

FORTALECIMIENTO AL PROYECTO DE FORMULACIÓN ADOPCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL POT DEL MUNICIPIO DE BARRANCABERMEJA, SANTANDER. CONTRATO No. 3349-17

Estudio De Amenaza Por Inundación Y Avenidas Torrenciales En El
Área Rural Y Urbana Del Municipio De Barrancabermeja
Volumen II: Estudio del Área Urbana
Barrancabermeja, Santander, Colombia - Febrero 2018



Alcaldía de
Barrancabermeja

BARRANCABERMEJA





Gestores del Proyecto

Darío Echeverri Serrano

Alcalde Municipio de Barrancabermeja 2016-2019,
Municipio de Barrancabermeja

Elizabeth Lobo Gualdrón,

Asesora de Planeación
Oficina Asesora de Planeación, Barrancabermeja

Autores

Gabriel Alberto Bayona Fetecua

Geólogo, Universidad EAFIT • Magíster en Ciencias de la Tierra. Universidad EAFIT • Director de Proyecto,
SAGGES S.A.S. • info@sagges.com.

Andrés Felipe Duque Pérez

Ingeniero Civil, Universidad Escuela de Ingeniería de Antioquia • Magíster En Ingeniería - Aprovechamiento De
Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín • Coordinador de ingeniería hidrología,
SAGGES S.A.S.

Colaboradores

Christian Camilo Herrera Uribe

Ingeniero Civil, Universidad de Medellín • Especialista en Vías y Transporte, Universidad Nacional de Colombia •
Ingeniero Especialista, SAGGES S.A.S.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
1 GENERALIDADES.....	10
1.1 Localización del Área de Estudio.....	10
1.1.1 Localización General.....	10
1.1.2 Descripción General de los Principales Sistemas Lénticos y Lóticos	11
1.1.3 Área de Estudio	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo General.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.2.3 Alcance del Estudio	15
1.2.4 Descripción de Actividades.....	16
2 ANTECEDENTES, DIAGNÓSTICO Y MARCO CONCEPTUAL.....	18
2.1 Antecedentes.....	18
2.1.1 Caracterización Histórica de Amenazas y Eventos Amenazantes.....	18
2.1.2 Estudios Previos	22
2.2 Análisis Conceptual de la Problemática y Diseño de la Metodología de Trabajo	27
2.2.1 Recorridos de campo	27
2.2.2 Modelo hidrológico e hidráulico adecuado.....	33
2.2.3 Metodología General para la Zonificación de la Amenaza.....	33
3 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD	34
3.1 Susceptibilidad a Eventos de Inundación	34
3.2 Susceptibilidad A Avenidas Torrenciales	35
4 METODOLOGÍA E INFORMACIÓN UTILIZADA	36
4.1 Caudales Máximos.....	36
4.1.1 Tormenta de diseño	36
4.1.2 Método Racional	39
4.2 Modelación Hidráulica de las Crecientes	41
4.3 Zonificación de la Amenaza	41
4.4 Información Utilizada.....	42
4.4.1 Topografía	42
4.4.2 Coberturas.....	43
4.4.3 Precipitación.....	44
4.4.4 Niveles	45
5 ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO.....	48
5.1 Caracterización Morfométrica de las cuencas	48
5.1.1 Tiempo de Concentración.....	52
5.2 Estimación de Caudales Máximos	53



5.2.1	Coficiente de escorrentía	53
5.2.2	Tormenta de Diseño	54
5.2.3	Caudales máximos	55
5.3	Modelación Hidráulica	56
5.3.1	Parámetros de modelación	56
5.3.2	Condiciones de borde	58
5.3.3	Resultados	59
6	ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA.....	63
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
8	BIBLIOGRAFÍA	68

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1	Localización general del municipio de Barrancabermeja	10
Figura 1.2	Localización general del perímetro urbano y zonas de expansión.....	11
Figura 1.3	Área de estudio	14
Figura 2.1	Eventos de desastres asociados a eventos de inundación reportados en el área urbana (más de dos eventos)	19
Figura 2.2	Reporte de eventos de inundación en el área rural del municipio.....	20
Figura 2.3	Eventos reportados por año	21
Figura 2.4	Afectaciones reportadas por año	21
Figura 2.5	Esquematación de la inundación en el área de estudio realizado por Integral S.A	22
Figura 2.6	Área de estudio Ingetec S.A	24
Figura 2.7	Estudio de amenaza por inundación en la zona de expansión sureste (Alcaldía)	25
Figura 2.8	Registro fotográfico realizado en la verificación en campo	26
Figura 2.9	Puntos visitados en recorridos de campo.....	28
Figura 2.10	Sitios reportados con eventos de inundación durante los recorridos de campo	29
Figura 3.1	Geomorfología en el área urbana del municipio.....	34
Figura 3.2	Susceptibilidad a eventos de inundación en el área urbana.....	35
Figura 4.1	Esquematación del proceso de estimación de caudales máximos.....	36
Figura 4.2	Tipos de daño por inundación y condiciones de flujo.....	41
Figura 4.3	Modelo Digital de Elevación en el área urbana	43
Figura 4.4	Cobertura vegetal en las cuencas estudiadas	44
Figura 4.5	Intensidad-Duración-Frecuencia de la lluvia en la estación Aeropuerto Yariguies [23155030]	45
Figura 4.6	Elevación de la creciente asociadas a un período de retorno de 10 años (área rural)	46
Figura 4.7	Elevación de la creciente asociadas a un período de retorno de 100 años (área rural)	46
Figura 4.8	Elevación de la creciente asociadas a un período de retorno de 500 años (área rural)	47
Figura 5.1	Localización de las cuencas estudiadas	49
Figura 5.2	Dominio computacional definido para el estudio hidráulico de la cuenca de la quebrada Las Camelias.....	57
Figura 5.3	Parámetros definidos para la malla computacional del estudio hidráulico de la cuenca de la quebrada Las Camelias	58
Figura 5.4	Condiciones de borde definidas para el modelo implementado	59
Figura 5.5	Profundidad de inundación para una creciente asociada a un período de retorno de 10 años en la quebrada Pozo Siete	60
Figura 5.5	Velocidades de flujo para una creciente asociada a un período de retorno de 10 años en la quebrada Zona de Expansión.....	60



Figura 5.5	Profundidad de inundación para una creciente asociada a un período de retorno de 500 años en las quebradas Sin Nombre 6, 7, 8	61
Figura 5.5	Velocidades de flujo para una creciente asociada a un período de retorno de 100 años en la quebrada Las Camelias	61
Figura 6.1	Amenaza por inundación estimadas en el estudio	64

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1	Eventos de desastres asociados a eventos de inundación reportados en el área urbana	20
Tabla 2.2	Niveles máximos estudio Integral S.A.....	22
Tabla 2.3	Niveles máximos estudio Ingetec S.A	23
Tabla 3.1	Grado de susceptibilidad a inundaciones asociado a las unidades geomorfológicas.	34
Tabla 4.1	Metodologías para la estimación del tiempo de concentración (Tc)	38
Tabla 4.2	Coefficiente de escorrentía para diferentes periodos de retorno	40
Tabla 4.3	Categorización de amenaza por inundación	42
Tabla 5.1	Parámetros morfométricos de las cuencas estudiadas.....	50
Tabla 5.2	Tiempo de concentración estimado para la cuenca Las Camelias	52
Tabla 5.3	Tiempo de concentración estimado para todas las cuencas estudiadas.....	53
Tabla 5.4	Coefficientes de escorrentía para cada tipo de cobertura identificada en las cuencas estudiadas	53
Tabla 5.5	Coefficiente de escorrentía estimado para cada una de las cuencas estudiadas	54
Tabla 5.6	Intensidad de la lluvia estimada para cada una de las cuencas estudiadas en mm/h.....	55
Tabla 5.7	Intensidad de la lluvia afectada por el coeficiente de escorrentía para cada una de las cuencas estudiadas en mm/h	55
Tabla 5.8	Caudales máximos estimados para cada una de las cuencas estudiadas, en m ³ /s.....	56
Tabla 5.9	Condiciones de borde en la sección de control del modelo de cada una de las cuencas estudiadas	58
Tabla 6.1	Categorización de amenaza por inundación	63
Tabla 6.2	Barrios en condición crítica por amenaza de inundación	65

INTRODUCCIÓN

La gestión del riesgo es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de las políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible.

Mediante la ley 1523 de 2012, en la cual el gobierno de Colombia adopta la política nacional de riesgo, se constituye la gestión del riesgo como una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental sostenible, en todos los niveles del gobierno y la efectiva participación de la población.

Posteriormente con la implementación del decreto 1807 de 2014, siguiendo lo estipulado en el artículo 189 del decreto de ley 019 de 2012, se establecen los alcances, metodologías, información base y escalas de trabajo para la implementación de la gestión de riesgo en los planes de ordenamiento territorial, teniendo en cuenta las determinaciones del artículo 9 de la Ley 388 de 1997. Éste es incorporado al Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio mediante el decreto 1077 de 2015.

Al incorporar la gestión del riesgo al POT, definida como la herramienta para la planificación del territorio de cada municipio, se adicionan nuevos elementos y nuevo conocimiento, para una planeación, de corto y largo plazo, enmarcada en el desarrollo sostenible; contribuyendo efectivamente a la seguridad, el bienestar y el mejoramiento en la calidad de vida de las personas.

En el desarrollo de este proyecto, teniendo en cuenta los alcances definidos en el decreto 1077 de 2015, se realiza la zonificación de amenazas de origen hidrológico (inundaciones y avenidas torrenciales) en el área rural y urbana del municipio de Barrancabermeja, la cual puede ser utilizada como una herramienta fundamental en la planificación de su territorio. Este estudio incluye un análisis de los factores antrópicos que pueden influir directamente sobre los eventos naturales amenazantes analizados.

Con el objetivo de describir detalladamente las metodologías utilizadas, la información base utilizada y los resultados del estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales, el presente documento se estructura de la siguiente manera:

- **VOLUMEN I: ESTUDIO DEL ÁREA RURAL**
- **VOLUMEN II: ESTUDIO DEL ÁREA URBANA**
 - **Capítulo 1 - Generalidades:** se presenta la localización general del área de estudio, los objetivos y alcances definidos.
 - **Capítulo 2 - Antecedentes, Diagnóstico y Marco Conceptual:** se estudian los eventos históricos de desastres que han ocurrido en el municipio, se indaga sobre los trabajos previos realizados con respecto a la gestión del riesgo en el área rural del municipio; se realiza un diagnóstico general de la problemática y se plantea el marco conceptual y metodológico de trabajo.
 - **Capítulo 3 – Análisis de Susceptibilidad:** se definen las zonas susceptibles a eventos de inundación y avenidas torrenciales
 - **Capítulo 4 – Metodología e Información Utilizada:** se describe de forma detallada la información utilizada y los aspectos teóricos y prácticos de las metodologías implementadas.

- **Capítulo 5 – Estudio Hidrológico e Hidráulico:** se estiman los niveles máximos de creciente asociados a diferentes períodos de retorno con los cuales, mediante la metodología planteada, se estiman las zonas de inundación.
- **Capítulo 6 – Zonificación de la Amenaza:** se clasifica el grado de amenaza para las zonas definidas como inundables.
- **Capítulo 7 – Conclusiones y Recomendaciones:** se presentan las principales conclusiones del estudio y se realizan recomendaciones futuras para la mejora constante del estudio de las amenazas en el área rural.

1 GENERALIDADES

En el presente capítulo se describe la localización general del área de estudio, se realiza una descripción de los sistemas lénticos y lóticos en dicha área con el objetivo de delimitar el área objeto del estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales. Posteriormente, se definen los objetivos generales y específicos, así como el alcance del estudio.

1.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1.1 Localización General

El municipio de Barrancabermeja se encuentra localizado en la zona nororiental del país en el Departamento de Santander; está ubicada a 120 km al occidente de Bucaramanga, a orillas del Río Magdalena, en la región del Magdalena Medio, siendo el municipio más importante de ésta y segundo en todo el departamento. Limita al Norte con el municipio de Puerto Wilches, al Sur con los municipios de Puerto Parra, Simacota y San Vicente de Chucurí, al Oriente con el municipio de San Vicente de Chucurí y Girón, y al Occidente con el Río Magdalena.

Figura 1.1 Localización general del municipio de Barrancabermeja

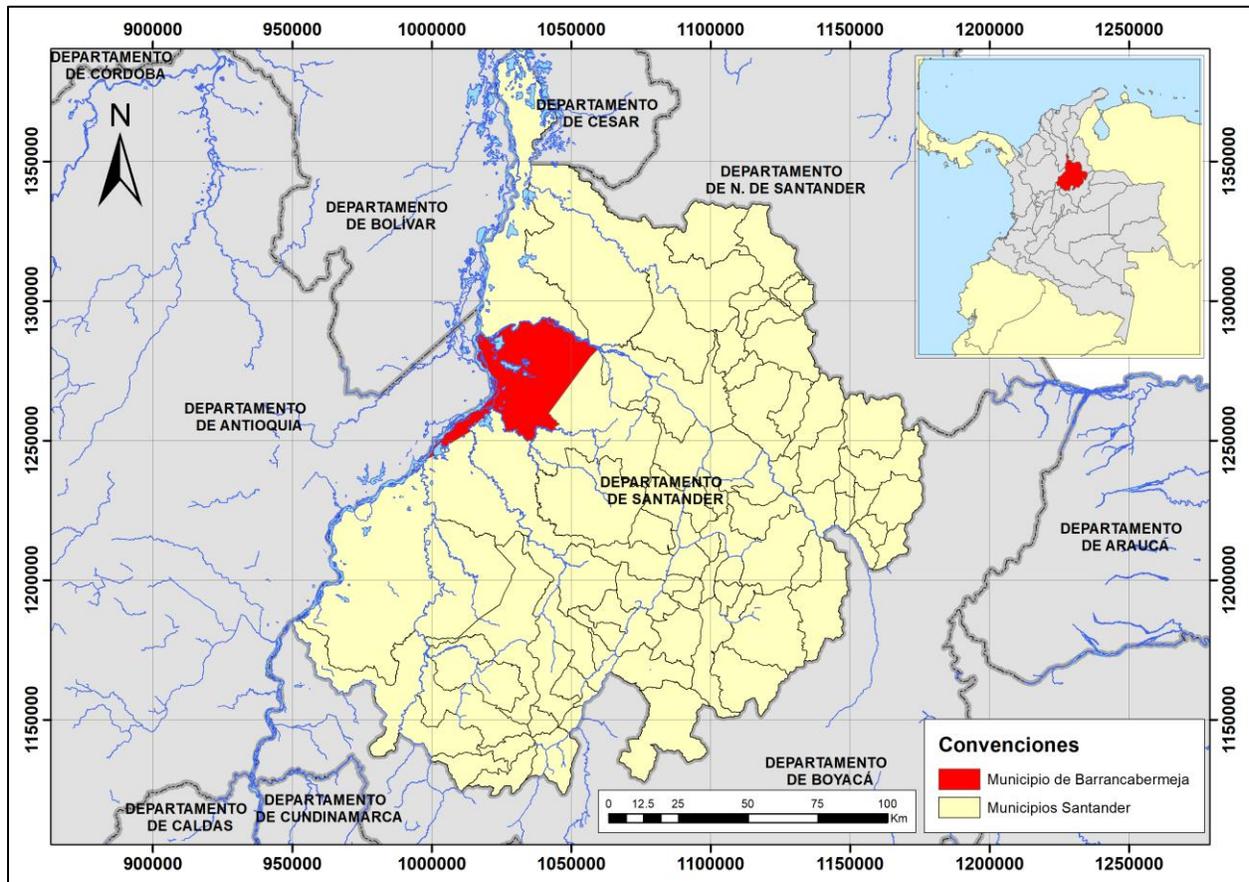
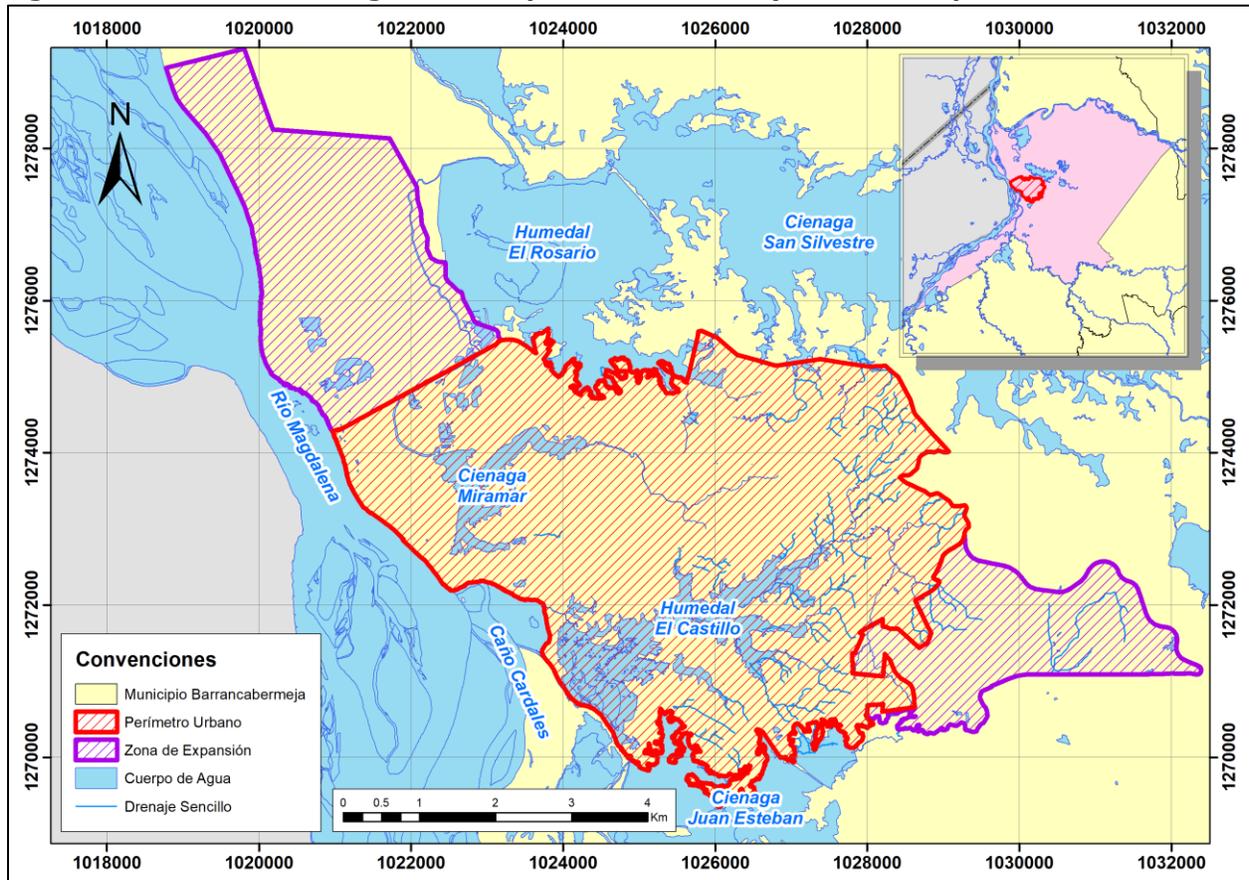


Figura 1.2 Localización general del perímetro urbano y zonas de expansión



1.1.2 Descripción General de los Principales Sistemas Lénticos y Lóticos

Barrancabermeja está situada en el valle del Magdalena, en la margen derecha del río que da nombre al valle. Está rodeado de una gran cantidad de cuerpos lénticos y lóticos los cuales generan los eventos de inundaciones y avenidas objeto del presente estudio. En el Volumen I de este estudio, se presenta una descripción completa de la dinámica fluvial en todo el municipio de Barrancabermeja.

Dentro del área urbana se pueden encontrar numerosas corrientes entre las que destacan las quebradas Pozo Siete, Lavanderas y Las Camelias. El comportamiento de dichas corrientes se encuentra estrechamente relacionado con otros cuerpos de agua lénticos y lóticos de mayor orden de magnitud, como es el caso del humedal El Castillo que define las condiciones de descarga la quebrada Pozo Siete; la ciénaga Miramar recibe las aguas de las quebradas Las Lavanderas y Las Camelias.

Las inundaciones en el área occidental del perímetro urbano están definidas por las crecientes del río Magdalena, mientras que en la zona sur están relacionadas con los niveles en la ciénaga de Juan Esteban, Humedal El Castillo y El Caño Cardales, que a su vez dependen del régimen de caudales del río Magdalena.

Por otra parte, Las inundaciones en el área norte y noreste del perímetro urbano son controladas por los niveles de la ciénaga El Rosario y ciénaga de San Silvestre, las cuales se comunican a través del caño el rosario; y sus niveles están influenciados por el río Sogamoso.

- Quebrada Pozo Siete

Con un área de 8,9 km (hasta el sitio de cruce con la vía de entrada al casco urbano), es la corriente de mayor orden en el área urbana del municipio. Recorre el casco urbano en sentido oeste y la longitud de su cauce principal es de 7 km, el cual descarga sus aguas en el humedal el castillo.

- Quebrada Las Camelias

La quebrada Las Camelias se caracteriza por tener un grado de intervención antrópica cercano al 100%. La presión sobre el cauce ha sido tal, que sus aguas discurren por un canal artificial con viviendas ubicadas sobre el borde este. Recibe las aguas servidas de los barrios por donde discurre por lo que la calidad del agua es una problemática latente. Tiene un área de 4,2 km² y descarga sus aguas a la ciénaga Miramar a través de un cauce de 6,3 km.

