

**ANALISIS DE AMENAZA POR INUNDACION Y DIAGNOSTICO DEL SISTEMA DE DRENAJE URBANO DE LA CABECERA MUNICIPAL DE CLEMENCIA, BOLIVAR.**



**Universidad  
de Cartagena**

Fundada en 1827

**EMIR ANDRES CAÑAVERAS QUEVEDO**

**ANDRES FELIPE PEREZ BARRIOS**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Cartagena De Indias D. T. Y C.**

**2018**



**ANÁLISIS DE AMENAZA POR INUNDACION Y DIAGNOSTICO DEL SISTEMA DE DRENAJE URBANO DE LA CABECERA MUNICIPAL DE CLEMENCIA, BOLIVAR.**

**INVESTIGADORES:**

**EMIR ANDRES CAÑAVERAS QUEVEDO**

**ANDRES FELIPE PEREZ BARRIOS**

**DIRECTOR:**

**JAVIER MOUTHON BELLO, PhD**

**Ingeniero Civil**

**Grupo de Investigación:**

**GIHMAC**

**Línea de Investigación:**

**Manejo Hidráulico y Ambiental de la Zona Costera y Fluvial**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS, D. T y C.**

**2018**

## AGRADECIMIENTOS

### **Emir Andrés Cañaveras Quevedo:**

En primer lugar, le doy las gracias a Dios, por haberme permitido alcanzar el tan anhelado objetivo; ser ingeniero civil, brindándome en el camino, sabiduría, paciencia, esperanza y experiencia de cada momento vivido.

A mi familia, por siempre estar unida, por siempre estar presente en cada momento de mi formación como persona; siendo la base de mi ser. Por ser esa autentica familia provinciana, que siempre está dispuesta a apoyarte cuando la necesitas y que siempre tiene presente el costumbrismo, la cultura, el arte y el amor suficiente para darle sentido a la vida.

A mi director de tesis, el profesor Javier Mouthon Bello y mis evaluadores, los profesores Ramón Andrade y Alfonso Arrieta, por su sabiduría, amabilidad y disponibilidad a la hora de guiarme en cada nueva experiencia de aprendizaje, por motivarme a seguir adelante con la investigación y por ser referentes en mi carrera profesional y científica.

A cada uno de mis profesores, compañeros y amigos, ya que de una u otra forma contribuyeron con mi desempeño y conocimiento, y por cada momento de vida compartido que siempre recordaré.

**Andrés Felipe Pérez Barrios:**

A Jehová Dios por qué sin su ayuda nada de esto hubiese sido posible, gracias a su apoyo se pudo lograr esta meta. A mis padres, Milton y Nelcy por qué son un apoyo día a día, y ven siempre lo mejor de mí, sus consejos y disciplina han hecho de no lo que hoy soy. A mis hermanos, Milton y Adriana por su ejemplo de trabajo y perseverancia, que me ha mostrado que con trabajo duro y empeño es posible salir de problemas y cumplir objetivos. A mis docentes por su instrucción y aporte de conocimiento en este trayecto. A mí director por sus aportes, su experiencia, apoyo y tiempo que lograron hacer de este un gran trabajo. A todos los que a lo largo de este camino han contribuido de maneras simples pero significativas que han sido tantos que tardaría en mencionar. A todos ellos solo puedo decir GRACIAS



CONTENIDO

INTRODUCCION .....	13
1 MARCO DE REFERENCIA.....	17
1.1 Marco Teórico .....	17
1.1.1 Amenazas Naturales .....	17
1.1.2 Fenómenos Naturales .....	17
1.1.3 Precipitación.....	18
1.1.4 Gestión de riesgos .....	19
1.1.5 Amenazas Inundación .....	21
1.1.6 Vulnerabilidad.....	21
1.1.7 Curvas IDF .....	22
1.1.8 Morfometria de Cuencas. ....	23
1.1.9 Estudio hidráulico .....	30
1.2 MARCO LEGAL.....	41
1.3 JUSTIFICACION PROGRAMA DE SIMULACION.....	43
1.3.1 HEC- RAS.....	43
1.4 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE. ....	47
2 OBJETIVOS .....	60
2.1 GENERAL.....	60
2.2 ESPECÍFICOS.....	60



3	ALCANCE.....	61
4	METODOLOGÍA .....	64
4.1	METODOLOGÍA 1. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA A PARTIR DE DATOS HISTÓRICOS APORTADOS POR LAS COMUNIDADES.....	66
4.1.1	Etapa 1. Búsqueda inicial de documentación histórica.....	66
4.1.2	Etapa 2. Recolección de información histórica mediante el uso de herramientas participativas con comunidades. ....	67
4.1.3	Etapa 4. Construcción de la mancha de inundación.....	78
4.1.4	Etapa 5. Clasificación de la inundación. ....	78
4.2	METODOLOGÍA 2. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO .....	81
4.2.1	Etapa 1. Recolección de información.....	81
4.2.2	Etapa 2. Determinación de los caudales máximos, períodos de retorno y niveles de inundación.....	84
4.2.3	Etapa 3. Estimación de las manchas de inundación.....	85
4.3	COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN .....	85
4.4	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA .....	86
4.4.1	Análisis hidrológico de la amenaza.....	87
4.4.2	Análisis hidráulico de la amenaza.....	107
4.4.3	Análisis de la amenaza de inundación en la llanura inundable. ....	113
4.4.4	Evaluación final de la amenaza.....	114



4.5	MEDIDAS DE INTERVENCION PROPUESTAS.....	116
5	RESULTADOS.....	117
5.1	PRECIPITACION .....	117
5.1.1	Curvas IDF .....	117
5.1.2	Relación de las intensidades por los 3 métodos .....	134
5.1.3	Hietogramas de diseño. ....	135
5.1.4	Caudales maximos estimados.....	136
5.2	RESULTADOS METODOLOGÍA 1. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA A PARTIR DE DATOS HISTÓRICOS APORTADOS POR LAS COMUNIDADES .....	139
5.2.1	Construcción de la mancha de inundación.....	139
5.2.2	Clasificación de la inundación. ....	142
5.3	RESULTADOS METODOLOGÍA 2. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO .....	144
5.3.1	Estimación de encharcamiento por precipitación máxima.....	144
5.3.2	Estimación de llanura de inundación por Arroyos .....	146
5.4	COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN .....	149
5.5	DIAGNÓSTICO DEL DRENAJE Y ZONAS DE AMENAZA URBANA.....	151
5.6	MEDIDAS DE INTERVENCION PROPUESTAS.....	152
5.6.1	Propuesta para Arroyos. ....	152
5.6.1	Propuesta para Tramos de Vías.....	154



6	CONCLUSIONES.....	159
7	RECOMENDACIONES.....	162
8	Bibliografía.....	164
	ANEXOS.....	170
	ANEXO A. HIETOGRAMAS DE DISEÑO.....	170
	ANEXOS B. HIDROGRAMAS DE DISEÑO.....	173
	ANEXO C. RESULTADOS MODELAMIENTO HIDRAULICO HIDROLOGICO.....	178
	ANEXO D. AMENAZA POR CAPACIDAD HIDRAULICA DE VIAS.....	193
	ANEXO E. CALCULO DE CAPACIDAD HIDRAULICA DE VIAS (CD).....	199
	ANEXO F. PLANO DE PROYECCION DE LOS SUMIDEROS SOBRE TRAMOS DE VIAS AMENAZADOS POR INUDACION PLUVIOMETRICA.....	200





## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Periodos de Retorno recomendados según el grado de protección del sistema. ....	25
Tabla 2 Coeficientes de impermeabilidad, según tipo de superficie Fuente: .....	27
Tabla 3. Velocidad de salpicadura sobre varios tipos de rejilla. ....	38
Tabla 4.Grupo hidrológico del suelo.....	39
Tabla 5. Numero de curva por tipo de suelo. ....	40
Tabla 6. Clasificación de las inundaciones adaptada .....	79
Tabla 7. Continuación de Ilustración 6. ....	80
Tabla 8 Características morfométricas de la zona de estudio. ....	96
Tabla 9. Determinación del Número de Curva, de la zona de estudio.....	98
Tabla 10 Estaciones escogidas, adyacentes al área de estudio.....	98
Tabla 11 Ejemplo de Homogenización por método de proporciones normales.. ....	100
Tabla 12. Informe meteorológico histórico de la estación BAYUNCA. ....	102
Tabla 13 Informe meteorológico histórico homogenizado de la estación “BAYUNCA” .....	103
Tabla 14. Escala de amenaza desarrollada para la metodología RPIU .....	115
Tabla 15 Precipitación máxima anual, estación pluviométrica Bayunca.....	119
Tabla 16. Precipitación máxima diaria probable para T distintos .....	121
Tabla 17. Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración de 24 horas .....	123
Tabla 18. Producto precipitación y coeficiente de duración. ....	123
Tabla 19. Intensidad de la lluvia, según el periodo de retorno. ....	124
Tabla 20 Variables para estimación del valor de la regresión para T=2 años.....	125
Tabla 21. Resumen de aplicación de regresión potencial .....	126
Tabla 22. Variables de regresión potencial para T= 2 años. ....	127



Tabla 23. Intensidades vs Tiempo de duración .....	128
Tabla 24. Constantes de regresión.....	129
Tabla 25. Intensidades vs Tiempo de duración .....	130
Tabla 26 Coeficientes de la ecuación general de intensidades para estación Aeropuerto Rafael Núñez. ....	131
Tabla 27. Intensidades vs Tiempo de duración .....	132
Tabla 28. Intensidades vs Tiempo de duración (usando Ecuación actualizada por IDEAM) .....	133
Tabla 29. Relación de Intensidades Chang/Diazgranados. ....	134
Tabla 30. Relación de Intensidades Chang/IDEAM .....	134
Tabla 31. Relación de Intensidades Diazgranados/IDEAM .....	134
Tabla 32. Promedio de Intensidades .....	135
Tabla 33. Diseño para estabilidad. ....	153
Tabla 34. Diseño para capacidad máxima. ....	153
Tabla 35 Tramo de ubicación y tipo de sumidero recomendado .....	155
Tabla 36 Continuación Tramo de ubicación y tipo de sumidero recomendado.....	156
Tabla 37 Continuación Tramo de ubicación y tipo de sumidero recomendado.....	157



## **LISTA DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Parámetros Hidráulicos de una vía.....	36
Ilustración 2. Flujos del Cauce y los lechos de Creciente.....	44
Ilustración 3. Ubicación espacial del área de estudio.....	61
Ilustración 4. Planteamiento metodológico de la investigación, adaptada de (S.G. C.) .....	65
Ilustración 5. Viviendas encuestadas. ....	68
Ilustración 6. Nivel de profundidad estimado por información obtenida, georreferenciada con QGIS.....	69
Ilustración 7. Proyección del transecto, sobre el arroyo arena, Clemencia, Bolívar.....	71
Ilustración 8. Modelo digital de elevación usado para la modelación, visualizado con QGIS .....	82
Ilustración 9. Geovisor institucional del IDEAM. ....	83
Ilustración 10. Fotomapa del Municipio de Clemencia, Bolívar.. ....	89
Ilustración 11. Conformación de Subcuencas de los arroyos.....	90
Ilustración 12. Conformación de Subcuencas de los arroyos.....	91
Ilustración 13. Diferencia en la estimación de las Subcuencas por los dos métodos.....	91
Ilustración 14. Obtención de áreas aferentes de cada tramo de vía urbana.....	92
Ilustración 15. Curvas de nivel de la zona de estudio; formadas a través de Global Mapper.....	93
Ilustración 16. Curvas de nivel de la zona estudiada. ....	94
Ilustración 17. Cuerpos de agua adyacentes a la población.. ....	95
Ilustración 18. Proyección de las Cuencas sobre el Atlas geológico de Colombia .....	97
Ilustración 19. Polígono de Thiessen. ....	101
Ilustración 20. Construcción del sistema Geométrico, proyección de sección transversal sobre D.E.M. ....	109



Ilustración 21. Construcción del sistema Geométrico, proyección de sección transversal sobre D.E.M. ....	109
Ilustración 22. Dato Geométrico, vista isométrica del arroyo Arena. ....	110
Ilustración 23. Adaptación del perfil de terreno en el D.E.M. a través de HEC RAS. ....	110
Ilustración 24. Gráfico para la obtención de niveles de severidad en inundación pluvial .....	115
Ilustración 25. Modelo Hidrológico de las Cuencas Arena y Hormiguero en HEC HMS. ....	137
Ilustración 26. Puntos informados de la población .....	140
Ilustración 27. Estimación de la mancha Histórica de inundación por información de la comunidad. ....	141
Ilustración 28 Mancha de encharcamiento por precipitación máxima para T =2años. ....	145
Ilustración 29. Mancha de inundación para T=2años, inducida por arroyos. ....	147
Ilustración 30. Tirante para un T=2 años en sección transversal del arroyo Arena. ....	148
Ilustración 31. Comparación de mancha de inundación en el casco urbano. ....	150
Ilustración 32 Amenaza urbana por Capacidad hidráulica de vías para T =2años .....	151
Ilustración 33. Estimación del nivel del flujo para la sección recomendada con T=50años.....	154
Ilustración 34. Propuesta de distribución de sumideros sobre el casco urbano. ....	158

## **RESUMEN**

En esta investigación se llevó a cabo el análisis de amenaza por inundación y el diagnóstico del sistema de drenaje urbano, como herramienta de apoyo para la gestión del riesgo y ordenamiento territorial de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar, Colombia. El estudio se basó en dos metodologías de evaluación: una a partir del trabajo con la comunidad y otra a partir del modelamiento hidrológico e hidráulico, teniendo como enfoque la incidencia de caudales de los arroyos Arena y Hormiguero y el flujo en las calles de la población.

En la metodología que implica el trabajo con la comunidad, se realizaron encuestas a las poblaciones afectadas por inundaciones, en las que se determinó el nivel de afectación de la comunidad para así determinar el comportamiento natural de las inundaciones. La metodología que trata de la modelación hidrológico-hidráulica partió de información obtenida por fuentes como el IDEAM, IGAC, SGC y la NASA, esta información, comprendió informes de precipitación, información del uso del suelo, proyección de cuerpos de agua, características estratigráficas del suelo y un modelo digital de elevación (D.E.M.); el cual fue indispensable en la conformación del modelo lluvia-escorrentía, conformado sobre la base de un sistema de información geográfica.

De acuerdo con los datos obtenidos por el trabajo con la población se determinó que históricamente el 65% de las viviendas encuestadas han sufrido inundaciones ordinarias o leves, el 26% extraordinaria o moderada y el 9% de estas inundaciones catastróficas o desastrosas.

Por medio de la modelación hidrológico-hidráulica se determinó que existe relación entre las manchas de inundación correspondientes a los periodos de retorno estudiados y la mancha de inundación histórica, se observó que la mancha de inundación que más similitud mantiene con la histórica es la correspondiente a un periodo de retorno de 10 años con una diferencia del 7.2% de área inundada, entre las dos. Además, se estimó que las láminas de agua generan inundaciones en el 11,2% y 38,4% del área urbana, para periodos de retorno de lluvias entre 2 y 100 años, respectivamente.



Por último, se proponen alternativas de solución para mitigar los efectos de la inundación por incapacidad hidráulica de arroyos y vías.

## **ABSTRACT**

In this research, the flood threat analysis and the diagnosis of the urban drainage system were carried out, as a support tool for risk management and territorial ordering of the municipal capital of Clemencia, Bolívar, Colombia. The study was based on two evaluation methodologies: one based on work with the community and the other based on hydrological and hydraulic modeling, focusing on the incidence of flows from the Arena and Hormiguero streams and the flow in the streets of the population.

In the methodology that implies the work with the community, surveys were carried out to the populations affected by floods, in which the level of affectation of the community was determined in order to determine the natural behavior of the floods. The methodology dealing with hydrological-hydraulic modeling was based on information obtained by sources such as IDEAM, IGAC, SGC and NASA, this information included precipitation reports, land use information, water bodies projection, stratigraphic characteristics of the ground and a digital elevation model (DEM); which was indispensable in the conformation of the rain-runoff model, formed on the basis of a geographic information system.

According to the data obtained from the work with the population, it was determined that historically 65% of the dwellings surveyed have suffered from ordinary or minor floods, 26% extraordinary or moderate floods and 9% of these catastrophic or disastrous floods.

By means of hydrological-hydraulic modeling, it was determined that there is a relationship between the flood spots corresponding to the return periods studied and the historical flood spot; with a difference of 7.2% of flooded area, with a spot corresponding to a return period of 10 years. In addition, it was estimated that the sheets of water have an incidence between 11.2% and 38.4% of the urban area, for periods of return of rainfall between 2 and 100 years, respectively.

Finally, alternative solutions are proposed to mitigate the effects of flooding due to hydraulic incapacity of streams and roads.



## **INTRODUCCION**

En Colombia, con el transcurrir de cada periodo invernal, se hace patente la fragilidad de los sistemas de prevención y control de inundaciones, siendo la población de zonas rurales la más afectada, pues es tendencia general, centrar esfuerzos en la atención de necesidades propias de grandes ciudades pertenecientes al casco urbano de la población por encima de las comunidades rurales. Por tal razón, resulta ventajoso para estas poblaciones la realización de estudios que permitan analizar la vulnerabilidad que presentan a fenómenos relacionados con la afectación que sufren cuando se enfrentan año tras año a la temporada invernal propia del país. Hay que tener en cuenta que cualquier lugar con precipitaciones es vulnerable, aunque la lluvia no es el único impulsor de las inundaciones (Geographic, 2010). Una inundación se da cuando se presenta la ocupación por parte del agua a zonas o regiones que habitualmente se encuentran secas. Normalmente es consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que puede drenar el propio cauce del río, aunque no siempre es este el motivo. Las inundaciones se producen por diversas causas (o la combinación de éstas), pueden ser causas naturales como las lluvias, oleaje o deshielo o no naturales como la rotura de presas, por ejemplo (GAMA, 2015-2016).

Resulta importante destacar que las inundaciones se desarrollan en terrenos donde este fenómeno es recurrente. A pesar de esto, causan pérdidas que se pueden prevenir con la predicción meteorológica y una buena planificación urbanística. Pero sobre todo es trascendental comprender que el agua tiende a pasar por dónde transcurre su camino natural y que por tanto se deben respetar al máximo los cursos de agua y las formas de los mismos. Además, cuanto más natural se conserva el entorno menos daños causará (GAMA, 2015-2016).

El manejo del recurso hídrico es un problema que afecta a todos los países de forma similar. En los Estados Unidos, por ejemplo, donde el sistema de pronóstico y atenuación de inundaciones está muy desarrollado, estos fenómenos pueden llegar a causar 6 mil millones de dólares en daños y matar cerca de 140 personas al año. En un informe elaborado por la OCDE en el 2007, se descubrió que las inundaciones costeras representan 3 billones de



dólares en daños en todo el mundo. En el valle del río Amarillo de China, donde han ocurrido algunas de las peores inundaciones del planeta, millones de personas han fallecido por esta causa durante el último siglo (Geographic, 2010).

En Colombia también se efectúan planes y se desarrollan proyectos enfocados al manejo y la gestión de riesgos de desastres, entre ellos las inundaciones. De hecho, el Gobierno Nacional por medio de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres –UNGRD- y la articulación con organismos internacionales, como la Agencia de Cooperación Internacional JICA, llevan a cabo el proyecto de “Fortalecimiento de la capacidad de manejo del riesgo de inundaciones”. El proyecto que tiene una vigencia de tres años (2014-2017) y cuyo objetivo es, fortalecer las capacidades de las instituciones colombianas para la gestión del riesgo de inundaciones, cuenta con grandes avances que permite que Colombia sea modelo en la implementación de protocolos y estrategias para reducir la vulnerabilidad de las comunidades ante las inundaciones (Colombia U. N., 2016).

Clemencia, ubicado en el departamento de Bolívar, es un municipio susceptible a estos fenómenos. En su cabecera municipal se han presentado a través del tiempo problemas por inundaciones causadas principalmente por el efecto de las lluvias en las estructuras de control las cuales ven rebasada su capacidad con relativa facilidad. Históricamente se pueden identificar, según lo expuesto por la (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2012), que la zona de la cabecera municipal, más vulnerable a inundaciones la comprenden los barrios: 13 de junio, Laguito y Bello Horizonte. Aparte de estas zonas se encuentran arroyos efímeros (se presentan en temporada de invierno), que aportan caudales de escorrentía que ponen en riesgo a la comunidad, cuando ocurren fuertes precipitaciones, entre estos: Arroyo el Hormiguero y Arroyo Arena; cabe resaltar que las actividades antrópicas han generado pérdida en su capacidad hidráulica.

Este proyecto de investigación estuvo enmarcado dentro del grupo de investigación GIHMAC, de la Universidad de Cartagena, en la línea de investigación de Manejo hidráulico y ambiental de la zona costera y fluvial, presenta un análisis enfocado al manejo del flujo de escorrentía superficial en las cuencas de los arroyos Arena y Hormiguero, esto a partir de las características del lugar que fue objeto de estudio y la información hidrológica disponible.





En esta investigación se plantearon resolver preguntas como:

¿Bajo qué características un evento de precipitación incide considerablemente en la superficie urbana, tanto como para generar inundaciones y poner en riesgo el patrimonio de los pobladores?

¿Qué sectores serían los más afectados al presentarse un evento de precipitación que ponga en estado de amenaza a la comunidad?

¿Cuál es la perspectiva actual, física y operativa del sistema de drenaje pluvial urbano, frente a eventos de precipitación con periodos de retorno críticos?

¿Es necesario determinar medidas de intervención para reducir la amenaza?

Para resolver las anteriores preguntas de investigación se propuso la modelación del comportamiento hidráulico-meteorológico de la zona de estudio y su influencia directa en las zonas aledañas.

De acuerdo a lo anterior, el objetivo de este proyecto fue determinar las zonas de afectación y los niveles de lámina de agua por inundación pluvial en el área urbana de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar, con el fin de asignar el nivel de amenaza por inundaciones pluviales, que presenta cada sector de la zona estudiada y el diagnóstico de su sistema de drenaje, teniendo en cuenta principalmente, el conocimiento local de los pobladores, el informe pluviométrico de la estación “BAYUNCA” dispuesto por el IDEAM y la topografía representada en el modelo digital de elevación con código AP\_26958\_FBS\_F0190\_RT.dem, producto de METI y NASA.

La información junto con los parámetros recolectados en campo fue procesada a través de los softwares HEC RAS®, HEC HMS® y QGIS®, que permitieron determinar los puntos y niveles de inundación en seis escenarios (Periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, y 100 años) para establecer si el actual sistema de drenaje urbano es suficiente para acarrear los caudales de esorrentía, o si se requieren obras de mitigación para reducir la amenaza de inundación

A partir de las proyecciones estimadas con los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, y 100 años se determinó que los picos de los hietogramas correspondían a precipitaciones de 15.90,



18.44, 20.62, 23.90, 26.73, 29.89 mm y a intensidades de 190.84, 221.23, 205.47, 247,39, 286.79, 320.71, 358,64 mm/h, además el porcentaje de áreas inundadas correspondía a 11,2, 16,7, 20,5, 28,4, 34,3, y 38,4% respectivamente. Con la proyección del periodo de retorno de 50 años para la cuenca rural, se determinó que el tramo K1+421 y K2+241, del arroyo Arena, entre el barrio La Paz y Calle Franco, debe ser intervenido, para aumentar su capacidad hidráulica, y con la proyección del periodo de retorno de 2 años para la cuenca urbana, se determinó que 89 tramos de vías no contaban con la capacidad hidráulica suficiente, para acarrear el caudal de escorrentía. Como alternativa de solución para evitar que ocurran estos eventos se sugieren estrategias inmediatas y de mediano a largo plazo, sin tener en cuenta factibilidad y viabilidad de estas soluciones.

Por otro lado, es importante destacar que las alternativas de solución a la problemática por inundación, asociadas a la Ingeniería Civil, tienen gran impacto en las comunidades, por ende, contar con la información brindada con este proyecto sería de gran importancia para predicciones y toma de decisiones.

## **1 MARCO DE REFERENCIA**

### **1.1 Marco Teórico**

Con el fin de realizar un correcto análisis de la amenaza por inundaciones, es necesario tener claros los conceptos que se han de investigar y aplicar en el desarrollo de esta problemática.

#### **1.1.1 Amenazas Naturales**

Amenazas naturales. Se definen como “aquellos elementos del ambiente biofísico que son peligrosos al hombre y que están causados por fuerzas extrañas a él”. Los principales estudios realizados sobre amenazas naturales desde los últimos 10 años se han concentrado en Centro América. Diferentes estudios revisados acogen y trabajan el concepto de "amenazas naturales" como a todos los fenómenos atmosféricos, hidrológicos, geológicos (especialmente sísmicos y volcánicos) y a los incendios que, por su ubicación, severidad y frecuencia, tienen el potencial de afectar adversamente al ser humano, a sus estructuras y a sus actividades. Se hace un énfasis en que la condición de "natural" excluye a todos los fenómenos causados exclusivamente por el hombre como la contaminación y los eventos naturales inducidos por el hombre a partir de sus condiciones sociales; exclusión que deja a las investigaciones en curso carentes de otras formas de análisis de la amenaza (Chardon & González, 2002).

#### **1.1.2 Fenómenos Naturales**

Es toda manifestación de la naturaleza. Se refiere a cualquier expresión que adopta la naturaleza como resultado de su funcionamiento interno. Los hay de cierta regularidad o de aparición extraordinaria y sorprendente. Entre los primeros tenemos las lluvias en los meses de verano en la sierra, la llovizna en los meses de invierno en la costa, etc. Ejemplos del segundo caso serían un terremoto, un "tsunami" o maremoto, una lluvia torrencial en la costa peruana, etc. Los fenómenos naturales de extraordinaria ocurrencia pueden ser previsibles o imprevisibles dependiendo del grado de conocimiento que los hombres tengan acerca del funcionamiento de la naturaleza. Por ejemplo, un fenómeno natural como un terremoto de



gran magnitud en las costas del Pacífico es previsible, según los estudios realizados, aunque no se sepa detalles como el día, magnitud o el epicentro. Sin embargo, las lluvias torrenciales que durante varios meses han caído en la costa norte del Perú, provocando crecida de ríos, desbordes, inundaciones, no fueron previsibles por lo menos en términos de su temporalidad. El largo ciclo de recurrencia del Fenómeno del Niño significó que no quedaban recuerdos vivos en la sociedad o en la comunidad científica de eventos anteriores.

La ocurrencia de un "fenómeno natural" sea ordinario o incluso extraordinario (mucho más en el primer caso) no necesariamente provoca un "desastre natural". Entendiendo que la tierra está en actividad, puesto que no ha terminado su proceso de formación y que su funcionamiento da lugar a cambios en su faz exterior, los fenómenos deben ser considerados siempre como elementos activos de la geomorfología terrestre. Así, una lluvia torrencial, los huaycos y avenidas pueden ocasionar erosiones o sedimentaciones cambiando el paisaje natural, pero estos resultados no pueden considerarse desastrosos o catastróficos. El hombre debe aceptar que está conviviendo con una naturaleza viva, que ésta tiene sus propias leyes de funcionamiento contra las cuales no puede atentar, a riesgo de resultar él mismo dañado.

Todo lo anterior nos indica que los efectos de ciertos fenómenos naturales no son necesariamente desastrosos. Lo son únicamente cuando los cambios producidos afectan una fuente de vida con la cual el hombre contaba o un modo de vida realizado en función de una determinada geografía. Inclusive, a pesar de ello, no se podría asociar "fenómeno natural" con "desastre natural". Los fenómenos naturales no se caracterizan por ser insólitos, más bien forman conjuntos que presentan regularidades y están asociados unos con otros (Maskrey, 1993).

### **1.1.3 Precipitación**

Se denomina al proceso mediante el cual el agua contenida en la atmósfera llega a la superficie de la tierra en estado líquido o sólido. Este proceso se presenta como consecuencia de los cambios de presión, temperatura y movimientos de masa, ayudados por minúsculos núcleos de condensación y material sólido en suspensión.

La precipitación incluye la nieve, lluvia y otros procesos como el granizo.



El diámetro de las gotas de agua precipitadas varía entre 0,5mm. y 2,5mm. Si el diámetro es inferior a 0,5mm. La precipitación se llama llovizna. Cuando la precipitación se da a temperaturas menores que cero se denomina escarcha y cuando se da por encima de cero grados se denomina rocío. Cuando la precipitación es sólida y amorfa se denomina granizo, y cuando esta cristalizada se denomina nieve.

La formación de la precipitación requiere la elevación de la masa de agua en la atmosfera de manera tal que se enfríe, y parte de su humedad se condense (Arrieta Pastrana, 2011).

#### **1.1.4 Gestión de riesgos**

La Gestión del Riesgo de Desastres tal como se explicita en la Ley induce un cambio de paradigma en la forma de enfrentar la problemática asociada a los desastres. El enfoque de gestión por procesos permite implementar la gestión en un sentido transversal, e incluye así competencias y actividades que articulan a cada una de las entidades que integran el SNGRD. En un contexto más amplio se parte desde el conocimiento del riesgo de desastres para tomar medidas correctivas y prospectivas de reducción del riesgo y fortalece el proceso de manejo de desastres, el cual no sólo se limita a la atención y a la respuesta, sino a una recuperación que no reproduce las condiciones pre existentes al desastre, sino que conduce a una transformación del escenario de riesgo a un territorio seguro y ambientalmente sostenible.

En términos generales, las transformaciones que se impulsan a través de la Ley son las siguientes:

- La definición del proceso general de la gestión del riesgo de desastres y, en particular, la insistencia en que el mismo “se constituye en 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 territorial sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población”.
- En relación con el tema anterior, tales responsabilidades se resumieron en un objetivo general que establece como obligación para el Sistema “llevar a cabo el proceso social



de la gestión del riesgo con el propósito de ofrecer protección a la población en el territorio colombiano, mejorar la seguridad, el bienestar y la calidad de vida y contribuir al desarrollo sostenible”.

