de cambio climático para Bogotá (IDIGER, 2019)



Fuente: Tomado de IDIGER (2019)