- Humedales y Ciénagas

Las ciénagas son elemento constituyente básico del plano inundable, por tal razón sus formas y tamaños considerados en un año hidrológico, son función del nivel del agua en el sistema.

Las estructuras orgánicas de las ciénagas permiten agruparlas en 4 tipos:

Ciénaga de tipo 1: Es una ciénaga simple y primaria, conectada directamente con el río.

Ciénaga de tipo 2: Es el Conjunto o racimo de ciénagas, consiste en una ciénaga primaria (conectada directamente con el río) y una o más ciénagas secundarias conectadas directamente o indirectamente con la ciénaga primaria.

Ciénaga tipo 3: Una ciénaga primaria conectada indirectamente con el río.

Ciénaga tipo 4: Ciénaga aislada, sin conexión con el río.

En el área urbana se encuentran las ciénagas Miramar y Juan Esteban, las cuales se hayan en la actualidad en un alto grado de contaminación, merced a los vertimientos que reciben, producto de actividades humanas y actividades industriales (aguas servidas). Estas ciénagas fueron ecosistemas naturales, de alto potencial turístico y pesquero que generaban sustento a los habitantes de la región.

Dentro de las principales ciénagas y humedales localizados dentro o cerca del perímetro urbano del municipio de Barrancabermeja se tienen.

- **Ciénaga El Castillo**

El área está conformada por terrazas antiguas disecadas, sobre las que se asienta el municipio de Barrancabermeja y el Valle aluvial actual, compuesto por diques medios y bajos.

Sobre las terrazas, los ecosistemas terrestres se encuentran totalmente reemplazados por la zona urbana del municipio de Barrancabermeja y por praderas de pastos para la ganadería; en el valle aluvial reciente, los bacines más profundos alojan un complejo de ciénagas que permanecen con agua todo el año o la mayor parte de él; algunas de estas áreas inundadas, tienen gran extensión y mayor profundidad, es el caso de las Ciénagas de San Silvestre o la de Juan Esteban las cuales alcanzan profundidades hasta de unos seis metros.

El humedal, El Castillo es un sistema complejo de pantanos y esteros cuyo nivel de agua promedio anual es de 3,5 m. El nivel menor alcanzado en la época de sequía es de 1,5 metros, desaguan hacia el río Magdalena a través de drenajes menores que llegan al caño Cardales (Barrancabermeja, 2002).

- **Ciénaga de Juan Esteban**

El área de la ciénaga está ubicada en el suroriente de Barrancabermeja, con un espejo de agua de aproximadamente 10 Ha.

El área de la cuenca que drena a la ciénaga es de aproximadamente 120 hectáreas, donde el Caño La Cira es el principal afluente. Otros caños como el Agua Blanca y el Verdum que se encuentran sedimentados y taponados como resultado de la contaminación causada por los asentamientos humanos en la periferia del cuerpo de agua.

El caño eferente llamado Juan Esteban gestor del caño Cardales presenta problemas de sedimentación en épocas de verano que a veces es imposible entrar por este camino a la ciénaga según los pescadores y habitantes de la región.

Los habitantes de la zona son de bajos recursos económicos, algunos residen en los barrios periféricos de Barrancabermeja, la situación económica les ha conllevado a disponer de los recursos naturales de una forma inapropiada, causando la destrucción casi total de la vegetación y el desplazamiento de especies faunísticas de la región que se han desplazado a otros ambientes naturales.

La mayor parte de la vegetación ha sido reemplazada por pastizales y para el uso de la agricultura. Esto ha permitido grandes deslizamientos de suelo por escorrentía causados por el agua de lluvia que sin duda permite el avance de la erosión incontrolable. Este desplazamiento y la caza está por terminar lo poco que queda de fauna fuertemente amenazadas en los últimos años (Barrancabermeja, 2002).

- **Ciénaga El Llanito y San Silvestre**

Se encuentran ubicada en una depresión inundable, sobre el margen derecho del río Magdalena, en el municipio de Barrancabermeja y a la confluencia del río Sogamoso. Esta ciénaga está formada por un sistema de cuerpos de agua, que están unidos por estrechos caños, constituyendo un área aproximada de 280 hectáreas. Los caños Jeringas y el Llanito alimentan la ciénaga con las aguas provenientes de los terrenos ondulados de origen petrolero, el caño de Jeringas se encuentra parcialmente obstruido disminuyendo su aporte a la ciénaga.

Es importante destacar la estrecha relación que existe con la Ciénaga San Silvestre, esta cubre un área de 9 Km² está unida a otras ciénagas como La Brava, El Zarzal y El Sábalo; este sistema es alimentado por las aguas provenientes de los caños Zarzal, La Tigra, La Vizcaína, esta última proveniente de los caños petroleros.

Esta ciénaga vierte sus aguas al río Sogamoso por el caño San Silvestre, el cual a cincuenta metros aproximadamente de su desembocadura, se le unen las aguas de la ciénaga El Llanito. Estos humedales forman un sistema amortiguador de las crecientes durante la época de lluvias de los ríos Sogamoso y Magdalena siendo visibles los procesos de refugio y remanso, dándose la inundación de la cuenca. Hay una clara influencia del caño el Rosario el cual vierte sus aguas contaminantes provenientes de los afluentes industriales de la petroquímica de Barrancabermeja; determinando el mecanismo hidrológico de la contaminación para estas ciénagas (Barrancabermeja, 2002).

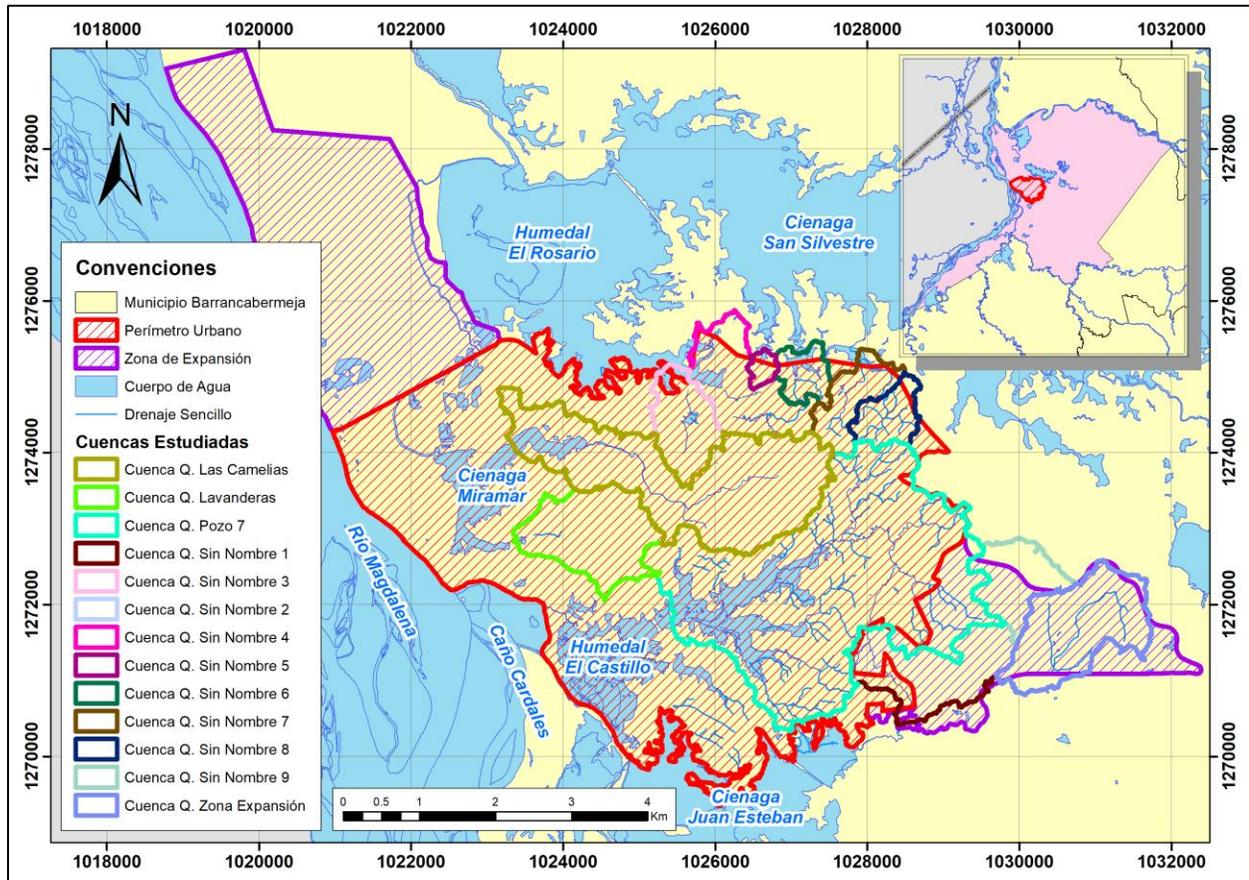
- **Ciénaga Miramar**

Situada al Lado del Complejo Industrial de Barrancabermeja, se alimenta de las quebradas Las Lavanderas y Las Camelias que llevan las aguas servidas de Barrancabermeja y junto a los crudos que recibe del complejo, es una de las ciénagas más contaminadas de la zona (Barrancabermeja, 2002).

1.1.3 Área de Estudio

El área de estudio corresponde a todos los cuerpos de agua superficiales y sus respectivas cuencas hidrográficas localizadas dentro del área urbana del municipio de Barrancabermeja.

Figura 1.3 Área de estudio



1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Delimitar y zonificar el grado de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en el área urbana del municipio de Barrancabermeja.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar y analizar información contenida en el plan de ordenamiento territorial, estudios regionales, técnico o informes técnicos, cartografía base, información de bases de datos institucionales y la información de redes de monitoreo de amenaza existentes.
- Identificar zonas susceptibles a eventos de inundación y avenidas torrenciales.
- Estudiar el comportamiento hidrológico e hidráulico de las zonas susceptibles a eventos de inundación y avenidas torrenciales.
- Delimitar las zonas susceptibles a eventos de inundación y avenidas torrenciales.
- Clasificar el grado de amenaza en las zonas inundables.

1.2.3 Alcance del Estudio

Considerando lo expuesto en el decreto 1077 de 2015, el estudio de zonificación de amenazas por inundación y avenidas torrenciales en el área rural del municipio de Barrancabermeja contempla los siguientes aspectos:

1.2.3.1 Estudios básicos de amenaza por inundación

- Escala de trabajo

La escala de trabajo para el área urbana y zonas de expansión corresponde a 1:5.000.

- Área de estudio

Corresponde al área en las cuales exista alguna posibilidad de presentarse inundación, sean aledañas o no a ríos, caños, quebradas, humedales y otros cuerpos de agua o aquellas que hagan parte de su área de influencia.

- Insumos mínimos

- **Geomorfología:** identificación de las diferentes sub-unidades geomorfológicas asociadas a los paisajes aluviales, con especial énfasis en las geoformas correspondientes a la llanura de inundación.
- **Modelo Digital de Elevación:** a la escala de trabajo asociada
- **Registro de eventos de inundación:** con base en la información disponible en diferentes entidades a nivel nacional, regional o local, interrelacionada con la información de la comunidad, identificar cuales han sufrido afectaciones por inundación y en qué fecha.
- **Hidrología:** caracterización del régimen hidrológico en la región a la cual pertenece el municipio mediante un análisis de eventos hidroclimáticos máximos identificando para cuales períodos de retorno se están presentando las afectaciones y las áreas afectadas por los mismos.

- Alcance

Para la zonificación de la amenaza se emplean tres categorías: alta, media y baja, teniendo en cuenta el registro de eventos, la recurrencia de los mismos y la intensidad de la inundación.

Para el suelo urbano, de expansión urbana y rural se utilizará, como mínimo, análisis de tipo histórico y geomorfológico. De acuerdo con la información disponible se podrán complementar con análisis hidrológico-hidráulicos y métodos asistidos por sensores remotos y sistemas de información geográfica.

En todo caso, los análisis se realizarán en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y disponibilidad de la información.

- Productos

- Mapas de zonificación de amenaza por inundación
- Documento técnico que contenga las metodologías empleadas y los resultados obtenidos

1.2.3.2 Estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales

- Escala de trabajo

La escala de trabajo para el área rural corresponde a 1:2.000.

- Área de estudio

Todos los cauces presentes o con influencia en el municipio, que por sus condiciones topográficas puedan tener un comportamiento torrencial.

- Insumos mínimos

- **Geomorfología:** identificación de las diferentes sub-unidades geomorfológicas asociadas a eventos torrenciales.
- **Estudio hidrológico de la cuenca:** orientado al flujo torrencial, considerando el ciclo de sedimentos.
- **Cartografía base:** escala 1:2.000
- **Análisis hidráulico:** teniendo en cuenta factores detonantes como precipitación o movimientos en masa.

- Alcance

Para la zonificación de la amenaza se emplean tres categorías: alta, media y baja, dependiendo de la frecuencia de recurrencia de los eventos y sus características: la profundidad de la lámina de agua, los materiales de arrastre y la velocidad de flujo.

Utilizar, como mínimo, alguno de los siguientes análisis: estadísticos, determinísticos o probabilísticos.

En todo caso, los análisis se realizan en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y la disponibilidad de información.

1.2.4 Descripción de Actividades

Las actividades planteadas para el desarrollo del presente trabajo se pueden agrupar de la siguiente manera:

1.2.4.1 Preparación de la información

Se define la información requerida para el desarrollo de todas las actividades (cartografía, series hidrológicas, entre otros)

1.2.4.2 Caracterización de eventos históricos

Se realiza un análisis de los eventos de históricos mediante la búsqueda de información documental disponible y registros en bases de datos de eventos de desastre.

1.2.4.3 Diseño de la metodología de trabajo

Con base en la información disponible y la problemática identificada se plantean las metodologías y modelos que se ajusten a las necesidades planteadas en los alcances del estudio.

1.2.4.4 Análisis hidrológico

El análisis hidrológico comprende inicialmente la caracterización física de la zona de estudio y la caracterización hidrológica general a partir de los aspectos observados en la visita de campo y de lo encontrado en la información secundaria consultada. Esta actividad también incluye la recopilación de información como valores de niveles, precipitación, cobertura vegetal y suelos, con base en la cual se debe adelantar la respectiva evaluación de los aspectos hidrológicos de la zona de estudio.

1.2.4.5 Análisis hidráulico

Mediante la implantación de los modelos hidráulicos definidos se estiman los niveles y velocidades de flujo de las crecientes asociadas a diferentes períodos de recurrencia.

1.2.4.6 Zonificación de la amenaza

Con base en los criterios técnicos definidos (geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos) se clasifica el grado de amenaza para las crecientes máximas definidas. A partir de los resultados obtenidos se generarán mapas de zonificación en los que se delimitarán los sectores expuestos a diferentes grados de amenaza definidos cualitativamente.

2 ANTECEDENTES, DIAGNÓSTICO Y MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se realiza el análisis de los antecedentes y la información existente de estudios regionales y locales con respecto a inundaciones y avenidas torrenciales. Se presenta un diagnóstico de la problemática encontrada en el área urbana del municipio de Barrancabermeja y se plantea un marco conceptual para el estudio de dicha problemática.

2.1 ANTECEDENTES

El estudio de los antecedentes de eventos de inundación y avenidas torrenciales comprende la recopilación y análisis de la información de eventos históricos disponible en la base de datos de nacionales, regionales y locales, así como de informes técnicos previamente realizados asociados al estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en el área rural del municipio.

2.1.1 Caracterización Histórica de Amenazas y Eventos Amenazantes

2.1.1.1 Fuentes de información

Se realizó una búsqueda exhaustiva de información referente a eventos de inundación y avenidas torrenciales en el municipio de Barrancabermeja. Esta se clasificó en dos tipos de información; el primero corresponde a documentación bibliográfica, la cual comprende todos los estudios previos relacionados cualquier forma con el estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales; el segundo tipo de información corresponde a bases de datos que contengan registros de eventos históricos en el área urbana del municipio.

▪ Documentación

En primer instancia, se consultó la información disponible en el archivo documental (digital) del área de planeación del municipio y de la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) encontrando que los estudios más relevantes en el área rural del municipio corresponden a:

- Proyecto POMCA Río Opón
- Proyecto POMCA Río Sogamoso

En dichos estudios se presenta la caracterización de la amenaza y el riesgo por inundación y avenidas torrenciales en toda la extensión de dichas cuencas, las cuales abarcan el 100% del área rural y urbana del municipio de Barrancabermeja. La escala de trabajo de estos estudios es 1:25.000. Asimismo, presentan un inventario georreferenciado de eventos históricos de inundaciones y avenidas.

▪ Bases de datos

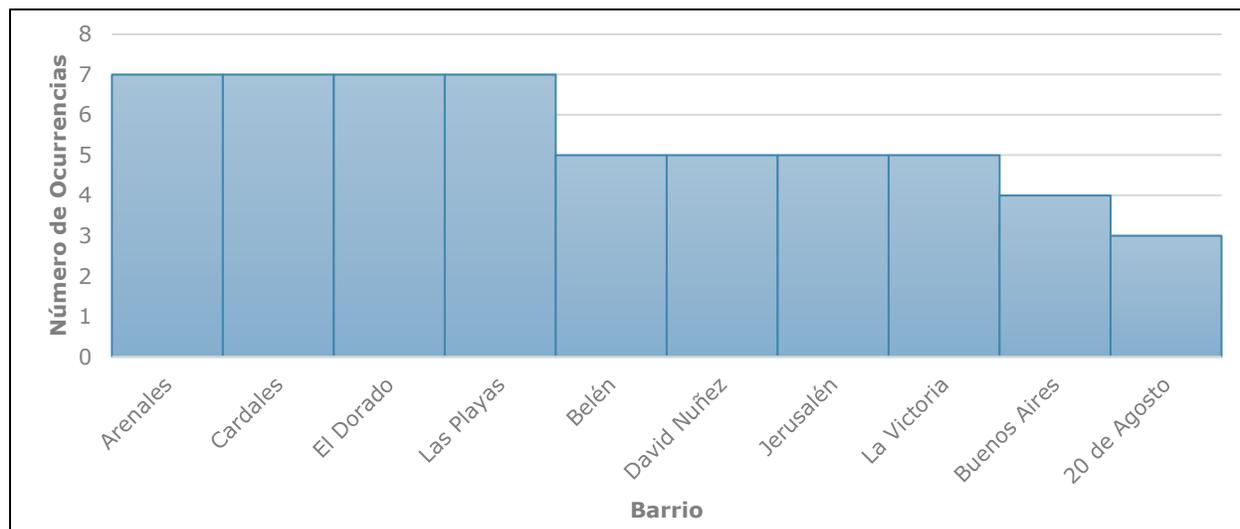
La Unidad Nacional de Gestión del Riesgo (UNGRD), cuenta con una base de datos que contiene los registros de desastres generados por eventos extremos de diferente naturaleza entre los años 1998 y 2016. Esta información fue cotejada con el registro de atención de emergencias de la Alcaldía Municipal.

Vale la pena aclarar que también se consultó la base de datos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DESINVENTAR). Sin embargo, no disponen de registros en el departamento de Santander.

2.1.1.2 Catálogo de eventos históricos de inundación y avenidas torrenciales

Con base en la información documental y de las bases de datos disponibles se elaboró un catálogo de eventos históricos de inundación (no se reportan avenidas torrenciales), el cual se presenta de manera detallada en el Anexo A, adjunto al presente documento.

Figura 2.1 Eventos de desastres asociados a eventos de inundación reportados en el área urbana (más de dos eventos)



Se concluye que el total de eventos registrados corresponde a 100 y los barrios que más ocurrencias de eventos de inundación reportan son:

- Arenales (7), Cardales (7), El Dorado (7), Las Playas (7), Belén (5), David Nuñez (5), Jerusalén (5), La Victoria (5), Campo Galán-Termo Galán (5), Buenos Aires (4), 20 de Agosto (4), El Palmar (3), y San Francisco (3).

Los demás barrios presentan una ocurrencia de menos de dos eventos en 20 años de registros disponibles.