- La definición del proceso de conocimiento del riesgo como aquel compuesto por la identificación de escenarios de riesgo, el análisis y evaluación del riesgo, el monitoreo y seguimiento del riesgo y sus componentes y la comunicación para promover una mayor conciencia del mismo que alimenta los procesos de reducción del riesgo y de manejo de desastres.
- La reducción del riesgo, entendida como el proceso de la gestión del riesgo compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes (mitigación del riesgo) y a evitar la configuración de nuevos riesgos en el territorio (prevención del riesgo). Las medidas de mitigación y prevención que se adopten con antelación tienen el propósito de reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. Los componentes del proceso de reducción del riesgo son: la intervención correctiva del riesgo existente, la intervención prospectiva de nuevos escenarios de riesgo y la protección financiera.
- El manejo de desastres se define como el proceso de la gestión del riesgo que se compone de la preparación para la respuesta a emergencias, la preparación para la recuperación postdesastre, la ejecución de dicha respuesta y la ejecución de la respectiva recuperación la cual comprende: rehabilitación y reconstrucción.

El PNGRD se convierte en una hoja de ruta para todos los actores del Sistema Nacional en cuanto a las acciones que, en materia de gestión del riesgo, deberán ejecutarse en el país en el marco de desarrollo del mediano y largo plazo, se visualiza como un instrumento que se armoniza con los planes de desarrollo, los planes municipales de gestión del riesgo, los planes de ordenamiento territorial y la planificación ambiental del país.

### **1.1.5 Amenazas Inundación**

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas.

En la clasificación más sencilla se pueden identificar dos tipos: Inundaciones lentas, que son las que ocurren en las zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos, los incrementos de nivel diario son de apenas del orden de centímetros, reporta afectaciones de grandes extensiones, pero usualmente pocas pérdidas de vidas humanas, el tiempo de afectación puede fácilmente llegar a ser del orden de meses, en Colombia el ejemplo más claro es la región de la Mojana.

El otro tipo de inundación es las llamadas crecientes súbitas, que aunque las áreas de afectación son menores, el poder destructivo es potencialmente mayor y cobra el mayor número de vidas cuando se presentan, responden rápidamente a la ocurrencia de fuertes precipitaciones en las partes altas de las cuencas, los incrementos de nivel son del orden de metros en pocas horas, y el tiempo de permanencia de estas inundaciones en las zonas afectadas son igualmente de horas o pocos días, estas se presentan en todas las cuencas de alta pendiente de la región Andina principalmente. El IDEAM cuenta en la actualidad con mapas de amenaza por inundación a diferentes escalas desde nacionales (1:500.000 y 1:100.000) hasta escalas locales (1:5.000) para algunas aéreas piloto seleccionadas. (IDEAM, 2011).

### **1.1.6 Vulnerabilidad**

De manera general y como introducción, se puede decir que la vulnerabilidad corresponde a la probabilidad de que una comunidad, expuesta a una amenaza natural, tecnológica o antrópica más generalmente, según el grado de fragilidad de sus elementos (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta, desarrollo político institucional entre otros), pueda sufrir daños humanos y materiales en el momento



del impacto del fenómeno. La magnitud de estos daños estará asociada con el grado de vulnerabilidad. Una forma resumida de definir la vulnerabilidad puede ser la probabilidad de que, debido a la intensidad del evento y a la fragilidad de los elementos expuestos, ocurran daños en la economía, la vida humana y el ambiente. Este enfoque hacia la vulnerabilidad contempla factores físicos, sociales, políticos, tecnológicos, ideológicos, institucionales, culturales y educativos que, a su vez, se relacionan dentro de la realidad de la vulnerabilidad. La vulnerabilidad tiene expresiones distintas según se trate de países, de territorios subnacionales, de rubros productivos, de comunidades o de hogares. En estos últimos, por ejemplo, la vulnerabilidad y los comportamientos demográficos entre otras acompañan a la pobreza, conformando un verdadero síndrome de desventaja social. Se consolida así un círculo de vidas desmedradas (Chardon & González, 2002).

### **1.1.7 Curvas IDF**

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Temez, 1978).

Junto con la definición de las curvas, surgen otros elementos a considerar, como son la intensidad de precipitación, la frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento. Por ello, es de suma importancia tener claro el concepto de cada una de estas variables, de modo de tener una visión más clara de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.

En este sentido, se debe destacar que la intensidad, según (Chow, Midment, & Mays, 1993), se define como la tasa temporal de precipitación, o sea, la profundidad por unidad de tiempo (mm/hr), y ésta se expresa como:

$$i = \frac{P}{T_d} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde P es la profundidad de lluvia en mm o pulg, y Td es la duración, dada usualmente en hr.





*Otra forma de expresar la intensidad es la descrita por (Wenzel, 1982), de esta se tiene:*

$$i = \frac{c}{T d^{c+f}} \text{ Ec. 2}$$

i: intensidad de la lluvia

Td: duración

d, c, f: coeficientes dependientes del lugar y periodo de retorno.

Una forma ampliada de la ecuación anterior para incluir el periodo de retorno es:

$$i = \frac{c T^m}{T d^{c+f}} \text{ Ec. 3}$$

Es importante señalar, que cuando sólo se dispone de un pluviómetro en una estación, es evidente que, en general, sólo se podrá conocer la intensidad media en 24 horas. Como se comprenderá, esta información puede inducir a grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son, en general, las más intensas. Es natural entonces que las determinaciones de intensidades de lluvia se hagan a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos (PIZARRO, PIZARRO, SANGÜESA, & MARTÍNEZ, s.f.).

### **1.1.8 Morfometría de Cuencas.**

La palabra Morfometría como tal se refiere en principio a la forma en que se mide algo, y para este caso en particular, está enfocada en los parámetros que se utilizan para medir las cuencas, y determinar así sus propiedades y su comportamiento. Por esto, es bueno analizar algunas de las variables que se tienen en cuenta en el estudio de cuencas hidrográficas.

#### **1.1.8.1 Divisoria**

Corresponde a aquella línea de terreno que delimita la esorrentía que corre hacia dos lados contiguos. Por lo general corresponde a los puntos de cota máxima entre cuencas o microcuencas. Es importante la designación de este parámetro pues nos muestra las rutas que

seguirá el agua que escurre a través de puntos altos del terreno.

### **1.1.8.2 Área de Drenaje**

El trazado de la red de drenaje de aguas lluvias debe, en general, seguir las calles de la localidad. La extensión y el tipo de áreas tributarias deben determinarse para cada tramo por diseñar. El área aferente debe incluir el área tributaria propia del tramo en consideración. Las áreas de drenaje deben ser determinadas por medición directa en planos, y su delimitación debe ser consistente con las redes de drenaje natural (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016).

### **1.1.8.3 Caudal de diseño**

Para la estimación del caudal de diseño puede utilizarse el método racional, el cual calcula el caudal pico de aguas lluvias con base en la intensidad media del evento de precipitación con una duración igual al tiempo de concentración del área de drenaje y un coeficiente de escorrentía. La ecuación del método racional es:

$$Q = 2.78 * C * i * A \text{ Ec. 4}$$

De acuerdo con el método racional, el caudal pico ocurre cuando toda el área de drenaje está contribuyendo, y éste es una fracción de la precipitación media bajo las siguientes suposiciones:

- 1- El caudal pico en cualquier punto es una función directa de la intensidad  $i$  de la lluvia, durante el tiempo de concentración para ese punto.
- 2- La frecuencia del caudal pico es la misma que la frecuencia media de la precipitación.
- 3- El tiempo de concentración está implícito en la determinación de la intensidad media de la lluvia por la relación anotada en el punto 1 anterior.

El método racional es adecuado para áreas de drenaje pequeñas hasta de 700 Ha. Cuando son relativamente grandes, puede ser más apropiado estimar los caudales mediante otros modelos lluvia escorrentía que representen mejor los hietogramas de precipitación e hidrogramas de respuesta de las áreas de drenaje y que eventualmente



tengan en cuenta la capacidad de amortiguamiento de las ondas dentro de la red de colectores. En estos casos, es necesario justificar el método de cálculo (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016).

#### **1.1.8.4 Periodo de retorno de diseño**

El periodo de retorno de diseño debe determinarse de acuerdo con la importancia de las áreas y con los daños, perjuicios o molestias que las inundaciones periódicas puedan ocasionar a los habitantes, tráfico vehicular, comercio, industria, etc. La selección del periodo de retorno está asociada entonces con las características de protección e importancia del área de estudio y, por lo tanto, el valor adoptado debe estar justificado (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016).

*Tabla 1. Periodos de Retorno recomendados según el grado de protección del sistema.  
Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016)*

Características del Área de Drenaje	Mínimo (años)	Aceptable (años)	Recomendado (años)
Tramos iniciales en zonas residenciales con áreas tributarias menores de 2 ha	2	2	3
Tramos iniciales en zonas comerciales o industriales, con áreas tributarias menores entre 2 y 10 ha	2	3	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias entre 2 y 10 ha	2	3	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores a 10 ha	5	5	10
Canales abiertos en zonas planas y que drenan áreas mayores a 1000 ha	10	25	50
Canales abiertos en zonas montañosas (alta velocidad) o a media ladera, que drenan en área mayores a 1000 ha	25	50	100



#### **1.1.8.5 Coeficiente de escorrentía**

El coeficiente de escorrentía, C, es función del tipo de suelo, del grado de permeabilidad de la zona, de la pendiente del terreno y otros factores que determinan la fracción de la precipitación que se convierte en escorrentía. En su determinación deben considerarse las pérdidas por infiltración en el suelo y otros efectos retardadores de la escorrentía. De igual manera, debe incluir consideraciones sobre el desarrollo urbano, los planes de ordenamiento territorial y las disposiciones legales locales sobre uso del suelo. El valor del coeficiente C debe ser estimado tanto para la situación inicial como la futura, al final del periodo de diseño.

Para áreas de drenaje que incluyan sub-áreas con coeficientes de escorrentía diferentes, el valor de C representativo del área debe calcularse como el promedio ponderado con las respectivas áreas.

$$C = \frac{(\sum C * A)}{\sum A} \text{ Ec. 5}$$



*Tabla 2 Coeficientes de impermeabilidad, según tipo de superficie*  
*Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016)*

Tipo de superficie	C
Cubiertas	0,90
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0,90
Vías adoquinadas	0,85
Zonas comerciales o industriales	0,90
Residencial con casas contiguas, predominio de zonas duras	0,75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas duras entre estos	0,60
Residencial unifamiliar con casas contiguas y predominio de jardines	0,45
Residencial con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separados	0,30
Laderas sin vegetación	0,60
Laderas con vegetación	0,30
Parques recreacionales	0,30



### 1.1.8.6 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración está compuesto por el tiempo de entrada y el tiempo de recorrido en el colector. El tiempo de entrada corresponde al tiempo requerido para que la escorrentía llegue al sumidero del colector, mientras que el tiempo de recorrido se asocia con el tiempo de viaje o tránsito del agua dentro del colector.

$$Tc = Te + Tt \text{ Ec. 6}$$

Debido a las diversas condiciones morfológicas que se presentan en el planeta, investigadores han optado por estimar el tiempo de concentración empíricamente para condiciones específicas de terreno estudiado, a continuación, se presentan algunas de estas ecuaciones:

(Ventura & Heras, (s.f.).)

$$tc = \frac{aS^{0.5}}{i} \text{ Ec. 7}$$

Dónde:

tc= tiempo de concentración (horas)

i= pendiente media del cauce principal (%)

S= área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

L= longitud del cauce principal (km)

a= alejamiento medio ( $0,05 \leq a \leq 0,5$ )  $a = \frac{L}{\sqrt{S}}$

(Passini, (s.f.).)

$$tc = \frac{a(SL)^{1/3}}{i^{0.5}} \text{ Ec. 8}$$

Dónde:

tc= tiempo de concentración (horas)

***Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.***



**Universidad  
de Cartagena**  
Fundada en 1827

$i$ = pendiente media del cauce principal (%)

$S$ = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$L$ = longitud del cauce principal (km)

$a$ = alejamiento medio ( $0,04 \leq a \leq 0,13$ )  $a = \frac{L}{\sqrt{S}}$

. (Giandotti, (s.f).)

$$tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}} \quad Ec. 9$$

siempre que  $L/3.600 \geq tc \geq (L/3.600 + 1,5)$

Dónde:

$tc$ = tiempo de concentración (horas)

$S$ = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$L$ = longitud del cauce principal (km)

$i$ = elevación media de la cuenca o diferencia de nivel principal (m)

(Dirección General de Carreteras(España), (s.f).)

$$tc = 0.3 \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} \quad Ec. 10$$

Dónde:

$tc$ = tiempo de concentración (horas)

$J$ = pendiente media del cauce principal (H/L)

$H$ = diferencia de nivel entre el punto de desagüe y el punto hidrológicamente más alejado (m)

$L$ = longitud del cauce principal (km)



### **1.1.9 Estudio hidráulico**

Un estudio hidráulico aplicado sobre una cuenca hidrográfica pretende específicamente conocer las características relacionadas a la geometría del canal, de esta manera se relacionan los comportamientos que el canal pueda presentar a sus propias condiciones físicas. Este comprende varias etapas, se define la zona objeto del estudio, se reúne información de la misma, para posteriormente efectuar el respectivo análisis de la zona, determinando características pluviométricas y estimando caudales máximos. Finalmente se calibra un modelo para las cuencas de estudio y la simulación de hidrogramas (Aparicio, 1992).

Además, para la correcta realización del estudio hidrológico, es necesario conocer las propiedades morfométricas de la misma.

#### **1.1.9.1 Propiedades morfométricas**

(Chow V. T., 1959) Describe en su libro hidráulica de canales abiertos, que, dentro del estudio hidráulico, se determina primeramente los elementos geométricos de una sección del canal. Estas propiedades son determinadas a través de la geometría y la profundidad de flujo que se presenta en dicho canal.

La profundidad de flujo,  $y$ , es la distancia vertical del punto más bajo del canal hasta la superficie libre y a menudo se intercambia con el termino profundidad de flujo de la sección,  $d$ .

El ancho superficial,  $T$ , es el ancho de la sección del canal en la superficie libre. Se calcula por medio de la formula

$$T = b + 2zy \text{ Ec. 11}$$

El área mojada  $A$  es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.

$$A = (b + zy)y \text{ Ec. 12}$$

El perímetro mojado  $P$  es la longitud de la línea de intersección de superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.





$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2} \quad \text{Ec. 13}$$

El radio hidráulico R es la relación entre el área y el perímetro mojado de la sección del canal.

$$R = A/P \quad \text{Ec. 14}$$

### **1.1.9.2 Determinación de caudal: Ecuación de Manning**

La ecuación de Manning fue desarrollada en 1889 por el ingeniero irlandés Robert Manning quien encontró la relación de la velocidad con los parámetros geométricos pendiente longitudinal y radio hidráulico, además del coeficiente de rugosidad de Manning.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{Ec. 15}$$

Esta ecuación está basada en condiciones de flujo uniforme permanente en donde se considera que la profundidad, área mojada, velocidad y caudal de la sección se mantienen constantes. En corrientes naturales, es muy poco probable encontrar el desarrollo de un flujo uniforme permanente, debido a que en ríos y corrientes en estado natural casi nunca se experimenta una condición estricta de flujo uniforme. Sin embargo, a pesar de estas desviaciones a la realidad, se tiene que los resultados obtenidos a partir de estas suposiciones de flujo uniforme son aproximados y generales y, constituyen en sí, una forma simple y satisfactoria para muchos problemas prácticos. A partir de la ecuación (Ec.16) se puede referir el caudal que corre por el canal al área mojada, radio hidráulico y pendiente, reemplazando la velocidad por la relación del caudal y el área. La ecuación (Ec. 17) será utilizada para determinar el caudal que puede contener una sección transversal, asumiendo un borde libre de 5 centímetros.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{Ec. 16}$$

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{Ec. 17}$$

### **1.1.9.3 Parámetros de Forma de una cuenca**

La forma de una cuenca es determinante de su comportamiento hidrológico (cuencas con la misma área, pero de diferentes formas presentan diferentes respuestas hidrológicas – hidrogramas



diferentes, por tanto- ante una lámina precipitada de igual magnitud y desarrollo), de ahí que algunos parámetros traten de cuantificar las características morfológicas por medio de índices o coeficientes.

Los parámetros de forma principales son: Coeficiente de Gravelius y Rectángulo equivalente y coeficiente de Horton.

- Índice de Compacidad o de GRAVELIUS

Está definido como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica:

$$K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ec. 18}$$

La razón para usar la relación del área equivalente a la ocupada por un círculo es porque una cuenca circular tiene mayores posibilidades de producir avenidas superiores dadas su simetría. Sin embargo, este índice de forma ha sido criticado, pues las cuencas en general tienden a tener forma de pera.

- Factor de forma adimensional de HORTON

Horton ha sugerido un factor adimensional de forma designado como “Rf” que puede deducirse a partir de la ecuación siguiente:

$$Rf = \frac{A}{Lb^2} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

Rf: factor adimensional de forma de Horton

A: área de la cuenca

Lb: longitud de la cuenca, medida desde la salida hasta el límite, cerca de la cabecera del cauce principal, a lo largo de una línea recta (Villegas Yepes , 2013).



#### **1.1.9.4 Ciclo Hidrológico**

El ciclo del agua, también conocido como ciclo hidrológico, describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra. El agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas del ciclo, y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años. Aunque el equilibrio del agua en la Tierra permanece relativamente constante con el tiempo, las moléculas de agua individuales pueden circular muy rápido. El sol dirige el ciclo calentando el agua de los océanos. Parte de esta agua se evapora en vapor de agua. El hielo y la nieve pueden sublimar directamente en vapor de agua (Perez, s.f.).

#### **1.1.9.5 Escorrentía Superficial**

La escorrentía superficial describe el flujo del agua, lluvia, nieve, u otras fuentes, sobre la tierra, y es un componente principal del ciclo del agua. A la escorrentía que ocurre en la superficie antes de alcanzar un canal se le llama fuente no puntual. Si una fuente no puntual contiene contaminantes artificiales, se le llama contaminación de fuente no puntual. Al área de tierra que produce el drenaje de la escorrentía a un punto común se la conoce como línea divisoria de aguas. Cuando la escorrentía fluye a lo largo de la tierra, puede recoger contaminantes del suelo, como petróleo, pesticidas (en especial herbicidas e insecticidas), o fertilizantes.

La escorrentía superficial puede generarse por precipitación o por fundición de nieve o glaciares. La fundición de nieve y glaciares se da sólo en áreas lo bastante frías como para que se formen permanentemente. La escorrentía de nieve suele alcanzar su punto máximo en primavera, y los glaciares se derriten en verano, lo que produce máximos de flujo pronunciados en los ríos afectados por ellos. El factor determinante de la tasa de fundición de nieve o glaciares es la temperatura del aire y la duración de la luz solar. En las regiones de alta montaña, las corrientes se elevan durante los días soleados y disminuyen en los nublados debido a la razón anterior.

En áreas donde no hay nieve, la escorrentía proviene de la precipitación. Sin embargo, no toda la precipitación produce escorrentía, porque el almacenaje en los suelos puede absorber los chaparrones ligeros. En los suelos muy antiguos de Australia y África del Sur, las raíces proteoides, con sus redes muy densas de pelos, pueden absorber tanta agua de lluvia como para evitar la escorrentía, aunque caigan cantidades sustanciales de lluvia. En estas regiones, incluso en suelos de arcilla agrietados relativamente menos estériles, son necesarias cantidades altas de precipitación,



y un bajo potencial de evaporación, para generar cualquier escorrentía superficial, lo que conduce a adaptaciones especializadas a corrientes muy variables (por lo general, efímeras).

- Flujo terrestre con exceso de infiltración

Hay un exceso de infiltración cuando la tasa de precipitación en una superficie excede la tasa a la cual el agua puede infiltrarse en la tierra, y cualquier cuenca para almacenamiento está ya llena. A este proceso también se le llama flujo terrestre hortoniano (en honor de Robert E. Horton), o flujo terrestre insaturado. Se produce con más frecuencia en regiones áridas y semiáridas, donde las intensidades de precipitación son altas y la capacidad de infiltración del suelo es reducida debido a la impermeabilización de la superficie, o en áreas pavimentadas.

- Flujo terrestre con exceso de saturación

Cuando el suelo está saturado y la cuenca de almacenamiento llena, la precipitación producirá inmediatamente una escorrentía superficial. El nivel precedente de humedad del suelo es un factor que afecta al tiempo que pasará hasta que el suelo se sature. Esta escorrentía se conoce también como flujo terrestre saturado.

- Flujo de retorno subsuperficiales

Después de que el agua se filtra en el suelo en la porción en cuesta de una colina, el agua puede fluir lateralmente por el suelo, y exfiltrarse (fluir fuera) cerca de un canal. También se le llama flujo interno.

Al fluir, la cantidad de escorrentía puede verse reducida de varios modos: una pequeña parte puede evaporarse; el agua puede almacenarse temporalmente en cuencas micro topográficas; y otra parte puede fluir inmediatamente sobre la superficie. La escorrentía superficial que permanece al final fluye en una corriente de agua como ríos, lagos, estuarios u océanos (Perez, s.f.).

#### **1.1.9.6 Impacto Humano sobre la Escorrentía Superficial**

La urbanización aumenta la escorrentía superficial, al crear superficies más impermeables, como pavimento y edificios, que no permiten la filtración del agua hasta el acuífero. En vez de filtrarse al suelo, el agua es forzada directamente hacia corrientes o drenajes, donde la erosión y sedimentación pueden ser problemas importantes, incluso cuando no hay inundación. El aumento



de escorrentía reduce la recarga de agua subterránea, bajando así la capa freática y empeorando las sequías, sobre todo para los agricultores y quienes dependen de pozos de agua.

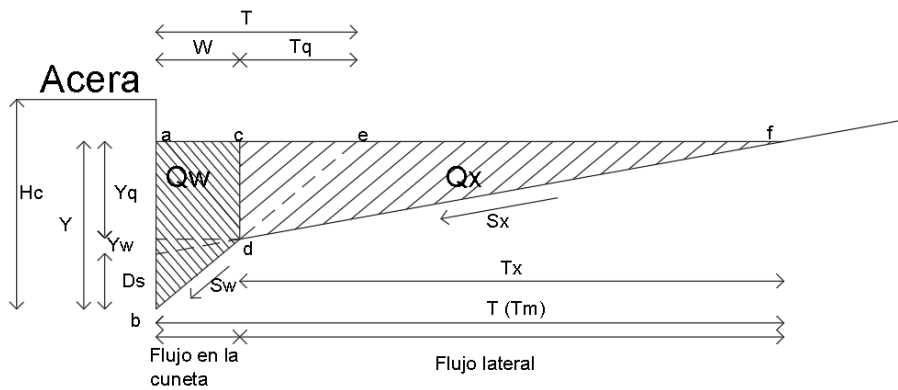
Cuando hay contaminantes antropogénicos disueltos o suspendidos en la escorrentía, el impacto humano se amplía. Esta carga de contaminantes puede alcanzar a diversas aguas receptoras como corrientes, ríos, lagos, estuarios y océanos, cambiando la química del agua en estos sistemas y en sus ecosistemas relacionados (Perez, s.f.).

#### **1.1.9.7 Determinación de la Capacidad Hidráulica de una vía**

En una vía el flujo está compuesto por la precipitación que cae sobre esta y en sus zonas anexas. Los aportes van incrementándose en la dirección del flujo sobre la vía., hasta llegar al punto de entrada o sumidero. De acuerdo con lo anterior, la característica hidráulica sobre la vía es un flujo no permanente; no obstante, para el diseño se pueden suponer condiciones de flujo permanente y uniforme en la cuneta, para simplificar el cálculo de los parámetros hidráulicos necesarios en el diseño de los sumideros (Diaz, 2013).

#### **Cuneta con sección transversal compuesta.**

Cuando la sección de la cuneta es compuesta el esparcimiento de aguas lluvias en la vía se divide por el flujo en la cuneta y flujo lateral. El escurrimiento en la vía está determinado por la división de la sección transversal de flujo en tres porciones de áreas: abdec, cde y cdf, como se muestra en la siguiente ilustración.



*Ilustración 1. Parámetros Hidráulicos de una vía. Fuente: (Diaz, 2013)*

$$Q_s = \frac{0,375}{n} s_x^{1,67} T^{2,67} S_0^{2,67} \quad \text{Ec. 20}$$

$$Q_s = Q_x + Q_w = Q_x + Q_1 + q_1 \quad \text{Ec. 21}$$

$$A_s = 0,5W(Y + Y_q) + 0,5Y_q T_x \quad \text{Ec. 22}$$

$$V_s = Q_s / A_s \quad \text{Ec. 23}$$

$Q_s$ = escurrimiento en la calle

$Q_w$ = flujo frontal transportado por el ancho de la cuneta  $w$ .

$Q_x$ = flujo lateral transportado por el ancho de vía

$Y$ = tirante en la cuneta

$D_s$ = profundidad de la depresión en la cuneta

$Y_q$ = profundidad del flujo lateral al borde de la vía



$T_x$ = ancho del esparcimiento del flujo lateral

$T$ = ancho del esparcimiento en la vía

$V_s$ = velocidad promedio del flujo en la sección transversal

La relación entre la pendiente transversal de la vía  $S_x$  y la pendiente de la cuneta  $S_w$  es la siguiente:

$$S_w = S_x + D_s/W \text{ Ec. 24}$$

$S_x$ = pendiente transversal de la vía

$S_w$ = pendiente transversal en la cuneta

$W$ = ancho de la cuneta deprimida

$D_s$ = profundidad de la depresión.

### **Sumideros de rejilla**

Para el cálculo de sumideros de rejilla se propone en la literatura la relación entre el flujo frontal en la cuneta y el de la calle como:

$$E_w = \frac{Q_w}{Q_s} = \left(\frac{S_w}{S_x}\right)^{1,67} \left( \left(\frac{T_1}{T_x}\right)^{2,67} - \left(\frac{T_1 - W}{T_x}\right)^{2,67} \right) \text{ Ec. 25}$$

La relación del flujo lateral para el flujo en la calle es:

$$E_x = \frac{Q_x}{Q_s} = 1 - E_w \text{ Ec. 26}$$

Por otro lado, se determina la velocidad de salpicadura por la expresión empírica siguiente, en la que se relaciona la longitud y el tipo de rejilla



$$V_0 = p + qL - rL^2sL^3 \text{ Ec. 27}$$

Expresión donde p, q, r y s son constantes empíricas para varios sumideros de rejilla.

*Tabla 3. Velocidad de salpicadura sobre varios tipos de rejilla. Fuente: (Diaz, 2013)*

Velocidad de salpicadura sobre varios tipos de rejillas					
Numero	Tipo de rejilla	p	q	r	s
1	Barra P-1-7/8	0.6767	4.03	2.1325	0.6458
2	Barra P-1-1/8	0.5364	3.12	1.4764	0.3229
3	Platinas	0.0914	4.85	4.2979	1.6146
4	Barra 45°	0.3018	2.64	1.1811	0.3229
5	Barra P-1-7/8-4	0.2256	2.44	0.8358	0.2153
6	Barra 30°	0.1554	2.34	0.6552	0.1076
7	Reticulada	0.0853	2.26	0.5906	0.1076

#### **1.1.9.8 Modelo Lluvia-escorrentía: Modelo de infiltración propuesto por el SCS (NRCS)**

Teniendo en cuenta todo lo establecido en el capítulo D.6 del RAS 2010, en aquellos casos en los cuales sea necesario hacer un análisis hidráulico bajo la condición de flujo no permanente, se debe hacer uso de modelos hidrológicos que permitan obtener los hidrogramas de diseño. Ejemplo de estos modelos hidrológicos, que pueden ser utilizados con propósitos de diseño, son los incluidos en programas como el Storm Water Management Model (SWMM), y el Hydrologic Modeling System del Hydrologic Engineering Center (HEC-HMS), el cual fue usado en este proyecto.

Este método fue desarrollado por el entonces Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (U.S. Soil Conservation Service, SCS) actualmente conocido como el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos (U.S. Natural Resources Conservation Service -NRCS); permite determinar la precipitación efectiva producida por un evento de lluvia. El método asigna un número de curva (CN) característico de cada tipo de suelo





de la cuenca, dependiendo de sus características de permeabilidad. Con este número de curva, el diseñador puede calcular el caudal de escorrentía directa, tal como se detalla a continuación:

$$P = \frac{(Pt-0.2S)^2}{(Pt+0.8S)} \text{ Ec. 28}$$

Donde:

P= Profundidad de precipitación efectiva (m)

S= Retención potencial máxima (m)

Pt= Profundidad de precipitación total (m)

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{ Ec. 29}$$

CN= Numero de Curva

El valor del número de curva (CN) depende de tres aspectos: el grupo hidrológico del suelo, los antecedentes de humedad del suelo y su uso. Los cuatro grupos hidrológicos se catalogan de acuerdo con la textura del suelo y la capacidad de infiltración como se muestra a continuación:

*Tabla 4. Grupo hidrológico del suelo.*

Grupo hidrológico de suelo	Grupo hidrológico de suelo
A	Arena, arena margosa o marga arena (capacidad de infiltración mayor a 7.62 mm/h)
B	Limo margoso o marga (capacidad de infiltración de 3.81 a 7.62 mm/h)
C	Margas arcillo arenosas (capacidad de infiltración de 1.27 a 3.81 mm/h)
D	Marga arcillosa, marga arcillo limosa, arcilla arenosa, arcilla limosa o arcilla (capacidad de



De acuerdo con la actividad humana desarrollada en la zona del proyecto se deben determinar los números de curva (CN) que mejor se ajusten a las condiciones locales. En la tabla 5 se presentan algunos valores de CN utilizados en zonas urbanas. Se debe verificar la fundamentación teórica del presente modelo de infiltración antes de seleccionar un número de curva, teniendo en cuenta las características de la zona de proyecto ya sea urbana, suburbana, rural, agrícola, entre otras.