Figura 2.2 Reporte de eventos de inundación en el área rural del municipio

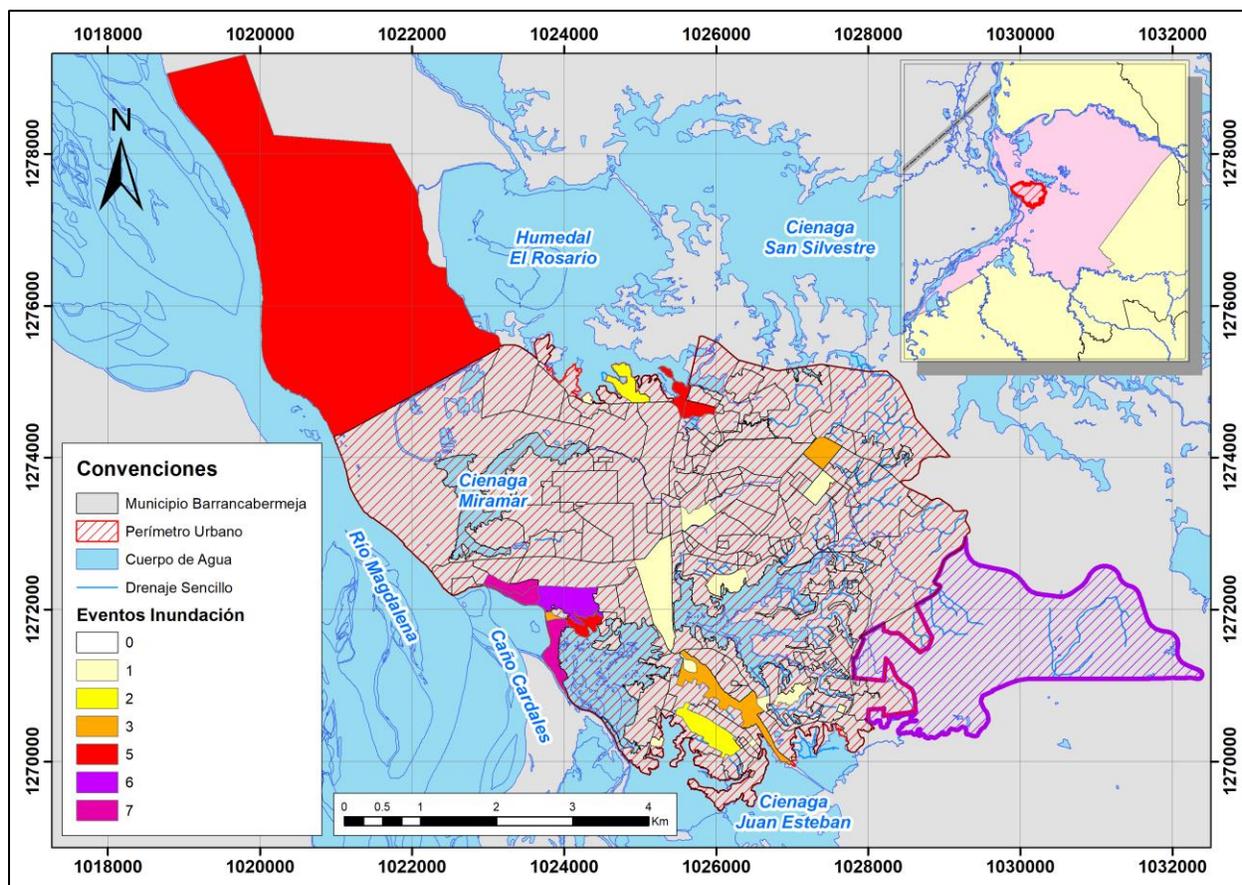


Tabla 2.1 Eventos de desastres asociados a eventos de inundación reportados en el área urbana

Barrio/Eventos	Barrio/Eventos	Barrio/Eventos	Barrio/Eventos	Barrio/Eventos	Barrio/Eventos	Barrio/Eventos	Barrio/Eventos		
Arenales	7	El Palmar	3	Altos del campestre	1	Las Américas	1	Yarima	1
Cardales	7	San Francisco	3	Antonia Santos	1	Las Lavanderas	1	La Bufalera	1
El Dorado	7	Campogalán	3	Campo Hermoso	1	Las Palmas	1	Sector impala	1
Las Playas	7	Buenos Aires II	2	Cincuentenario	1	Mano de Dios	1	-	-
Belén	5	Coviba	2	Colinas del Sur	1	Miraflores	1	-	-
David Núñez	5	El Castillo	2	El Muelle	1	Palmira	1	-	-
Jerusalén	5	El Cruce	2	El Progreso	1	Pozo siete	1	-	-
La Victoria	5	La Candelaria	2	Fermín Amaya	1	Pueblo Nuevo	1	-	-
Buenos Aires	4	Termogalán	2	La Esperanza	1	San Luis	1	-	-
4 de Agosto	3	20 de Julio	1	Lagos	1	Villanueva	1	-	-
Total									100

En la Figura 2.3 se presenta el número de eventos registrados por años, encontrando que, en el área rural, se reportó un número máximo de 4 eventos en los años 1999 y 2016. En los años 2010 y 2011, conocidos por ser los años de la emergencia invernal, se reportaron

únicamente 3 eventos. En la Figura 2.4 se presentan las afectaciones asociadas a los eventos reportados, es decir el total de reportes por vereda para cada evento, encontrando que, en los años 1999, 2002, 2005, 2008 y 2016, se reportaron afectaciones en más de 8barrios.

Figura 2.3 Eventos reportados por año

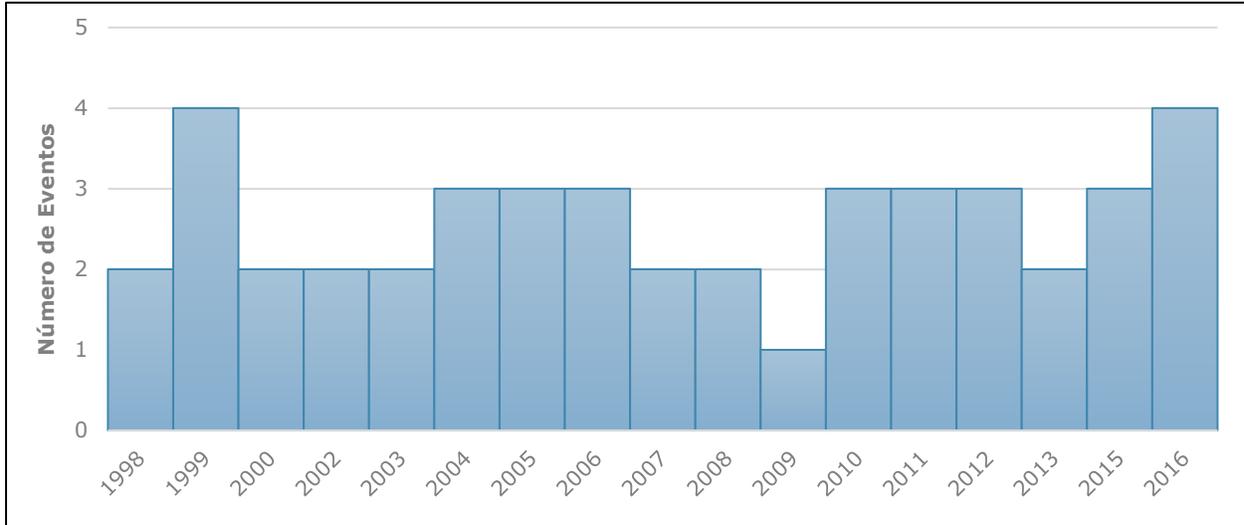
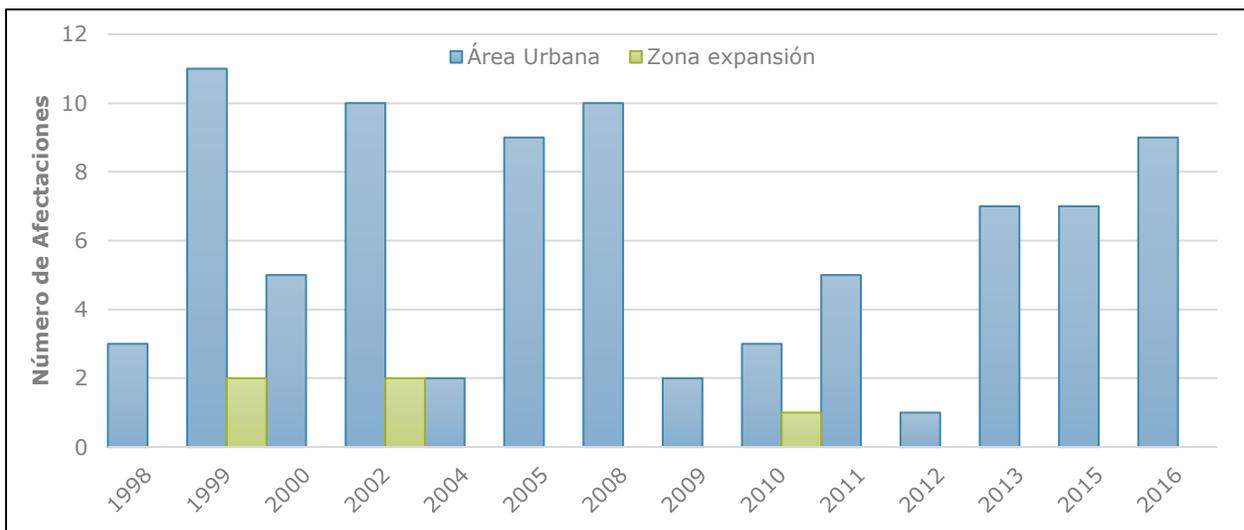


Figura 2.4 Afectaciones reportadas por año



Las principales limitaciones del catálogo generado son:

- No es posible georreferenciar los eventos en la mayoría de los casos debido a que en el UNGRD no se reporta esta información.
- Los eventos en la documentación de la Alcaldía Municipal carecen de registro temporal (fecha)

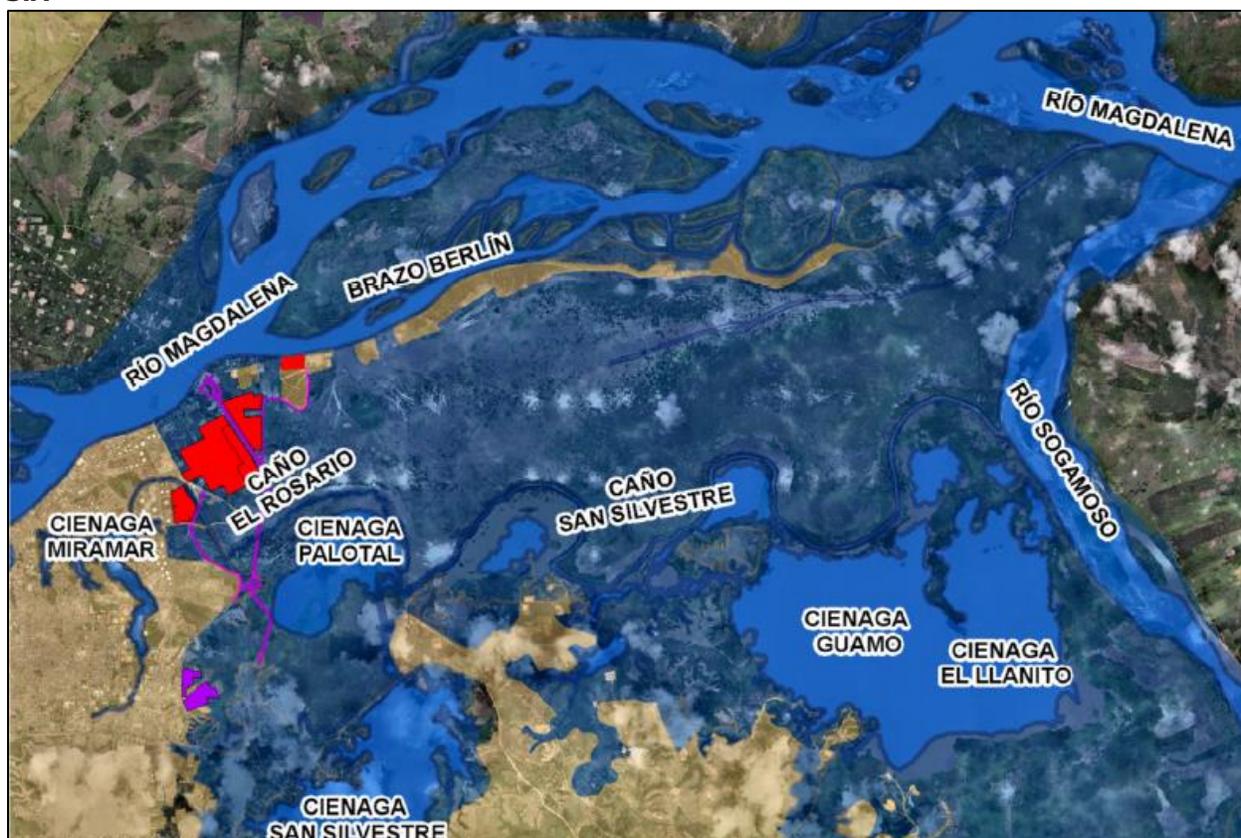
2.1.2 Estudios Previos

Examinando detalladamente el archivo documental de La Alcaldía Municipal se encuentra que existen diversos estudios en los cuales se caracteriza la amenaza y el riesgo por inundación en el municipio. También se encuentran estudios de inundación para problemáticas específicas, tales como el estudio de inundaciones para el desarrollo del puerto Impala o el diseño de una protección contra inundaciones para el barrio Coviba.

2.1.2.1 Proyecto de Modernización de la Refinería de Barrancabermeja

Integral S.A realiza el estudio de inundaciones de la ciénaga El Rosario (Palotal) entre los años 2011 y 2012. Allí estimaron los niveles de creciente para la estación Barrancabermeja y Estación Puente Ferrocarril y ciénaga El Rosario, los cuales se muestra en la Tabla 2.2 siguiente. También proponen obras para mitigar las afectaciones por eventos de inundación en el área del proyecto propuesto.

Figura 2.5 Esquematación de la inundación en el área de estudio realizado por Integral S.A



Fuente: Integral S.A (2012)

Tabla 2.2 Niveles máximos estudio Integral S.A

Período de retorno (Tr)	Nivel (msnm)	
	Estación Barrancabermeja	Estación Puente Ferrocarril
2,33	75,08	72,62
5	75,35	73,27
10	75,56	73,71

Período de retorno (Tr)	Nivel (msnm)	
25	75,84	74,25
50	76,04	74,66
100	76,24	75,06
500	-	75,99

Fuente: Integral S.A (2012)

2.1.2.2 Diseño conceptual de un dique para evitar inundaciones en los barrios Coviba, 20 de Enero y Campo Hermoso

En el año 2013, Integral S.A presenta los diseños de un dique para evitar las inundaciones en los barrios Coviba, 20 de Enero y Campo Hermoso, los cuales se inundan debido a las crecientes de la ciénaga de San Silvestre.

2.1.2.3 Diagnóstico hidrológico en el área de concesión portuaria para el puerto Impala

Desarrollado por Ingetec S.A en el año 2013, estiman los niveles de inundación del río Magdalena en el área de Campo Galán (zona de expansión) con el objetivo de estimar el nivel de implantación de las obras del puerto Impala. Estiman los niveles de creciente con base en los registros de las estaciones Barrancabermeja y Maldonado, ambas localizadas sobre el río Magdalena.

Tabla 2.3 Niveles máximos estudio Ingetec S.A

Período de retorno (Tr)	Nivel (msnm)	
	Estación Barrancabermeja	Estación Maldonado
2,33	75,04	69,88
5	75,41	70,24
10	75,66	70,48
20	75,90	70,71
25	76,97	70,78
50	76,20	71,00
100	76,43	71,22

Fuente: Ingetec S.A (2013)

Figura 2.6 Área de estudio Ingetec S.A

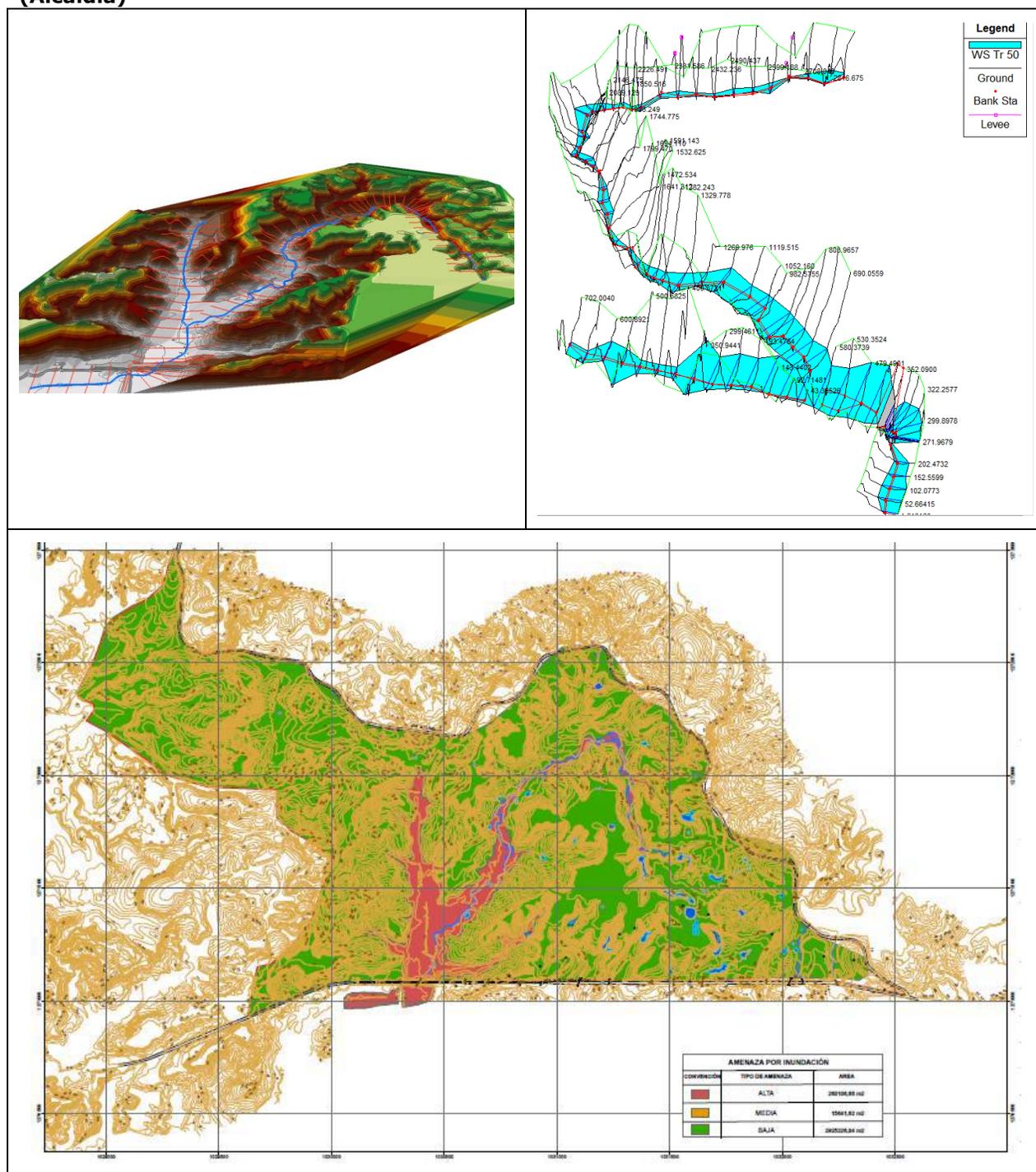


Fuente: Ingetec S.A

2.1.2.4 Estudios básicos de amenaza en la zona de expansión sureste

En este estudio desarrollado por la Alcaldía de Barrancabermeja en el año 2014, caracterizan la amenaza por inundaciones en la zona de expansión sureste. Se estudia una quebrada cuyo nombre se desconoce y que cruza la vía de ingreso sur del municipio.

Figura 2.7 Estudio de amenaza por inundación en la zona de expansión sureste (Alcaldía)



Fuente: Barrancabermeja (2014)

2.1.2.5 Proyecto incorporación de la gestión del riesgo en el POT

En el año 2015 la alcaldía de Barrancabermeja realiza un estudio de amenaza y riesgo por inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa, para su incorporación en el

POT, allí se describen procesos puntuales de eventos de inundación en el área urbana del municipio.

Figura 2.8 Registro fotográfico realizado en la verificación en campo



Fuente: Barrancabermeja (2015)

2.1.2.6 Plan parcial para la mitigación de impactos en el caño Cardales

En el año 2006, la Unión Temporal Cardales desarrolla el plan parcial para la mitigación de impactos por inundación en el caño Cardales. Estiman los niveles de inundación para la estación Barrancabermeja y determinan varias medidas para la mitigación del riesgo por inundación.

Período de Retorno, T_r (años)	Nivel Máximo, N_T (m.s.n.m.)
200	75,91
100	75,77
50	75,63
30	75,55
20	75,40
10	75,31
5	75,16

Período de Retorno, Tr (años)	Nivel Máximo, N _T (m.s.n.m.)
2	74,93

2.2 ANÁLISIS CONCEPTUAL DE LA PROBLEMÁTICA Y DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO

Con base en la revisión de antecedentes, se concluye que gran parte del área urbana de municipio de Barrancabermeja tiene un alto grado de susceptibilidad a ser afectado por eventos de inundación (no se tiene reporte de avenidas torrenciales). Estos eventos se presentan de manera frecuente y afectan significativamente a la población.

El principal mecanismo de generación de este tipo de amenaza corresponde a crecientes “lentas”, las cuales se dan principalmente por el desbordamiento de los ríos Magdalena y Sogamoso, que afectan directamente los niveles en las ciénagas y humedales a que colindan, o se encuentran dentro, del perímetro urbano y el área de expansión. Asimismo, la descarga de las quebradas que drenan a estos cuerpos de agua es controlada por dichas variaciones del nivel.

Como se describió anteriormente, el área de estudio se encuentra enmarcada dentro de sistema hidrográfico complejo con abundantes cuerpos de agua lénticos y lóticos, interconectados de forma superficial y subsuperficial, cuya interacción, desde un punto de científico es difícil de modelar, medir y verificar.

Los aspectos que destacar en la caracterización de la dinámica fluvial del sistema hidrográfico son:

- El intercambio de flujos entre el sistema río-humedal-quebradas
- Caños y quebradas altamente intervenidos por acciones antrópicas
- Incremento de la presión hidráulica sobre los cauces naturales, por construcción de vivienda informal sobre las llanuras de inundación (retiros tienden a cero).
- Disposición de residuos sólidos en los cauces de las quebradas, así como basuras de mayor tamaño como colchones, camas y armarios, entre otros. Con alta posibilidad de obstrucción de las obras hidráulicas.
- Reflujo en el sistema de alcantarillado (mixto), el cual descarga directamente a las quebradas.

2.2.1 Recorridos de campo

Con el objetivo de realizar un diagnóstico completo de la situación, identificar problemáticas puntuales y validar los resultados de los estudios, se realizaron recorridos de campo sobre el mayor número de quebradas posibles. En la Figura 2.9 se presenta la localización de los sitios visitados, mientras que en la Figura 2.10 se muestra los sitios con reporte de eventos de inundación recurrente por parte de la población.

Figura 2.9 Puntos visitados en recorridos de campo

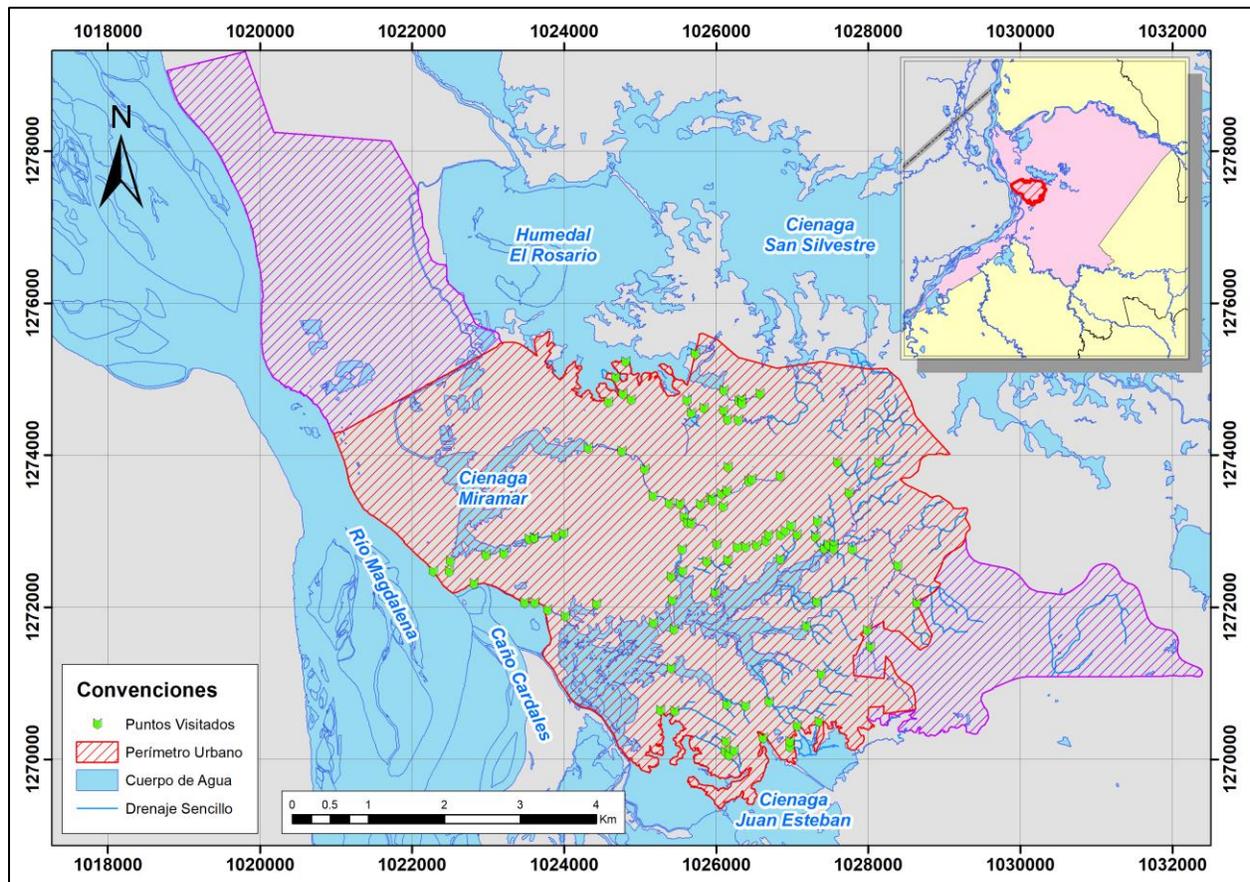
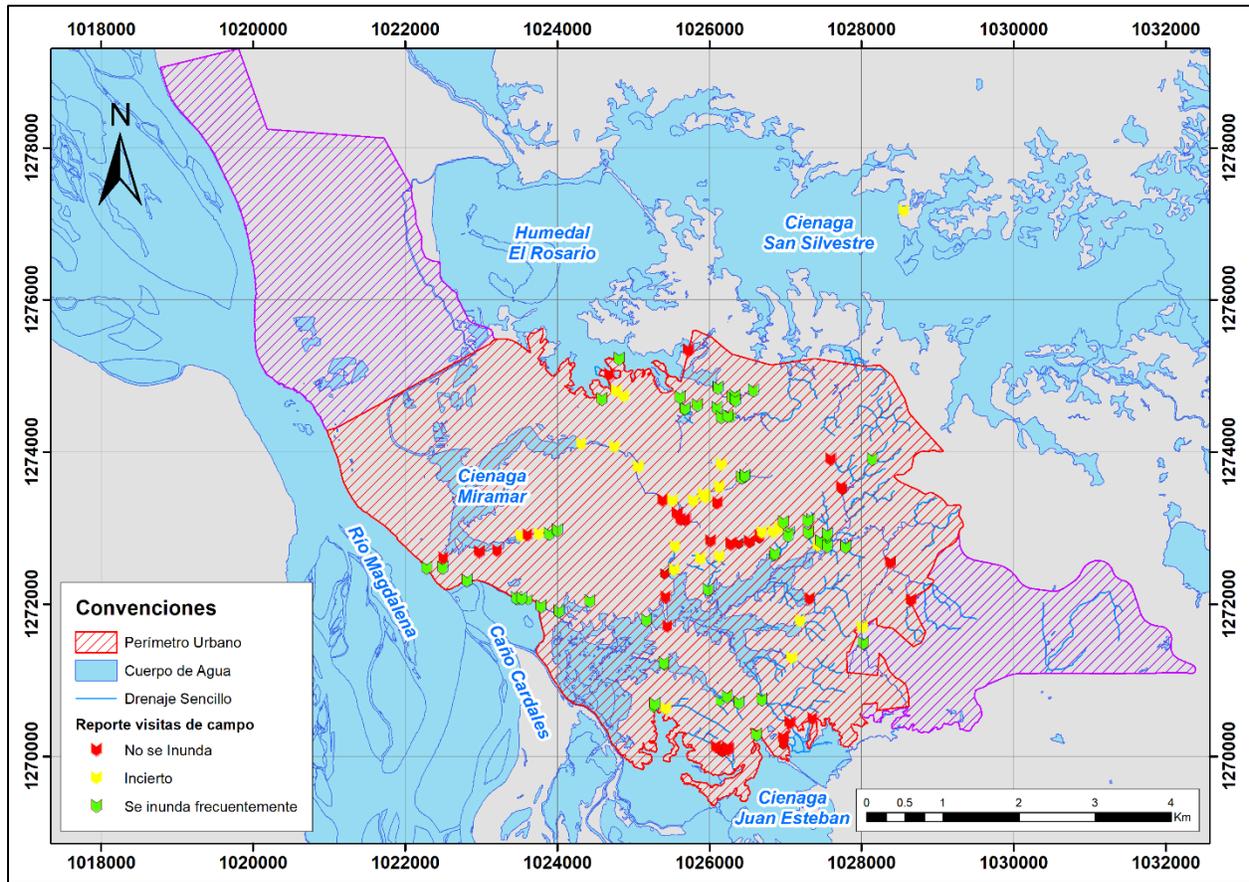


Figura 2.10 Sitios reportados con eventos de inundación durante los recorridos de campo



En total se visitaron 86 puntos en los cuales 44 reportan eventos de inundación recurrentes, en 31 la comunidad manifiesta que nunca han estado expuestos eventos de inundación y en 28 puntos no se logra establecer claramente si el sitio ha estado expuesto a eventos de inundación.

En el Anexo D se presentan las fichas técnicas de los sitios visitados, donde se presentan las características principales de las estructuras hidráulicas (si hay), así como una descripción de los eventos de inundación reportados por la comunidad. También se presenta el registro fotográfico de cada una de las visitas.

Fotografía 2.1 Zona inundable sector quebrada Lavanderas



Fotografía 2.2 Zona inundable sector quebrada Sin Nombre 2 (ciénaga del Rosario)



Fotografía 2.3 Lleno con escombros en zona inundable



Fotografía 2.4 Invasión del cauce quebrada Pozo Siete



Fotografía 2.5 Canalización en ramal de quebrada Las Camelias



Fotografía 2.6 Invasión llanura quebrada Las Camelias



2.2.2 Modelo hidrológico e hidráulico adecuado

La selección del modelo depende de la información disponible y de las características hidráulicas de las crecientes en el área de estudio.

2.2.2.1 Información disponible

En el Volumen I del presente estudio se realizó el estudio de niveles, en la red de drenaje del municipio de Barrancabermeja, el cual abarca los sistemas lénticos asociados a problemas de inundaciones en el área urbana.

Adicionalmente se cuenta con información de intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones máximas en 24, cobertura vegetal de las cuencas e información topográfica de estas.

2.2.2.2 Modelo seleccionado

Para la estimación de las zonas inundadas por los cuerpos de agua lénticos, se utiliza un método SIG para la propagación de los niveles de inundación hasta la máxima extensión en la topografía.

Para el estudio de las crecientes rápidas se seleccionó el modelo hidráulico 2D implementado en el software HEC-RAS 5.0.3. Este se alimenta con los valores de intensidad de la precipitación estimados para cada una de las subcuencas, los cuales son transitados a través de una malla computacional obteniendo las profundidades y velocidades de flujo en el dominio espacial definido, las ventajas y desventajas del modelo son:

Ventajas	Desventajas
Profundidades y velocidades de flujo en todo el dominio espacial	Altos requerimientos computacionales
	Selección de los intervalos espaciales y temporales de modelación
	Inestabilidad del flujo algunas condiciones

2.2.3 Metodología General para la Zonificación de la Amenaza

Para obtener los mapas de zonificación por inundación y avenidas torrenciales se desarrollan las siguientes actividades:

- Definir los niveles de creciente en los cuerpos de agua lénticos (humedales y ciénagas).
- Estimar los tiempos de concentración de las subcuencas con base en los parámetros morfométricos de las mismas.
- Estimar la intensidad de la lluvia de diseño asociada a cada uno de los períodos de retorno.
- Definir los parámetros y las condiciones de borde del modelo para los diferentes escenarios de modelación.
- Zonificar las crecientes modeladas con base en los criterios definidos para la categorización de las amenazas.

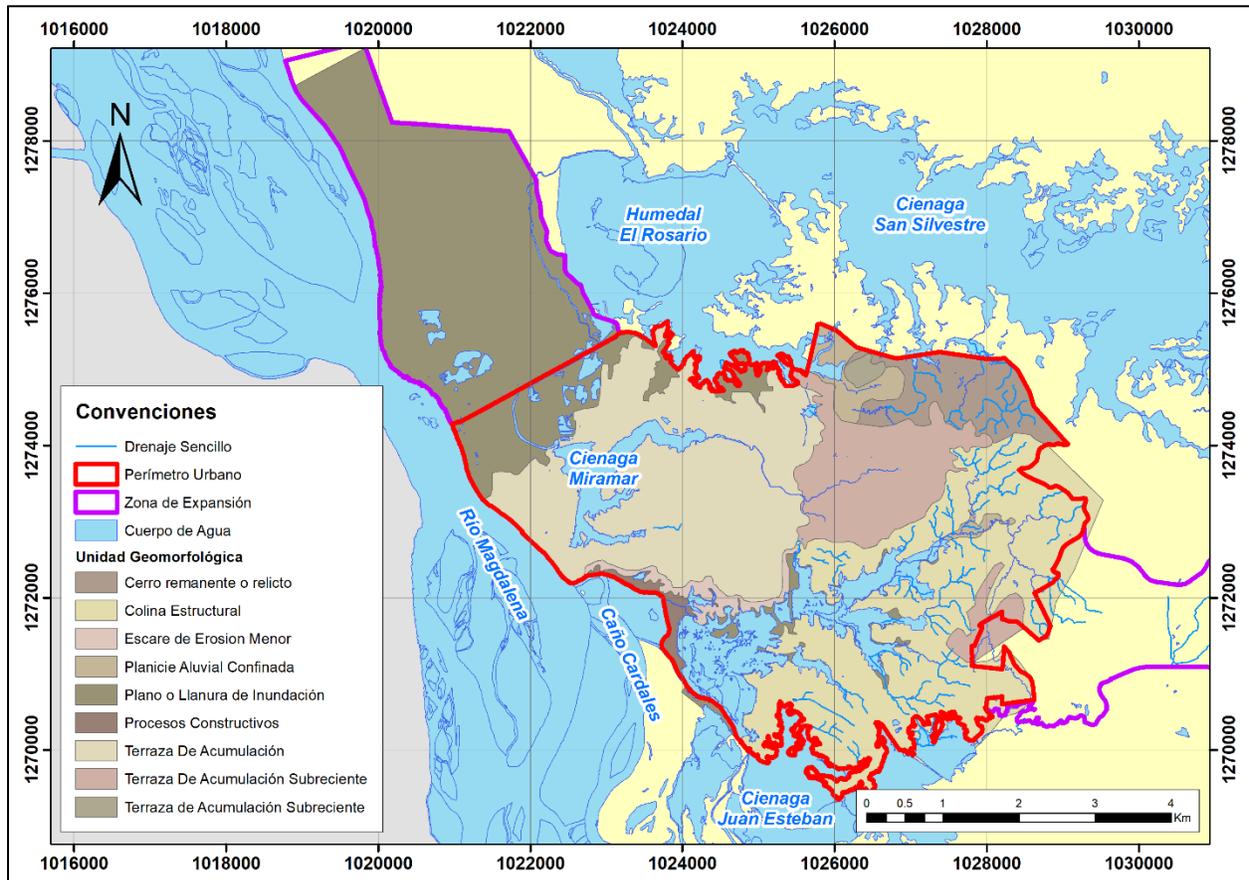
3 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

El análisis de susceptibilidad permite definir las zonas que, por sus condiciones fisiográficas, son propensos a sufrir eventos de determinado tipo. La susceptibilidad a eventos de inundación y avenidas torrenciales se puede clasificar con base en las unidades geomorfológicas, ya que estas describen el origen de las geformas del terreno y si estas están relacionadas con procesos fluviales o no.

3.1 SUSCEPTIBILIDAD A EVENTOS DE INUNDACIÓN

La susceptibilidad a eventos de inundaciones fue evaluada mediante la caracterización geomorfológica del área de estudio, en la cual se puede asociar un grado de susceptibilidad a inundaciones a cada una de las unidades identificadas. En la Figura 3.1 se muestran las unidades geomorfológicas identificadas en el estudio de amenaza por movimientos en masa en el área urbana de Barrancabermeja.

Figura 3.1 Geomorfología en el área urbana del municipio



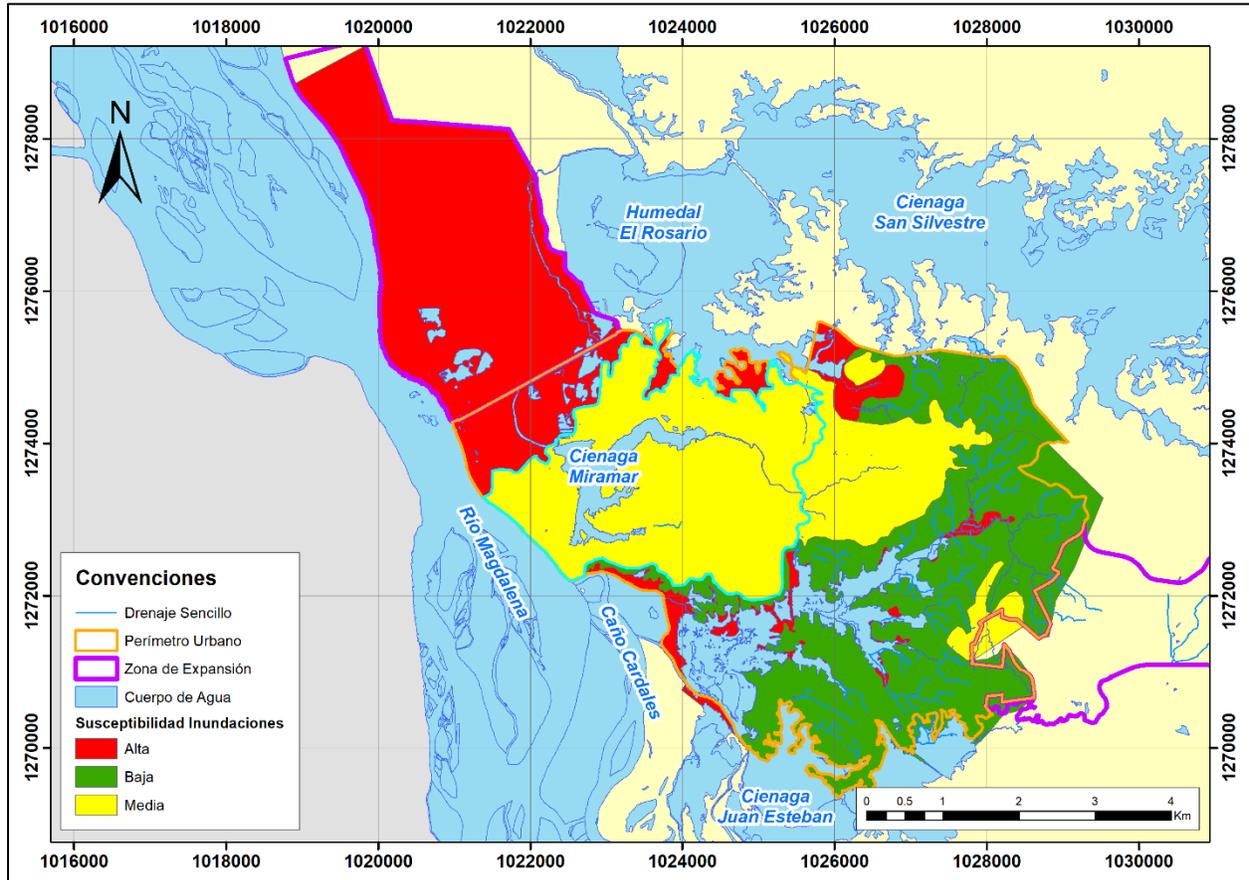
El grado de susceptibilidad a eventos de inundación asociado a cada una de las unidades geomorfológicas esta definido en la siguiente tabla.

Tabla 3.1 Grado de susceptibilidad a inundaciones asociado a las unidades geomorfológicas.

Susceptibilidad a Inundación	Caracterización Geomorfológica
------------------------------	--------------------------------

Susceptibilidad a Inundación	Caracterización Geomorfológica
Alta	Procesos constructivos, planicie aluvial confinada, plano o llanura de inundación
Media	Terraza de acumulación, terraza de acumulación subcreciente
Baja	Cerro remanente, colina estructural, escarpe de erosión menor

Figura 3.2 Susceptibilidad a eventos de inundación en el área urbana



Vale la pena aclarar que la metodología para la caracterización de la amenaza desarrollada en el presente estudio abarca toda la extensión espacial del municipio.

3.2 SUSCEPTIBILIDAD A AVENIDAS TORRENCIALES

Como se reporta en el estudio de amenaza por movimientos en masa, en el área de estudio no se encuentran unidades geomorfológicas, asociadas a eventos de avenidas torrenciales, tales como depósitos aluvio-torrenciales. Durante los recorridos de campo no se encontraron evidencias de la ocurrencia de eventos torrenciales. Por lo tanto, se considera que la susceptibilidad a eventos torrenciales en el área urbana del municipio es nula.

4 METODOLOGÍA E INFORMACIÓN UTILIZADA

En el presente capítulo se describe detalladamente la metodología utilizada para la modelación de los eventos de inundación asociados a diferentes períodos de retorno, así como el método empleado para la clasificación del grado de amenaza de estos. También se describe la información base utilizada y el uso que se le dio en el desarrollo de las actividades.