*Tabla 5. Numero de curva por tipo de suelo.*

Tipo de cobertura y condicion hidrológica		Area impermeable promedio	Numero de curva para cada tipo de suelos			
			A	B	C	D
Espacios abiertos	Cobertura pobre (cobertura de pastos < 50%)		68	79	86	89
	Cobertura parcial (cobertura de pastos de 50% a 75%)		49	69	79	84
	Cobertura buena (cobertura de pastos > 75%)		39	61	74	80
Áreas Impermeables	Parqueaderos, techos, zonas pavimentadas, entre otros.		98	98	98	98
	Andenes pavimentados y sumideros		98	98	98	98
Calles y carreteras	Zanjas o diques pavimentados		83	89	92	93
	Zona cubierta de gravas		76	85	89	91
	Zona cubierta de arenas o polvo		72	82	87	89
Zonas urbanas	Zonas comerciales y de negocios	85%	89	92	94	95
	Zona industrial	72%	81	88	91	93
Zonas residenciales (por tamaño del lote)	500 m <sup>2</sup> o menos	65%	77	85	90	92
	1000 m <sup>2</sup>	38%	61	75	83	87
	1350 m <sup>2</sup>	30%	57	72	81	86
	2000 m <sup>2</sup>	25%	54	70	80	85
	4000 m <sup>2</sup>	20%	51	68	79	84
	8000 m <sup>2</sup>	12%	46	65	77	82
Áreas urbanas permeables en desarrollo y sin vegetación			77	86	91	94

En caso de que la zona objeto del diseño, sea de tipo urbana, donde las superficies están compuestas por sectores permeables y no permeables, el diseñador debe estimar un valor de número de curva equivalente. Para esto, se debe utilizar la siguiente ecuación.

$$CNequi = \frac{(\%I * CNimper + (100 - \%I) * CNperm)}{100} \quad Ec. 30$$

%I= Porcentaje de área con cubierta impermeable.

CNperm= Numero de Curva área permeable.

CNimper= Numero de Curva área impermeable.



## **1.2 MARCO LEGAL**

En Colombia y principalmente en la cuenca Magdalena-Cauca se han producido la mayoría de los asentamientos humanos y podemos decir que contiene aproximadamente el 90% de la población total del país y dentro de ella se desarrolla también en alto porcentaje de las actividades sociales y económicas.

Esta alta densidad poblacional y la gran actividad que en esta cuenca se lleva a cabo, la convierten en una zona de vital importancia para el país, pero, así mismo, se convierte también en una región vulnerable y expuesta a los desastres naturales (Instituto Colombiano de Hidrología, 1988).

Por estas y otras razones se consideró necesaria la creación de programas de prevención de riesgos por inundaciones y otras consecuencias relacionadas a estos fenómenos naturales. Para cumplir este objetivo el gobierno nacional vio necesaria la ayuda externa para poner en marcha actividades de predicción y alerta hidrometeorológicas, enfocadas primordialmente en la cuenca Magdalena-Cauca. De esta manera fue creado el programa de Alertas Hidrometeorológicas.

### **Objetivos del Programa**

Los objetivos del programa de Alertas a escala nacional y a corto plazo fueron desde su creación los siguientes:

- Disminuir las pérdidas y los daños producidos por las avenidas e inundaciones y otros eventos hidrológicos y meteorológicos.
- Soporte a la proyección y construcción de obras civiles de defensa contra las inundaciones
- Contribución a la planeación y uso racional de recursos naturales en la navegación fluvial, en la construcción y explotación de obras hidrotécnicas y aprovechamiento de agua.
- Aportes en el desarrollo agrícola nacional, particularmente en ejecución de obras de adecuación de tierras, riego y drenaje (Instituto Colombiano de Hidrología, 1988).

Para el año 1991 el HIMAT público en colaboración con el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres de Colombia, una cartilla titulada, “Mi amiga el Agua, Prevención Frente



a Inundaciones Lentas y Repentinas. Su fin principal fue mostrar a la población vulnerable información útil sobre cómo se producen las inundaciones, como se originan los vientos, los temporales invernales, que medidas tener en cuenta cuando se presentaran estos fenómenos, entre otras valiosas anotaciones.

Desde manera similar, y desde entonces, el gobierno nacional ha publicado diversos folletos e informes relacionados al manejo de riesgos de inundaciones. Por ejemplo, un caso mucho más reciente es el del boletín “Colombia ejemplo en el manejo del riesgo por inundaciones”, en el cual El Gobierno Nacional por medio de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres –UNGRD- y la articulación con organismos internacionales, como la Agencia de Cooperación Internacional JICA, llevan a cabo el proyecto de “Fortalecimiento de la capacidad de manejo del riesgo de inundaciones”. El proyecto que tiene una vigencia de tres años (2014-2017) y cuyo objetivo es, fortalecer las capacidades de las instituciones colombianas para la gestión del riesgo de inundaciones, cuenta con grandes avances que permite que Colombia sea modelo en la implementación de protocolos y estrategias para reducir la vulnerabilidad de las comunidades ante las inundaciones (Colombia U. N., 2016).

Además, se han expedido decretos relacionados al manejo de recursos hídricos, por ejemplo, se expidió el Decreto 1640 de 2012, “Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones”. Esta reglamentación establece la nueva estructura de planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas del país, permitiendo una mayor claridad en el nivel de gestión de las mismas, por parte de las autoridades ambientales competentes y las diferentes entidades y actores responsables de su formulación e implementación. Adicionalmente se expidió la resolución 509 del 2013 “Por la cual se definen los lineamientos para la conformación de los Consejos de Cuenca y su participación en las fases del Plan de Ordenación de la Cuenca y se dictan otras disposiciones” (Pacheco & Sierra, 2016).



### **1.3 JUSTIFICACION PROGRAMA DE SIMULACION.**

Para realizar un análisis hidrológico se requiere muchas veces de software especializados que ayuden a modelar condiciones hidrológicas, meteorológicas e hidráulicas, con el fin de aportar una visión de lo que ocurriría en un evento de flujo natural en cauces, la discusión que han tenido investigadores en el área de la hidrología se basa en muchos casos en que tipo de software simula bien las condiciones de flujo y en que principios se basa.

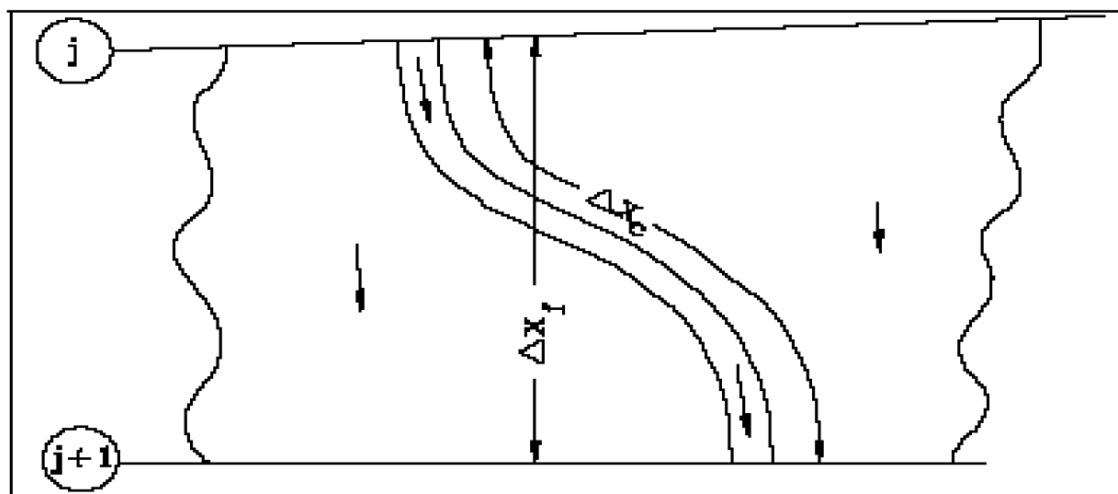
#### **1.3.1 HEC- RAS**

HEC-RAS (Hydrological Engineering Center - River Analysis System) es un programa de modelización hidráulica unidimensional compuesto por 4 tipos de análisis en ríos:

- Modelización de flujo en régimen permanente.
- Modelización de flujo en régimen no permanente.
- Modelización del transporte de sedimentos.
- Análisis de calidad de aguas.

Las leyes físicas que rigen el tránsito de una corriente son: (1) el principio de conservación de la masa (continuidad) y (2) el principio de conservación de momento.

La ilustración 2 plasma las características bidimensionales de la interacción entre los flujos del cauce y el lecho de creciente. Cuando el río crece las aguas se alejan lateralmente del cauce inundando las tierras y rellenando las depresiones existentes. A medida que aumenta el tirante los lechos de creciente comienzan a arrastrar las aguas río abajo, tomando, generalmente un camino más corto que el que recorre el cauce principal. Al disminuir la altura del río, el agua avanza hacia el cauce desde el otro lado de la ribera incrementando el flujo en el cauce principal (Hamad, 2008).



*Ilustración 2. Flujos del Cauce y los lechos de Creciente.  
Fuente: Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre (Hamad, 2008)*

Dado que la dirección principal del flujo se orienta a lo largo del cauce, es posible realizar una aproximación a este campo de flujo bidimensional mediante una representación unidimensional. Las zonas inundadas fuera del cauce pueden compararse con áreas de almacenamiento que intercambian sus aguas con el cauce.

Por diferentes investigaciones se ha determinado que el flujo más allá de las riberas se asemeja al que transita a través de otro cauce. Uno de los enfoques más frecuentes al abordar el análisis de las zonas de inundación, consiste en ignorar completamente el agua que rebasa las riberas y asumir que dicha área se utiliza solamente para almacenamiento. Esta suposición tiene aplicación para grandes cursos de agua como ríos en los que el cauce se encuentra flanqueado por diques y las restantes zonas de inundación son tierras profusamente pobladas de vegetación o áreas de almacenamiento fuera del mismo. Para abordar este problema (Fread, 1976) y (Smith, 1978) dividieron el sistema en dos cauces o canales independientes y elaboraron ecuaciones de continuidad y momento para cada uno de ellos. Y su simplificación consistió en asumir una superficie horizontal del agua en cada sección transversal normal a la dirección del flujo, de manera que el intercambio de impulsos entre el cauce y las zonas de inundación resultaba insignificante, distribuyendo la descarga de acuerdo con la conducción, es decir:



$$Q_c = \phi Q \text{ Ec. 31}$$

$Q_c$ =flujo en el cauce

$Q$ =flujo total

$$\phi = K_c / (K_c + K_f)$$

$K_f$ = conducción en el lecho de creciente

$K_c$ = conducción en el cauce

Con estas suposiciones es posible combinar las ecuaciones unidimensionales de movimiento en un solo conjunto:

$$\frac{dA}{dt} + \frac{d(\phi Q)}{dx_c} + \frac{d((1-\phi)Q)}{dx_f} = 0 \text{ Ec. 32}$$

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{d(\phi^2 Q^2 / A_c)}{dx_c} + \frac{d((1-\phi)^2 Q^2 / A_f)}{dx_f} + gA_c \left( \frac{dz}{dx_0} + S_{fc} \right) + gAf \left( \frac{dz}{dx_f} + S_{ff} \right) = 0 \text{ Ec. 33}$$

En el cual los subíndices c y f están referidos al cauce y zonas de inundación respectivamente, la aproximación a estas ecuaciones se llevó a cabo mediante el uso de diferencias finitas implícitas resueltas numéricamente a través de la técnica de iteración Newton-Raphson.

Con base en lo establecido por Fread y Smith, (Barkau, 1982) trabajo con las ecuaciones de diferencias finitas para cauce y la zona de inundación y definió un nuevo sistema de ecuaciones que resulto más conveniente desde el punto de vista de trabajo en computadoras. Así mismo mediante un factor de distribución de velocidad, combino los términos convectivos y al definir un recorrido equivalente del caudal, reemplazo las condiciones de fricción del talud por una fuerza equivalente.

Las ecuaciones determinadas por Barkau constituyen la base para la solución del caudal inestable en el software de la HEC-RAS.



De acuerdo a lo anterior se ha adelantado investigaciones como la realizada por (Hamad, 2008) y (Munera, 2013), para determinar la factibilidad del programa y en que variables de estudio es más acertada su modelación. En estas investigaciones se ha estudiado variables hidráulicas e hidrológicas y se ha determinado lo siguiente:

“HEC-RAS es un modelo unidimensional, sin embargo, incorpora la posibilidad de realizar simulaciones cuasi bidimensionales, permitiendo la representación de zonas donde se considera que no hay flujo o con zonas de almacenamiento de agua. Sin embargo, los resultados que se obtengan con el HEC - RAS en tramos donde el flujo sea marcadamente bidimensional (grandes llanuras de inundación) no serán todo lo riguroso que sería deseable” (Hamad, 2008).

Según la investigación realizada por Munera, en la cual se hace un análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, CCHE2D, GSTARS y BRI-STAR con el objeto de evaluar las capacidades, limitaciones y aplicabilidad de éstos en la simulación del flujo en un cauce aluvial (río Negro) se obtuvo que: “Tras las modelaciones hidráulico-morfológicas realizadas con cada uno de los modelos empleados, sobre un tramo de estudio del río Negro (3.9 km de longitud), se demostró que HEC-RAS, fue el modelo que mejor represento los niveles de flujo” (Munera, 2013).

A la hora de determinar la efectividad de los modelos al estimar los niveles de inundación, fue necesario comparar el valor estimado por la modelación con registros de inundaciones obtenidos en campo, en esta se obtuvo que el modelo HEC-RAS realizó una buena estimación obteniendo un error de 5% en su aproximación, que comparado con los otros modelos CCHE2D (29%) G-STAR (27%) BRI-STAR (11%) se nota muy significativa.

Las variables tenidas en cuenta para la modelación hidráulica fueron: tirante, velocidad, área mojada, ancho efectivo, número de froude y esfuerzo tractivo.

De acuerdo con los resultados obtenidos por la investigación, se tiene que el HEC-RAS arroja mejores resultados en la aproximación de las variables hidráulicas y sedimentológicas a las condiciones reales.

Además se tiene que HEC-RAS fue el mejor modelo para hacer las simulaciones referentes a un evento de inundación.





#### **1.4 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.**

En lo relacionado con estudios hidrológicos realizados en Clemencia, Bolívar no se dispone de informes, sin embargo, se tiene información de las zonas más afectadas por el desbordamiento de los arroyos, esta información fue obtenida llevado a cabo el Plan municipal de gestión del riesgo de desastres del municipio de Clemencia por la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, en la que se tiene lo siguiente:

La zona de la cabecera municipal, más vulnerable a inundaciones la comprenden los barrios: 13 de junio, Laguito y Bello Horizonte, los cuales presentan inundaciones y además contaminación de aguas residuales en el caso de Bello Horizonte.

Aparte de estas zonas se encuentran arroyos que aportan caudales de escorrentía que ponen en riesgo a la comunidad, entre estos: Arroyo el Hormiguero y Arroyo Arena; estos aumentan su caudal, cuando ocurren precipitaciones fuertes, además cabe resaltar que las actividades antrópicas han generado pérdida en su capacidad hidráulica.

Entre la población más afectada por la escorrentía de los arroyos se encuentran:

- Los alumnos de la I.E.T.A sede 2.
- Los residentes del barrio La Paz.
- Los habitantes del barrio Bello Horizonte (se han presentado pérdidas humanas).

Para el año 2010, debido al fenómeno de la niña, sufrido en todo el país, las constantes lluvias provocaron que los arroyos naturales que atraviesan el municipio se desbordaran e inundaran a los barrios cercanos a estos. La población afectada fue la asentada en barrios urbanizados espontáneamente cerca a los arroyos, la población vulnerable, y población desplazada (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2012).

La ola invernal para este año ocasiono daños y pérdidas:

- En las personas: no dejo personas afectadas físicamente
- En bienes materiales particulares: daños a las viviendas y vías de acceso a los barrios



- En bienes materiales colectivos: se afectaron las instituciones educativas, las cuales sirvieron de albergues temporales.
- En bienes de producción: Pérdidas de cultivos y de animales en el área rural.
- En bienes ambientales: suelos saturados por la cantidad de agua que recibieron.

Para llevar a cabo el estudio hidrológico propuesto en este proyecto, con el que se permitió analizar la dinámica hidráulica de los arroyos Arena, Hormiguero y de la escorrentía superficial en las calles de Clemencia, Bolívar, fue necesario una recopilación de estudios que se han realizado, en el país, para proponer solución a problemas de inundación; con el fin de conocer las limitaciones y supuestos en estos estudios, teniendo en cuenta que se estudian zonas con características morfométricas diferentes. Estos estudios proporcionaron una fuente de información que favorece esta investigación ya que indican una metodología específica a utilizar.

El análisis de las amenazas es importante para emprender la mitigación de riesgos naturales en cualquier zona afectada, y a su vez a la hora de planificar proyectar y construir una obra civil de ingeniería, como obra de mitigación. Para realizar estos análisis fue necesario la obtención de información como mapas, estadísticas, estudios de suelo, análisis previos, entre otros, que brindasen información acertada y específica de la zona analizada.

A la hora de realizar un análisis de las amenazas por inundación, especialmente cuando se quiere planificar y crear planes de ordenamiento territorial, se debe manejar mucha información, que sobrepasa la capacidad de los métodos manuales, por lo que se hace indispensable contar con un sistema computarizado que ayude a manejar los datos de una forma eficiente.

Los sistemas utilizados para este tipo de tarea son los sistemas de información geográfica S.I.G. cuyo principio es el de, contener, organizar, analizar y exhibir información, en base a estos principios es una herramienta muy eficaz a la hora de planificar y proyectar una obra civil, para posteriormente pasar a su etapa de construcción, estos sistemas han sido utilizados en numerosos proyectos de análisis hidrológico y meteorológico en el mundo.

En Colombia y especialmente en el departamento de Bolívar la implementación de los sistemas de información geográfica para el ordenamiento territorial y el estudio de amenazas es un tema



relativamente nuevo y han sido usados principalmente por las entidades estatales, como son: El ayuntamiento de Cartagena, El ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (que realizó el sistema de información geográfica municipal de clemencia, Bolívar) y a nivel nacional El Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, entre otros.

Para el análisis objeto del proyecto se recurrió a recursos de apoyo relacionados con el tema de estudio, desarrollados por diferentes autores.

A continuación, se relacionan algunos de los estudios existentes acerca del tema planteado:

Para el año 2004 se planteó el diseño de las obras de drenaje de las aguas lluvias, como solución a los problemas de inundación de barrios del sur de la ciudad de Riohacha.

Este proyecto planteo solución a los problemas de inundación de barrios del sur de la ciudad de Riohacha. Para este caso de estudio las inundaciones presentadas en épocas de fuerte invierno se deben a los excesos de la escorrentía que llega a la laguna “La finquita” la cual es un gran cuerpo de agua artificial que se creó durante los años 70 por retiro excesivo de material para ser usado como relleno en la construcción de la vía Riohacha – Valledupar. En la zona más crítica se producen estancamientos de aguas lluvias en época invernal.

Para materializar el diseño fue necesario la obtención de información primaria de la zona en estudio, en primera instancia se debió plantear un levantamiento topográfico (planimétrico y altimétrico), evaluar los registros de precipitación en la zona según datos históricos de 20 años(1983-2003), acumulados por el IDEAM, determinar el área de la microcuenca y su coeficiente de escorrentía, para este caso se dividió en dos (2) áreas: área aferente a la laguna =30,91 Ha y área aferente a los barrios= 13,37Ha, con coeficientes de escorrentía  $C= 0.32$  y  $C= 0.54$  respectivamente, luego de esto se realizó el cálculo del caudal de diseño para cada área  $Q= 2.256$  l/s y  $Q= 1.518$  l/S respectivamente.

Luego de la obtención de información relevante para el estudio, se elaboró en el programa Excel una matriz de cálculo para el diseño de las dimensiones y configuración óptima del canal, se evaluó el impacto ambiental por efecto de la construcción y la operación del proyecto, se hizo un análisis



fisicoquímico y microbiológico de las aguas de las lagunas a intervenir y se definió y nivel conceptualmente los ejes de las vías por donde se diseñaría el recorrido del canal.

Las recomendaciones más relevantes del autor son las siguientes:

- Para la protección de las obras de evacuación evitar el reflujo en el canal de drenaje, se recomienda determinar el perfil hidráulico de la costa caribe y compararla con la cota de salida del canal para ajustarla si está por debajo.
- El periodo de retorno de diseño se escogió de 5 años para dar pronta solución al problema, teniendo en cuenta que la zona es netamente residencial.
- Si se toma como periodo de retorno mínimo de 10 años esto demandaría reubicación de muchas viviendas del sector por el tamaño de las obras de drenaje.

(Gomez Sierra & Pinto Bermudez, 2004).

Para el año 2006 se realiza el diagnóstico de la cuenca hidrográfica del arroyo grande, mediante una evaluación hidrológica e hidráulica, que permitiese proponer posibles alternativas de solución desde la ingeniería civil, con el fin de mitigar el impacto de las inundaciones periódicas que se presentaban en sectores de la zona industrial de Mamonal.

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación fue necesario la delimitación de la cuenca (con ayuda del programa Global Mapper y estudios topográficos y altimétricos de la zona), realizar fotointerpretación de la zona de estudio, estudiar la hidrometeorología por medio de estaciones cercanas, crear polígonos de Thiessen, para determinar la precipitación máxima de la cuenca, además fue menester plantear un análisis hidrológico, en el que se determinó las características morfométricas de la cuenca, se estimó los coeficientes de escorrentía, el tiempo de concentración, el periodo de retorno y los caudales máximos, también se realizó un análisis hidráulico para posteriormente pasar a la determinación de puntos críticos, al diseño de un embalse, la creación de escenarios desfavorables y por último la presentación de la alternativa más adecuada para solucionar los problemas de inundación.



Se determinó en este estudio a partir del análisis para determinar las características morfológicas de la cuenca, que la cuenca del Arroyo Grande tiene un área aproximada de 1811 ha, con una pendiente media de 0.37% y una longitud del cauce principal de 13,4 km.

Al realizar la fotointerpretación de la Cuenca del Arroyo Grande mediante imágenes de Google Earth de los años 2007, 2011 y 2013, se evidenció una expansión de la intervención antrópica y/o industrial, generando un desvío en el cauce principal, y a su vez se modificaron los coeficientes de escorrentía, agravando los problemas de inundación en la zona.

A partir de la creación de los polígonos de Thiessen se determinó que de las 7 estaciones meteorológicas (Aeropuerto Rafael Núñez, Cañaveral, Santa Ana, Escuela Naval, Bayunca, Sincerín y Arjona), cercanas a la cuenca del Arroyo Grande, solo tuvieron influencia sobre la cuenca las estaciones de Escuela Naval, Santa Ana y Arjona, debido a la lejanía de las otras estaciones. Se llegó a la conclusión que la precipitación máxima presentada en la cuenca se dio en el año 1997 con una magnitud aproximada de 138 mm/año, mientras que la mínima precipitación se llevó a cabo en 1976 con 55 mm/año aproximadamente.

Para la determinación de los ramales de la cuenca del Arroyo Grande, esta se dividió en 8 subcuencas, se calcularon los caudales máximos y los hidrogramas de cada subcuenca para cada periodo de retorno, obteniendo una escorrentía máxima de 75,8 m<sup>3</sup>/s para toda la cuenca.

Para la realización del análisis hidráulico, se tuvieron en cuenta 85 secciones diferentes del canal principal que atraviesa la Empresa Reficar. Con este análisis se determinó la capacidad hidráulica del canal, dejando evidencia de 15 secciones críticas o incapaces de transportar el caudal máximo probable generado en la cuenca (un 18% del total de las secciones).

Hecho el análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del Arroyo Grande, se plantearon las alternativas de solución para la mitigación de las inundaciones en la zona de estudio (Arnedo Pacheco & Sierra Passo, 2006).

En el año 2008 se caracteriza hidrológicamente la cuenca del arroyo Matute, como elemento para considerar un posible ordenamiento territorial.



El objeto de este estudio es el de evaluar alternativas de manejo para minimizar los efectos de crecientes del Arroyo Matute en el barrio San José de los Campanos-Cartagena, para el cual fue pertinente plantearse caracterizar hidrológicamente la Cuenca, identificar las áreas potencialmente afectadas, determinar la transformación de la cuenca y el cauce del arroyo, analizar los Impactos, evaluar soluciones, seleccionar las alternativas posibles y establecer un plan de Gestión.

El estudio tuvo como procesos investigativos, la caracterización hidrológica de la cuenca, en la que se precisó las estructuras existentes, el uso y la calidad del agua en la cuenca, seguido a ello se determinó el área potencialmente afectada por las inundaciones y finalmente se definió los impactos producidos por la acción del arroyo matute.

Como alternativa de solución se propuso, la disposición de humedales artificiales de retención, represas de retardo, una presa de almacenamiento y aprovechamiento, estructura de almacenamiento y liberación controlada y la reforestación de la zona de estudio.

Además de las soluciones anteriormente expuestas, se presenta una propuesta de gestión ambiental, en la cual se ve la importancia de un cambio de la reglamentación(en lo referente a la conservación y aprovechamiento del recurso hídrico),incentivar a los propietarios de predios que están dentro de la cuenca a construir reservorios para retener las aguas, con liberación controlada, estimular la reforestación y cultivos ornamentales, promover la formulación de un plan de manejo de residuos sólidos en la cuenca, estimular a las corporaciones y autoridades locales para que realicen proyectos de educación ambiental en los barrios que se encuentran alrededor de la cuenca, fortalecer los POT de Cartagena y Turbaco en el área de conservación de la cuenca, un plan de manejo de las aguas residuales domésticas, un plan de manejo para el consumo de recurso hídrico(Botero Pareja, Guardo Castaño, Nieto Parra, & Castaño Rodríguez, 2008).

En el año 2013 se realizó la evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca hidrográfica del arroyo Policarpa para el control de inundaciones.

Se planteó en este proyecto, analizar y diagnosticar la situación de la cuenca hidrográfica del Arroyo Policarpa, en Cartagena, Colombia, mediante la evaluación de sus características hidráulicas e hidrológicas, con el fin de controlar las inundaciones en la zona baja de la misma.



Siguiendo la metodología propuesta para esta investigación, se determinaron los parámetros morfométricos necesarios para conocer, detallar y predecir el comportamiento de la cuenca del arroyo Policarpa, la que se dividió en diez (10) subcuencas para aplicar el método Racional.

Por su parte, para el estudio hidráulico, se analizaron (19) secciones transversales a lo largo del cauce, para determinar su capacidad hidráulica.

Bajo la mencionada evaluación se llevó a cabo la determinación de puntos críticos por inundación y fue necesario la creación de escenarios conflictivos en el manejo de la escorrentía superficial, para luego proponer alternativas de solución que mitigaran el impacto por desbordamiento.

Se realizó una comparación entre los caudales determinados con el estudio hidrológico y con el estudio hidráulico en la zona. El análisis hidrológico arrojó que el aporte del arroyo Policarpa a la Bahía de Cartagena tiene un valor de descarga máximo de 22,2 m<sup>3</sup>/s.

Por su parte, para el estudio hidráulico, se determinó que algunas secciones no contaban con la capacidad hidráulica adecuada para transportar el caudal hidrológico en el canal; dichas secciones contaban con alturas entre 30 y 40 centímetros y solo tenían capacidad para transportar el 2% del caudal para un período de 50 años.

Al evaluar la factibilidad de las alternativas planteadas por este estudio, se encuentra viable como primera solución al problema de inundación y/o desbordamientos del arroyo Policarpa, la construcción de un embalse de amortiguación de caudal y la ampliación de las secciones del canal (Del Castillo & Ortiz, 2013).

Para el año 2014 se analizó la amenaza por inundación para la localidad de Tunjuelito, desarrollado a través de sistemas de información geográfica.

Se buscó en este proyecto desarrollar a través de sistemas de información geográfica, un mapa para el análisis de tipo predictivo de la amenaza por inundación para la localidad de Tunjuelito.

Para poder obtener el mapa de inundación, el paso inicial fue la obtención de las llanuras de inundación, que se traduce en el alcance de las aguas en los diferentes periodos de retorno, para obtener estas llanuras se empleó la ecuación de Manning.



Con la finalidad de facilitar y hacer más preciso el análisis, se realizó una subdivisión del tramo original que corresponde a la parte del río que delimita a la localidad de Tunjuelito, cuya longitud es de 12 kilómetros aproximadamente, de la división se obtuvieron 15 subtramos.

Para el manejo de la ecuación de Manning fue indispensable caracterizar el cauce, para poder realizar la caracterización se asemejó el cauce natural a un canal artificial tipo trapezoidal, para poder obtener valores de su sección transversal.

Con la ayuda de la cobertura digital de la topografía del terreno analizado y a través de la herramienta QGIS, se realizaron aforos digitales para cada uno de los subtramos cada 50 metros, tomando medidas de la base (b), del cauce, la pendiente del talud (z) y diferencia de niveles; esta última para calcular la pendiente media del subtramo y finalmente se promediaron los valores obtenidos.

Se realizó una hoja de cálculo que permitiera iterar diferentes alturas de lámina de agua (y), para hallar la que permitiese el paso del caudal de estudio correspondiente a cada periodo de retorno y así identificar las curvas de nivel que delimiten la zona inundable.

Una vez obtenidos los resultados de la altura probable de la lámina de agua de acuerdo con los caudales en los diferentes periodos de retorno, se procede a dibujar las capas o manchas de inundación siguiendo las curvas de nivel a las cuales llegaría la inundación identificadas en la hoja de cálculo.

De acuerdo con la categorización de la amenaza por inundación dada por el FOPAE y los resultados de las llanuras de inundación se obtuvo el mapa de amenaza.

El uso de la herramienta QGIS permite el ingreso de los datos referentes a las llanuras de inundación como lo son la velocidad de las aguas, el periodo de retorno, el caudal esperado y área de afectación, datos que servirían para realizar un análisis de la vulnerabilidad y del riesgo, permitiendo la actualización o modificación de los datos de forma fácil y ágil, haciendo del mapa que se ha generado, un instrumento ideal para la gestión del riesgo (Robayo Mejía, 2014).





En el año 2014 se realizó el estudio hidrológico de la cuenca del río Chípalo. Este proyecto tuvo como objeto, realizar el estudio Hidrológico de la cuenca del Río Chípalo, con el fin de conocer los caudales máximos en el punto de control denominado puente el silbador.

Para ello fue necesario recolectar y analizar la información disponible de la zona de estudio necesaria para la modelación hidrológica, basándose en la obtención de información cartográfica e hidrometeorológica.

Dentro de la información cartográfica se encuentra el mapa de uso de suelos, el cual permitió determinar el tipo de cobertura y su influencia en la relación precipitación escurrimiento.

Para la obtención de la información hidro-meteorológica se realizó el análisis por la metodología de polígonos de Thiessen para seleccionar las estaciones más próximas a la cuenca en estudio.