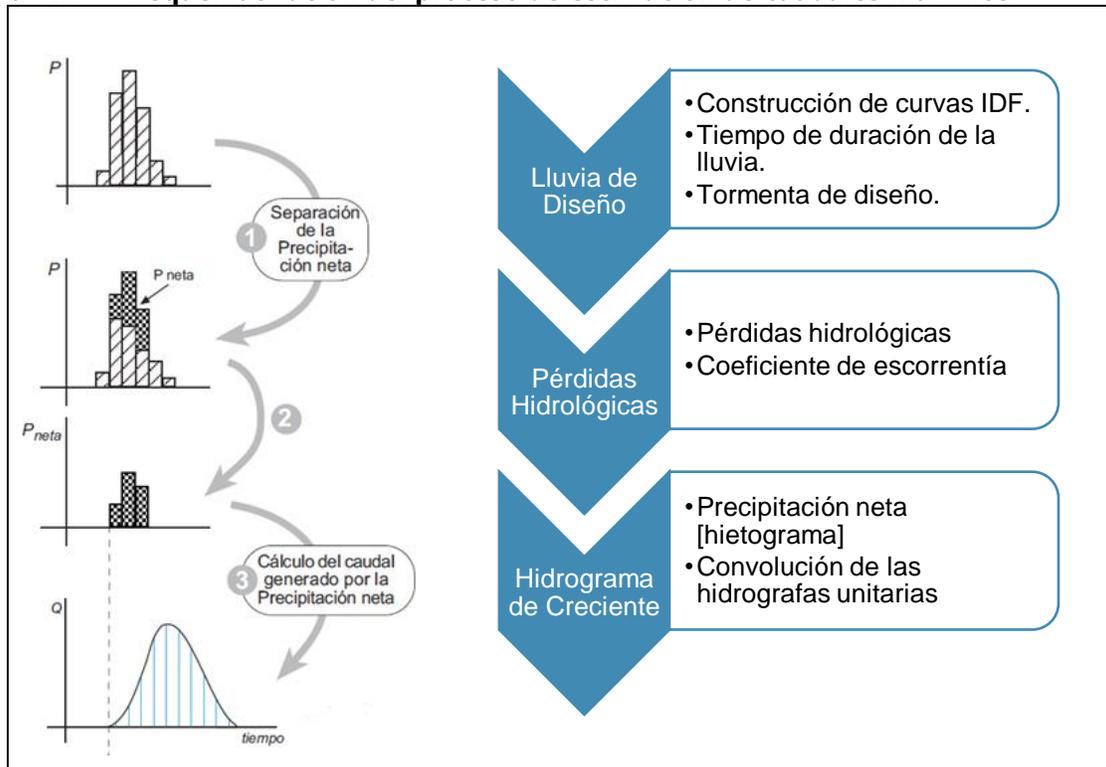
4.1 CAUDALES MÁXIMOS

Uno de los objetivos principales de la Hidrología Superficial es calcular la escorrentía generada cuando se presenta un evento de precipitación determinado, es decir, calcular el *hidrograma* generado por un *hietograma* (Sanchez-San Román, 2016).

En el presente estudio, se requiere calcular los caudales generados eventos extremos de precipitación asociados a diferentes períodos de retorno (Tr); para ello se plantea la estimación de los caudales máximos implementando la metodología del método racional.

El proceso de estimación de los caudales máximos se puede esquematizar, de forma simplificada, de la siguiente manera:

Figura 4.1 Esquemización del proceso de estimación de caudales máximos



Fuente: Sánchez-San Román (2016)

4.1.1 Tormenta de diseño

Con el objetivo de definir la tormenta (o lluvia) de diseño es necesario determinar la magnitud (intensidad), duración y distribución temporal del evento. Para ello se debe



estimar la intensidad de la lluvia con una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, el cual representa el tiempo que se requiere para que toda la cuenca esté aportando al proceso de escorrentía.

4.1.1.1 Duración de la lluvia

Para determinar la duración de la lluvia a partir de los parámetros morfométricos (ver Tabla 4.1), se utiliza una serie de fórmulas empíricas, las cuales utilizan distintos criterios para su cálculo. En este trabajo, se estimó el tiempo de concentración con las ecuaciones propuestas por Kirpich, Temez, Giandiotti, Bransby-Williams y Johnstone, y Cross, entre otros, cuyos fundamentos teóricos fueron revisados por (Vélez&Botero, 2011), con el fin de tener varios estimativos para determinar un valor aproximado de la duración de la lluvia. Las expresiones utilizadas para estimar este parámetro son las siguientes:

Tabla 4.1 Metodologías para la estimación del tiempo de concentración (Tc)

S.C.S - Ranser	California Culverts Practice
$T_c = 0,947k^{0,385}$ $k = \sqrt{\frac{L_c^3}{H}}$ <p>T_c : Tiempo de concentración, en horas. L_c : Distancia desde el sitio de interés al punto en el cual la corriente principal corta la divisoria, en km. H : Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente, en pies.</p>	$T_c = \left[\frac{0,87L^3}{C_{MC} - C_{mc}} \right]^{0,385}$ <p>T_c : Tiempo de concentración, en horas. L : Longitud del cauce principal hasta el punto de aforo, en km. C_{MC} : Cota mayor de la cuenca, en metros. C_{mc} : Cota menor de la cuenca, en metros.</p>
Kirpich (1990)	Témez (1978)
$T_c = 0,066 \left[\frac{L}{\sqrt{S_0}} \right]^{0,77}$ <p>T_c: Tiempo de concentración, en horas. L : Longitud desde la estación de aforo hasta la divisoria, siguiendo el cauce principal, en km. S_0 :diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L en m/m.</p>	$T_c = 0,3 \left[\frac{L}{S_0^{0,25}} \right]^{0,75}$ <p>T_c : Tiempo de concentración, en horas. L : Longitud del cauce principal en km. S_0 :Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L en %.</p>
Johnstone y Cross (1949)	Zuluaga, Valencia y Saldarriaga
$T_c = 5 \left[\frac{L}{\sqrt{S_0}} \right]^{0,5}$ <p>T_c : Tiempo de concentración, en horas. L : Longitud del cauce principal, en millas. S_0: Pendiente del canal en pies/milla.</p>	$T_c = 0,658 \left[\frac{L}{S_0^{0,25}} \right]^{0,671}$ <p>T_c : Tiempo de concentración, en horas. L : Longitud del cauce principal, en km. A : Área de la cuenca, en km².</p>
Pérez Montegudo (1985)	Ven Te Chow
$T_c = \frac{L}{V_r}$ <p>L : Longitud de la corriente principal. V_r: Velocidad de onda de la creciente por el cauce principal en km/h. V_r se expresa como: $V_r = 72 \left[\frac{AE}{L} \right]^{0,6}$ AE :Diferencia de cotas en km en el cauce principal desde el punto más bajo.</p>	$T_c = 0,8773 \left[\frac{L}{\sqrt{\left(\frac{C_{Mr} - C_{mr}}{L} \right)}} \right]^{0,64}$ <p>T_c : Tiempo de concentración, en horas. L : Longitud del cauce principal hasta el punto de aforo, en km. C_{Mr} : Cota mayor del río, en metros. C_{mr} : Cota menor del río, en metros.</p>
Giandotti (1990)	Bransby - Williams
$T_c = \frac{4 A^{0,5} + 1,5 L}{25,3 (L S_0)^{0,5}}$ <p>T_c : Tiempo de concentración, en horas. A : Área de la cuenca en km². L : Longitud del cauce principal, en Km. S_0 :diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L, en m/m.</p>	$T_c = \frac{F L}{(A)^{0,1}(S_0)^{0,3}}$ <p>T_c : Tiempo de concentración, en horas. A : Área de la cuenca en km². L : Longitud del cauce principal en km. F : 58,5 si el área está dada en km². S_0 : diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L, en m/m.</p>

4.1.1.2 Magnitud de la lluvia

En la zona de estudio se cuenta con una estación con información de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) de la lluvia, la cual fue utilizada para estimar la magnitud de la tormenta de diseño (ver Figura 4.5).

4.1.2 Método Racional

El método Racional fue desarrollado a finales de la década de 1890 para ser utilizada en sistemas de drenaje de aeropuertos y en pequeñas cuencas urbanas. En estos sistemas las suposiciones básicas del método se cumplen con cierto grado de aproximación.

El método se fundamenta en que la máxima tasa de escurrimiento superficial, en una cuenca pequeña, ocurre cuando toda la cuenca está contribuyendo y la descarga máxima se obtiene cuando la duración de la lluvia iguala en magnitud al tiempo de concentración de la cuenca.

La fórmula racional supone que la intensidad de la precipitación permanece constante durante un tiempo igual o mayor que el tiempo de concentración y es uniforme sobre toda la cuenca, estos supuestos difícilmente se dan en la naturaleza, por tanto, los resultados obtenidos deben ser vistos con precaución.

La fórmula racional tiene la siguiente expresión:

$$Q_{Tr} = \frac{C \cdot I_{TR} \cdot A}{3.6} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

- C: coeficiente de escorrentía
- I_{TR} : intensidad en mm/h
- A: área de la cuenca en km^2

El método Racional fue desarrollado para pequeñas áreas de drenaje, pero en los últimos años se ha venido empleando en cuencas de tamaño mediano, bajo la hipótesis de que esto es posible si se pueden obtener unos adecuados coeficientes de escorrentía distribuidos en el espacio.

4.1.2.1 Coeficiente de escorrentía

La escorrentía superficial provocada por un aguacero (R) puede compararse con la precipitación caída (P). El coeficiente de escorrentía (C) se denomina el cociente entre ambos.

$$C = \frac{R}{P} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

El coeficiente de escorrentía depende de numerosos factores como son el tipo de precipitación (lluvia, granizo o nieve), su magnitud, intensidad y distribución en el tiempo, la humedad inicial del suelo, las características del terreno (granulometría, textura, estructura, materia orgánica, pendiente, micro relieve, rugosidad), el tipo de vegetación existente, etc. El coeficiente de escorrentía varía entre 0 y 1.

Las tablas habituales para estimar el coeficiente de escorrentía dependen únicamente del tipo de terreno y la cobertura vegetal. En algunos casos también dependen de la pendiente,

el periodo de retorno y de la humedad antecedente del suelo. Por tanto, debe escogerse un coeficiente razonable para representar todos los efectos integrados de estos factores.

En la Tabla 4.2 se presentan algunos valores para el coeficiente de escorrentía que han sido resumidos de Ven Te Chow (1994), entre una exhaustiva lista para diferentes condiciones hidrológicas.

Tabla 4.2 Coeficiente de escorrentía para diferentes periodos de retorno

Característica de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto / techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
<i>Zonas verdes (jardines, parques, etc.)</i>							
<i>Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50 % del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio (cubierta de pasto del 50 al 75 % del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena (cubierta de pasto mayor del 75 % del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
<i>Área de cultivos</i>							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
<i>Pastizales</i>							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Bosques</i>							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Fuente: Chow (1994)

4.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LAS CRECIENTES

Dado que el objetivo principal del estudio de amenazas consiste en evaluar las condiciones de profundidad y velocidad de la lámina de agua ante el evento de inundación, se hace necesario implementar un modelo bidireccional (2D). A continuación, se resumen las actividades requeridas para la implementación de un modelo hidráulico bidimensional en condición de flujo permanente en HEC-RAS 5.0.3:

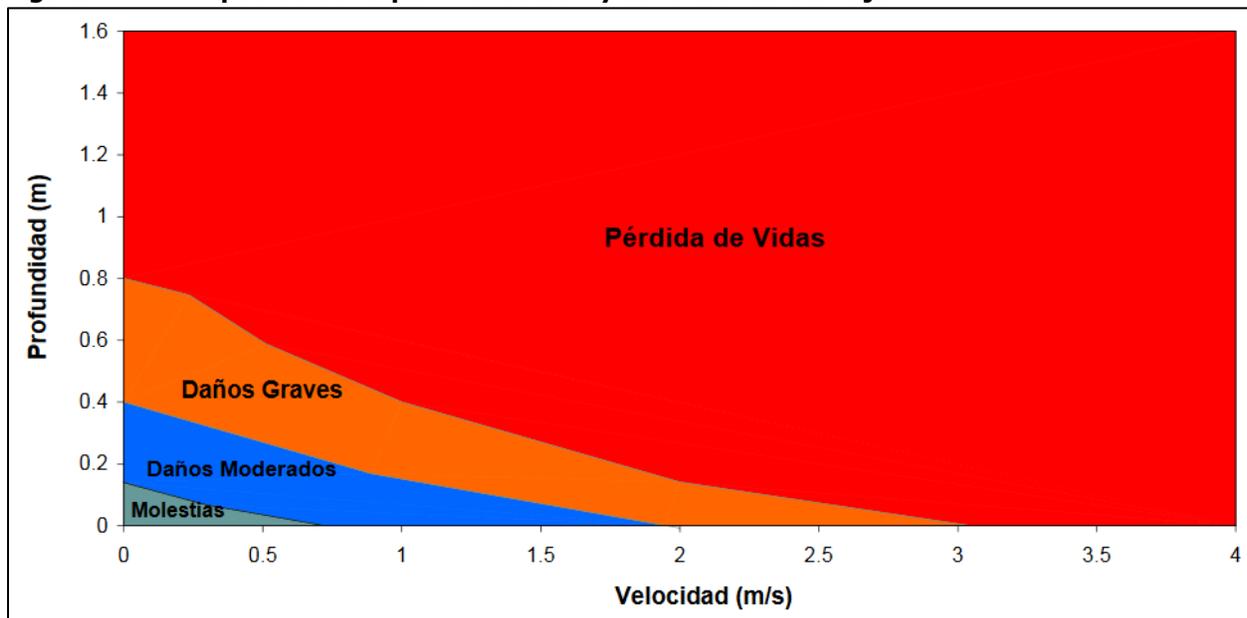
- Construcción de la geometría del cauce (planta perfil y secciones) con base en información topográfica.
- Construcción de la malla computacional
- Definición del paso temporal de resolución
- Definición de los coeficientes de rugosidad asociada a la malla computacional.
- Definición de las tormentas de diseño
- Definición de las condiciones de borde en las secciones de control hidráulico
- Ejecución del modelo y análisis de resultados.

4.3 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA

La categorización de la amenaza por eventos de inundación y avenidas torrenciales es el objetivo principal del presente trabajo. La relación que se establezca entre las probabilidades de ocurrencia de los eventos y las categorías definidas es un tema de importancia mayor.

Los criterios para la clasificación del grado de amenaza son subjetivos, y generalmente están según la normativa local establecida para la gestión del riesgo por inundación (EU, 2014). Generalmente se aplican dos escenarios probabilísticos: en el primero se asocia una categoría alta, media o baja, según la probabilidad de ocurrencia del evento, 10, 100 y 500 años, respectivamente. En el segundo escenario se definen subjetivamente las clases en función de los daños generados, asociados a la profundidad y velocidad de flujo para un caudal asociado a determinado período de retorno, generalmente 100 años (ver Figura 4.2). Este último enfoque es utilizado por UNAL (2013).

Figura 4.2 Tipos de daño por inundación y condiciones de flujo



Fuente: UNAL (2013)

Para el presente trabajo se adoptaron los siguientes criterios de clasificación del grado de amenaza.

Tabla 4.3 Categorización de amenaza por inundación

Categoría de Amenaza	Descripción de la inundación
Alta	Probabilidad de ocurrencia alta. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno menor que 10 años.
Media	Probabilidad de ocurrencia media. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno entre 10 y 100 años.
Baja	Probabilidad de ocurrencia baja. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno entre 100 y 500 años.
Nula	Probabilidad de ocurrencia baja. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno mayor que 500 años.

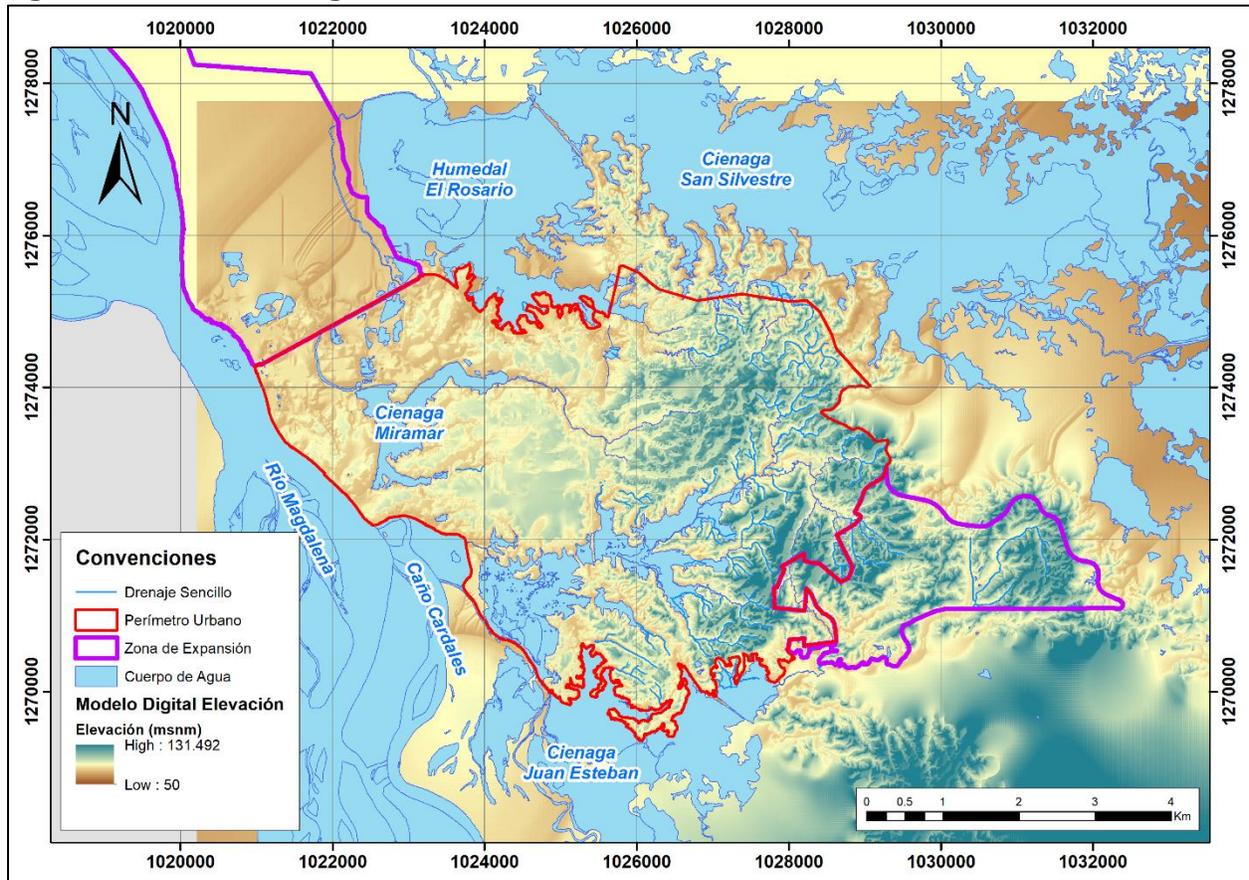
4.4 INFORMACIÓN UTILIZADA

Con el objetivo de realizar las diferentes actividades con la información disponible más detallada a la fecha, se describen los datos utilizados en el desarrollo del presente trabajo.

4.4.1 Topografía

Con base en la información cartográfica escala 1:5.000 se generó el Modelo Digital de Elevación utilizado la delimitación de las cuencas y la estimación de sus respectivos parámetros morfométricos, y para la implementación del modelo hidráulico.

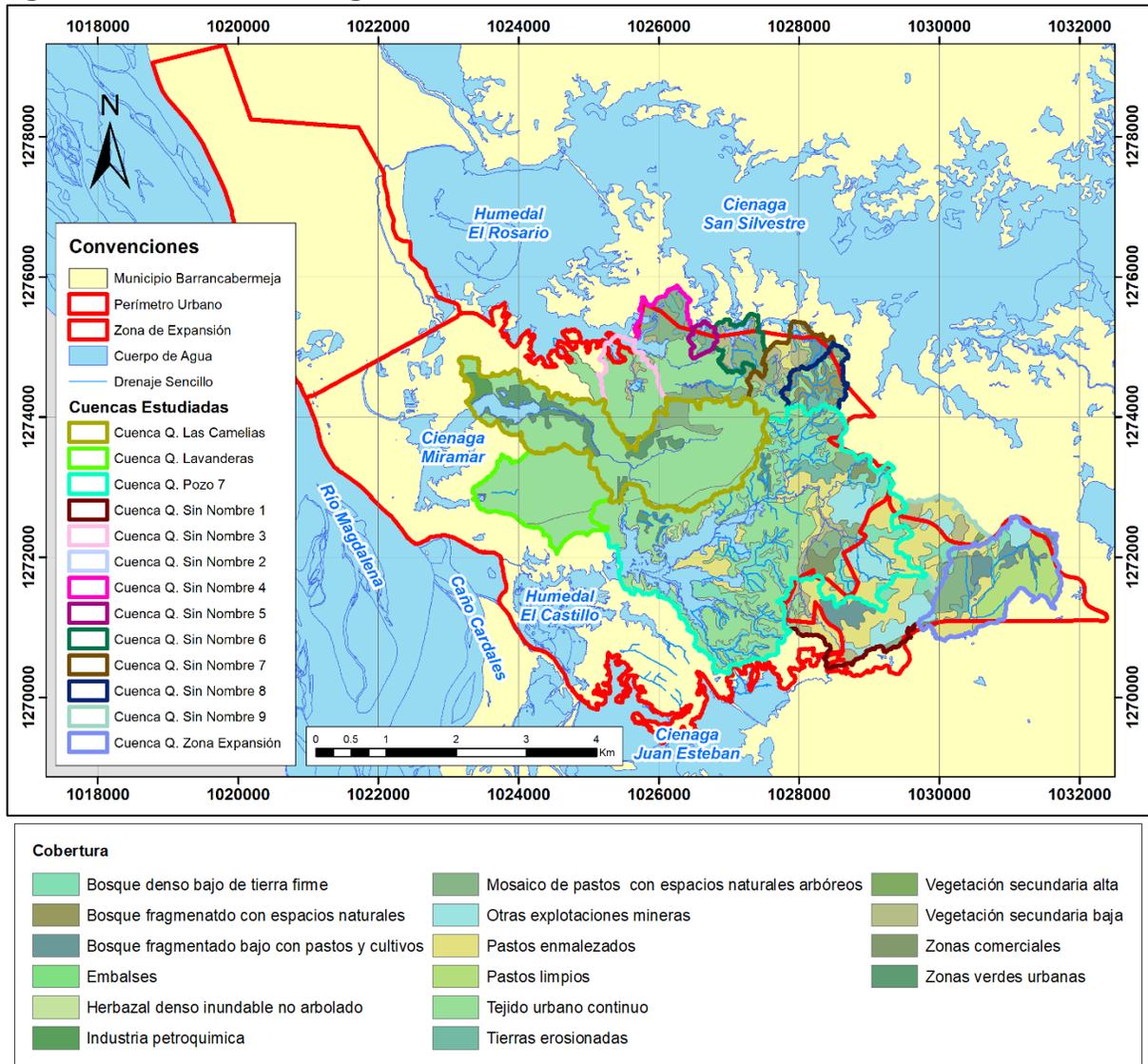
Figura 4.3 Modelo Digital de Elevación en el área urbana



4.4.2 Coberturas

La cobertura vegetal de la cuenca es un determinante clave en el proceso de transformación lluvia-escorrentía; para su caracterización se utilizó la información de los proyectos de POMCA de los ríos Opón y Sogamoso, con una escala espacial de 1:25.000.

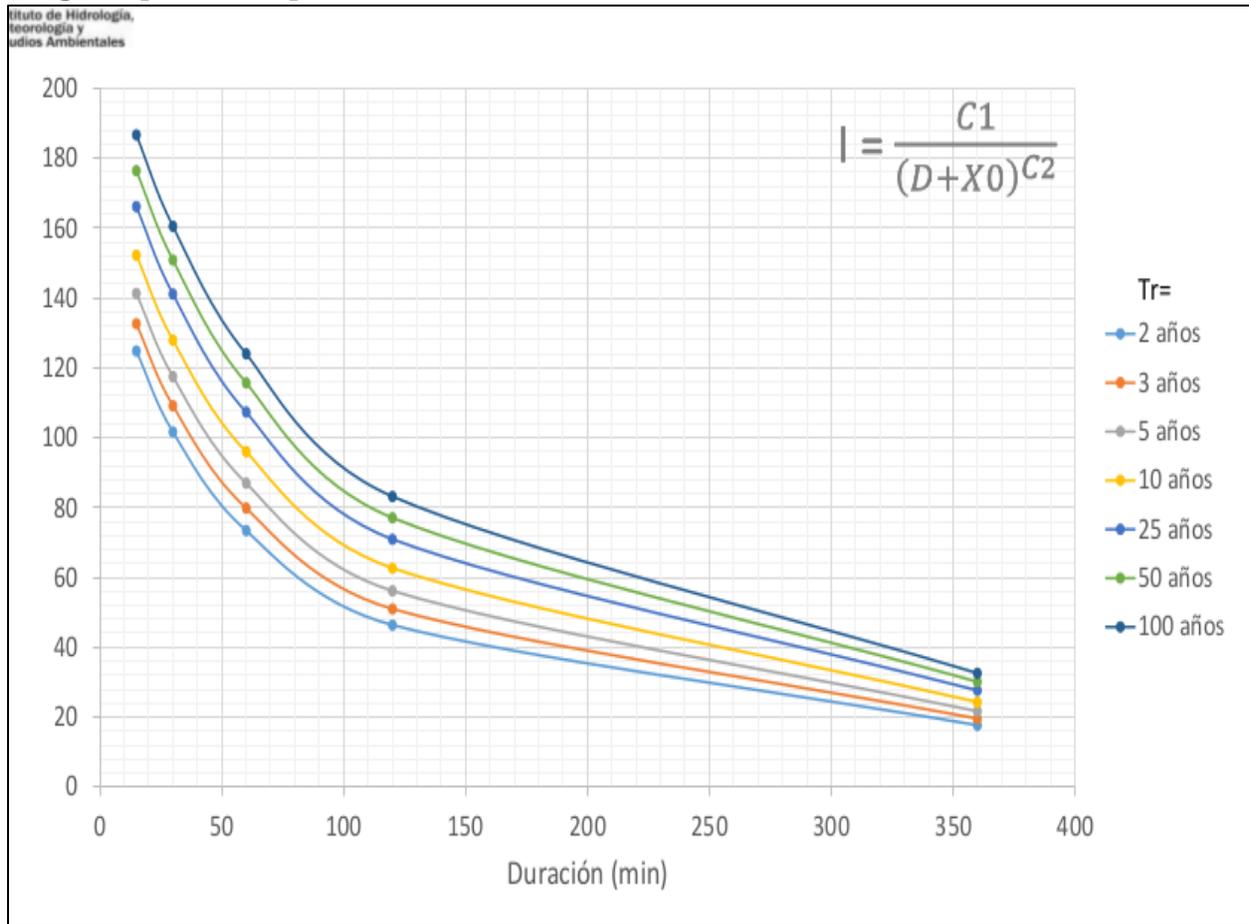
Figura 4.4 Cobertura vegetal en las cuencas estudiadas



4.4.3 Precipitación

Las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) son utilizadas para la estimación de la tormenta de diseño de los caudales máximos. Para determinar cuáles estaciones describen el comportamiento de la intensidad, duración y frecuencia de las lluvias. Para todas las cuencas estudiadas se utilizó la información disponible en la estación Aeropuerto Yarigües [23155030].

Figura 4.5 Intensidad-Duración-Frecuencia de la lluvia en la estación Aeropuerto Yariguies [23155030]



Fuente: IDEAM

4.4.4 Niveles

La información de niveles utilizada como condición de borde de los modelos hidráulicos corresponde al mapa de elevación de las crecientes, desarrollado en el Volumen I del presente estudio.

Figura 4.6 Elevación de la creciente asociadas a un período de retorno de 10 años (área rural)

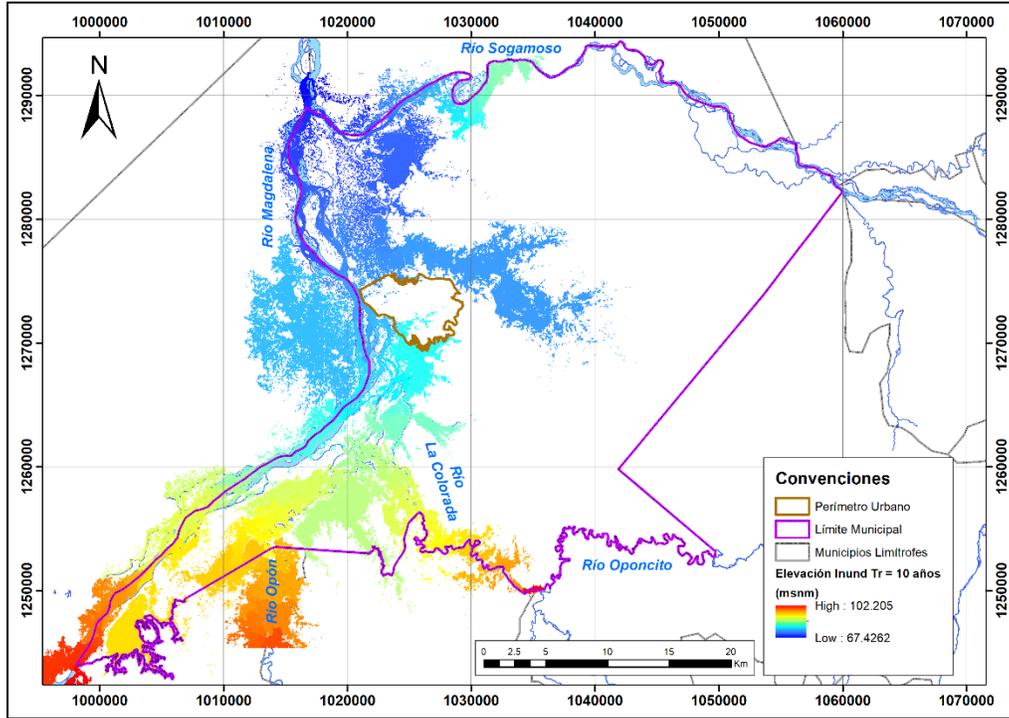


Figura 4.7 Elevación de la creciente asociadas a un período de retorno de 100 años (área rural)

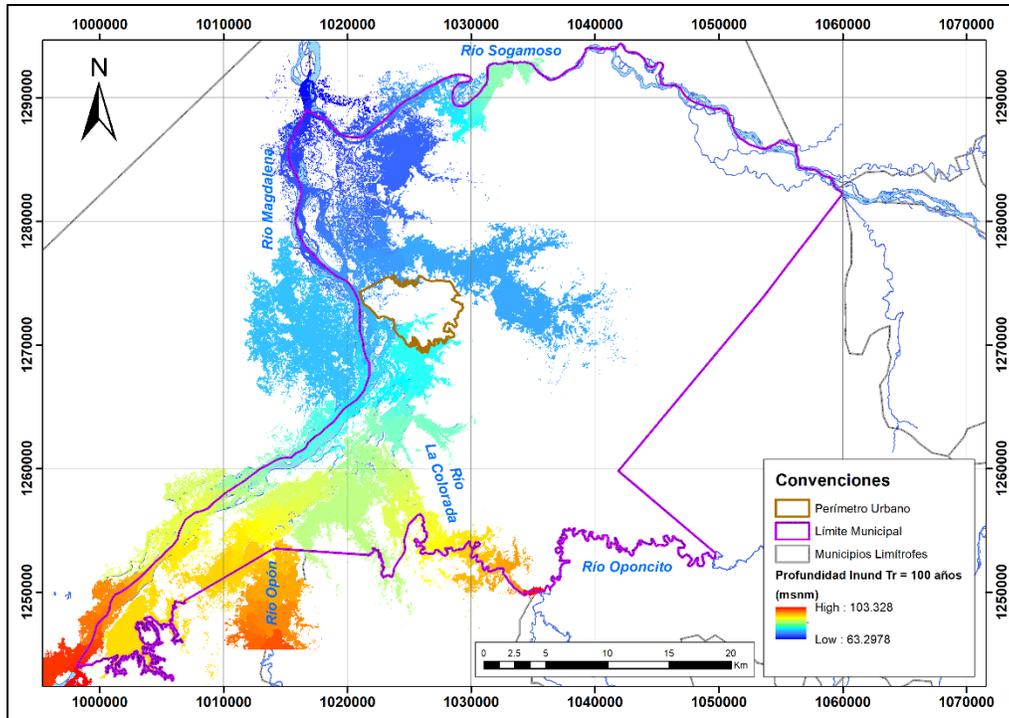
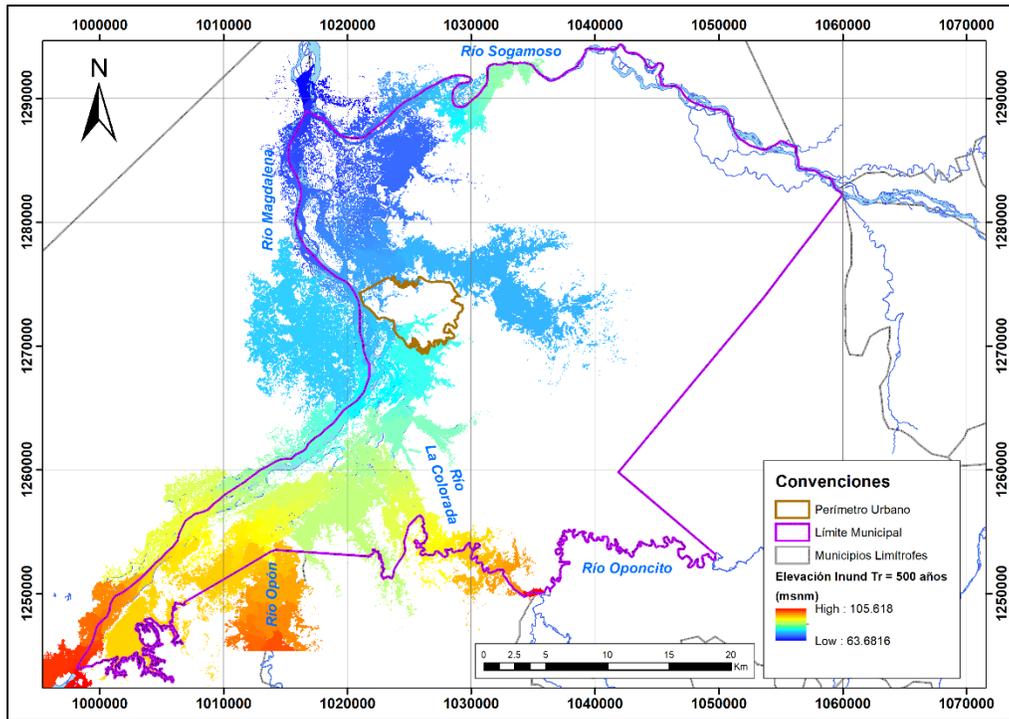


Figura 4.8 Elevación de la creciente asociadas a un período de retorno de 500 años (área rural)



5 ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

5.1 CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LAS CUENCAS

El área de la cuenca hidrográfica es considerada uno de los parámetros más importantes en todos los procesos hidrológicos que se dan en la cuenca, ya que esta representa el volumen de control de esta; para la estimación de los caudales medios de largo plazo este es el parámetro morfométrico más relevante.

En el proceso de transformación de lluvia en escorrentía a escala de evento, utilizando el enfoque metodológico de las hidrógrafas unitarias, como se desarrolla en el presente estudio, existen otros parámetros morfométricos de la cuenca que también influyen; estos son:

- Perímetro de la cuenca
- Longitud del cauce principal
- Distancia de la salida de la cuenca al centro de gravedad de esta
- Diferencia de elevaciones máxima de la cuenca
- Pendiente del cauce principal
- Pendiente promedio de la cuenca

Por otra parte, la caracterización de otros parámetros morfométricos tales como el factor de forma, la relación de bifurcación, la relación de longitudes, entre otros permiten inferir sobre el comportamiento hidrológico que pueda tener la cuenca ante la ocurrencia de eventos extremos.

Figura 5.1 Localización de las cuencas estudiadas

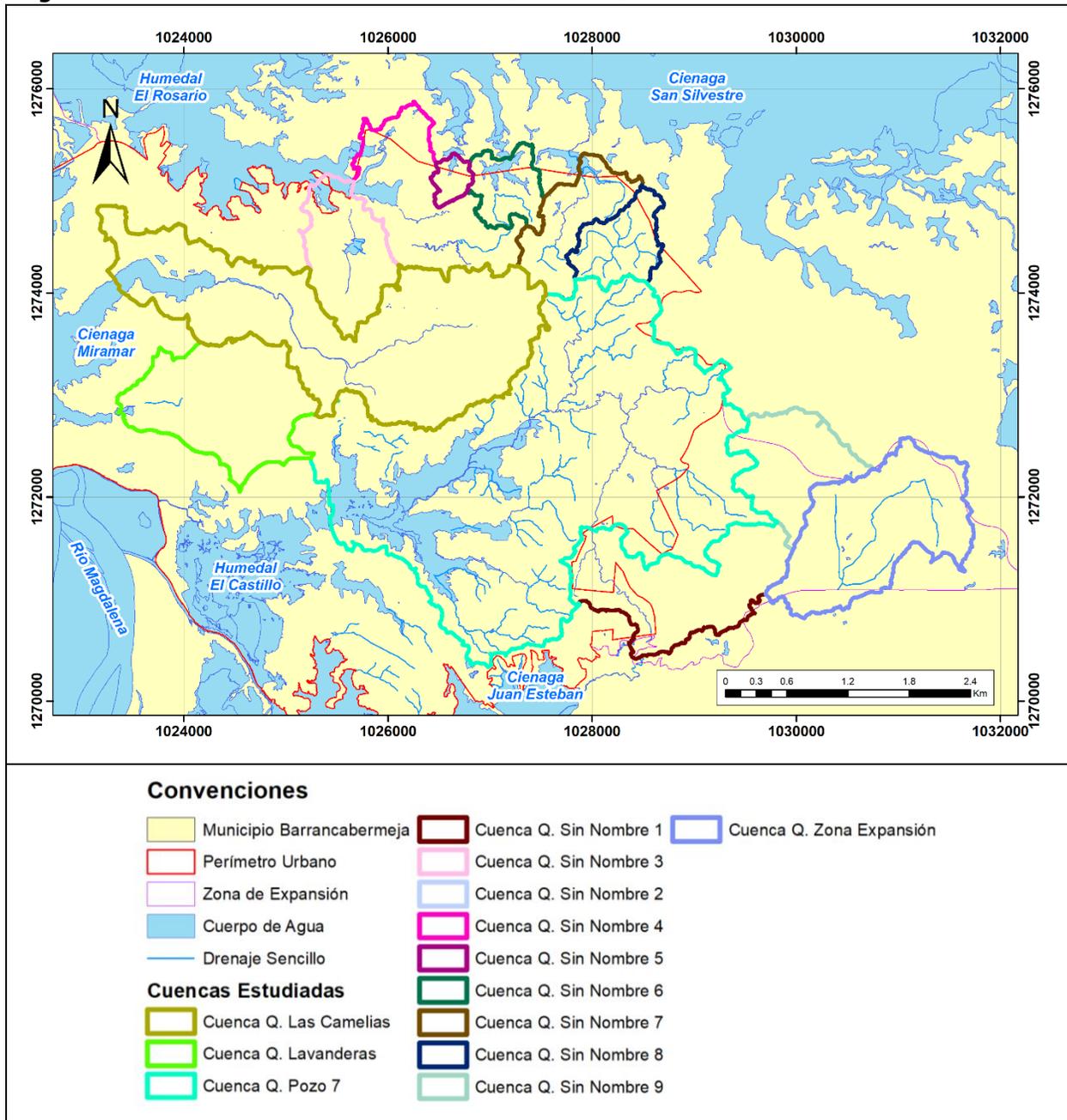


Tabla 5.1 Parámetros morfométricos de las cuencas estudiadas

Parámetro	Camelias	Lavanderas	Pozo 7	Zona Expansión	Quebrada Sin Nombre								
					1	2	3	4	5	6	7	8	9
Área (km ²)	4,2	1,7	8,9	1,9	1,7	0,2	1,0	1,4	0,1	0,4	0,7	0,6	1,0
Perímetro (km)	21,1	8,9	27,0	10,2	11,0	3,1	6,6	10,4	2,2	4,9	7,1	5,1	7,5
Longitud máxima (km)	6,4	2,5	7,2	3,7	2,8	1,0	2,3	3,7	0,7	1,3	2,1	1,4	2,1
Ancho (km)	0,7	0,7	1,2	0,5	0,6	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5
Distancia al centroide (km)	4,4	1,3	3,0	1,6	2,3	0,7	1,5	2,8	0,3	0,6	0,5	1,3	1,3
Elevación máxima (msnm)	107,0	88,2	125,8	126,2	125,8	86,8	102,5	108,6	106,9	109,7	109,7	108,1	124,9
Elevación mínima (msnm)	71,0	71,9	71,2	81,5	75,1	71,6	69,9	71,6	72,0	70,7	72,3	72,0	72,3
Diferencia de elevaciones (m)	36,0	16,3	54,6	44,8	50,8	15,2	32,6	37,0	35,0	38,9	37,3	36,0	52,6
Elevación media (msnm)	89,6	83,4	95,1	102,1	95,4	80,4	81,1	87,0	85,3	89,9	94,4	91,9	92,4
Pendiente media (m/m)	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
Longitud cauce (km)	6,3	2,3	7,0	3,6	2,7	0,9	2,1	3,6	0,6	1,3	2,0	1,3	2,0
Pendiente media cauce (km)	0,8	0,8	0,6	1,2	1,2	1,6	0,5	1,1	2,3	2,5	1,8	2,8	1,4
Elevación máxima cauce (m)	103,4	85,9	111,6	112,0	91,3	85,2	84,7	96,9	86,4	92,0	105,6	97,8	102,4
MagnitudO	150,0	98,0	333,0	192,0	70,0	8,0	46,0	61,0	17,0	49,0	72,0	60,0	93,0
Orden máximo [Strahler]	4,0	4,0	5,0	5,0	4,0	2,0	4,0	4,0	3,0	4,0	4,0	4,0	5,0
Número de corrientes	191,0	133,0	426,0	247,0	89,0	9,0	63,0	77,0	23,0	66,0	100,0	80,0	117,0
Longitud total de cauces (km)	33,2	15,3	75,6	24,8	13,2	1,1	8,2	12,1	2,0	5,7	9,0	7,2	11,1
Frec. corrientes de primer orden	35,4	57,1	37,6	99,1	41,9	46,7	47,8	42,5	123,3	109,7	96,6	107,9	97,5
Densidad de drenaje (km/km ²)	7,8	8,9	8,5	12,8	7,9	6,6	8,5	8,5	14,8	12,8	12,1	13,0	11,6
Relación de bifurcación [Horton]	5,2	4,5	4,4	3,9	4,4	8,0	3,7	3,8	4,1	3,6	4,1	3,9	3,0
Relación de longitudes [Horton]	3,2	2,6	2,4	2,1	2,0	15,8	2,3	2,7	2,1	2,0	2,9	2,0	0,8
Relación de áreas [Horton]	6,2	5,3	4,9	4,5	5,3	15,5	4,3	4,9	5,2	4,4	4,9	4,7	3,5
Relación de pendientes [Horton]	1,4	0,9	1,8	1,9	1,6	1,6	1,4	1,8	1,7	2,0	1,8	2,6	-nan
Coeficiente de compacidad	2,9	1,9	2,5	2,1	2,4	2,1	1,9	2,4	1,7	2,1	2,3	1,9	2,2
Relación de circularidad	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3	0,2
Diámetro topológico	65,0	31,0	72,0	74,0	34,0	8,0	23,0	29,0	10,0	14,0	26,0	20,0	29,0
Índice de elongación	0,4	0,6	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5
Factor de forma	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2

CONTRATO No. 3349-17

Estudio De Amenaza Por Inundación Y Avenidas Torrenciales
En El Área Rural Y Urbana Del Municipio De Barrancabermeja
Volumen II: Estudio del Área Urbana



Parámetro	Camelias	Lavanderas	Pozo 7	Zona Expansión	Quebrada Sin Nombre								
Coefficiente de masividad	21,1	48,6	10,7	52,7	57,2	469,0	84,3	60,6	618,8	201,1	126,6	165,4	96,9
Coefficiente orográfico	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Coefficiente de estabilidad	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

5.1.1 Tiempo de Concentración

La respuesta de la cuenca depende de las características de la tormenta. El análisis de la precipitación se basa fundamentalmente en la obtención de las variables de intensidad, frecuencia, duración y de la distribución temporal de la lluvia.