Luego de la obtención de la información, se determinó la delimitación de la cuenca hidrográfica, la morfometría, el cálculo de curvas I.D.F, para la cual se utilizó el método simplificado propuesto por el Manual de drenaje para carreteras del Ministerio de transporte.

Para fines de conocer el comportamiento de la cuenca se supuso una tormenta de diseño, para el punto de control ubicado en el puente silbador, se asumió para el análisis un periodo de retorno de 50 años, se calculó el hietograma el cual es la representación gráfica de la precipitación de una duración 5 horas con intervalos de tiempo de 30 minutos, estos datos fueron suministrados por las curvas IDF para un periodo de retorno definido, se construyó el hietograma por el método de bloque alterno.

Se planteó para este proyecto, estimar los caudales máximos para la cuenca del Río Chípalo utilizando las metodologías: racional, hidrograma unitario triangular SCS y el hidrograma unitario SCS, en la que se realizó el modelo hidrológico con el Software HEC HMS.

Los valores obtenidos en este estudio del caudal pico por los diferentes métodos (Hidrograma unitario triangular SCS- 165.39 m<sup>3</sup>/s, Hidrograma unitario SCS 167 m<sup>3</sup>/s y Método racional- 192.78m<sup>3</sup>/s) se encuentran dentro de los valores proyectados por el estudio realizado por el Himat 1990, para períodos de retorno de 2, 20 y 100 años que dice que se deben esperar caudales máximos de 50, 130 y 180 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Sin embargo, (Vergara., 1992) estima caudal del orden de 200 a 250 m<sup>3</sup>/s para una creciente ocurrida en 1959.



Al comparar los valores del caudal pico calculado por los tres métodos, concluyen los autores que tanto para el método del hidrograma unitario triangular S.C:S. y el hidrograma unitario S.C.S. los resultados obtenidos son similares ya que los dos métodos tienen en cuenta la distribución de la lluvia en el tiempo (hietograma) por el contrario el cálculo realizado por el método racional toma la intensidad de la lluvia calculada con las curvas I.D.F. en un tiempo igual al tiempo de concentración el cual indica que después de ese tiempo toda la cuenca está aportando caudal al punto de cierre. Y no tiene en cuenta la distribución temporal de la lluvia (Becerra Vargas & Quiroga Garzon, 2014).

En el año 2015 se lleva a cabo la evaluación del drenaje pluvial existente con descarga al mar Caribe frente a la alternativa de solución con descarga sobre la bahía de Cartagena, en el área comprendida entre las avenidas primera y san Martín. En este estudio se propuso evaluar desde el punto de vista técnico una alternativa de solución a través de un drenaje pluvial a gravedad frente al sistema de drenajes existente en el barrio Bocagrande de esta ciudad, entre la Avenida Primera, la Avenida San Martín y parte de la Carrera Tercera, por medio de un rediseño y reorientación del flujo con descarga en la Bahía de Cartagena, buscando reducir al máximo posibles retardos en el drenaje urbano evitando daños a la estructura vial y edificaciones aledañas.

Para cumplir con los objetivos de este proyecto fue menester esquematizar el funcionamiento y comportamiento del sistema de drenajes existente en la zona de estudio con base en la altimetría del pavimento, sus puntos de vertimiento al Mar Caribe y un inventario de las estructuras de drenaje presentes. Además, fue necesario evaluar y analizar alternativas de solución frente al sistema de drenajes existente, proponiendo el vertimiento de la escorrentía en la bahía de Cartagena a través de un sistema por gravedad que cumpliera con los requerimientos deseados. Por otro lado, se propuso un sistema de protección complementario para mitigar los efectos del Mar de Leva sobre el drenaje durante eventos ocasionales extremos para evitar la intrusión marina en el área de drenajes a estudiar.

Para el desarrollo del diseño de la alternativa propuesta se tuvo en cuenta, realizar el análisis hidrológico centrado en la idea de verter las aguas pluviales a la Bahía, y garantizar que no se presentaran interferencias entre los servicios existentes y el drenaje propuesto, todo esto basado en



el método racional. Se determinó las cotas para cada encuentro de los tramos en la zona de estudio, con estas cotas se calculó las pendientes de cada tramo que permitieran determinar las direcciones de flujo y el punto de convergencia, para realizar la descarga final. Se clasificó el área de estudio en distintas subcuencas, encontrándose de esta manera 8 subcuencas.

Siguiendo con lo anterior se identificaron las zonas verdes o permeables del área de estudio para ser descontadas a cada área aferente que colinda respectivamente con cada tramo de calle, por medio de la Morfometría del terreno se obtuvo el tiempo de concentración, para ser relacionado con la intensidad de lluvia de diseño y de esta forma poder determinar el caudal de escorrentía.

Luego de obtenido el caudal de escorrentía se determinó la capacidad de la vía, para poder establecer si se presentaba o no caudal excedente en los diversos tramos y así determinar el diseño de sumideros que condujeran este caudal (en caso de necesitarse).

Fue necesario para este proyecto conocer el aumento del nivel del mar a lo largo del tiempo para comprobar los alcances o límites en cuanto a tiempo se refiere, esto debido a que es de vital importancia conocer la profundidad de las tuberías de descarga para asegurar la salida del flujo teniendo en cuenta los diferenciales de energía que maneja la válvula de altitud sobre la bahía de Cartagena cuya cota ascenderá con el paso del tiempo según proyecciones para futuros años, entre 0.15m a 0.20m para el año 2040 y de 1m para el año 2100.

En esencia se desarrolló un análisis hidrológico y se verificó la profundidad de tuberías de descarga en la actualidad, para el año 2040 con un acenso del nivel del mar de 0.2m (más desfavorable), y 2100 para un acenso del nivel del mar de 1m (Brewer & Herrera, 2015).

En el año 2017 se determinó la proyección de los niveles de inundación actual y futura en el sistema de caños y lagos de la ciudad de Cartagena, mediante el análisis del comportamiento de la variación de niveles de los cuerpos de agua y el modelo matemático desarrollado a través del software MIKE HYDRO RIVER con el fin de sugerir estrategias para la mitigación de los impactos en la urbe, teniendo en cuenta los escenarios del ascenso del nivel del mar para el año 2040.

Esta investigación se realizó desde el mes de agosto del 2016 hasta noviembre del mismo año y presenta un enfoque cuantitativo debido a que se fundamentó en la toma de datos de nivel, viento



y velocidad de corriente de los cuerpos de agua con instrumentos predeterminados, que permitieron la realización de la modelación hidrodinámica para determinar los puntos de inundación de las zonas que colindan con el sistema.

Durante este tiempo se realizó el monitoreo del sistema de caños y lagos, teniendo en cuenta escenarios con época seca y con ascensos del nivel del mar mínimos y máximos según lo estimado.

Según los estudios y el análisis llevado a cabo por esta investigación, se pudo inferir que la Bahía mantuvo el nivel más alto del sistema  $-0.078$  m y la Ciénaga de la Virgen el más bajo con  $-0.267$  m, además, se resalta la influencia de las precipitaciones en el aumento de los niveles, principalmente en la Ciénaga y en el caño Juan Angola, producto de la gran extensión de la primera y de la comunicación directa que tiene con el caño. Finalmente se infiere que la entrada del mar por la bahía y principalmente la Bocana rige el comportamiento (ascenso y descenso) en los cuerpos de agua del sistema, ya que estos al ser más pequeños, reciben los volúmenes suministrados por el mar.

Se evaluaron seis escenarios a partir del crecimiento anual de 3.6 mm, 5 mm y 7.2 mm cada uno con y sin lluvia. En general la lámina de agua en los tres escenarios sin lluvia era muy parecida, pero diferían en que a medida que aumentaba el crecimiento se presentaba más zonas inundables, lo mismo para los casos con precipitaciones. En los eventos sin lluvia la lámina de agua por encima del borde oscilaba entre los 10 cm (Caño de Bazurto y Chambacú) y 80 cm (Ciénaga de las Quintas), la Laguna de San lázaro también se ve afectada con láminas de agua de 30 a 40 cm; en los eventos con lluvia se nota un crecimiento importante en el caño Juan Angola puesto que este alcanza una lámina de 1.2 m por encima del borde. Para el caso de aumento mínimo la Laguna de Chambacú y Laguna del Cabrero no se ven afectados en eventos sin precipitación (Cañate Lara & Guzmán Torres, 2017).

Si bien los estudios anteriormente expuestos tratan la problemática de inundación, lo hacen desde perspectivas diferentes, ya sea por la caracterización y diagnóstico de las cuencas de los cuerpos de agua en su zona de estudio, la obtención de llanuras de inundación, el análisis del comportamiento y capacidad hidráulica de las estructuras de drenaje y/o vías existentes, y el



planteamiento de alternativas de solución a la problemática. Al plantear el análisis de la problemática desde una visión específica, no consideran la articulación entre estas, lo que lleva a que la estimación de zonas de afectación por inundación sea quizás menor a la estimada por la integración de los diversos enfoques.

El análisis de la amenaza por inundación planteado en este proyecto tendrá en consideración la articulación de los enfoques anteriormente expuestos, razón por la cual cabe la necesidad de basarse en los mencionados estudios previos.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GENERAL**

Determinar las zonas de afectación y los niveles de la lámina de agua por inundación pluvial en el área urbana de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar, con el fin de asignar el nivel de amenaza por inundaciones pluviales, que presenta cada sector de la zona estudiada y el diagnóstico de su sistema de drenaje.

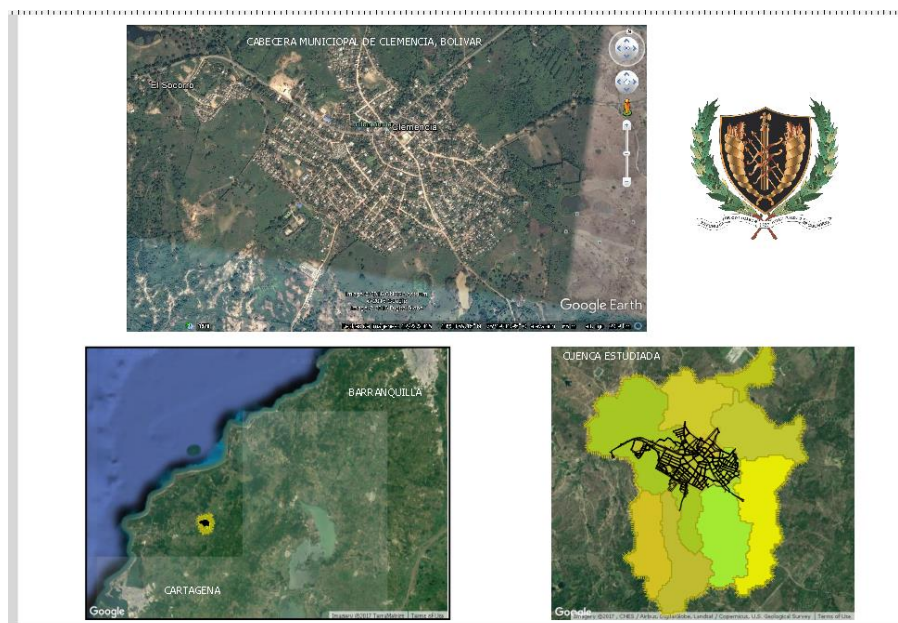
### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Conceptualizar la relación entre la hidrología, la hidráulica y la afectación resultante de la inundación en el ámbito de la amenaza del entorno social, por la falla funcional y física del sistema de drenaje.
- Determinar la expresión de determinación de Intensidades para la estación pluviométrica BAYUNCA.
- Definir mediante el análisis hidrológico e hidráulico la respuesta del sistema de drenaje ante escenarios factibles de evaluación que permitan simular condiciones climatológicas, de uso del suelo, de deterioro de la red, entre otros factores que inciden en dicho sistema, con el fin de evaluar el desempeño de este.
- Generar mapas de amenaza por inundación, con base en la información de las variables, que permita el análisis predictivo de la amenaza, con la finalidad de que sea útil para la gestión del riesgo de desastres y para el desarrollo urbano.
- Determinar medidas de intervención, que permitan la mitigación del caudal de escorrentía que cause problemas a la población, reduciendo la amenaza.

### 3 ALCANCE

El municipio de Clemencia está ubicado a la altura del kilómetro 37 de la carretera de la Cordialidad en la zona norte del departamento de Bolívar; en la subregión litoral del tramo que une a las ciudades de Cartagena y Barranquilla. Limita geográficamente por el norte con el corregimiento de Arroyo Grande; al sur con los municipios de Santa Rosa de Lima y Villanueva; al oriente con el municipio de Santa Catalina y al occidente con el corregimiento de Bayunca.

Las coordenadas geográficas que referencia al municipio son: 10°34'06" de latitud norte y 75°19'30" de longitud oeste, al norte del departamento de Bolívar y al noreste de la cabecera municipal del Municipio de Santa Catalina. Se encuentra ubicado entre la carretera de la Cordialidad y la carretera al mar. Representa el 16.39% de la superficie total del territorio del Departamento de Bolívar. Actualmente cuenta con una población aproximada de 15.000 Habitantes. La información referente a este proyecto se recolecto desde febrero de 2017, y se culminó el 5 de noviembre del mismo año.



*Ilustración 3. Ubicación espacial del área de estudio.*

Este proyecto se llevó a cabo a lo largo del segundo semestre de 2017 con una duración de cuatro (4) meses, iniciando con la revisión bibliográfica relevante basada en investigaciones llevadas a



cabo en el ámbito nacional e internacional en poblaciones y/o cuencas hidrográficas con la necesidad de solucionar sus problemas de manejo de aguas de escorrentía superficial. Además se consideró los informes y diagnósticos expedidos por los entes gubernamentales y no gubernamentales sobre el manejo de los recursos hídricos e impacto de la inundación en la población.

Esta investigación tuvo como objeto determinar el nivel de amenaza por inundación y el diagnóstico del drenaje del casco urbano de Clemencia, Bolívar, partiendo de la incidencia de caudales por los arroyos Arena y Hormiguero y por el manejo de la escorrentía superficial debido a precipitaciones, en las calles y estructuras de drenaje de la mencionada población.

Para lo anterior se tuvo en cuenta llevar a cabo un análisis hidrológico e hidráulico tanto en las cuencas de los arroyos como en la cobertura urbana, para así determinar la magnitud de caudales y láminas de agua correspondiente a lluvias con periodos de retorno críticos, los cuales se detallan en la metodología.

Con el fin de llevar a cabo el estudio hidrológico - hidráulico, se realizó la caracterización morfométrica pertinente para las cuencas de los arroyos, determinando variables tales como las áreas de drenaje, el perímetro, la divisoria entre cuencas, la longitud de esta entre otras. Además, se estudió la geometría de las vías, estructuras de drenaje presentes y tramos de arroyo que atraviesen la población, para determinar su capacidad hidráulica

Como complemento lo anterior se estudiaron los datos históricos pluviométricos brindados por el IDEAM correspondiente a la estación pluviométrica “BAYUNCA”.

Teniendo en cuenta que toda la población no se encontraría en el mismo nivel de exposición a inundaciones, resultó crucial zonificar la población de acuerdo al nivel de amenaza que presente, pues esto redundaría en beneficios económicos, sociales y ambientales..

Aunque no es prioridad de este proyecto presentar un diseño de drenaje pluvial, ni de mitigación frente a los arroyos, se determinó con base al diagnóstico de las estructuras disponibles, si es necesario o no la ampliación, adecuación o construcción de estos.

Por lo tanto, una vez finalizado el análisis de la información recolectada, se obtuvieron mapas con niveles de amenaza por inundación del área urbana en cuestión, en el cual se pueden observar





cuales son las zonas que presentan mayor afectación por la lámina de agua debido a la acumulación de caudales.

Tomando como base esta investigación, en el futuro a través de la información presentada, podría determinarse qué sectores necesitan obras de mitigación de la amenaza y cuales requerirían en caso de materializarse la construcción de un sistema de drenaje pluvial, la vinculación a este. Además, podría evaluarse la factibilidad que tiene en la zona de estudio la implementación de diversos sistemas de drenaje pluvial. También surge la posibilidad de estimar modificar o mejorar el sistema disponible actualmente para contrarrestar la acumulación de grandes caudales de escorrentía en ciertas zonas en particular. Además, se podría determinar si a través de algún tipo de intervención en la topografía de las zonas más vulnerables, se lograría minimizar el riesgo al que en la actualidad se encuentran expuestas.

Por último, cabe resaltar que no es objeto de esta investigación la realización de un estudio hidrológico-meteorológico detallado de las cuencas, solo se definirán las características morfométricas, meteorológicas e hidráulicas que permitan simular eventos pluviométricos con valores de intensidad en diferentes duraciones, para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.



#### **4 METODOLOGÍA**

Se partió de una base metodológica mixta (cualitativa y cuantitativa), esta inició consultando información relacionada con la amenaza por inundación pluviométrica, teniendo como soporte investigaciones nacionales e internacionales, como también la consulta de las variables que intervienen en la amenaza por inundación en la zona de estudio.

Posteriormente se seleccionó la información relevante para este estudio y se inició la etapa de análisis de la información, teniendo como meta la obtención de llanuras de inundación de la zona en cuestión.

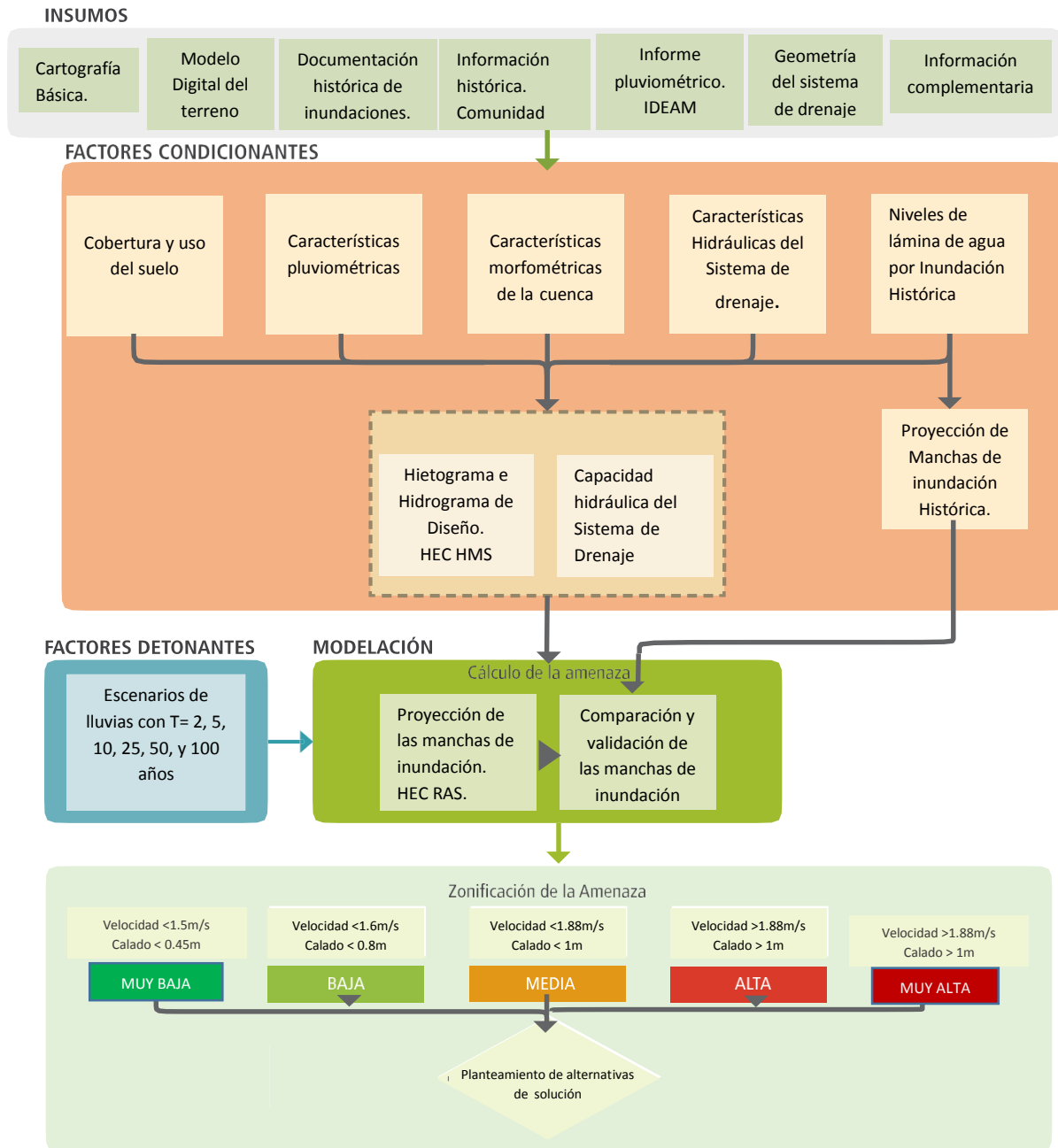
Para fines del estudio se propuso dos metodologías para la evaluación de la amenaza: La primera incorporo el conocimiento local y la elaboración de información geográfica, plasmando la proyección de inundaciones mediante el uso de herramientas participativas con la comunidad y la segunda metodología se enfocó en la determinación de niveles máximos de precipitación, períodos de retorno y tiempos de duración, que junto con la información de alturas en el terreno provenientes de la topografía, el modelo digital de elevación D.E.M. y el modelador hidráulico HEC RAS®, se estimaron las manchas de inundación.

En el siguiente diagrama se presenta el planteamiento metodológico del proyecto.

*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



**Universidad de Cartagena**  
Fundada en 1827



*Ilustración 4. Planteamiento metodológico de la investigación adaptada de (Servicio Geológico Colombiano, 2015)*



#### **4.1 METODOLOGÍA 1. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA A PARTIR DE DATOS HISTÓRICOS APORTADOS POR LAS COMUNIDADES**

La metodología a partir de la búsqueda de datos históricos se basó en lo expuesto por (Rodríguez Gaviria, 2016) donde se partió de la suposición de que el pasado es un reflejo del futuro y si una inundación alguna vez ha alcanzado ciertos niveles puede hacerlo también en el futuro.

Se propuso esta metodología para tener una estimación de cómo ha sido el comportamiento natural de las inundaciones y hacer un reconocimiento de la zona a través del trabajo con las comunidades y el desarrollo de las etapas que se explican a continuación:

##### **4.1.1 Etapa 1. Búsqueda inicial de documentación histórica**

Partiendo del informe del Plan municipal de gestión del riesgo de desastres del municipio de Clemencia en el que se expone las áreas potencialmente afectadas por las inundaciones, se llevó a cabo una encuesta en las viviendas de la zona afectada por inundación en la que se determinó: si ha sufrido o no inundaciones, nivel alcanzado por las inundaciones en la vivienda y los bienes afectados por la inundación.

Para obtener información sobre el caudal de los arroyos se consultaron informes de estudios previos para la realización de obras de mitigación en dichos arroyos, llevados a cabo bajo el control de la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique CARDIQUE.

Por otra parte, se estudió las fuentes documentales, planes de desarrollo, ordenamiento territorial, archivos históricos (entrevistas, registros en video, registros fotográficos), bases de datos (locales, regionales y nacionales), estudios técnicos, además de información geográfica, mapas digitales e impresos con información catastral, sobre inundaciones pasadas, de coberturas, con cartografía básica, imágenes y orto fotos, entre otras.

Dentro de esta etapa se realizó una validación y clasificación de los datos históricos recopilados para definir aquellas inundaciones históricas que entrarían en el análisis con base en criterios, tales como: período de tiempo, formato (análogo o digital), calidad (escala, resolución) y disponibilidad.



#### **4.1.2 Etapa 2. Recolección de información histórica mediante el uso de herramientas participativas con comunidades.**

Se tuvo en cuenta para esta etapa la toma de datos que pudiesen combinarse más adelante con otros métodos como el modelamiento hidráulico, para identificar y hacer seguimiento presente y futuro de la amenaza. Las comunidades establecidas tienen un conocimiento claro sobre los niveles de inundación en su territorio y los valores máximos históricos, ya que han evidenciado estos fenómenos directamente, por esto se incorporó al trabajo de campo diferentes métodos participativos con comunidades, clasificados como:

**Trabajo individual** en el que se usaron herramientas como las encuestas por hogar.

La aplicación de las encuestas por hogar se aplicó a aquellos hogares que se encuentran en la zona de inundación de acuerdo a lo establecido por (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2012), con el apoyo de un cuestionario orientado a cubrir aspectos de la amenaza y que fuese lo suficientemente ordenado y claro a la hora de recopilar, procesar y tabular los datos, como información más relevante de la encuesta se debió conocer si la vivienda ha sufrido o no inundaciones y el nivel alcanzado por las inundaciones.

Para llevar a cabo las encuestas se hizo necesario determinar el tamaño de la muestra que iba a ser encuestada, dado que factores como el tiempo y los altos costos que implicaba encuestar al completo de la población (N) fue necesario tomar de ella una muestra representativa (n) que asegurara un porcentaje de error pequeño (menor a 0,01) y que además, después de realizado un análisis de una muestra pequeña se acercase al estimado real de haber analizado a toda la población (N) para que así de cada 100 casos en 99 de los mismos, la predicción fuera correcta. La (Ec. 34) muestra cómo se determina el tamaño de dicha muestra.

$$n' = \frac{S^2}{V^2} = \frac{\text{varianza de la muestra}}{\text{varianza de la poblacion}} \text{ Ec. 34}$$

Después de utilizar el software Google Earth y realizar un conteo manual del total de viviendas correspondientes a cada población en riesgo se obtuvo el total de la población implicada en el análisis, en estos casos es necesario realizar un ajuste por población como se indica a continuación

$$n = \frac{n'}{1 - n'/n} \text{ Ec. 35}$$

Luego se efectuaron los cálculos matemáticos indicados anteriormente obteniendo como resultado el total de casas a encuestar que son una muestra representativa del total

$$n' = \frac{0,09}{0,03^2} = 100 \rightarrow \text{Ajustando por poblacion tenemos que } n = \frac{100}{1 - 100/571} \approx 80$$

Gracias a esto se logró determinar el total de viviendas a encuestar que fueron 80 viviendas, repartidas en 2 zonas afectadas por inundación en la población. Luego se enumeraron las viviendas y se escogió de manera aleatoria cuales serían las viviendas por encuestar.



*Ilustración 5. Viviendas encuestadas, visualizadas en Google Earth. Fuente: Autores*



**Trabajo en campo** haciendo uso de herramientas como los transectos y las entrevistas a pie, apoyados en herramientas de captura de información y de coordenadas geográficas.

Los datos obtenidos durante el trabajo de campo se basaron principalmente en la fecha de la inundación, profundidad (evidenciados con marcas en viviendas y otros elementos o asociados con respecto a la altura del cuerpo), duración, identificación de la causa, y los impactos ocasionados. Estos datos fueron georreferenciados para convertirlos en información espacial y permitir la reconstrucción de eventos pasados.



*Ilustración 6. Nivel de profundidad estimado por información obtenida, georreferenciada con QGIS. Fuente: Autores*

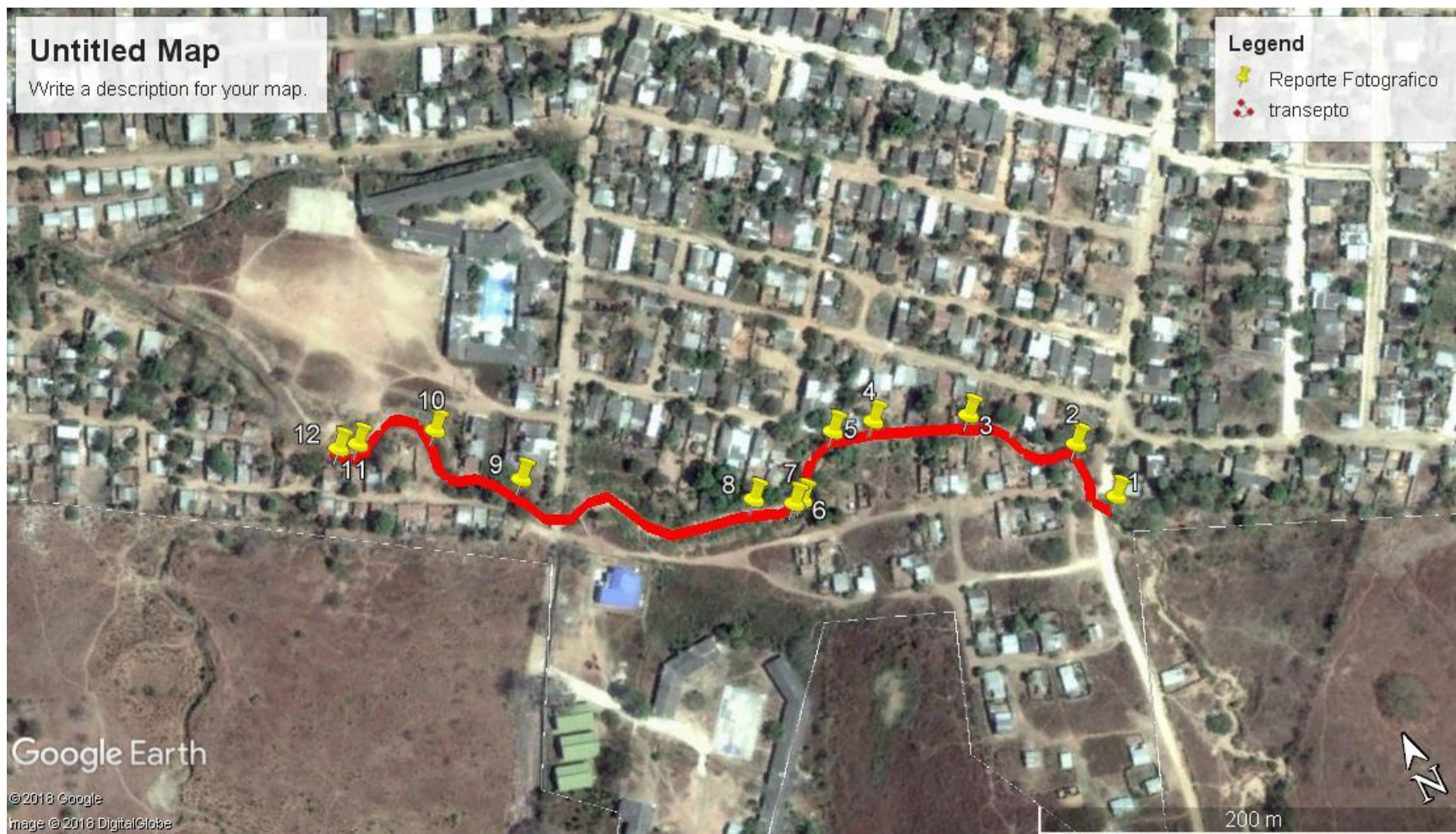
*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



**Universidad  
de Cartagena**  
Fundada en 1827

Por medio de los transeptos se obtuvo evidencia fotográfica del estado en que se encontraban los canales en el momento en que fue realizada la exploración de campo, logrando visualizar diversas problemáticas que acrecientan el principal problema, la amenaza por inundación. A continuación, se puede observar un mapa de la ubicación en que fueron tomadas tales fotografías, así como algunas de ellas que exponen la situación encontrada.