5.1.1.1 Duración de la lluvia

En este caso, la duración de la lluvia se hace igual al tiempo de concentración de la cuenca, debido a que es la situación más crítica, en el cual la totalidad de la cuenca está aportando al proceso de escorrentía; para duraciones inferiores al tiempo de concentración no toda la cuenca está aportando escorrentía, y para duraciones mayores, la intensidad de la lluvia disminuye sin incrementarse el área de drenaje, resultando esto en una situación menos desfavorable.

Para determinar la duración de la lluvia a partir de los parámetros morfométricos (ver Tabla 5.1), se utilizaron las ecuaciones descritas en la sección 4.1.1.1. En la Tabla 5.2 se presentan los resultados de la estimación del tiempo de concentración de la quebrada Pozo Siete para cada una de las metodologías utilizadas, mientras que en la Tabla 5.3 se muestran los tiempos de concentración estimado para cada una de las cuencas estudiadas.

Tabla 5.2 Tiempo de concentración estimado para la cuenca Las Camelias

Metodología	T _c (min)	T _c (horas)
Barnsby Williams	161,5	2,69
California Culverts Practice	120,2	2,00
Clark	136,6	2,28
Giandotti	221,3	3,69
Johnstone & Cross	69,7	1,16
Kirpich	65,1	1,08
Passini	115,8	1,93
Pérez	124,5	2,08
Pilgrim & McDermott	78,9	1,32
Snyder	195,4	3,26
SCS - lag equation	214,5	3,58
SCS - Ranser	120,1	2,00
Témez	60,1	1,00
Valencia & Zuluaga	105,5	1,76
Ven Te Chow	98,2	1,64
Promedio	118,0	2,0
Mediana	118,0	2,0
Desviación Estándar	59,3	1,0
Coefficiente de variación	0,50	0,50
Rango intercuartil (IQR)	83,30	0,04

Metodología	T _c (min)	T _c (horas)
Ancho de la banda de confianza	1,00	-
Límite inferior banda de confianza	76,32	1,27
Límite superior banda de confianza	159,62	2,66
Tiempo de concentración seleccionado	110,00	1,83

Tabla 5.3 Tiempo de concentración estimado para todas las cuencas estudiadas

Cuenca	Área (km ²)	T _c (min)
Q. Las Camelias	4,24	110
Q. Las Lavanderas	1,72	55
Q. Pozo Siete	8,85	110
Q. Zona Expansión	1,94	55
Q. Sin Nombre 1	1,67	50
Q. Sin Nombre 2	0,17	20
Q. Sin Nombre 3	0,96	40
Q. Sin Nombre 4	1,44	50
Q. Sin Nombre 5	0,14	10
Q. Sin Nombre 6	0,45	20
Q. Sin Nombre 7	0,75	30
Q. Sin Nombre 8	0,56	20
Q. Sin Nombre 9	0,95	35

5.2 ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS

5.2.1 Coeficiente de escorrentía

Con base en la información de coberturas descritas en la sección 4.4.2 se estima el coeficiente de escorrentía relacionando el tipo de cobertura con los valores de referencia presentados en la Tabla 4.2.

Tabla 5.4 Coeficientes de escorrentía para cada tipo de cobertura identificada en las cuencas estudiadas

Cobertura	Cobertura Chow (1994)	Período de Retorno (años)						
		2,33	5	10	25	50	100	500
Bosque denso bajo de tierra firme	Bosques - Plano, 0-2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Bosque fragmentado con espacios naturales	Bosques - Plano, 0-2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Bosque fragmentado bajo con pastos y cultivos	Bosques - Plano, 0-2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Herbazal denso inundable no arbolado	Pastizal - Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Industria petroquímica	Concreto/Techo	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00

Cobertura	Cobertura Chow	Período de Retorno (años)						
		2,33	5	10	25	50	100	500
Mosaico de pastos con espacios naturales arbóreos	Pastizal - Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Otras explotaciones mineras	Zonas verdes - Condición Pobre	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
Pastos enmalezados	Pastizal - Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Pastos limpios	Pastizal - Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Tejido urbano continuo	Concreto/Techo	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Tierras erosionadas	Pastizal - Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Vegetación secundaria alta	Bosques - Plano, 0-2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Vegetación secundaria baja	Pastizal - Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Zonas comerciales	Concreto/Techo	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Zonas verdes urbanas	Pastizal - Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53

Tabla 5.5 Coeficiente de escorrentía estimado para cada una de las cuencas estudiadas

Cuenca	Área (km ²)	Período de Retorno (años)						
		2,33	5	10	25	50	100	500
Q. Las Camelias	4,24	0,61	0,65	0,68	0,73	0,77	0,81	0,87
Q. Las Lavanderas	1,72	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Q. Pozo Siete	8,85	0,42	0,45	0,48	0,53	0,56	0,60	0,69
Q. Zona Expansión	1,94	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,52
Q. Sin Nombre 1	1,67	0,28	0,31	0,33	0,37	0,40	0,44	0,55
Q. Sin Nombre 2	0,17	0,69	0,73	0,77	0,82	0,85	0,90	0,96
Q. Sin Nombre 3	0,96	0,62	0,66	0,69	0,74	0,78	0,83	0,89
Q. Sin Nombre 4	1,44	0,47	0,50	0,53	0,58	0,61	0,66	0,74
Q. Sin Nombre 5	0,14	0,35	0,38	0,41	0,45	0,48	0,52	0,63
Q. Sin Nombre 6	0,45	0,28	0,31	0,33	0,37	0,40	0,44	0,56
Q. Sin Nombre 7	0,75	0,39	0,42	0,45	0,49	0,53	0,57	0,67
Q. Sin Nombre 8	0,56	0,37	0,40	0,43	0,47	0,51	0,55	0,63
Q. Sin Nombre 9	0,95	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53

5.2.2 Tormenta de Diseño

Para el método racional la tormenta está definida únicamente por su intensidad por lo que, con base en los tiempos de concentración de cada una de las cuencas se estima la intensidad interpolando los valores definidos en las curvas IDF de la estación Aeropuerto Yariguies. En la Tabla 5.6, se presentan los valores de intensidad estimado para cada una de las cuencas estudiadas. El valor de precipitación que se convierte en escorrentía está definido por el coeficiente de escorrentía, en la Tabla 5.7 se presentan los valores de intensidad de la lluvia afectados por el coeficiente de escorrentía.

Tabla 5.6 Intensidad de la lluvia estimada para cada una de las cuencas estudiadas en mm/h

Cuenca	Área (km ²)	Período de Retorno (años)						
		2,33	5	10	25	50	100	500
Q. Las Camelias	4,24	49,5	59,7	66,6	75,5	81,9	88,1	115,3
Q. Las Lavanderas	1,72	77,1	90,9	100,2	112,1	120,7	128,9	163,8
Q. Pozo Siete	8,85	49,5	59,7	66,6	75,5	81,9	88,1	115,3
Q. Zona Expansión	1,94	77,1	90,9	100,2	112,1	120,7	128,9	163,8
Q. Sin Nombre 1	1,67	81,1	95,3	104,8	117,0	125,8	134,2	169,9
Q. Sin Nombre 2	0,17	116,2	132,3	143,2	157,2	167,3	177,0	215,1
Q. Sin Nombre 3	0,96	90,3	105,3	115,3	128,1	137,4	146,3	183,1
Q. Sin Nombre 4	1,44	81,1	95,3	104,8	117,0	125,8	134,2	169,9
Q. Sin Nombre 5	0,14	135,0	151,2	162,3	176,6	187,0	196,9	234,4
Q. Sin Nombre 6	0,45	116,2	132,3	143,2	157,2	167,3	177,0	215,1
Q. Sin Nombre 7	0,75	101,7	117,4	127,9	141,3	151,1	160,3	198,1
Q. Sin Nombre 8	0,56	116,2	132,3	143,2	157,2	167,3	177,0	215,1
Q. Sin Nombre 9	0,95	95,7	111,0	121,3	134,4	144,0	153,0	190,4

Tabla 5.7 Intensidad de la lluvia afectada por el coeficiente de escorrentía para cada una de las cuencas estudiadas en mm/h

Cuenca	Área (km ²)	Período de Retorno (años)						
		2,33	5	10	25	50	100	500
Q. Las Camelias	4,24	30,4	38,8	45,6	55,1	62,8	71,6	100,7
Q. Las Lavanderas	1,72	56,0	69,6	80,7	95,8	108,0	121,8	163,1
Q. Pozo Siete	8,85	20,9	27,1	32,3	39,6	46,0	53,3	79,8
Q. Zona Expansión	1,94	19,2	25,3	30,1	37,9	44,7	52,9	85,8
Q. Sin Nombre 1	1,67	22,7	29,4	35,0	43,3	50,9	59,5	93,8
Q. Sin Nombre 2	0,17	80,0	96,4	109,8	128,2	143,1	160,0	206,5
Q. Sin Nombre 3	0,96	56,1	69,4	80,1	95,1	107,2	121,1	163,6
Q. Sin Nombre 4	1,44	38,0	47,9	55,7	67,4	76,9	88,0	126,3
Q. Sin Nombre 5	0,14	47,5	58,0	66,2	79,5	90,2	103,3	147,6
Q. Sin Nombre 6	0,45	32,1	40,6	47,0	57,9	66,8	77,8	119,6
Q. Sin Nombre 7	0,75	39,8	49,8	57,8	69,8	79,8	91,6	131,8
Q. Sin Nombre 8	0,56	42,6	52,8	61,5	73,5	84,5	96,9	136,4
Q. Sin Nombre 9	0,95	24,2	31,3	36,9	45,9	53,8	63,2	100,5

5.2.3 Caudales máximos

Aplicando el método racional (Ecuación 4.1) se estiman los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno para cada una de las cuencas estudiadas.

Tabla 5.8 Caudales máximos estimados para cada una de las cuencas estudiadas, en m³/s

Cuenca	Área (km ²)	Período de Retorno (años)						
		2,33	5	10	25	50	100	500
Q. Las Camelias	4,24	30,4	38,8	45,6	55,1	62,8	71,6	100,7
Q. Las Lavanderas	1,72	56,0	69,6	80,7	95,8	108,0	121,8	163,1
Q. Pozo Siete	8,85	20,9	27,1	32,3	39,6	46,0	53,3	79,8
Q. Zona Expansión	1,94	19,2	25,3	30,1	37,9	44,7	52,9	85,8
Q. Sin Nombre 1	1,67	22,7	29,4	35,0	43,3	50,9	59,5	93,8
Q. Sin Nombre 2	0,17	80,0	96,4	109,8	128,2	143,1	160,0	206,5
Q. Sin Nombre 3	0,96	56,1	69,4	80,1	95,1	107,2	121,1	163,6
Q. Sin Nombre 4	1,44	38,0	47,9	55,7	67,4	76,9	88,0	126,3
Q. Sin Nombre 5	0,14	47,5	58,0	66,2	79,5	90,2	103,3	147,6
Q. Sin Nombre 6	0,45	32,1	40,6	47,0	57,9	66,8	77,8	119,6
Q. Sin Nombre 7	0,75	39,8	49,8	57,8	69,8	79,8	91,6	131,8
Q. Sin Nombre 8	0,56	42,6	52,8	61,5	73,5	84,5	96,9	136,4
Q. Sin Nombre 9	0,95	24,2	31,3	36,9	45,9	53,8	63,2	100,5

5.3 MODELACIÓN HIDRÁULICA

Para cada una de las cuencas estudiadas se implementó un modelo hidráulico como se describe a continuación

5.3.1 Parámetros de modelación

5.3.1.1 Malla computacional y secciones de control

Para cada cuenca estudiada se selecciona un dominio espacial de modelación el cual corresponde al área de la cuenca. Este dominio se subdivide en pixeles de 10 m de resolución, para el cual el modelo construye curvas de nivel, área y perímetro mojado, que son utilizadas en la resolución de las ecuaciones del modelo. El valor general sugerido para este parámetro es de 20 m, sin embargo, se seleccionó un tamaño de 10 m, para obtener resultados más precisos (asumiendo un costo computacional mayor).

A la salida de la corriente estudiada, en el límite con el campo computacional se establece una sección de control, para la cual se establece una condición de borde como se describe más adelante.

5.3.1.2 Coefficiente de rugosidad

Dada la naturaleza del estudio, con el objetivo de ser conservadores en la modelación se utiliza un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,06 m^{1/3}/s, excepto en las cuencas Lavanderas y Camelias, donde se asume una rugosidad de 0,02 m^{1/3}/s debido al alto grado de antropización que tienen.

5.3.1.3 Tiempo de corrida e intervalo temporal

Se definió un tiempo de corrida de 2 horas, con el objetivo de garantizar que toda la precipitación que cae, aporte al proceso de escorrentía (se cumple para tiempos mayores que el tiempo de concentración). Esto debido a que la modelación es transitoria, pero se debe garantizar que alcance un régimen permanente tal como se define para el método racional. Asimismo, se definió un intervalo de tiempo de 30 segundos, respetando en todo momento el criterio de Courant-Friedrich-Lewis.

Figura 5.2 Dominio computacional definido para el estudio hidráulico de la cuenca de la quebrada Las Camelias

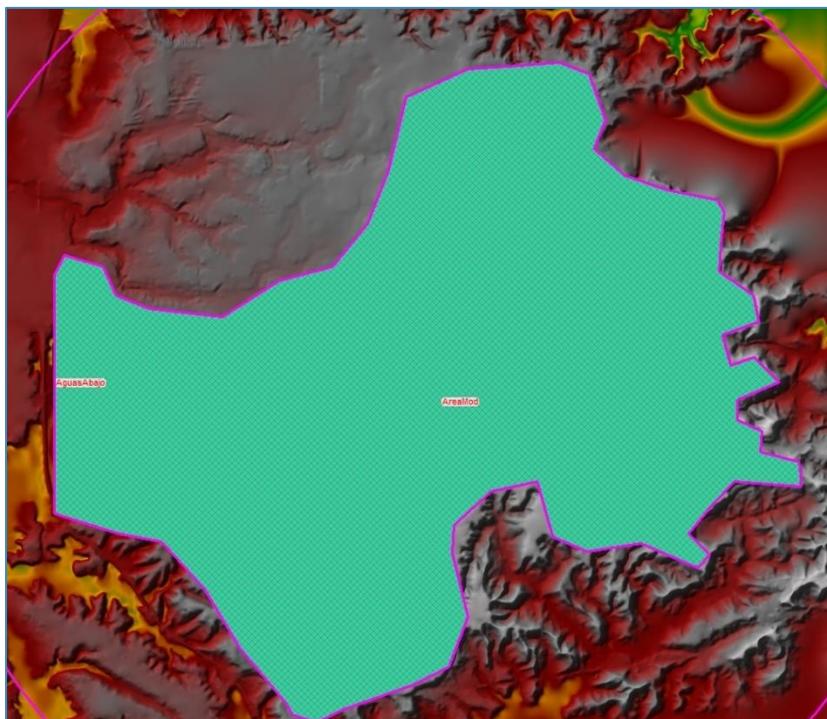
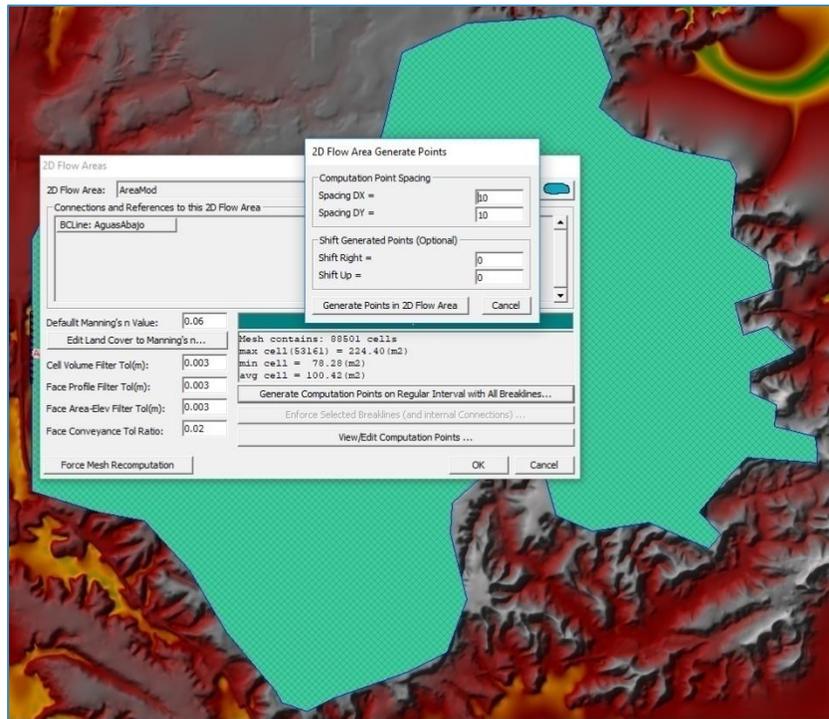


Figura 5.3 Parámetros definidos para la malla computacional del estudio hidráulico de la cuenca de la quebrada Las Camelias



5.3.2 Condiciones de borde

Para el modelo implementado se consideran dos condiciones de borde: la primera corresponde al nivel de descarga para el cual se define el nivel creciente asociado a un período de retorno de 100 años en del cuerpo receptor, en la Tabla 5.9 se relacionan los niveles utilizados para cada una de las cuencas estudiadas. La segunda condición de borde corresponde a la precipitación de diseño, la cual corresponde a los valores estimados en la Tabla 5.7

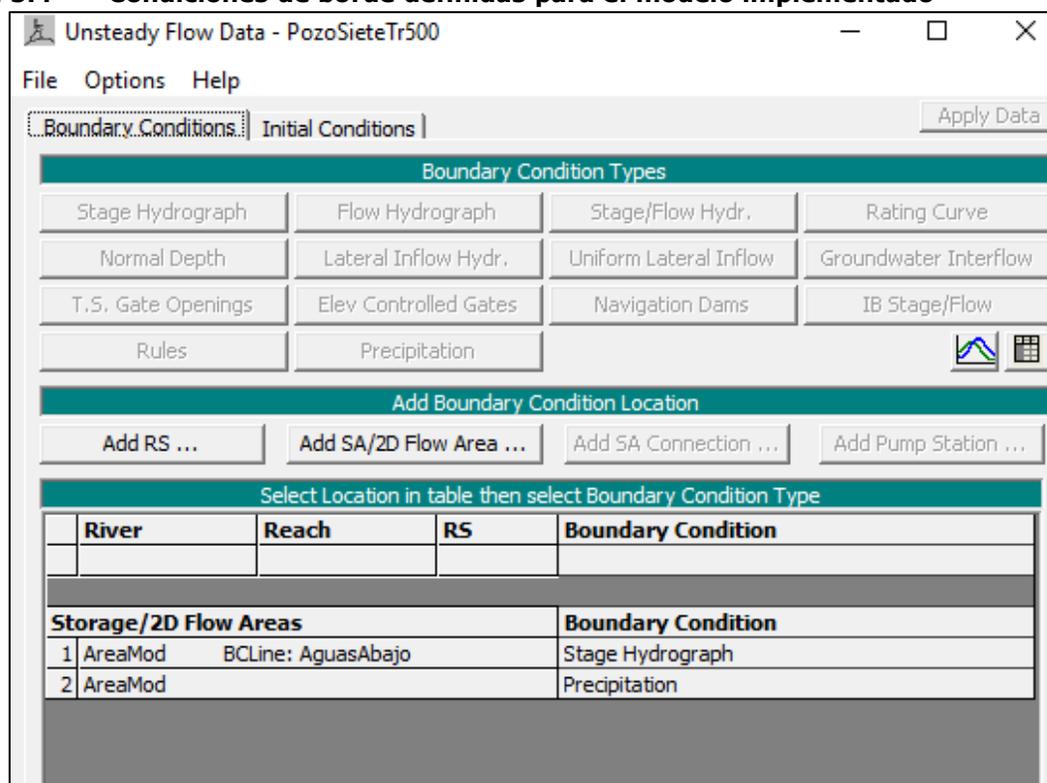
Tabla 5.9 Condiciones de borde en la sección de control del modelo de cada una de las cuencas estudiadas

Cuenca	Cuenca receptora	Nivel descarga
Q. Las Camelias	Ciénaga Miraflores	75,55
Q. Las Lavanderas	Ciénaga Miraflores	75,55
Q. Pozo Siete	Humedal El Castillo	78,83
Q. Zona Expansión	N/A	89,5 ¹
Q. Sin Nombre 1	Ciénaga Juan Esteban	78,83
Q. Sin Nombre 2	Ciénaga El Rosario	75,71
Q. Sin Nombre 3	Ciénaga El Rosario	75,71
Q. Sin Nombre 4	Ciénaga El Rosario	75,71

¹Barrancabermeja (2014) – Corresponde al nivel de creciente sobre la estructura hidráulica, la cual presenta insuficiencia

Cuenca	Cuenca receptora	Nivel descarga
Q. Sin Nombre 5	Ciénaga San Silvestre	76,13
Q. Sin Nombre 6	Ciénaga San Silvestre	76,13
Q. Sin Nombre 7	Ciénaga San Silvestre	76,13
Q. Sin Nombre 8	Ciénaga San Silvestre	76,13
Q. Sin Nombre 9	Ciénaga San Silvestre	76,13

Figura 5.4 Condiciones de borde definidas para el modelo implementado



5.3.3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados de profundidad y velocidad de flujo estimados para las crecientes asociadas a períodos de retorno de 10, 100 y 500 años en algunas de las quebradas estudiadas.