*Ilustración 7. Proyección del transecto, sobre el arroyo arena, Clemencia, Bolívar.*



*Fotografía 1. Muros de gaviones sobre el sector calle Franco, Arroyo Hormiguero.*



*Fotografía 2. Muros de gaviones sobre tramo de arroyo Hormiguero con rebasamiento del cauce, Sector calle Franco.*



*Fotografía 3. Muros de gaviones, arroyo Hormiguero, sector La Paz*



*Fotografía 4. Muros de gaviones que conservan las secciones del canal en sector La Paz*



*Fotografía 5. Aumento en la sección de tramo del canal ubicado en el sector La Paz, producto de caudales muy grandes en época invernal.*



*Fotografía 6. Acumulación de basuras en el cauce del canal*



*Fotografía 7. Acumulación de basuras en el arroyo Hormiguero.*



*Fotografía 8. Acumulación de basuras en el arroyo Hormiguero.*



*Fotografía 9. Socavación cerca de viviendas del sector La Paz*



*Fotografía 10. Ensanchamiento de sección transversal del arroyo, por erosión de taludes laterales del canal.*



*Fotografía 11. Socavación en predios de privados que colindan al canal, sector La Paz.*



*Fotografía 12. Manchas que muestran la altura alcanzada por el agua durante inundaciones en sector La Paz.*



#### **4.1.2.1 Etapa 3. Procesamiento y análisis de la información**

Una vez identificada una inundación histórica de interés, se procedió a sistematizar el conjunto de datos obtenidos y a verificar su consistencia confrontando con información disponible sobre la frecuencia de fenómenos como la Niña.

Se usó la información proporcionada de los lugares inundados, vinculando sus coordenadas obtenidas en campo a un sistema de información geográfica S.I.G. mediante el programa QGIS para superponerla con el plano topográfico de la población, y las imágenes satelitales con el fin de observar la distribución de la Inundación en el área urbana.

#### **4.1.3 Etapa 4. Construcción de la mancha de inundación**

Para construir la mancha de inundación se tuvo en cuenta la cantidad de puntos o lugares informados, cada uno de ellos con unas coordenadas y una altura relativa de inundación.

Además, se consideró el plano topográfico de la población y el D.E.M. para extraer la cota del terreno en cada uno de esos puntos.

Por medio de un análisis de frecuencias para toda la cantidad de puntos, se determinó la altura promedio de la lámina de agua reportada y la desviación estándar los cuales se sumaron al S.I.G, para generar una mancha de inundación. Este resultado se conservó hasta que se obtuvo los resultados con la otra metodología para luego analizar y validar sus resultados.

#### **4.1.4 Etapa 5. Clasificación de la inundación.**

A partir de la tabulación de los datos obtenidos con las encuestas por hogar, con la que se buscó indagar sobre la percepción de la profundidad y los daños, se procedió a clasificar las inundaciones reportadas por años adaptándose a las denominaciones recomendadas por (Barriendos & Coeur., 2016) y adaptadas por (Rodríguez Gaviria, 2016) de la siguiente forma: inundación ordinaria o leve aquella de la que no queda constancia de desbordamiento evidente, extraordinaria o moderada de la que queda constancia del desbordamiento evidente sin daños o con el registro de daños leves, y por último, catastrófica o desastrosa de la que queda constancia del desbordamiento con daños graves o destrucción completa a personas, infraestructura, áreas urbanizadas y sus contenidos, véase la tabla 6.



**Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.**



*Tabla 6. Clasificación de las inundaciones adaptada (Barriendos & Coeur, 2016) Fuente: (Hernandez Rodriguez, 2012)*

Profundidad (m) del agua según registros de marcas o encuestas	Profundidad del agua según registros de las personas asociadas a las partes de su cuerpo	Duración de la inundación	Calificación de la inundación	Características de la inundación
0.1	Tobillos	Más de 1 día	Leve	Contaminación del agua y estancamientos que afectan la salud.
0.3	Media pierna	Hasta 1 semana	Leve	Contaminación del agua y estancamientos que afectan la salud. Daños en las viviendas y otras estructuras, en pisos y paredes dependiendo del tipo y calidad de su material.
0.3	Media pierna	Más de una semana	Moderada	Contaminación del agua y estancamientos que afectan la salud. Daños en las viviendas y otras estructuras, en pisos y paredes dependiendo del tipo y calidad de su material al permanecer inmersos. Cambios en su rutina diaria.
0.5	Rodillas	Hasta 1 semana	Moderada	Contaminación del agua y estancamientos que afectan la salud. Daños severos en las viviendas y otras estructuras, en pisos y paredes dependiendo del tipo y calidad de su material al permanecer inmersos. Cambios en la rutina diaria de las comunidades. Piensan en buscar albergue y comienzan a proteger sus pertenencias.

**Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.**



Tabla 7. Continuación de Ilustración 6. Clasificación de las inundaciones adaptada (Barriendos & Coeur., 2016) Fuente: (Hernandez Rodriguez, 2012)

0.5	Rodillas	Más de una semana	Catastrófica	Contaminación del agua que afecta la salud. Aparición de animales peligrosos que ponen en peligro la vida. Daños graves en las viviendas y otras estructuras, en pisos y paredes dependiendo del tipo y calidad de su material al permanecer inmersos y por la velocidad de arrastre del agua. Los habitantes no salen a trabajar. Algunos van al albergue para proteger a los más vulnerables. Se pierden los cultivos. Se dificulta la movilidad pues no pueden salir ni ingresar al barrio. Incrementan los gastos pero no hay trabajo. Escasez de alimentos. Interrupción de servicios y negocios familiares. El abastecimiento de agua potable y energía son suspendidos. Se deterioran las condiciones de seguridad en la zona.
1	Cintura	Más de 1 día	Catastrófica	Ídem
1.3	Pecho	Más de 1 día	Catastrófica	Ídem
1.6	Cuello o x encima de la cabeza	Más de 1 día	Catastrófica	Ídem



## **4.2 METODOLOGÍA 2. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO**

Con esta segunda metodología se buscó obtener mapas de zonas de inundación para el área urbana de Clemencia, Bolívar con base en el análisis conjunto de la información de niveles y de alturas en el terreno, para esto se debió cumplir las siguientes etapas.

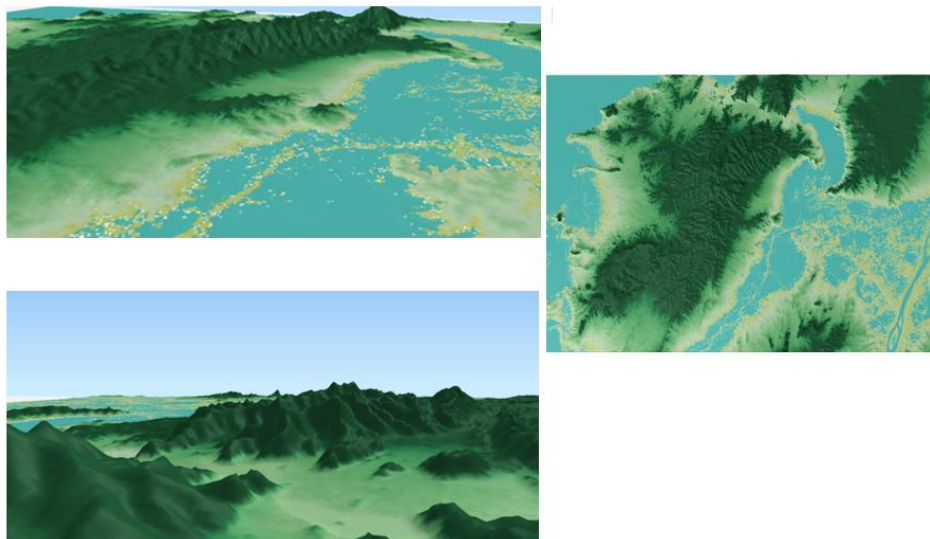
### **4.2.1 Etapa 1. Recolección de información**

Las fuentes que se tomaron en cuenta para la obtención de la información conceptual y fundamental de este proyecto tuvieron como base estudios que estén relacionados con amenaza por inundación, en el ámbito local, nacional e internacional, como también en el marco legal normativo vigente en Colombia (RAS 2010). Para la obtención de información específica de la zona en cuestión se tuvo como base las plataformas virtuales de los organismos encargados del control de emergencias, en este caso, principalmente en informes llevados a cabo por la unidad nacional de gestión de riesgo de desastres UNGRD, como también de información brindada por la oficina de planeación municipal de Clemencia, Bolívar, por otro lado información de estudios realizados por las empresas ACUACOR S.A. y C.D.I, en la localidad y además información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

#### **4.2.1.1 Información Morfométrica**

Fue pertinente para el estudio, la obtención de información en puntos específicos del territorio estudiado.

- Arroyo Hormiguero y Arroyo Arena: Para obtener información específica de las características de las cuencas de cada arroyo se optó por la obtención del modelo digital de elevación con código AP\_26958\_FBS\_F0190\_RT.dem obtenido de la página Earth Explorer, "ASTER GDEM es un producto de METI y NASA", el cual fue caracterizado gracias a la manipulación sobre la herramienta de información geográfica Global Mapper®.



*Ilustración 8. Modelo digital de elevación usado para la modelación, visualizado con QGIS*  
*Fuente: METI y NASA*

- Localidad de Clemencia-Bolívar: Para la obtención de información morfométrica de la subcuenca urbana que forma la población, se dispuso del levantamiento topográfico, realizado por las empresas ACUACOR S.A. y C.D.I. las cuales son responsables del diseño y mantenimiento del alcantarillado de la comunidad en cuestión, además se contó con información suministrada por el programa Google Earth Pro®.
  
- Uso del Suelo: Para la adquisición de las coberturas se consultó múltiples fuentes entre ellas base de datos de las Curadurías Urbanas, Plan de desarrollo municipal, Plan de Ordenamiento Territorial, estudios en la cabecera municipal de Clemencia, realizados por las empresas ACUACOR S.A. y C.D.I., y por último el software Google Earth Pro®, de estas fuentes se obtuvo las siguientes coberturas de la población de Clemencia, Bolívar.
  - Localidades.
  - Lotes.
  - Manzanas.
  - Construcciones.

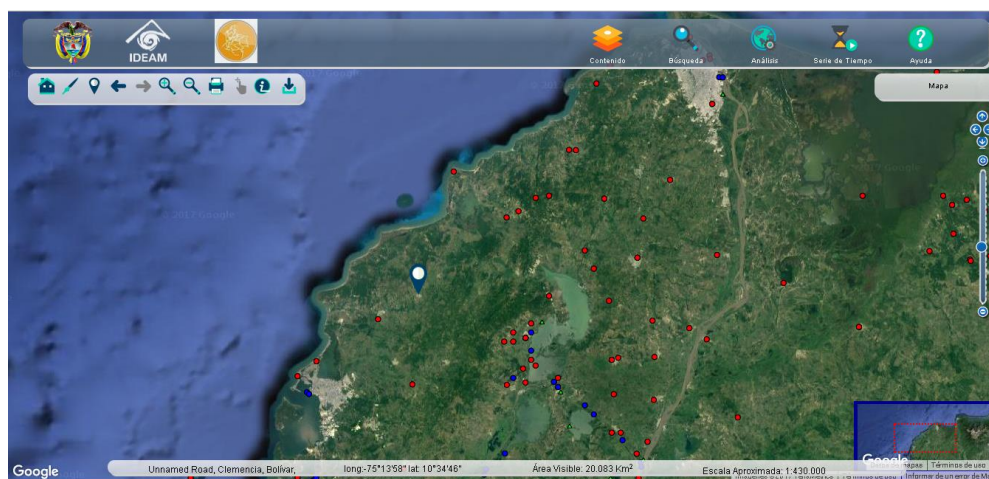
- Cuencas.
- Cuerpos de Agua.
- Drenajes
- Curvas de Nivel

#### 4.2.1.2 Información Hidrometeorológica.

Se basó en la recopilación de información de las estaciones meteorológicas más cercanas a Clemencia, Bolívar, con el fin de hacer un análisis hidrológico y meteorológico de la región fue necesario la obtención de:

- Fotografías aéreas de la zona y distribución de estaciones meteorológicas cercanas, adquiridas a través del Geo visor del IDEAM.
- Datos meteorológicos de las estaciones cercanas, relacionadas con precipitaciones y variaciones meteorológicas a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- Ubicación espacial de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.

A continuación, se presenta una ilustración del Geovisor del IDEAM en la que se muestra la distribución de las estaciones pluviométricas adyacentes a la zona de estudio.



*Ilustración 9. Geovisor institucional del IDEAM.*

#### **4.2.1.3 Capacidad Hidráulica.**

El análisis hidráulico de las calles y estructuras de drenaje de Clemencia, Bolívar y los arroyos Arena y Hormiguero, estuvo basado primeramente en calcular la capacidad hidráulica, por lo que fue necesario obtener sus secciones transversales.

Para el caso de las calles, fue necesario obtener información de estas secciones, mediante la disposición del plano topográfico de la localidad, suministrado por las empresas ACUACOR S.A. y C.D.I.

Para obtener información sobre los arroyos se dispuso del levantamiento topográfico realizado por las empresas anteriormente mencionadas, en algunos tramos de los arroyos, complementado por la información brindada por el DEM. Además, fue necesario realizar mediciones de dichas secciones, mediante una inspección en el sitio, para complementar los datos suministrados.

#### **4.2.2 Etapa 2. Determinación de los caudales máximos, períodos de retorno y niveles de inundación**

Se tuvo en cuenta la probabilidad de excedencia y se estimaron los caudales correspondientes a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, y 100 años.

Para estimar los caudales máximos se procedió a utilizar el Modelo Lluvia-escorrentía (Modelo de infiltración) expuesto en la sección 1.1.9.8, el cual tiene como resultado los hidrogramas de diseño y caudales picos, para esta modelación se consideraron los siguientes insumos:

- Características morfométricas de la zona de estudio: Fue necesario la determinación del área, pendiente, tiempo de concentración y tiempo de retardo de cada una de las cuencas y subcuencas.
- Determinación del Número de Curva: Se partió de la información geomorfológica expuesta en el atlas geológico de Colombia y de fotointerpretación de las imágenes satelitales de la zona estudiada.



- Hietogramas de diseño para cada periodo de retorno considerado: Se determinaron luego de estimar la ecuación de intensidad para la estación de “BAYUNCA” teniendo como base los valores máximos horarios en 24 horas y el tiempo de duración de la lluvia, que para este estudio se consideró igual al tiempo de concentración de la cuenca.

#### **4.2.3 Etapa 3. Estimación de las manchas de inundación**

Luego de determinados los caudales picos representados en los hidrogramas de diseño y la representación morfométrica de la zona por medio del D.E.M. y el plano topográfico se procedió a modelar las inundaciones por medio del software HEC RAS®.

HEC RAS® permitió el procesamiento del D.E.M. y el plano topográfico de la cabecera municipal de clemencia, con ello la geometría de las calles, arroyos y estructuras de drenaje, como también el hidrograma y caudal correspondiente a cada periodo de retorno, determinado por HEC HMS®, obteniendo de estas modelaciones las llanuras de inundación y su respectivo nivel de agua.

### **4.3 COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN**

Fue necesario comparar la mancha de inundación histórica, elaborada a partir de los datos aportados por la comunidad (sección 4.1), contra las manchas resultantes de la aplicación del modelo hidráulico-hidrológico (sección 4.2), esto se hizo para determinar si la proyección de las áreas amenazadas estimadas mediante la modelación guardaba relación con la estimada por la comunidad.

A través de la estimación de las diferencias porcentuales entre las áreas inundadas por los dos métodos se determinó que tan acertada es la modelación hidrológica-hidráulica con el software utilizado en este proyecto.

#### **4.4 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA**

El análisis de la amenaza por inundación ha sido históricamente una de las mayores ocupaciones de los investigadores, en busca de determinar el grupo de factores que desencadenan este tipo de afectación. Según lo reportado por (ERN-CAPRA, 2009) la evaluación de la amenaza asociada con un fenómeno natural se mide en función de la frecuencia de ocurrencia y la severidad medida mediante algún parámetro de intensidad del peligro determinado en una ubicación geográfica específica, por consiguiente, el estudio de la amenaza estará ligado a la frecuencia histórica de los eventos detonantes y su intensidad. En áreas urbanas será posible evaluar la amenaza por inundación desde tres dimensiones:

- **La amenaza pluvial evaluada por medio del análisis hidrológico:**

Debido a lluvias intensas o de gran duración, caídas directamente sobre el área afectada.

Mediante este análisis se estableció la relación entre la precipitación y la escorrentía producida hasta llegar al sistema de drenaje natural o antrópico.

La relación entre lluvia y escorrentía se presenta entre el hietograma (valores de entrada) y el hidrograma de diseño(resultado). Esta relación se determinó mediante la manipulación del software HEC HMS® utilizando el método del número de curva, propuesto por el Soil Conservation Service(S.C.S.), actualmente Natural Resources Conservation Service (N.R.C.S.)

- **La amenaza hidrodinámica evaluada por medio del análisis hidráulico:**

Mediante la modelación de las crecientes que transitan por los canales a cielo abierto que eventualmente sufren fallas funcionales y/o estructurales, presentándose desbordes y salida del agua del sistema.

- **La amenaza en la llanura inundable:** mediante la modelación que permita simular la distribución de la lámina de agua en la llanura de inundación y sus características. Para establecer la influencia del agua dentro de la llanura de inundación se empleó el software HEC RAS® que tiene como fundamento modelos matemáticos con ecuaciones de flujo en una dirección, basado en ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y de continuidad. Este modelo requiere de la información del flujo desbordado y la topografía detallada de la zona en estudio.



#### **4.4.1 Análisis hidrológico de la amenaza**

El concepto meteorológico de “precipitación” reúne a la lluvia, el granizo la nieve y agua nieve, entre otros fenómenos atmosféricos. En el presente documento, se hace referencia únicamente a la lluvia como el aspecto meteorológico detonante de la inundación pluvial, ya que es el fenómeno prevaleciente en la región estudiada. Los siguientes parámetros fueron los más relevantes para el análisis de las inundaciones en el área urbana estudiada.

- Duración de la lluvia.
- Intensidad media de la lluvia.
- Volumen total de la precipitación.
- Frecuencia de eventos.

Para evaluar los efectos de la precipitación se debió establecer sus características medibles, las cuales son determinadas mediante los parámetros previamente mencionados y adicionalmente será de interés conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia. A continuación, se describen los análisis que se propusieron para caracterizar las lluvias en la cuenca de aplicación, debido a que estos fueron uno de los insumos principales para la posterior modelación hidráulica.

##### **4.4.1.1 Análisis Morfométrico de la Cuenca.**

###### ***Delimitación de cuencas y subcuencas.***

- Arroyos Hormiguero y Arena.

Se tuvo como referencia la proyección de los cauces en el fotomapa del municipio de Clemencia establecido por el Ministerio de Ambiente, el cual se muestra en la ilustración 10.

La delimitación de las cuencas de los arroyos se llevó acabo por dos formas; una mediante la utilización de herramientas de sistema de información geográfica (S.I.G) y la otra mediante fotointerpretación de la zona de estudio.

Debido a que la fotointerpretación permitió una mejor relación con el fotomapa, y una visualización más precisa de la ubicación de los arroyos y las divisorias de cada subcuenca, se optó por trabajar con la delimitación estimada por este medio.

**Delimitación por medio de Fotointerpretación:** Para este caso fue necesario la utilización del programa Google Earth Pro®, por medio del cual se visualizó el relieve y el registro de

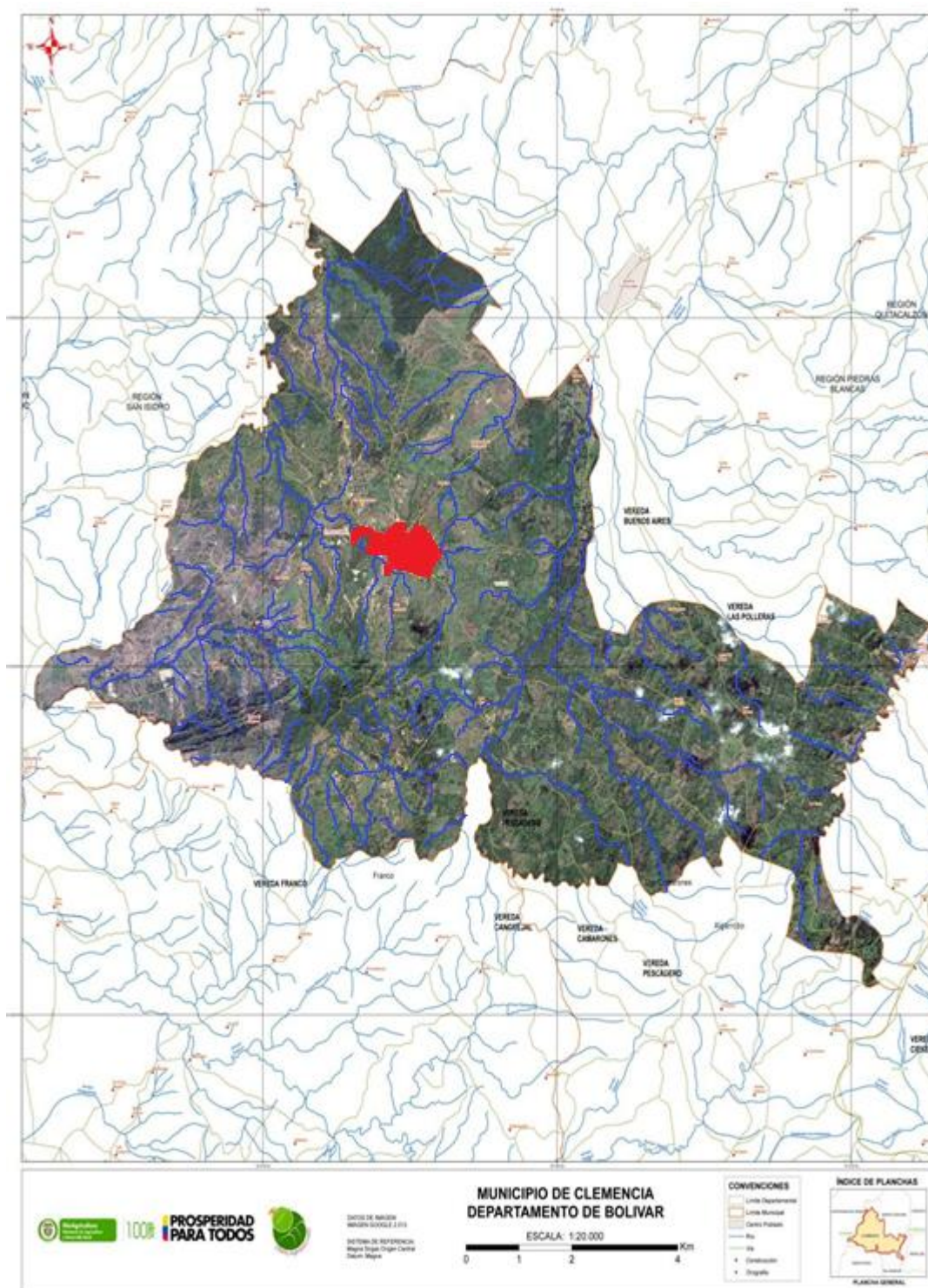


imágenes históricas del área estudiada, la manipulación de esta herramienta permitió visualizar las marcas en el terreno de los arroyos.

**Delimitación por medio de S.I.G:** Para este caso fue necesario la utilización del programa GlobalMapper® el cual trabajó sobre la base de un modelo digital de elevación D.E.M. producto de METI y NASA con una resolución espacial de 12,5 m.

Por medio de la fotointerpretación y el uso del software S.I.G se determinaron las cuencas de los arroyos, teniendo en cuenta que sectores de la superficie urbana formarían parte de sus subcuencas.

La población está atravesada por los arroyos Arena y Hormiguero, y estos a su vez están compuestos por subcuencas que contribuyen a su caudal de escorrentía, por ende, para efectos del estudio fue necesario determinar cuáles subcuencas afectan directamente al flujo que incide sobre la población, por lo que se procedió a nombrarlas como se muestra en las ilustraciones 11 y 12, entendiéndose que las subcuencas del arroyo Arena son las denotadas con la letra A y las del Hormiguero con la letra H.



*Ilustración 10. Fotomapa del Municipio de Clemencia, Bolívar. Fuente: Ministerio de Ambiente de Colombia.*

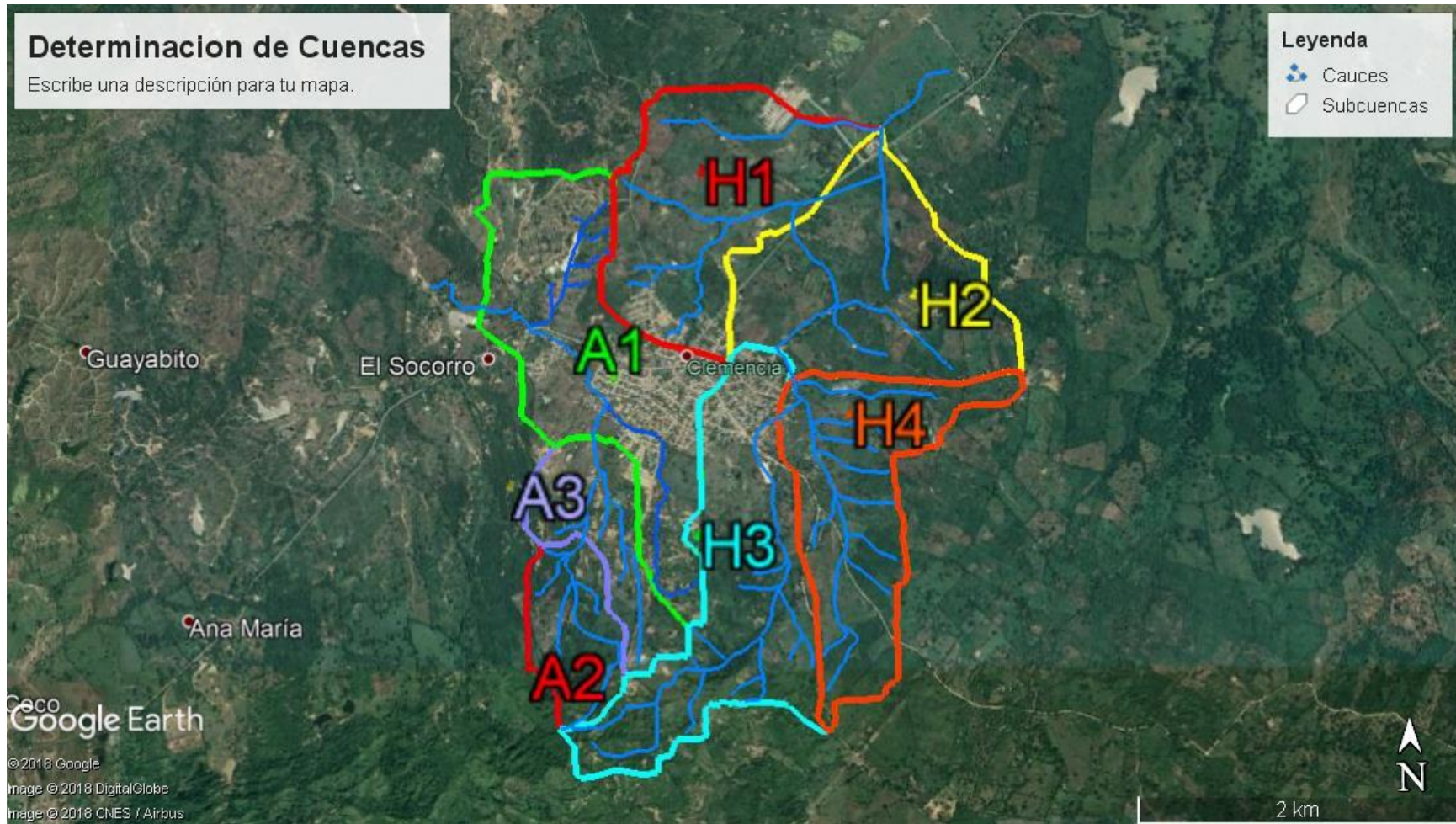
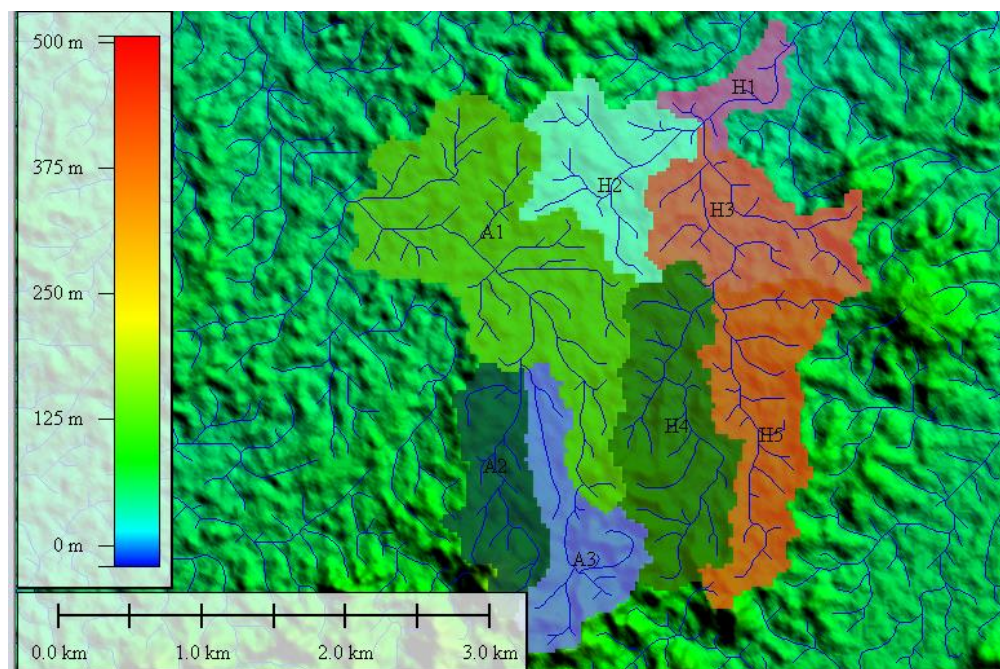
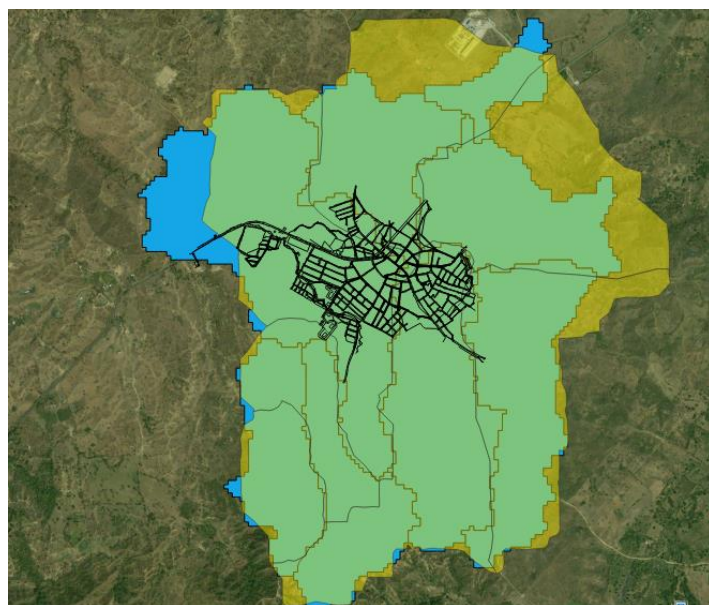