En el capítulo de zonificación se presentan los resultados consolidados de todos los modelos hidráulicos implementados para las cuencas estudiadas, así como las inundaciones esperadas para los cuerpos de área lénticos (ciénagas y humedales)

Figura 5.5 Profundidad de inundación para una creciente asociada a un período de retorno de 10 años en la quebrada Pozo Siete

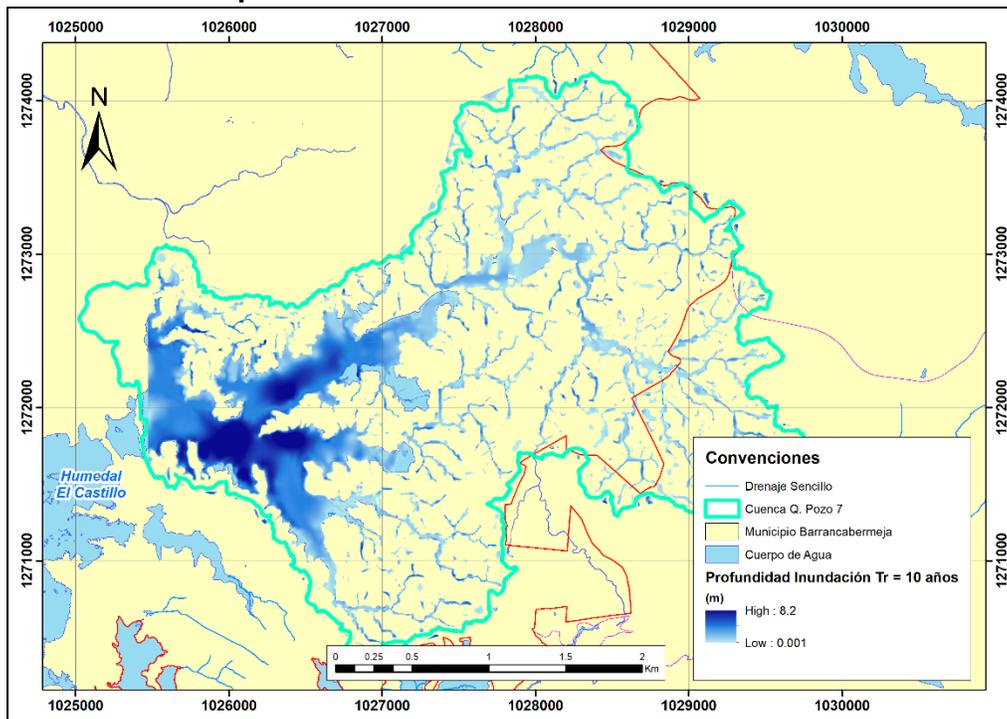


Figura 5.6 Velocidades de flujo para una creciente asociada a un período de retorno de 10 años en la quebrada Zona de Expansión

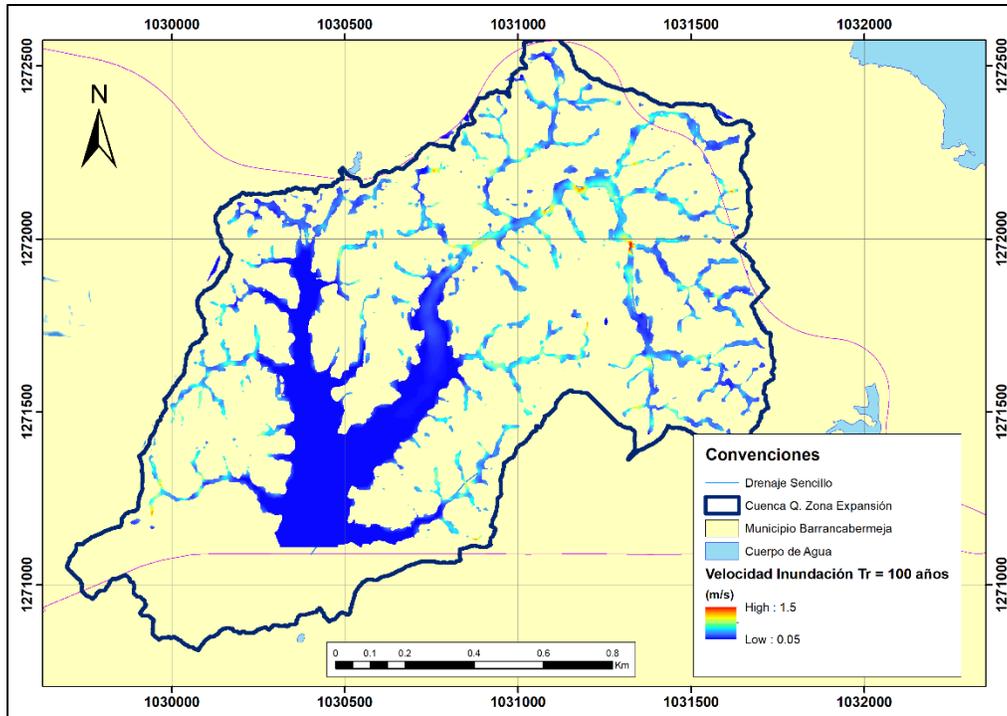


Figura 5.7 Profundidad de inundación para una creciente asociada a un período de retorno de 500 años en las quebradas Sin Nombre 6, 7, 8

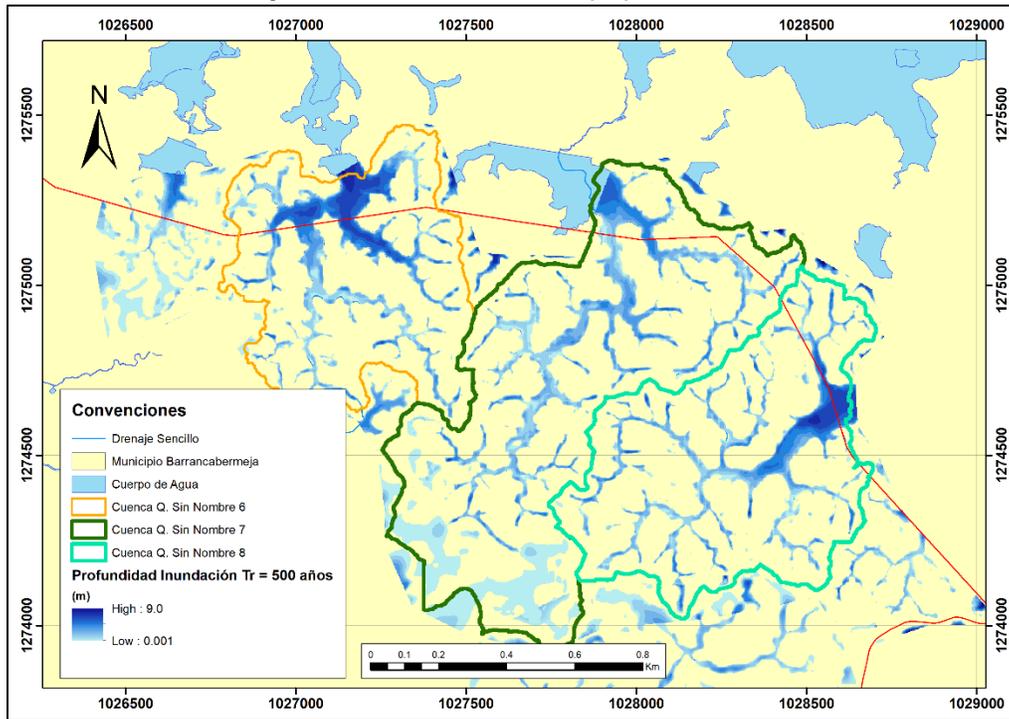
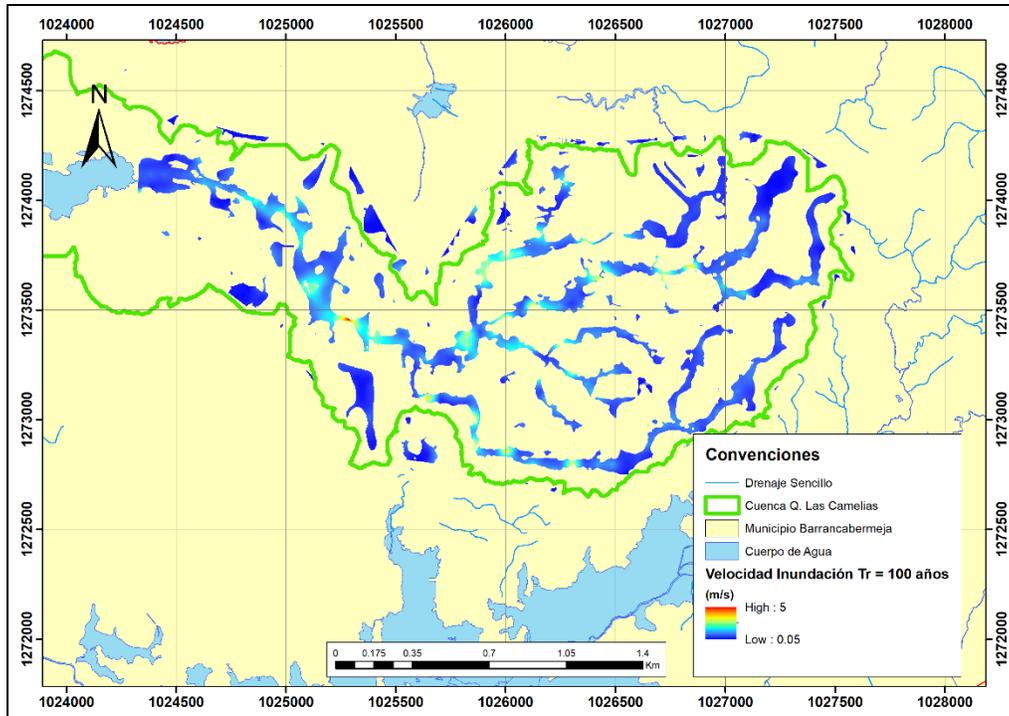


Figura 5.8 Velocidades de flujo para una creciente asociada a un período de retorno de 100 años en la quebrada Las Camelias



Vale la pena aclarar que, dada la naturaleza del modelo, tiende a generar zonas de encharcamiento donde posiblemente no existen, por lo tanto, se realiza una inspección

visual, contrastado con fotografías aéreas y el modelo de elevación, eliminando datos erróneos.

6 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA

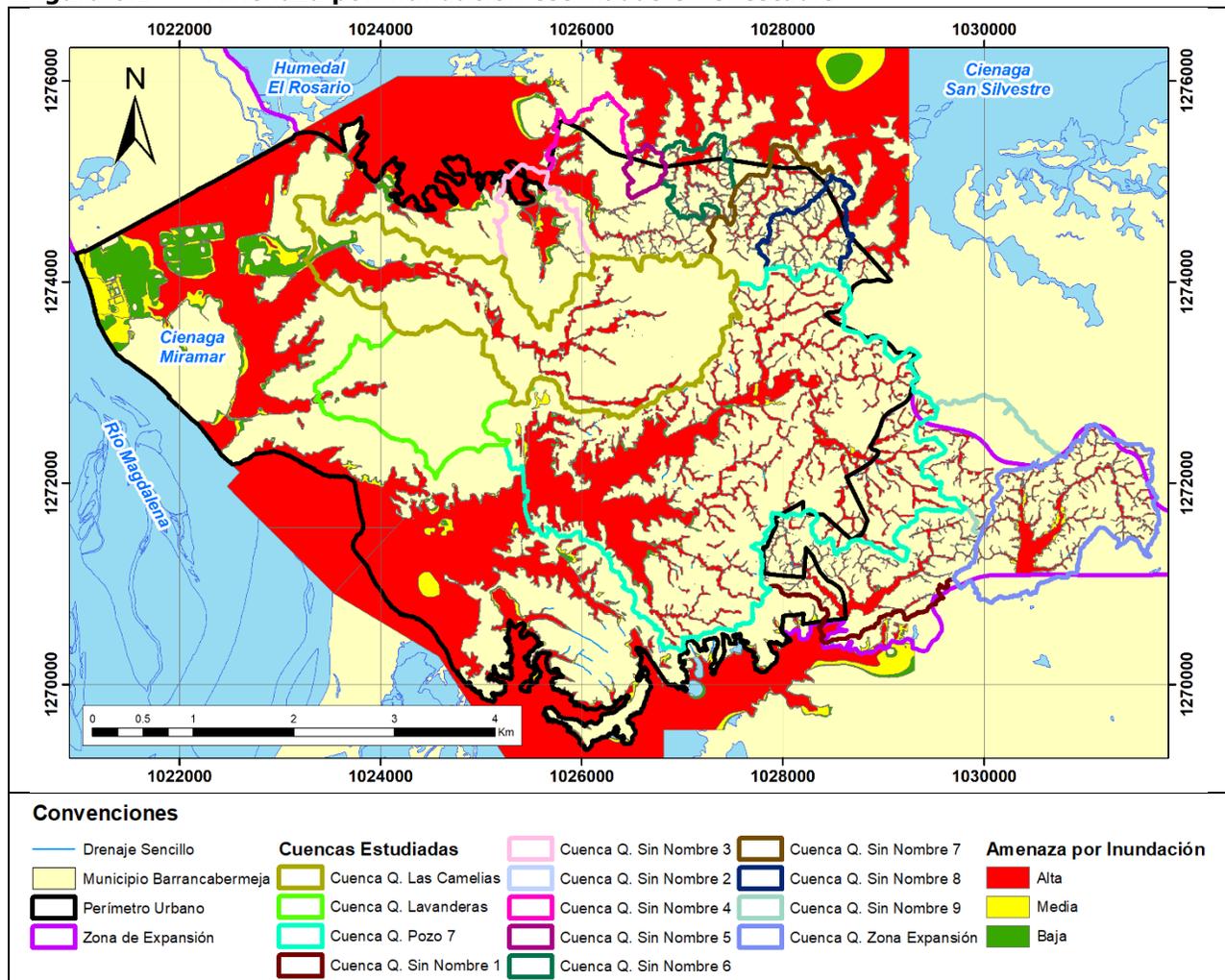
Con base en los criterios de definidos para la zonificación de la amenaza definidos en la sección 4.3, y resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 6.1 Categorización de amenaza por inundación

Categoría de Amenaza	Descripción de la inundación
Alta	Probabilidad de ocurrencia alta. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno menor que 10 años.
Media	Probabilidad de ocurrencia media. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno entre 10 y 100 años.
Baja	Probabilidad de ocurrencia baja. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno entre 100 y 500 años.
Nula	Probabilidad de ocurrencia baja. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno mayor que 500 años.

En la Figura 6.1 se muestra el mapa de amenaza por inundación calculado en el presente estudio.

Figura 6.1 Amenaza por inundación estimadas en el estudio



A continuación, se presenta un resumen de los barrios con un porcentaje de cobertura de más del 30% con amenaza alta por inundación, a los cuales se les debe hacer un énfasis especial en los estudios posteriores, sin desconocer las problemáticas que se puedan identificar en otros sectores del municipio.

Tabla 6.2 Barrios en condición crítica por amenaza de inundación

Ame>80%	80>Ame>50%	50>Ame>40%	40>Ame>30%
Arenales	El Dorado	Inv. Nuevo Milenio	El Limonar
San Francisco	Marsella	Ramaral	Villa Nueva
Campo Hermoso	Tres Unidos	Yariguies	Candelaria
Urb. El Refugio	Inv. El Jordán	Jerusalén	La Victoria
20 de Enero	Lagos II	Sector Comercial	Prados del Cincuentenario
La Playa	Cardales	Santa Isabel	Kennedy
Coviba	Isla del Zapato	El Palmar	Simón Bolívar
Inv. Los Nogales	Las Brisas	Antonia Santos	Urb. Los Lagos
			Inv. La Gran vía
			Altos de Cañaveral
			Brisas del Oriente

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se caracterizaron los eventos históricos de inundación en el área urbana con base en los registros disponibles en información documental del municipio y del UNGRD; encontrando un total de eventos 100 registrados; los barrios que más ocurrencias de eventos de inundación reportan son:

- Arenales (7), Cardales (7), El Dorado (7), Las Playas (7), Belén (5), David Núñez (5), Jerusalén (5), La Victoria (5), Campo Galán-Termo Galán (5), Buenos Aires (4), 20 de Agosto (4), El Palmar (3), y San Francisco (3).

Adicionalmente, se realiza varios recorridos de campo en los cuales se registra la problemática asociada a eventos de inundación en 86 sitios distribuidos en el área urbana del municipio. Encontrando que, en 44 de ellos, la comunidad manifiesta haber estado expuesta a eventos de inundación, en 31 las comunidades manifiestan que nunca han sido afectados por este tipo de eventos y 28 de ellos es incierto si se presenta o no esta problemática.

Se realiza un estudio de susceptibilidad a eventos de inundación con base las unidades geomorfológicas, identificando zonas más propensas a eventos de inundación, sin embargo, por el enfoque planteado para el desarrollo de este estudio, no se focaliza la modelación en dichas zonas (mayor rigor al momento de revisar los resultados), sino que se propone una metodología que permita identificar la amenaza en toda la extensión del territorio.

El territorio se dividió en 14 microcuencas, a saber:

- Quebrada Pozo Siete
- Quebrada Las Camelias
- Quebrada Las Lavanderas
- Quebrada Zona de Expansión
- Quebrada Sin Nombre (del 1 al 9)

Las cuales cubren la totalidad del área urbana del municipio. Para cada una de estas se definieron los tiempos de concentración con base en sus parámetros morfométricos. Se estimó la tormenta que genera el caudal máximo asociado a diferentes períodos de retorno mediante la ecuación del método racional.

La extensión de la inundación máxima asociada a diferentes períodos de retorno en los cuerpos de aguas lénticos (ciénagas y humedales), se definió con base en los niveles estimados en el Volumen I de este trabajo.

Para cada una de las microcuencas estudiadas se implementa un modelo hidráulico de simulación 2D desacoplado, el cual se alimenta con las precipitaciones máximas estimadas. Las condiciones de borde de salida del modelo corresponden a los niveles máximos asociados a un período de retorno de 100 años, en los cuerpos de aguas lénticos.

La zonificación de la amenaza por eventos de inundación se realizó con base en un criterio probabilístico, según el cual se define una amenaza alta para las zonas que se inundan debido a la ocurrencia de eventos con una recurrencia menor que 10 años, amenaza media para zonas que se inundan debido a eventos de inundación con un período de retorno entre 10 y 100 años y las zonas de amenaza alta son aquellas que se inundan durante las crecientes con una recurrencia de entre 100 y 500 años.

Con base en los mapas de zonificación de la amenaza por inundación se identifican barrios en condición crítica por amenaza de inundación, los cuales deben ser estudiados con mayor

detalle en las fases posteriores de estudio, sin desconocer la importancia de las demás problemáticas específicas en diferentes puntos del área urbana del municipio.

El estudio de susceptibilidad define que no se encuentran amenazas por avenidas torrenciales en el área urbana del municipio.

8 BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA BARRANCABERMEJA. (2002). Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Barrancabermeja.

ALCALDÍA BARRANCABERMEJA. (2014). Estudios básicos de amenaza por fenómenos de remoción en masa e inundación para el área de expansión urbana sur este del municipio de Barrancabermeja.

ALCALDÍA BARRANCABERMEJA. (2015). Metodología y proceso de incorporación de la gestión del riesgo en la revisión excepcional de POT, según lineamientos del decreto 1077 de 2015, con base en estudios básicos de amenaza por inundación y movimientos en masa en la zona urbana y de expansión de la ciudad de Barrancabermeja.

CHOW, Ven Te. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Santafé de Bogotá: McGraw Hill.

INGETEC S.A. (2013). Diagnóstico Área de Concesión Portuaria para el Puerto Impala Barrancabermeja S.A.

INTEGRAL S.A. (2012). Estudio Hidrológico para Process Consultants - Proyecto de Modernización Refinería Barrancabermeja.

INTEGRAL S.A. (2013). Diseño conceptual de un dique para evitar inundaciones en los barrios Coviba, 20 de Enero y campo hermoso en el municipio de Barrancabermeja.

UNAL & IDEAM. (2013). Zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:2.000 y 1:5.000 en áreas urbanas para diez municipios del territorio colombiano.