Ilustración 11. Conformación de Subcuencas de los arroyos. Fuente: Autores, formado con Google Earth Pro



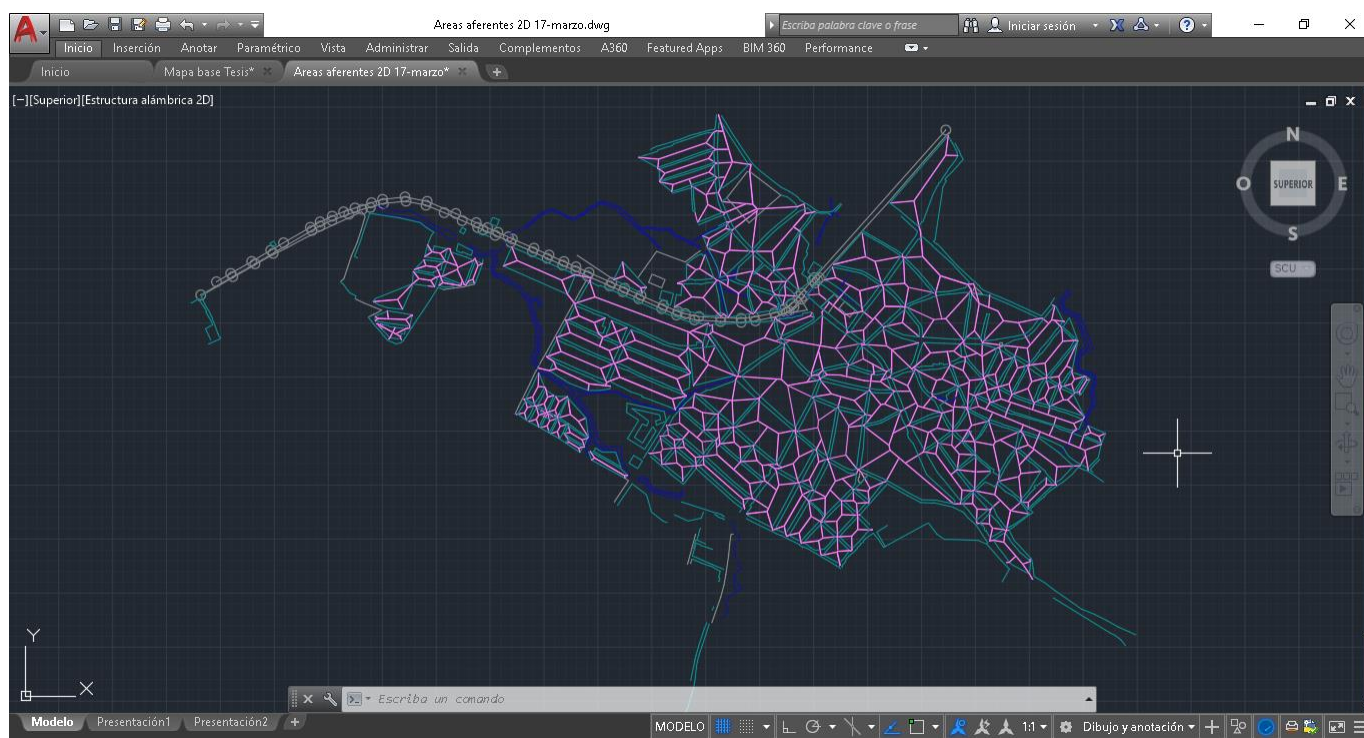
*Ilustración 12. Conformación de Subcuencas de los arroyos Fuente: Autores, formado con Global Mapper.*



*Ilustración 13. Diferencia en la estimación de las Subcuencas por los dos métodos. Fuente: Autores, formado con QGIS.*

- Localidad de Clemencia-Bolívar.

A través de la disposición del levantamiento topográfico altimétrico y planímetro de la localidad y la proyección de las bisectrices de cada esquina de cuadra se pudo obtener el área aferente para cada tramo de calle, además con la complementación con el programa GlobalMapper® se obtuvo las curvas de nivel, las líneas divisorias para así determinar el sentido del flujo.



*Ilustración 14. Obtención de áreas aferentes de cada tramo de vía urbana, a través de AutoCAD.*

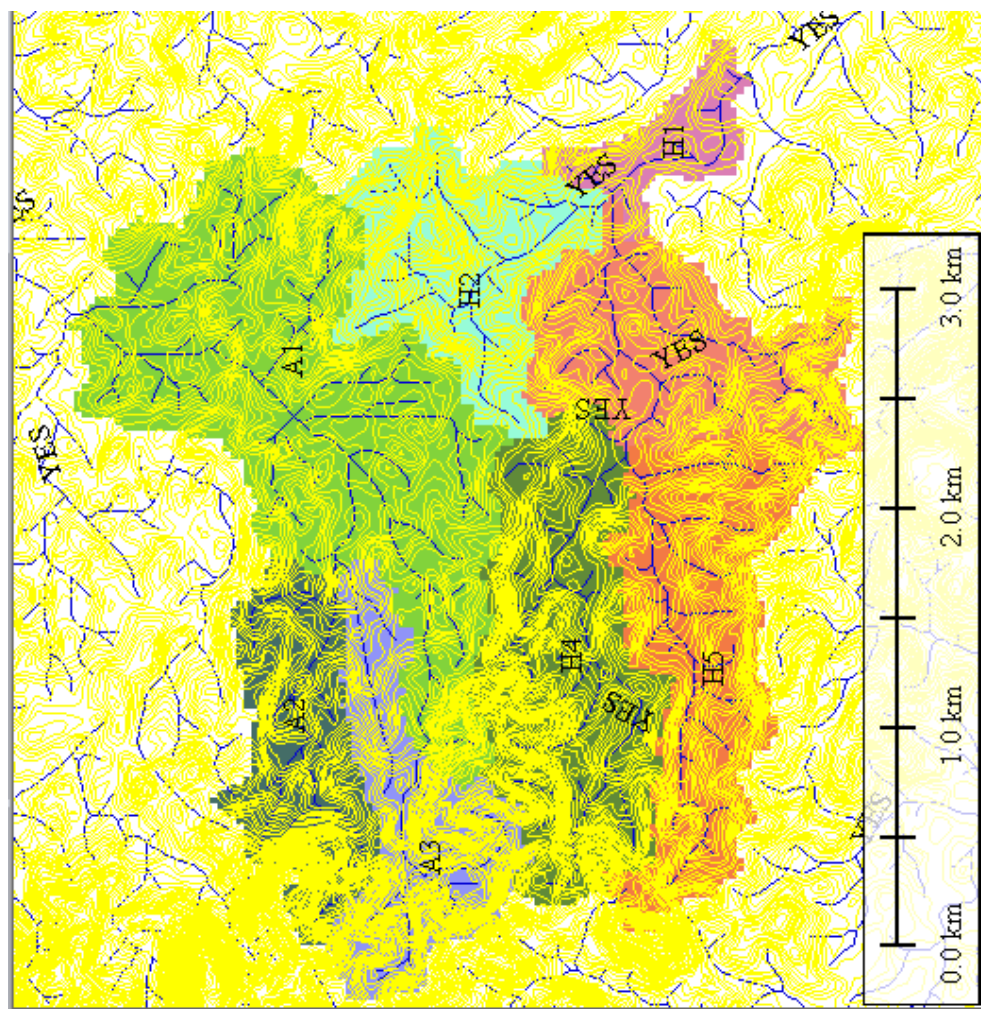
*Fuente: Autores*

### ***Determinación de las características morfométricas.***

Una vez concluida la delimitación de las cuencas y subcuencas, anteriormente mencionadas, se determinó las características morfométricas de cada una. Por medio de la caracterización, se pudo conocer la naturaleza de las cuencas y subcuencas debido a su morfometría, con esto fue posible

determinar qué puntos en las cuencas presentan un comportamiento crítico frente a inundaciones; por esto esta caracterización fue indispensable para alcanzar los objetivos del proyecto.

En la determinación de estas características, fue necesario conocer las longitudes de los cauces, áreas de subcuencas y pendientes; esta información se obtuvo por medio de la manipulación de los programas informáticos GlobalMapper®, Google Earth Pro® y AutoCad. A continuación, se presentan las curvas de nivel extraídas del DEM. La caracterización morfométrica se encuentra en la Tabla 8.



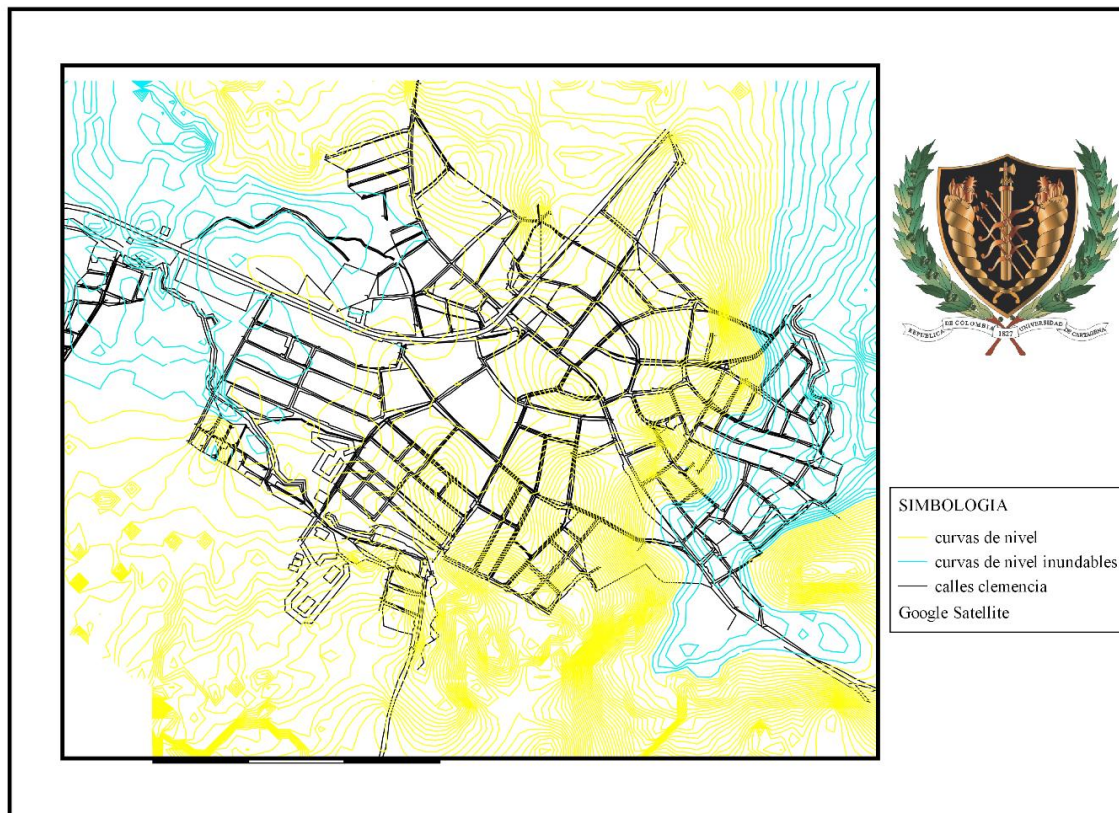
*Ilustración 15. Curvas de nivel de la zona de estudio; formadas a través de Global Mapper Fuente: Autores*

**Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.**



**Universidad de Cartagena**  
Fundada en 1827

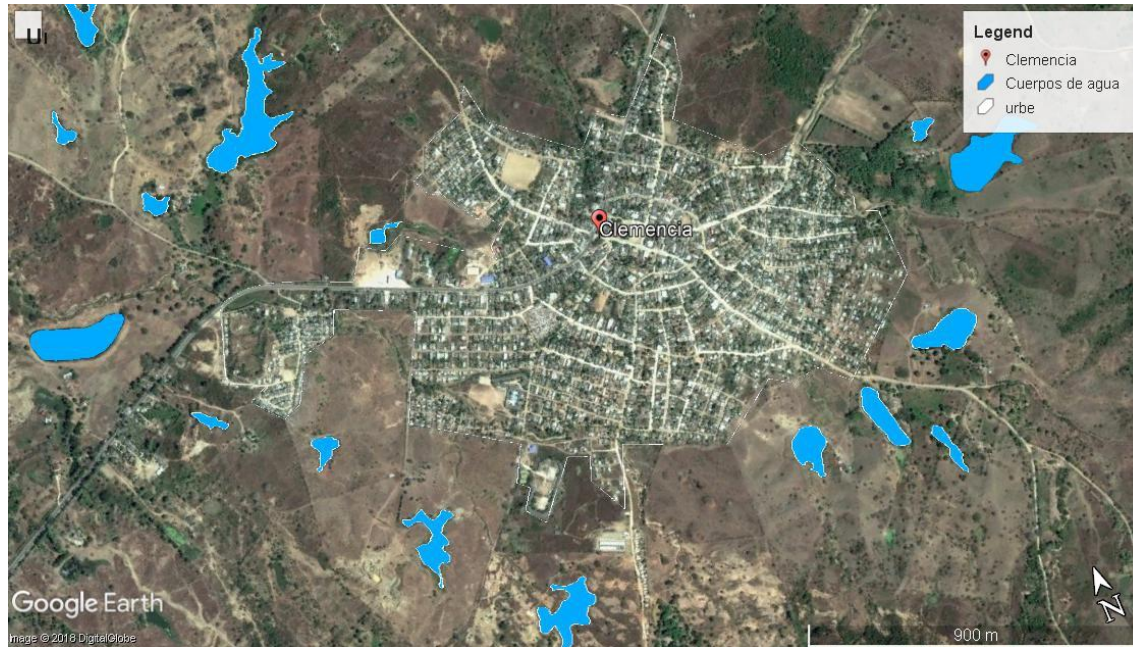
Con la disposición de las curvas de nivel se determinaron las posibles zonas inundables en el territorio estudiado, como se muestra a continuación:



*Ilustración 16. Curvas de nivel de la zona estudiada.*

Además de la determinación de las curvas de nivel fue necesario la fotointerpretación de la zona de estudio por medio del programa Google Earth Pro®, a través de esta se determinó los puntos del área estudiada con apariencia inundable, donde se muestra la formación de pequeñas lagunas y pozos alrededor de la cabecera municipal.





*Ilustración 17. Cuerpos de agua adyacentes a la población. Fuente: Autores, a través de Google Earth Pro.*

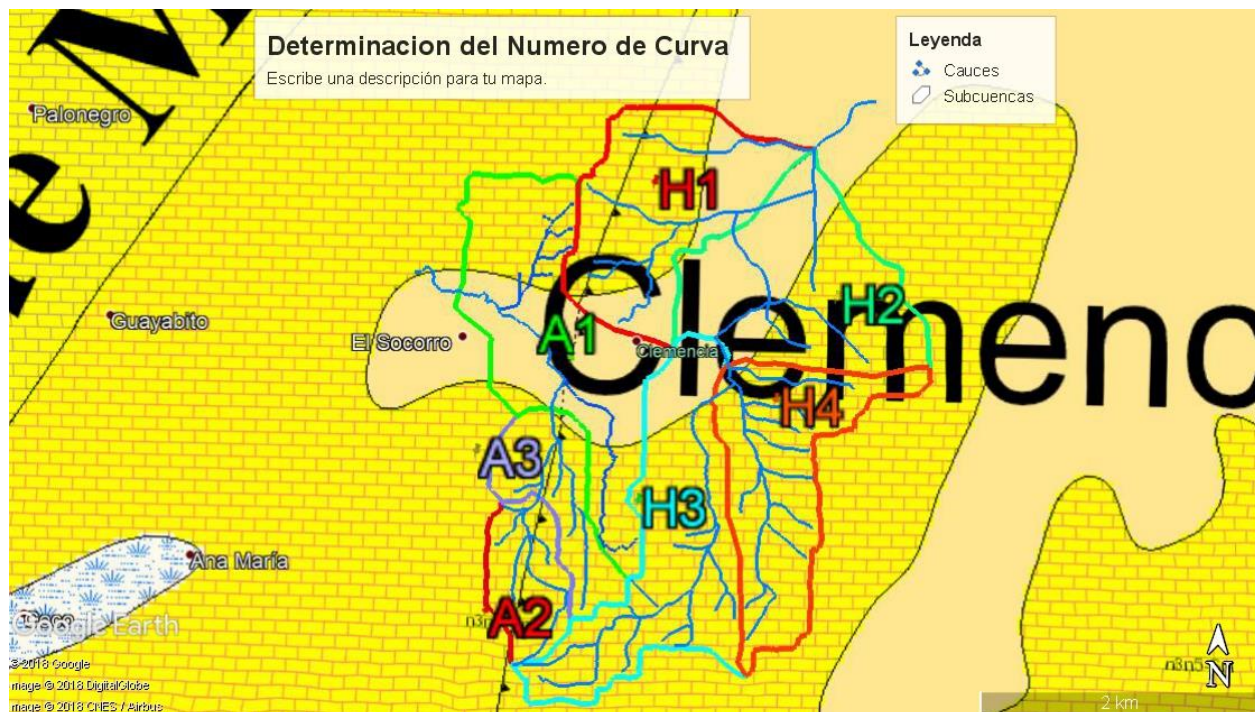


*Tabla 8 Características morfométricas de la zona de estudio.*

Cuencas	Subcuencas	Area	Area	Perimetro	Pendiente	Longitud CP	Longitud CR	Long. Axial	F. de Forma	Σ de las corrientes	Densidad de Drenaje.	Tiempo de Concentracion	Tiempo de retardo
		Km <sup>2</sup>	Ha	Km	Sm	Km	Km	Km	Kf	Km	Dd (Km/KM <sup>2</sup> )	Tc (hr)	minutos
Arena	A1	2,000	204,000	8,390	0,009	2,981	2,539	2,760	0,225	7,993	3,997	0,850	30,617
	A2	0,550	55,400	3,120	0,035	1,774	1,599	1,728	0,175	2,126	3,865	0,351	12,634
	A3	0,690	68,800	4,460	0,015	2,187	1,349	2,001	0,144	3,018	4,373	0,551	19,825
Hormiguero	H1	1,730	31,720	6,140	0,009	2,400	1,900	2,244	0,300	0,902	0,522	0,724	26,058
	H2	1,830	93,000	6,230	0,017	1,719	1,513	1,608	0,619	3,153	1,723	0,439	15,806
	H3	1,860	103,400	8,550	0,020	2,503	2,073	2,286	0,297	3,516	1,890	0,561	20,197
	H4	1,510	138,000	7,180	0,010	1,933	1,844	2,089	0,404	3,956	2,620	0,601	21,647

***Determinación del Numero de Curva.***

Fue necesario conocer las características del suelo en estudio, determinando las características superficiales por medio de fotointerpretación y la formación geológica, por medio del atlas geológico colombiano, para de esta forma obtener el número de curva para las cuencas de los arroyos y el coeficiente de escorrentía para la cobertura urbana. El cálculo de este factor se realizó siguiendo los pasos expuestos en la sección 1.1.9.8



*Ilustración 18. Proyección de las Cuencas sobre el Atlas geológico de Colombia a través de Google Earth Pro. Fuente: Autores*

*Tabla 9. Determinación del Número de Curva, de la zona de estudio. Fuente: Autores.*

CARACTERISTICAS SUELO, CLEMENCIA				COBERTURAS			
SUELO 1:	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales			URBANA			
AREA (KM2):	2.86	GRUPO:	D	AREA (KM2)	1.1	NC:	98
EDAD	CUATERNARIO						
SUELO 2:	Arenitas líticas y feldespáticas de grano fino a grueso con glauconita, y shales calcáreos intercalados con lodolitas			ESPACIO ABIERTO			
AREA (KM2):	6.15	GRUPO:	A	AREA (KM2)	7.9	NC:	49
EDAD	LANGHIANO-TORTONIANO						
N <sub>Cequi</sub> :				54.98			

#### 4.4.1.2 Análisis de series de precipitaciones máximas

Se identificaron las estaciones pluviométricas más cercanas a las cuencas estudiadas, prefiriendo que los registros históricos tuvieran la mayor cantidad de meses informados de precipitación máxima en 24 horas. Las estaciones que actualmente se encuentran activas y cuentan con registros mínimo de 20 años son las siguientes:

*Tabla 10 Estaciones escogidas, adyacentes al área de estudio.*

CATALOGO NACIONAL DE ESTACIONES IDEAM 2017				
NOMBRE	CODIGO	LATITUD	LONGITUD	APERTURA
BAYUNCA	14010030	10° 32' N	75° 24' N	1974
REPELÓN	29035200	10° 30' N	75° 24' N	1963
CAÑAVERAL	14010050	10° 24' N	75° 20' N	1974
LOMA GRANDE	29030270	10° 26' N	75° 7,0' N	1968
SAN JOSÉ	29030140	10° 36' N	75° 24' N	1987
CASA DE BOMBAS	29030410	10° 30' N	75° 24' N	1978
SAN ESTANISLAO	29030050	10° 24' N	75° 24' N	1958
EL PORVENIR	14010090	10° 42' N	75° 24' N	1988
HIBACHARO	14010020	10° 43' N	75° 24' N	1963
GALERAZAMBA	14015010	10° 47' N	75° 24' N	1945



Con la ubicación geográfica de las estaciones expuestas en la tabla anterior se empleó el método de polígonos de Thiessen en la herramienta de información geográfica QGIS® para determinar la precipitación correspondiente a las cuencas estudiadas y se determinó que los datos históricos pluviométricos necesarios correspondían a la estación Bayunca. La ilustración 18 muestra la determinación del polígono de Thiessen y el informe pluviométrico se presenta en la tabla 12.

Para los registros pluviométricos faltantes se optó por homogenizar las series con el método de proporciones normales utilizando los registros existentes en las estaciones cercanas, correspondientes al periodo de tiempo requerido, como se muestra en la siguiente expresión:

$$PF = \frac{1}{n} ((NF/NA) * PA + (NF/NB) * PB + (NF/NC) * PC + \dots (NF/Nn) * Pn)$$

Donde:

PF: Dato faltante de precipitación que se desea obtener en el periodo respectivo.

NF: Precipitación normal anual de la estación en estudio

NA,NB,NC: Precipitación normal anual de las estaciones índices

PA,PB,PC: Precipitación en las estaciones índices durante el mismo del tiempo del año faltante.

Pn: Precipitación en la enésima estación índice durante el mismo periodo del tiempo del dato faltante.

Un ejemplo de la homogenización hecha a los registros pluviométricos faltantes de Bayunca es la que se realizó para el mes de junio de 1974, donde el PF resultado: 32,83 mm, como se muestra en la tabla 11.



*Tabla 11 Ejemplo de Homogenización por método de proporciones normales. Fuente: Autores.*

HOMOGENIZACION POR PROPORCIONES NORMALES													
BAYUNCA		HIBACHARO		REPELON		CASA DE BOMBAS		CAÑAVERAL		LOMA GRANDE		SAN ESTANISLAO	
1974	32,83	1974	20	1974	43	1974	22	1974	73	1974	25	1974	0
1975	90	1975	70	1975	68	1975	41	1975	43	1975	110	1975	58
1976	44	1976	40	1976	42,5	1976	20	1976	40	1976	60	1976	50
1979	45	1979	40	1979	94,5	1979	53	1979	70	1979	57	1979	95
1982	28,3	1982	80	1982	25,8	1982	9	1982	75	1982	65	1982	33
1984	30	1984	15	1984	19,2	1984	83	1984	46	1984	8	1984	14
1985	35	1985	89	1985	41	1985	41	1985	21	1985	28	1985	23,9
1990	70,1	1990	47	1990	34,2	1990	20	1990	30	1990	55	1990	25,1
1991	57,4	1991	43	1991	15,2	1991	9	1992	20	1991	18	1991	20,6
1993	15,5	1993	65	1993	50,2	1993	27	1993	100	1993	30	1993	17,5
1994	12,6	1994	12	1994	21	1994	20	1994	92,5	1994	32	1994	54,5
1995	28	1995	40	1995	51,3	1995	70	1995	67,8	1995	31,5	1995	60
1996	25	1996	20	1996	43,5	1996	20	1996	34,9	1996	50	1996	84,5
1997	60,3	1997	90	1997	41,2	1997	44	1997	50	1997	83	1997	23
1998	40	1998	20	1998	49	1998	27	1998	32	1998	39	1998	118,1
1999	37	1999	70	1999	26,4	1999	45	1999	18,2	1999	22	1999	47,5
2001	40,1	2001	40	2001	6,4	2001	7	2001	33	2001	16	2001	27
2002	34,4	2002	34	2002	16,8	2002	30	2002	50	2002	23,5	2002	33,6
2003	78,5	2003	45	2003	74,8	2003	38	2003	36	2003	58,5	2003	41
2004	32	2004	30	2004	15,2	2004	19	2004	60,6	2004	16,5	2004	49
2005	27,2	2005	70	2005	34,5	2005	50	2005	72,3	2005	45	2005	93,5
2006	30	2006	14	2006	48,8	2006	63	2006	14	2006	36	2006	98
2007	21,2	2007	63	2007	10,3	2007	15	2007	35	2007	45	2007	48
2008	80,5	2008	25	2008	53,8	2008	38	2008	31,5	2008	47	2008	41
2009	73,8	2009	77	2009	56,2	2009	25	2009	20,5	2009	33,5	2009	91
2010	51,2	2010	70	2010	36,3	2010	30	2010	21,1	2010	41	2010	27
2011	39	2011	64	2011	11,4	2011	40	2011	10,1	2011	21	2011	95
2012	48,7	2012	26	2012	18,7	2012	8	2012	44,5	2012	17,5	2012	50
2013	36,5	2013	10	2013	23,1	2013	51	2013	12,2	2013	44	2013	70
2014	13	2014	9	2014	36	2014	35	2014	25,5	2014	28,5	2014	35
PNA:	42,22	PNA:	44,60	PNA:	36,73	PNA:	33,33	PNA:	41,61	PNA:	39,55	PNA:	52,54

La serie homogenizada completa para la estación Bayunca se presenta en la tabla 13.

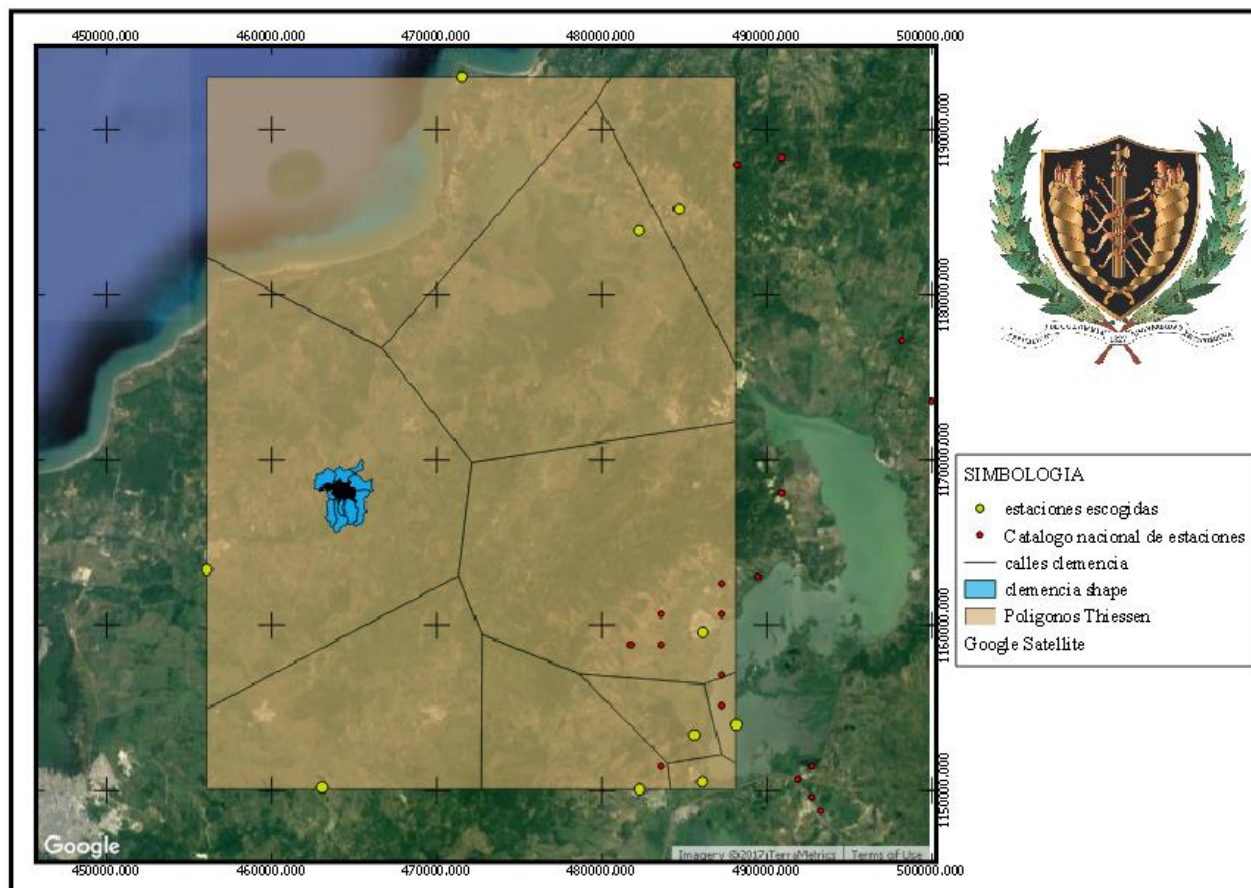


Ilustración 19. Polígono de Thiessen formado a través de catálogo Nacional de estaciones IDEAM 2017 y QGIS. Fuente: Autores.

# Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.



**Universidad de Cartagena**  
Fundada en 1827

Tabla 12. Informe meteorológico histórico de la estación BAYUNCA. Fuente:(IDEAM, 2017)

SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL

VALORES MAXIMOS MENSUALES DE PRECIPITACION EN 24 HORAS (mms)

FECHA DE PROCESO: 2017/07/38 ESTACION : 14010030 BAYUNCA

LATITUD: 1032 N TIPO DE ESTACION: PM DEPARTAMENTO: BOUVAR FECHA-INSTALACION 1974 MAY  
 LONGITUD: 7524 W ENTIDAD: IDEAM MUNICIPIO: CARTAGENA FECHA-SUSPENSION  
 ELEVACION: 75 m.s.n. REGIONAL 2 ATLANTICO CORRIENTE AY BARRO

AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1968	4	9					43	27	20	32	45	20		0	45
1969	2	1	20	15	15	35	30	70	40	30	25	30	40	22	70
1970	2	1	15	0	15	25	31	112	50	60	29	20	28	6	112
1971	2	1	15	5	13	16	24	15	61	11	23	13	8	5	61
1972	2	1	5	27	8	28	14	13	20	70	30	9	17	12	70
1973	2	1	2	0	20	20	40	31	14	50	25	36	19	0	50
1974	2	1					58		40	80	65	137	80	0	137
1975	2	1	0	0	21	0	55	90	90	91	174		140	25	174
1976	2	1	0	0	0	20	78	44	0	26	72	95	20	0	95
1977	2	1	0	1	0	0	80		0	52	120	40	90	0	120
1978	2	1	0	0	4	60	77	89	40	75	84		140	0	140
1979	2	1	0	0	0	0	130	45	33	64	140	60	90	35	140
1980	2	1	0	0	0	21	83	12	63	12	31	50	22.5	0.9	83
1981	2	1	5.7	2.5	5.6	46.2	70.2	45.9	78.8	42.7	72.4	35.8	47.1	30.1	78.8
1982	2	1	11.1	0.5	2.1	29.8	38	28.3	39.6	41.4	36.4	52.8			52.8
1983	2	1							11	17	85	120	20	60	120
1984	2	1	0	0	0	4	15	30	30	48	23	84	73	0	84
1985	2	1	0	0	2	0	52	35	82	28.8	31.4	95.7	27.9	33.8	95.7
1988	1	1								98	150	30	2.5		150
1989	1	1	0	0	29.2	0	76.6	98	19	34	55.8	55	53.4	100	100
1990	1	1	0	0	0	80.4	33.7	70.1	30.5	26.4	41	50	64.8	137	137
1991	1	1	0	0	0	66.4	85.5	57.4	20.5						85.5
1992	1	1											56.6	23.6	56.6
1993	1	1	14.3	0	29.4	14.8	57.7	15.5	25.4	29.1	87.4	44.7	58.8	23	87.4
1994	1	1	0	0	26	29.2	51	12.6	53.5	74.5	27	38	85	0	85
1995	1	1	0	0	0	84	52	28	74	67	11.5	26.5	35	67.5	84
1996	1	1	30	0	4.2	42	30	25	51.3	50	75	80	40	0	80
1997	1	1	0	0	0	27	27.3	60.3	38.6	7	34	40	94	0	94
1998	1	1	0	0	6.5	25.5	62.5	40	29.2	22.5	28.8	53.4	30	38	62.5
1999	1	1	5	96.5	12.5	10.1	34.4	37	61	103.2	50.1	106	78	29.9	106
2000	1	1	0.5	0.4	0.5	20	30	32.5	24	30.5	26	30	21.1	20.5	32.5
2001	1	1	34.8	0	62	5	33.5	40.1	32.7	10	31.6	112.2	20	6	112.2
2002	1	1	2	0	11	10	90.3	34.4	35.5	34.6	32.5	12.3	36	1.5	90.3
2003	1	1	0	0	0	44.6	22.5	78.5	49.5	14	46.5	59	59.5	80.5	80.5
2004	1	1	0	0				32	67.5	35.8	56.7	62.7	122	0	122
2005	1	1	0.1	0	1	1.5	26.5	27.2	59.5	51	49.4	106	52.5	6.8	106
2006	1	1	10	0	1	40	43.5	30	46.2	40.6	67.3	53.7	138	30	138
2007	1	1	0	1	0	55.5	61.5	21.2	20	59	79.8	122	14.4	0	122
2008	1	1	0	0	0	86	32	80.5	64.5	43.4	43.3	20	108.5	1.5	108.5
2009	1	1	11.7	3	0.5	3	5.6	29	73.8	47.4	56.5	81	37.1	39.5	81
2010	1	1	0	0	9	18.5	39	51.2	109.3	67.2	30.1	48.2	66	50.5	109.3
2011	1	1	0	0	18.5	16.7	29.5	3	39	41.5	28	51	75	43.8	75
2012	1	1	0	0	0	56.8	52	48.7	27	29.6	105.1	50.5	19.3	5	105.1
2013	1	1	0	0	0	12.5	31	36.5	40.1	29	49.5	56.1	22.2	0	56.1
2014	1	1	0	0	0	31.5	32.8	13	3.5	48.1	36.6	132	65.6	10	132

IDEAM-INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL

VALORES MAXIMOS MENSUALES DE PRECIPITACION EN 24 HORAS (mms)

FECHA DE PROCESO: 2017/07/38 ESTACION : 14010030 BAYUNCA

LATITUD: 1032 N TIPO DE ESTACION: PM DEPARTAMENTO: BOUVAR FECHA-INSTALACION 1974 MAY  
 LONGITUD: 7524 W ENTIDAD: IDEAM MUNICIPIO: CARTAGENA FECHA-SUSPENSION  
 ELEVACION: 75 m.s.n. REGIONAL 2 ATLANTICO CORRIENTE AY BARRO

AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
2015	1	1	0	0	0	16.4	2.5	10.5	35	50.5	25	20	10.5		50.5
2016	1	1													
MEDIO S			4.4	3.6	7.9	27.6	47.3	43.4	41.3	43.5	55.3	60.5	54.1	22	34.2
MAXIM OS			34.8	96.5	62	86	130	112	109.3	103.2	174	150	140	137	174
MINIM OS			0	0	0	0	2.5	10.5	0	7	11.5	9	8	0	0

IDEAM-INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES





*Tabla 13 Informe meteorológico histórico homogenizado de la estación BAYUNCA.*

DATOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 Hrs. (mm)														
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo	
1968	0,00	1,42	0,00	4,90	43,00	27,00	20,00	32,00	45,00	20,00	53,13	0,00	53,13	SEP
1969	20,00	15,00	15,00	35,00	30,00	70,00	40,00	30,00	25,00	30,00	40,00	22,00	70,00	JUN
1970	15,00	0,00	15,00	25,00	31,00	112,00	50,00	60,00	29,00	20,00	28,00	6,00	112,00	JUN
1971	15,00	5,00	13,00	16,00	24,00	15,00	61,00	11,00	23,00	13,00	8,00	5,00	61,00	JUL
1972	5,00	27,00	8,00	28,00	14,00	13,00	20,00	70,00	30,00	9,00	17,00	12,00	70,00	AGO
1973	2,00	0,00	20,00	20,00	40,00	31,00	14,00	50,00	25,00	36,00	19,00	0,00	50,00	AGO
1974	2,42	1,16	27,09	13,83	58,00	32,83	40,00	80,00	65,00	137,00	80,00	0,00	137,00	OCT
1975	0,00	0,00	21,00	0,00	55,00	90,00	90,00	91,00	174,00	47,67	140,00	25,00	174,00	SEP
1976	0,00	0,00	0,00	20,00	78,00	44,00	0,00	26,00	72,00	95,00	20,00	0,00	95,00	OCT
1977	0,00	1,00	0,00	0,00	80,00	44,10	0,00	52,00	120,00	40,00	90,00	0,00	120,00	SEP
1978	0,00	0,00	4,00	60,00	77,00	89,00	40,00	75,00	84,00	85,40	140,00	0,00	140,00	NOV
1979	0,00	0,00	0,00	0,00	130,00	45,00	33,00	64,00	140,00	60,00	90,00	35,00	140,00	SEP
1980	0,00	0,00	0,00	21,00	83,00	12,00	63,00	12,00	31,00	50,00	22,50	0,90	83,00	MAY
1981	5,70	2,50	5,60	46,20	70,20	45,90	78,80	42,70	72,40	35,80	47,10	30,10	78,80	JUL
1982	11,10	0,50	2,10	29,80	38,00	28,30	39,60	41,40	36,40	52,80	23,34	2,57	52,80	OCT
1983	0,17	0,00	5,63	59,39	30,44	40,74	11,00	17,00	85,00	120,00	20,00	60,00	120,00	OCT
1984	0,00	0,00	0,00	4,00	15,00	30,00	30,00	48,00	23,00	84,00	73,00	0,00	84,00	OCT
1985	0,00	0,00	2,00	0,00	52,00	35,00	82,00	28,80	31,40	95,70	27,90	33,80	95,70	OCT
1988	0,00	2,27	0,28	26,81	41,05	36,35	34,10	44,57	98,00	150,00		2,50	150,00	OCT
1989	0,00	0,00	29,20	0,00	76,60	98,00	19,00	34,00	55,80	55,00	53,40	100,00	100,00	JUN
1990	0,00	0,00	0,00	80,40	33,70	70,10	30,50	26,40	41,00	50,00	64,80	137,00	137,00	DIC
1991	0,00	0,00	0,00	66,40	85,50	57,40	20,50	31,21	51,04	47,52	22,70	1,13	85,50	MAY
1992	0,00	0,00	0,39	31,71	42,22	38,51	58,05	31,28	40,87	73,08	56,60	23,60	73,08	NOV
1993	14,30	0,00	29,40	14,80	57,70	15,50	25,40	29,10	87,40	44,70	58,80	23,00	87,40	SEP
1994	0,00	0,00	26,00	29,20	51,00	12,60	53,50	74,50	27,00	38,00	85,00	0,00	85,00	NOV
1995	0,00	0,00	0,00	84,00	52,00	28,00	74,00	67,00	11,50	26,50	35,00	67,50	84,00	ABR
1996	30,00	0,00	4,20	42,00	30,00	25,00	51,30	50,00	75,00	80,00	40,00	0,00	80,00	OCT
1997	0,00	0,00	0,00	27,00	27,30	60,30	38,60	7,00	34,00	40,00	94,00	0,00	94,00	NOV
1998	0,00	0,00	6,50	25,50	62,50	40,00	29,20	22,50	28,80	53,40	30,00	38,00	62,50	MAY
1999	5,00	96,50	12,50	10,10	34,40	37,00	61,00	103,20	50,10	106,00	78,00	29,90	106,00	OCT
2000	0,50	0,40	0,50	20,00	30,00	32,50	24,00	30,50	26,00	30,00	21,10	20,50	32,50	JUN
2001	34,80	0,00	62,00	5,00	33,50	40,10	32,70	10,00	31,60	112,20	20,00	6,00	112,20	OCT
2002	2,00	0,00	11,00	10,00	90,30	34,40	35,50	34,60	32,50	12,30	36,00	1,50	90,30	MAY
2003	0,00	0,00	0,00	44,60	22,50	78,50	49,50	14,00	46,50	59,00	59,50	80,50	80,50	DIC
2004	0,00	0,00	0,00	8,63	91,88	32,00	67,50	35,80	56,70	62,70	122,00	0,00	122,00	NOV
2005	0,10	0,00	1,00	1,50	26,50	27,20	59,50	51,00	49,40	106,00	52,50	6,80	106,00	OCT
2006	10,00	0,00	1,00	40,00	43,50	30,00	46,20	40,60	67,30	53,70	138,00	30,00	138,00	NOV
2007	0,00	1,00	0,00	55,50	61,50	21,20	20,00	59,00	79,80	122,00	14,40	0,00	122,00	OCT
2008	0,00	0,00	0,00	86,00	32,00	80,50	64,50	43,40	43,30	20,00	108,50	1,50	108,50	NOV
2009	11,70	0,50	0,00	5,60	29,00	73,80	47,40	56,50	81,00	37,10	39,50	24,50	81,00	JUN
2010	0,00	0,00	9,00	18,50	39,00	51,20	109,30	67,20	30,10	49,20	66,00	50,50	109,30	JUL
2011	0,00	0,00	18,50	16,70	29,50	39,00	41,50	28,00	51,00	75,00	43,80	56,50	75,00	OCT
2012	0,00	0,00	0,00	56,80	52,00	48,70	27,00	29,60	105,10	50,50	19,30	5,00	105,10	SEP
2013	0,00	0,00	0,00	12,50	31,00	36,50	40,10	29,00	49,50	56,10	22,20	0,00	56,10	OCT
2014	0,00	0,00	0,00	31,50	32,80	13,00	3,50	48,10	36,60	132,00	65,60	10,00	132,00	OCT
2015	0,00	0,00	0,00	16,40	2,50	10,50	35,00	50,50	25,00	20,00	10,50	21,97	50,50	AGO
MAX	34,80	96,50	62,00	86,00	130,00	112,00	109,30	103,20	174,00	150,00	140,00	137,00	174,00	

#### 4.4.1.3 Curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia).

Se utilizaron tres métodos para la obtención de las Curvas IDF, en estos se encuentran dos métodos empleados actualmente para la obtención de la intensidad en Colombia, los cuales son el expuesto por (Vargas & Diazgranados, 1998) e (IDEAM, 2016) el otro método utilizado fue el de la formula general de intensidad expuesto por (Olivares, 2017) modificado con las relaciones de duración de precipitación expuesta por (Chang & Bolivar, 1997).

Para efectos del proyecto se utilizó el método de relaciones de precipitación registrada en 24 horas y la precipitación caída en una duración  $t$  menor, desarrollado por Chang y Bolívar, como el método que representaría las condiciones de intensidades locales del área estudiada. Las intensidades determinadas por los otros dos métodos se utilizaron como referencia para determinar la relación con el primero en mención.

Las formulas utilizadas para la estimacion de las intensidades fueron las siguientes:

- Formula general de intensidad (Olivares, 2017).

$$I = \frac{K * T^m}{t^n}$$

- Formula de relaciones de precipitación registrada en 24 horas y la precipitación caída en una duración  $t$  menor (Chang & Bolivar, 1997).

$$\%Pt = -0,0067t^4 + 0,0902t^3 - 0,4236t^2 + 0,897t + 0,0026$$

- Formula de Curvas IDF sintéticas regionalizadas en Colombia (Vargas & Diazgranados, 1998).

$$I = \frac{a * Tr^b * M^d}{(tc/60)^c}$$

- Formula de Curvas IDF actualizadas en Colombia (IDEAM, 2016)



$$I = \frac{C1}{(D + X0)^{C2}}$$

Los datos utilizados para la obtención de las curvas IDF con la ecuación Sintética y ecuación general de intensidad, fueron los expuestos en el informe pluviométrico con precipitaciones registradas en 24 horas previamente homogenizados, presentados en la tabla 13.

Para cada tormenta se obtuvo el valor de intensidad con una duración similar a la del tiempo de concentración de la cuenca y se realizó el análisis de frecuencia de las series anuales de la estación; obteniendo las intensidades para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

#### **4.4.1.4 Hietograma de diseño.**

Para efectos del estudio fue necesario realizar un hietograma de diseño por cada periodo de retorno, para conocer el comportamiento evolutivo del evento de precipitación para una duración igual a la obtenida para el tiempo de concentración de la cuenca Arena y periodo de retorno determinado.

La construcción de los Hietogramas de diseño dependió de la obtención de la ecuación de intensidad expuesta por (Olivares, 2017) y modificada con las relaciones hechas por (Chang & Bolivar, 1997).

El método de los bloques alternos se llevó a cabo para la elaboración de este hietograma, en el que la precipitación máxima tiende a estar en el tiempo medio de duración de la lluvia.

#### **4.4.1.5 Caudales máximos estimados**

Debido a que se trata de cuencas cuyos cauces dependen exclusivamente de las lluvias, la estimación de los caudales se determinó mediante la relación lluvia-escorrentía, por lo que dependió de la determinación de las curvas IDF, de los hietogramas, de las características morfométricas y de la absorción del terreno; como se expuso en secciones anteriores.

La relación lluvia-escorrentía se determinó mediante la manipulación del software HEC HMS® utilizando el método del número de curva, propuesto por el Soil Conservation Service(S.C.S.), actualmente Natural Resources Conservation Service (N.R.C.S.). Esta relación se evidencia entre el hietograma (valores de entrada) y el hidrograma de diseño(resultado).

Por otro lado, para el caso de las calles se llevó a cabo el método racional ya que se trataba de áreas inferiores a 80 hectáreas y por su simplificación. Se tuvo como supuesto que todo el casco urbano se encontraba pavimentado por lo que el coeficiente de escorrentía fue: 0,6. La intensidad de lluvia escogida para la ubicación de sumideros fue la correspondiente a un periodo de retorno de 2 años(Tabla 1.) con duración de 5 minutos ( $I=190,84\text{mm/h}$ ).

En el cálculo de la capacidad hidráulica de vías se supuso que para las zonas donde no hay vías construidas el ancho de esta sería; de acuerdo con el decreto 0798- 2010 (MINISTERIO DE AMBIENTE, 2010): el ancho entre paramentos menos 2.4m (1.2 m ancho mínimo de acera) siempre y cuando no sea menor que 6.0 m (3m ancho mínimo carril). En caso de que solo hubiese espacio para 2 carriles se supuso la zona sin andenes; solo con sardinel, en este caso el ancho de la vía sería: ancho entre paramentos menos 0.30 m (0.15 m ancho sardinel). Se aplicó la misma analogía para el caso en que solo hubiese espacio para un carril, o menos.

#### **4.4.2 Análisis hidráulico de la amenaza**

Para establecer la amenaza hidrodinámica se recomienda iniciar con un análisis estadístico de los registros hidrológicos históricos en la cuenca de estudio con el objeto de establecer los valores pico y su probabilidad de ocurrencia (Moreno & Hernandez, 2008). Con estos registros se procede a realizar la modelación del tránsito de crecientes, en este caso en la cuenca urbanizada, lo que le añade aspectos que incrementan la complejidad del análisis del sistema de drenaje, siendo necesaria la modelación del sistema de drenaje urbano.

El presente análisis busca emplear la modelación integrada del sistema de drenaje urbano para transitar la onda de creciente, empleando información detallada del sistema de drenaje del área de estudio, para establecer su comportamiento hidráulico ante eventos de precipitación.

##### **4.4.2.1 Modelación hidráulica del drenaje natural y urbano.**

En la actualidad, hablar de la modelación de sistemas convencionales de drenaje no es apropiado. Investigaciones recientes coinciden en que la visión aislada de los componentes ha llevado a tomar decisiones equivocadas en el manejo de los sistemas de drenaje (Rauch, 2012). Por consiguiente, fue necesario emplear un análisis que permitiese involucrar todos los elementos del sistema y sus interacciones. En esta investigación se trabajó con el software HEC RAS® para modelar el sistema de drenaje.

La modelación en este proyecto se apoyó en la metodología de evaluación del riesgo público por inundación expuesta por (Hernandez Rodriguez, 2012). Dicha metodología propone un procedimiento a seguir al implementar un modelo integrado de drenaje, enfocándose en la identificación y selección de aproximaciones de modelación.

A continuación, se presentan los pasos que se llevaron a cabo.

##### **4.4.2.1.1 Análisis del sistema:**

La implementación de un análisis integrado debe permitir llegar a un mejor entendimiento del sistema, incluyendo la identificación de fallas en el mismo para establecer la necesidad de optimizar su funcionamiento. El estado actual del sistema se determinó mediante la revisión de los datos disponibles e inspecciones de campo. El estado del sistema es de utilidad para la identificación de tramos de calle y/o arroyos que pueden llegar a ser insuficientes.



Fue indispensable para este estudio el obtener parámetros que permitiesen determinar la capacidad hidráulica de las secciones transversales de las calles, obras de drenaje y de los arroyos adyacentes al casco urbano de Clemencia, Bolívar, para luego determinar el caudal que soporta cada sistema de drenaje; fue necesario entonces determinar lo que se describe a continuación.

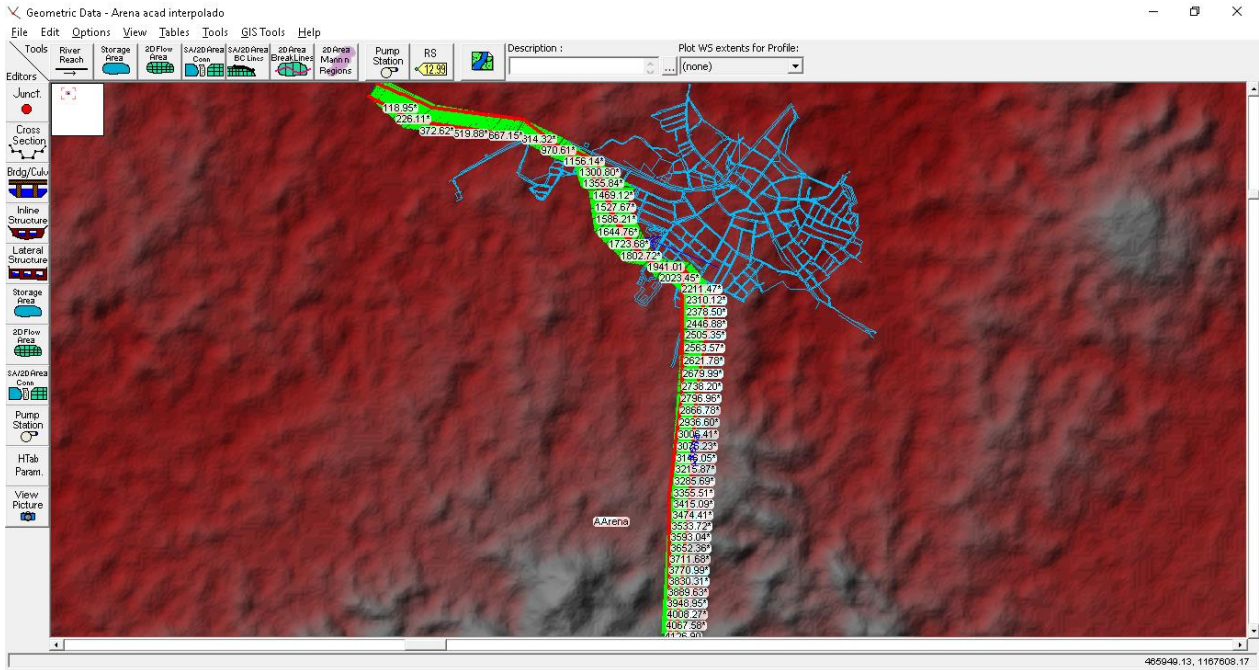
### ***Pendiente longitudinal***

La pendiente longitudinal del cauce de los arroyos Arena y Hormiguero, se determinó con la disposición de las curvas de nivel, obteniendo una pendiente promedio a través de la diferencia entre la cota más alta y la más baja del cauce y dividiendo este resultado entre la longitud horizontal entre estos dos puntos. La misma analogía se llevó a cabo para la obtención de dicha pendiente en cada tramo de vía urbana y estructuras de drenaje.

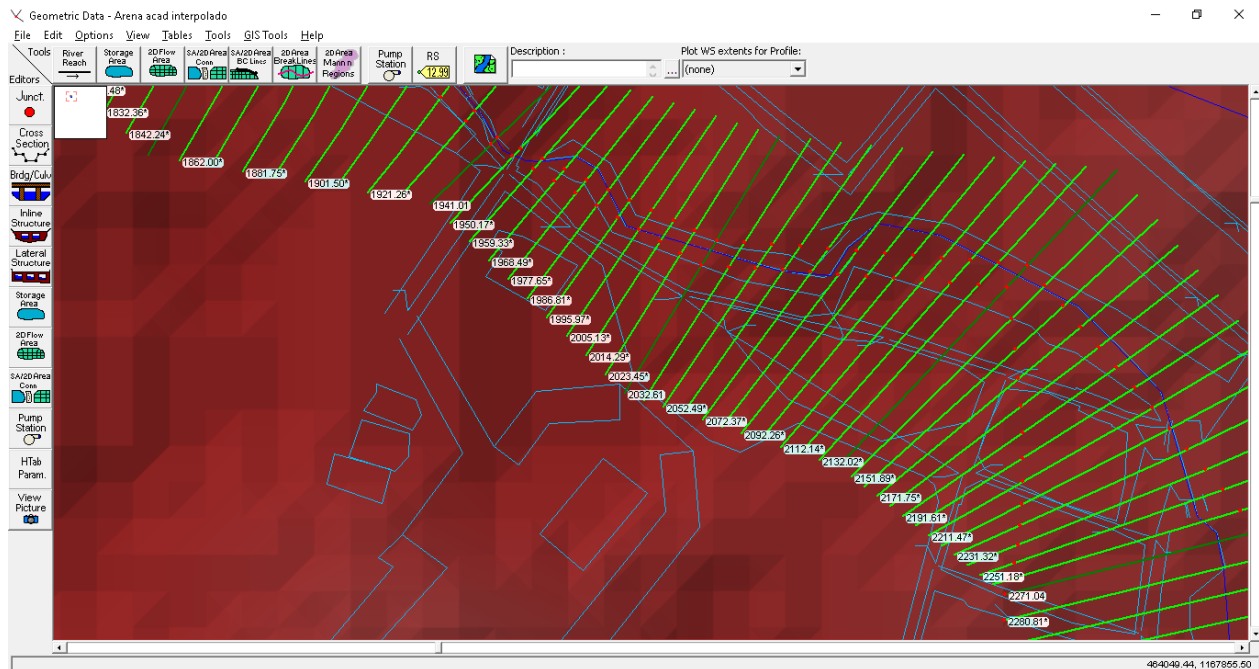
### ***Propiedades geométricas***

Arroyos: Para realizar el análisis de las características geométricas de los arroyos que afectan directamente a la población, se optó por apoyarse en el modelo digital de elevación (D.E.M.) y el reconocimiento e inspección de la sección transversal en campo para adaptar la geografía del modelo digital de elevación, debido a que la resolución espacial del D.E.M. no permitía observar las características geométricas de los arroyos.

**Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.**



*Ilustración 20. Construcción del sistema Geométrico, proyección de sección transversal sobre D.E.M. Fuente: Autores, formado con HEC RAS®*



*Ilustración 21. Construcción del sistema Geométrico, proyección de sección transversal sobre D.E.M. Fuente: Autores, formado con HEC RAS®*

# Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.

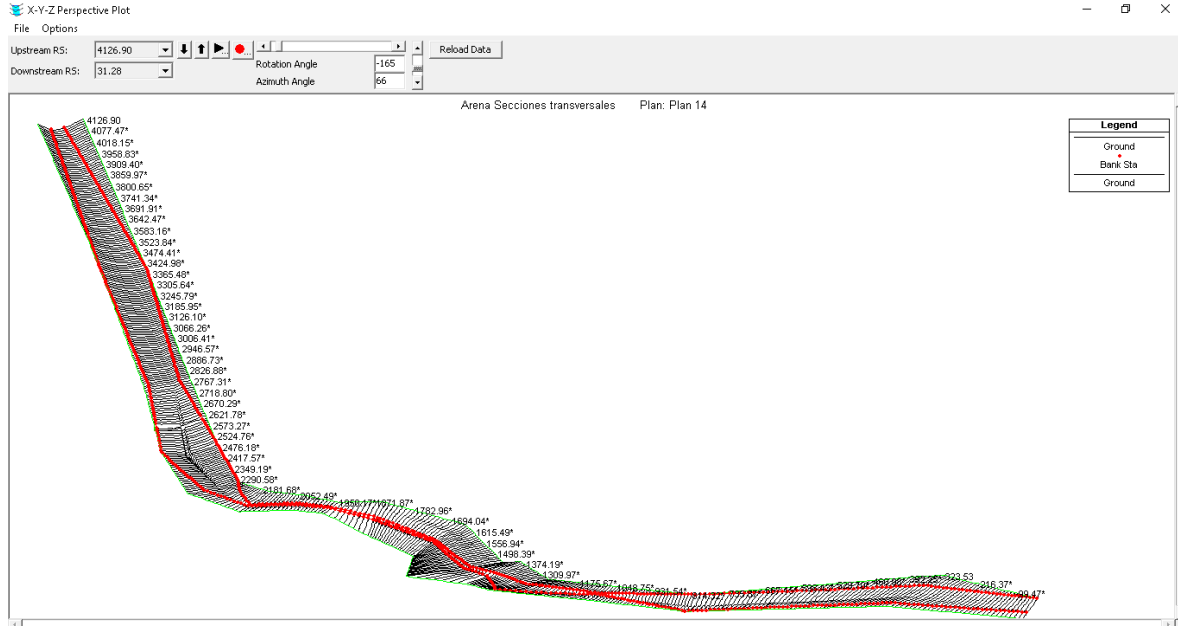


Ilustración 22. Dato Geométrico, vista isométrica del arroyo Arena. Fuente: Autores, formado con HEC RAS®.

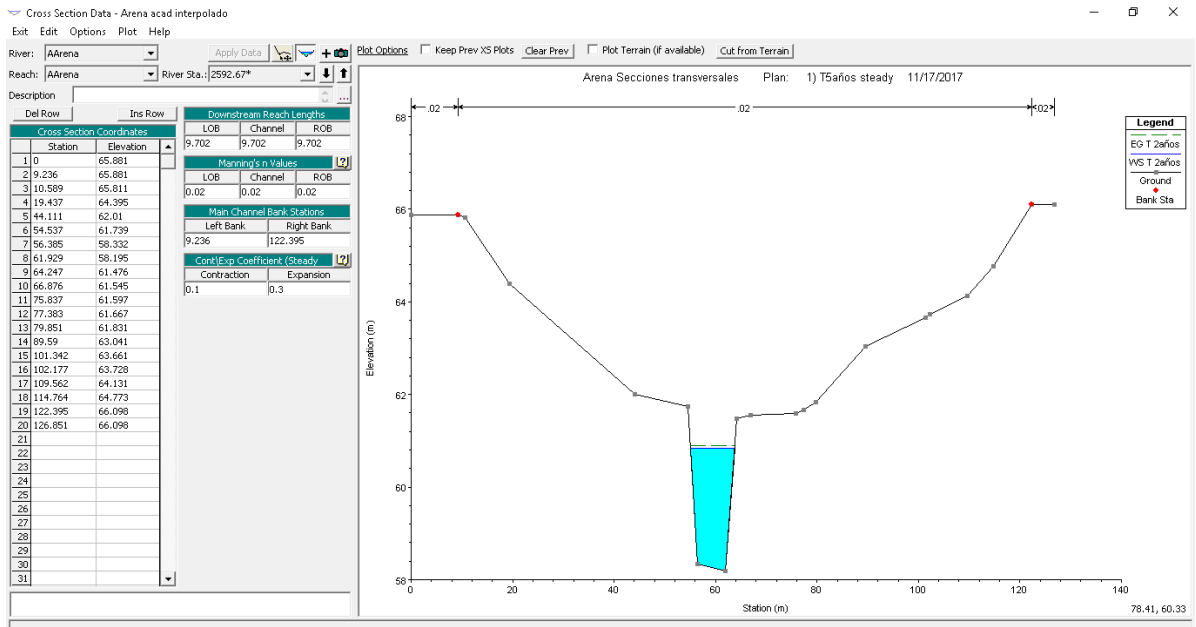


Ilustración 23. Adaptación del perfil de terreno en el D.E.M. a través de HEC RAS. Fuente: Autores





- Localidad de Clemencia-Bolívar: Para realizar el análisis específico de las características geométricas de las calles y estructuras de drenaje de la población de Clemencia se dispuso de planos topográficos (planimétricos y altimétricos) realizados por las empresas ACUACOR S.A. y C.D.I.

### ***Elección del Coeficiente de Manning***

Este coeficiente se estimó con relación a lo expuesto por el libro de Hidráulica de canales abiertos de Ven Te Chow, teniendo en cuenta las coberturas del terreno estudiado.

### ***Capacidad hidráulica.***

Toda vez obtenidos los parámetros anteriormente expuestos se dio paso a la estimación de la capacidad hidráulica que tiene cada tramo de calle y estructura de drenaje de la población, como también la de los arroyos, y así conocer si su capacidad es suficiente para acarrear el caudal que recorrería por ellos. En la estimación del caudal máximo soportado por cada sección transversal se aplicó la ecuación de Manning, expuesta en la sección 1.1.9.2 (Ec. 15).

Para la capacidad hidráulica de las calles se tomó como criterio de evaluación la capacidad para cuneta llena y para esparcimiento de agua máximo aceptable para evitar deslizamiento en los vehículos; siguiendo lo expuesto en la sección 1.1.9.7 por (Díaz, 2013).

#### **4.4.2.1.2 Identificación de procesos y criterios:**

El segundo paso consistió en un análisis más detallado del sistema en estudio, con el objeto de identificar las posibles causas de las fallas identificadas en el paso anterior. Como resultado del análisis se debió identificar los posibles escenarios a ser modelados.

***Creación de escenarios.*** Se supusieron condiciones de comportamiento hidrológico, meteorológico e hidráulico desfavorables para el sistema de drenaje en la localidad, en las que sea inminente un rebasamiento de la capacidad hidráulica de las calles y de los arroyos, con el fin de determinar las zonas más afectadas por el desbordamiento. Para esto se estimó una falla en

elementos de drenaje existentes, en el que se consideró la colmatación de estos y diferencia con la línea de energía piezométrica de los arroyos, teniendo en cuenta que los arroyos son el punto de vertimiento de los sistemas de drenaje urbano.

#### **4.4.2.1.3 Datos necesarios para la modelación:**

Entre más detallado sea el modelo por implementar es necesaria más información para su implementación (Schutze & Alex, 2012) citado en (Hernandez Rodriguez, 2012)). En este paso se debe reducir al máximo la complejidad del modelo, logrando un equilibrio entre los objetivos del estudio y los datos disponibles.

Para la estimación de las manchas de inundación se utilizó el software HEC RAS® el cual tuvo como base el D.E.M, los datos obtenidos del plano topográfico de la cabecera municipal de clemencia, la geometría de las calles, arroyos y estructuras de drenaje, el hietograma y el hidrograma de crecida determinado por HEC HMS®.

#### **4.4.2.1.4 Análisis del modelo y de los datos:**

Este paso comprendió un análisis detallado de los datos y de la estructura del modelo, con el fin de identificar posibles inconsistencias y/o inestabilidades. Si bien siempre existen diferencias entre el modelo y la realidad, estas se reducirán haciendo una estimación preliminar del comportamiento predictivo del modelo. Para esto, se debió realizar corridas preliminares del modelo implementado, buscando identificar anomalías en los resultados obtenidos.

#### **4.4.2.1.5 Calibración y validación:**

En esta etapa se determinaron los valores óptimos de los parámetros del modelo, a partir de comparaciones entre los resultados de las simulaciones y datos observados. Para lograr una buena calibración es necesario contar con registros simultáneos de precipitación y caudales, en diferentes puntos del sistema. Las interfaces entre diferentes subsistemas (calles, estructuras de drenaje, arroyos) deberán contar con una cantidad suficiente de datos. Dada la complejidad de los modelos integrados, se recomienda usar metodologías de calibración y evaluar el ajuste con funciones objetivo-definidas (Rauch, 2012). El proceso de calibración sugerido propone estimar de manera separada los modelos de cada subsistema, para finalmente calibrar de manera integrada, partiendo

de los resultados de la estimación inicial. Una vez estimados los parámetros óptimos del modelo, se procedió a validarlo, usando un conjunto de datos no usado durante el proceso de calibración. El objetivo del proceso de validación fue evaluar la capacidad predictiva del modelo. Es importante mencionar que, aún en los casos en los que no sea posible realizar una calibración adecuada del modelo, se pueden realizar análisis cualitativos a partir de los resultados obtenidos. Lo anterior se puede realizar comparando de manera relativa los resultados de diferentes escenarios, con el estado inicial y/o de referencia del sistema.

#### **4.4.2.1.6 Análisis de escenarios:**

Las medidas definidas en la sección 4.4.2.1.2, se implementaron en el modelo calibrado y validado. Los resultados de los diferentes escenarios simulados fueron comparados con un estado de referencia que pueda ser definido como el estado actual del sistema; para este caso de estudio fue la modelación de la inundación estimada gracias a los datos históricos. Nuevamente, los resultados de la simulación de los diferentes escenarios fueron evaluados, para identificar anomalías o inestabilidades (sección 4.4.2.1.4). Sólo cuando se obtuvo una calibración adecuada, fue posible realizar análisis cuantitativos absolutos. Este proceso ha de ser el empleado para la correcta implementación de un modelo del sistema de drenaje urbano, el cual finaliza con la documentación y presentación de resultados del estudio.

#### **4.4.3 Análisis de la amenaza de inundación en la llanura inundable.**

Según lo expresado por (Hernandez Rodriguez, 2012) “El resultado principal de un modelo de amenaza de inundación es la delimitación de las áreas factibles de inundación para un determinado periodo de retorno o tasa de excedencia”.

De acuerdo con las modelaciones previas (precipitación y sistema integrado de drenaje) y una vez la lámina de agua rebase la capacidad hidráulica de las calles y de los arroyos adyacentes a la población ésta empezará a dispersarse por la llanura inundable, en donde la intensidad de la amenaza será medida en términos de la frecuencia de la inundación, duración de la inundación y la profundidad del flujo. Para establecer el área de inundación la literatura reporta tres tipos principales de modelos hidráulicos: Modelos hidrodinámicos físicamente basados, modelos estocásticos y modelos conceptuales. A partir de la información disponible y el alcance del análisis

realizado se seleccionó el modelo de inundación, de manera tal que se obtuviesen los mejores resultados posibles. Para la determinación de las manchas de inundación se empleó el software HEC RAS® el cual se fundamenta en modelos matemáticos con ecuaciones de flujo en una dirección basado en ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y de continuidad.

#### **4.4.4 Evaluación final de la amenaza**






##### *Determinación de puntos críticos.*

Luego de los supuestos y consideraciones tenidos en los anteriores análisis, se procedió a determinar los parámetros hidrológicos e hidráulicos del cauce de cada tramo de calle, como de los arroyos Arena y Hormiguero, se obtuvo el caudal de escorrentía que fluiría, como también el caudal que soportaría cada cauce, con esto se determinó si los sistemas de drenaje son capaces en su estado actual de drenar el caudal de escorrentía, sin poner en riesgo los bienes y el normal desenvolvimiento urbano.

La evaluación final resultó en el mapa de amenaza del área de estudio, por medio del cual fue posible identificar las áreas en donde la severidad de la amenaza es mayor, media o baja, sea por efectos pluviales y/o por efectos de desbordes para los periodos de retorno expuestos en este documento. De acuerdo con Escuder et al (2010), la inundación pluvial puede ser clasificada con cinco niveles de tasas de daño a la población en función de la severidad de la amenaza. La severidad de la inundación se basa en una clasificación que involucra a cuatro variables: profundidad de la lámina de inundación ( $y$ ), velocidad del flujo ( $v$ ), el parámetro del vuelco (producto  $(v*y)$ ) y el parámetro de deslizamiento (producto  $v^2*y$ ), como se muestra en la Tabla 14.

Para efectos de esta investigación se trabajó exclusivamente con determinación de la amenaza por profundidad de la lámina de inundación.

Tabla 14. Escala de amenaza desarrollada para la metodología RPIU a partir de la severidad de la inundación desarrollada en el proyecto SUFRI  
Fuente: (Hernandez Rodriguez, 2012)

Escala de amenaza	Nivel de amenaza	Nivel de severidad (S)	Calado y(m)	Velocidad v(m/s)	Parámetro Vuelco v-y (m <sup>2</sup> /s)	Parámetro Deslizamiento v <sup>2</sup> -y (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )
2	 <b>Muy baja</b>	S0	No se esperan víctimas	<0.45	<1.50	<0.50
4	 <b>Baja</b>	S1	Severidad leve. Peatones pueden sufrir pérdida de estabilidad y dificultades para caminar.	<0.80	<1.60	<1.00
6	 <b>Media</b>	S2	Severidad media. Significativas pérdidas de estabilidad. Vehículos pierden adherencia.	<1.00	<1.88	<1.00
8	 <b>Alta</b>	S3	Severidad elevada. Alto riesgo para personas situadas en el exterior. Arrastre de vehículos.	>1.00	>1.88	>1.00
10	 <b>Muy Alta</b>	S4	Severidad extrema. Daños estructurales a edificios.	>1.00	>1.88	>3.00

Con base en esto se asignaron las zonas en amenaza inminente de inundación y/o desbordamiento y se plasmaron en un plano de amenazas por inundación a través de la herramienta de información geográfica QGIS®.

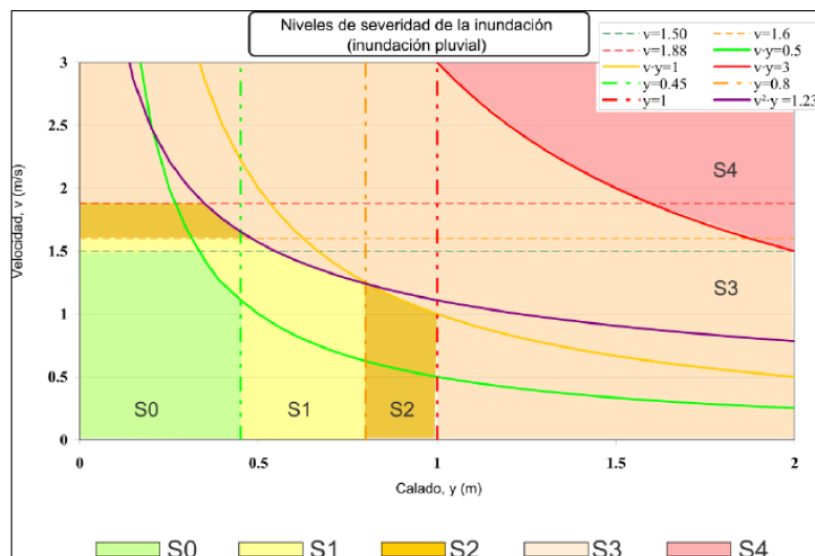


Ilustración 24. Gráfico para la obtención de niveles de severidad en inundación pluvial (Escuder et al, 2010). Fuente: (Hernandez Rodriguez, 2012)



#### **4.5 MEDIDAS DE INTERVENCION PROPUESTAS.**

De acuerdo con lo obtenido por las secciones anteriormente expuestas en esta metodología, se determinó que era necesario tomar medidas de prevención para atenuar los problemas del manejo de caudales inducidos por los arroyos y por el escurrimiento en las cunetas de las calles. Para plantear solución a las problemáticas se propuso la constitución de un canal revestido en pasto, en el caso de los arroyos y ubicación de sumideros de rejilla y de ventana en las calles de la cobertura urbana.



## 5 RESULTADOS

### 5.1 PRECIPITACION

Uno de los pasos más importantes para este estudio fue el determinar el comportamiento hidrológico de la zona de estudio, esto debido a que como ya se ha expuesto anteriormente, el análisis de la amenaza se llevó a cabo para cuencas hidrográficas efímeras, por lo que se depende exclusivamente de la dinámica de las precipitaciones para llevar a cabo el estudio.

#### 5.1.1 Curvas IDF

Se utilizaron tres métodos para la obtención de las Curvas IDF, en estos se encuentran dos métodos empleados actualmente para la obtención de la intensidad en Colombia, los cuales son el expuesto por (Vargas & Diazgranados, 1998) e (IDEAM, 2016) el otro método utilizado fue el de (Chang & Bolivar, 1997).

Para efectos del proyecto se utilizó el método de relaciones de precipitación registrada en 24 horas y la precipitación caída en una duración  $t$  menor, desarrollado por Chang y Bolívar, como el método que representaría las condiciones de intensidades locales del área estudiada. Las intensidades determinadas por los otros dos métodos se utilizaron como referencia para determinar la relación con las intensidades locales.

##### 5.1.1.1 Curvas IDF con relaciones de Chang y Bolívar.

Para la construcción de las curvas IDF se optó por seguir lo expuesto por (Olivares, 2017) al utilizar la fórmula:

$$I = \frac{K * T^m}{t^n}$$

*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



Universidad  
de Cartagena  
Fundada en 1827

La obtención de la precipitación máxima probable se hizo mediante una distribución probabilística de Gumbel teniendo como muestra los datos históricos de precipitación recolectados por la estación “BAYUNCA” desde 1974 hasta la actualidad, tomando como valor de entrada la precipitación máxima en 24 horas.

En la obtención de la ecuación de intensidad fue necesario determinar el producto entre la precipitación diaria máxima probable con el tiempo de duración de la lluvia. (Chang & Bolívar, 1997) determinaron para la estación Rafael Nuñez de Cartagena la relación entre la precipitación registrada en 24 horas y la precipitación caída en una duración  $t$  menor,  $P_t$ , esta relación fue utilizada para determinar dicho producto.

A continuación, se presenta el proceso para la estimación:



**5.1.1.1.1 Determinación de la precipitación máxima probable.**

- En primer lugar, fue necesario la extracción de los datos máximos anuales de precipitación del informe histórico de precipitación máxima en 24 horas.

*Tabla 15 Precipitación máxima anual, estación pluviométrica Bayunca*

Nº	Año	Mes Max. Precip.	Precipitación (mm)	
			$x_i$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1968	SEP	53,13	1806,90
2	1969	JUN	70,00	657,03
3	1970	JUN	112,00	267,89
4	1971	JUL	61,00	1199,42
5	1972	AGO	70,00	657,03
6	1973	AGO	50,00	2082,33
7	1974	OCT	137,00	1711,26
8	1975	SEP	174,00	6141,45
9	1976	OCT	95,00	0,40
10	1977	SEP	120,00	593,77
11	1978	NOV	140,00	1968,47
12	1979	SEP	140,00	1968,47
13	1980	MAY	83,00	159,58
14	1981	JUL	78,80	283,34
15	1982	OCT	52,80	1834,63
16	1983	OCT	120,00	593,77
17	1984	OCT	84,00	135,32
18	1985	OCT	95,70	0,00
19	1988	OCT	84,00	135,32
20	1989	JUN	95,70	0,00
21	1990	DIC	150,00	2955,81
22	1991	MAY	100,00	19,07
23	1992	NOV	137,00	1711,26
24	1993	SEP	85,50	102,67
25	1994	NOV	73,08	508,85
26	1995	ABR	87,40	67,78
27	1996	OCT	85,00	113,05
28	1997	NOV	84,00	135,32
29	1998	MAY	80,00	244,38
30	1999	OCT	94,00	2,67
31	2000	JUN	62,50	1097,77
32	2001	OCT	106,00	107,48
33	2002	MAY	32,50	3985,73
34	2003	DIC	112,20	274,48
35	2004	NOV	90,30	28,44
36	2005	OCT	80,50	229,00
37	2006	NOV	122,00	695,24
38	2007	OCT	106,00	107,48
39	2008	NOV	138,00	1795,00
40	2009	JUN	122,00	695,24
41	2010	JUL	108,50	165,57
42	2011	OCT	81,00	214,11
43	2012	SEP	109,30	186,80
44	2013	OCT	75,00	425,70
45	2014	OCT	105,10	89,63
46	2015	AGO	56,10	1562,83
<b>46</b>		<b>Suma</b>	<b>4399,1</b>	<b>39717,7</b>

- En segundo lugar, se obtuvieron las variables probabilísticas de la muestra

Promedio de la muestra:

$$x = \frac{\sum xi}{n} = 95,63 \text{ mm}$$

Desviación estándar de la muestra:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - x)^2}{n - 1}} = 29,71 \text{ mm}$$

Parámetros probabilísticos:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S = 23,16 \text{ mm}$$

$$\mu = x - 0,5772\alpha = 82,26 \text{ mm}$$

- La variable de Gumbel para el período de retorno T se determina a partir del valor del período de retorno. El valor se obtuvo por la siguiente expresión.

$$YT = -\ln(\ln(T/T - 1))$$

- El factor de frecuencia está dado por la expresión:

$$KT = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} (0,5772 + \ln(\ln(T/T - 1)))$$

$$KT = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} (0,5772 - YT)$$

- Gumbel sugiere que el valor máximo probable de una variable está representado por la siguiente expresión:

$$XT = x + KT * S$$

$$XT = x + \left( -\frac{\sqrt{6}}{\pi} (0,5772 - YT) \right) * S$$

$$XT = x - \alpha * 0,5772 + \alpha * YT$$

$$XT = \mu + \alpha * YT$$



(Chang & Bolivar, 1997) estudiaron para la estación Rafael Nuñez de Cartagena la relación entre la precipitación registrada en 24 horas y la precipitación caída en una duración  $t$  menor,  $P_t$ . Los resultados de Chang y Bolivar mostraron que el periodo de retorno no era significativo en el establecimiento de la relación y propusieron la siguiente expresión para tiempos de duración menores a 4 horas 20 minutos.

$$\%P_t = -0,0067t^4 + 0,0902t^3 - 0,4236t^2 + 0,897t + 0,0026$$

Donde:

$t$  = Duración de la lluvia en horas

$\%P_t$  = Fracción de la precipitación en 24 horas caída en una duración  $t$  de la lluvia

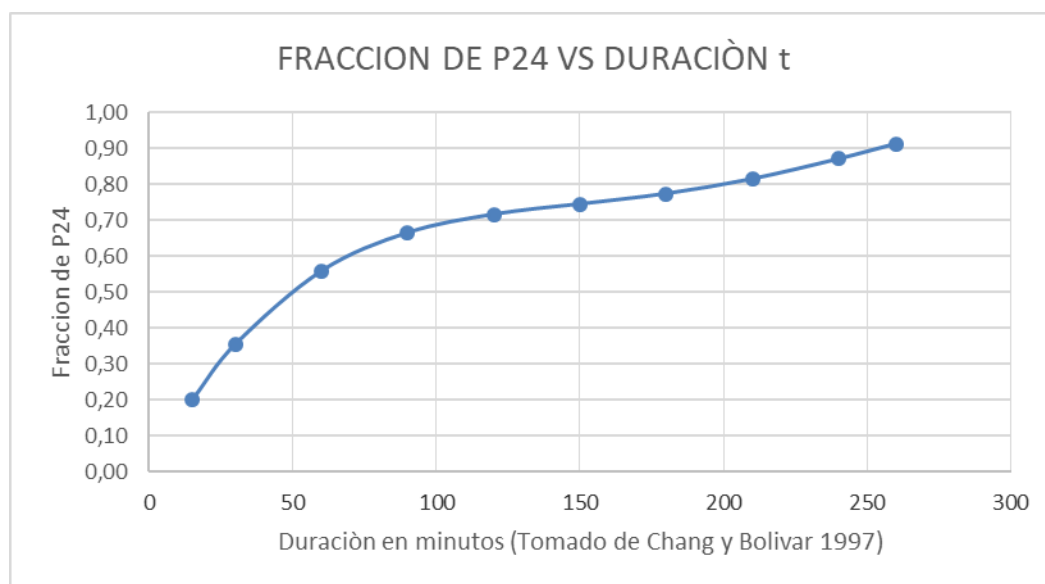


Gráfico 1. Fracción de Precipitación en 24 horas Vs Duración Fuente: (Chang & Bolivar, 1997)

**Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.**



Tabla 17. Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración de 24 horas Fuente: (Chang & Bolivar, 1997)

Duraciones, en horas									
0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,33
0,20	0,36	0,56	0,67	0,72	0,75	0,77	0,81	0,87	0,91

Tabla 18. Producto precipitación y coeficiente de duración. Fuente: Autores, basado en (Olivares, 2017)

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
4,33 hr	X4,33 = 91%	93,5757	120,6471	138,5707	161,2172	178,0177	194,6942	233,2309
4,00 hr	X4 = 87%	89,2801	115,1088	132,2096	143,9767	169,8458	185,7568	222,5245
3,50 hr	X3,5 = 81%	83,5687	107,7451	123,7519	143,9767	158,9805	173,8736	208,2892
3,00 hr	X3 = 77%	79,3635	102,3233	117,5247	136,7317	150,9806	165,1242	197,8080
2,50 hr	X2,5 = 75%	76,4261	98,5361	113,1749	131,6710	145,3925	159,0126	190,4867
2,00 hr	X2 = 72%	73,4874	94,7472	108,8231	126,6080	139,8019	152,8983	183,1622
1,50 hr	X1,5 = 67%	68,2477	87,9917	101,0640	117,5809	129,8340	141,9967	170,1027
1,00 hr	X1 = 56%	57,3768	73,9758	84,9659	98,8518	109,1532	119,3785	143,0076
0,50 hr	X0,5 = 36%	36,5136	47,0770	54,0708	62,9076	69,4632	75,9704	91,0076
0,25 hr	X0,25 = 20%	20,6903	26,6760	30,6391	35,6464	39,3611	43,0484	51,5692

Paso siguiente fue el determinar la intensidad de la lluvia según el periodo de retorno, a partir del producto anterior. Esta intensidad se expresa como:  $I = \frac{P (mm)}{t(hr)}$

Tabla 19. Intensidad de la lluvia, según el periodo de retorno. Fuente: Autores, basado en (Olivares, 2017)

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm/hr) según el Periodo de Retorno						
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
4,33 hr	260	21,5944	27,8416	31,9779	37,2040	41,0810	44,9294	53,8225
4,00 hr	240	22,3200	28,7772	33,0524	35,9942	42,4615	46,4392	55,6311
3,50 hr	210	23,8768	30,7843	35,3577	41,1362	45,4230	49,6782	59,5112
3,00 hr	180	26,4545	34,1078	39,1749	45,5772	50,3269	55,0414	65,9360
2,50 hr	150	30,5704	39,4144	45,2699	52,6684	58,1570	63,6050	76,1947
2,00 hr	120	36,7437	47,3736	54,4116	63,3040	69,9010	76,4492	91,5811
1,50 hr	90	45,4985	58,6612	67,3760	78,3872	86,5560	94,6644	113,4018
1,00 hr	60	57,3768	73,9758	84,9659	98,8518	109,1532	119,3785	143,0076
0,50 hr	30	73,0272	94,1539	108,1417	125,8152	138,9264	151,9409	182,0152
0,25 hr	15	82,7613	106,7041	122,5563	142,5856	157,4445	172,1937	206,2768

### 5.1.1.1.3 Obtención de los coeficientes K, d, m y n

La obtención de los valores K, m y n fueron obtenidos por regresión lineal, siguiendo las relaciones siguientes:

Realizando un cambio de variable:  $d = K * T^m$

Con lo que de la anterior expresión se obtiene:  $I = \frac{d}{t^n} \rightarrow I = d * t^{-n}$  de lo que se obtiene las gráficas de regresión para cada periodo de retorno.

Los valores de las constantes d y n se determinarían mediante las ecuaciones:

$$\ln(d) = \left[ \sum (\ln(x) * \ln(y)) * \ln(x) - \sum (\ln(x))^2 * \ln(y) \right] / \left[ \left( \sum \ln(x) \right)^2 - \sum \ln(x)^2 * N^0 \right]$$

$$n = [\ln(y) - (N^0 * \ln(d))] / n(x)$$

Donde:

x=duración de la lluvia

y=Intensidad de la lluvia.

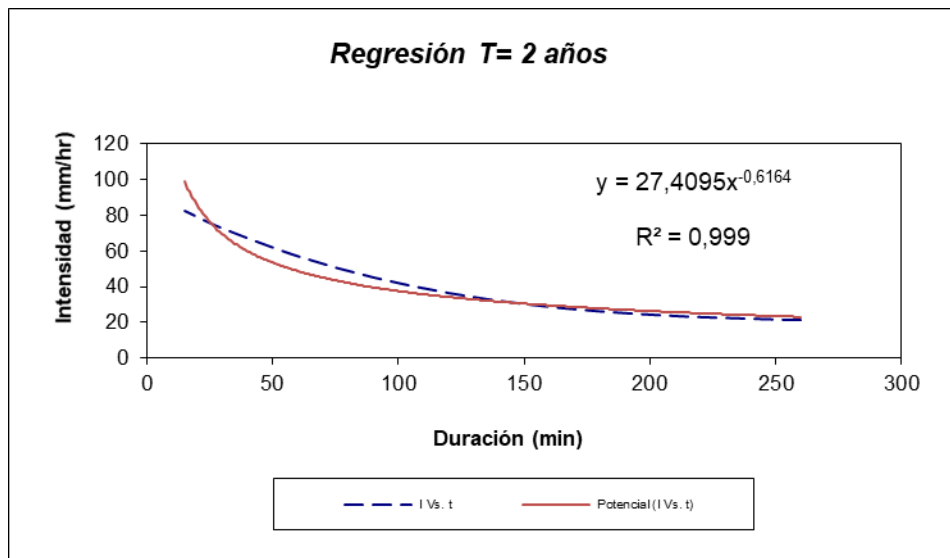
*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



A continuación, se muestra la analogía empleada, tomando como ejemplo lo realizado para el periodo de retorno de 2 años.

*Tabla 20 Variables para estimación del valor de la regresión para T=2 años*

<b>Periodo de retorno para T = 2 años</b>						
<b>Nº</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>ln x</b>	<b>ln y</b>	<b>ln x*ln y</b>	<b>(lnx)^2</b>
1	260	21,5944	5,5607	3,0724	17,0848	30,9212
2	240	22,3200	5,4806	3,1055	17,0200	30,0374
3	210	23,8768	5,3471	3,1729	16,9659	28,5916
4	180	26,4545	5,1930	3,2754	17,0091	26,9668
5	150	30,5704	5,0106	3,4200	17,1365	25,1065
6	120	36,7437	4,7875	3,6040	17,2540	22,9201
7	90	45,4985	4,4998	3,8177	17,1788	20,2483
8	60	57,3768	4,0943	4,0496	16,5806	16,7637
9	30	73,0272	3,4012	4,2908	14,5940	11,5681
10	15	82,7613	2,7081	4,4160	11,9586	7,3335
10	1355	420,2235	46,0829	36,2244	162,7824	220,4571
<b>Ln (d) = 5,9853</b>		<b>d = 397,5501</b>		<b>n = -0,5127</b>		



*Gráfico 2. Regresión para I, con un T= 2 años. Fuente: Autores.*

En función del cambio de variable realizado, se realizó otra regresión de potencia entre las columnas del periodo de retorno (T) y el término constante de regresión (d), para obtener valores de la ecuación:  $d = K * T^m$

De lo anterior se obtienen graficas de regresión, como la siguiente:

*Tabla 21. Resumen de aplicación de regresión potencial*

<b>Resumen de aplicación de regresión potencial</b>		
<b>Periodo de Retorno (años)</b>	<b>Término cte. de regresión (d)</b>	<b>Coef. de regresión [n]</b>
<b>2</b>	397,55010589893	-0,51274643936
<b>5</b>	512,56116370875	-0,51274643936
<b>10</b>	588,70849142118	-0,51274643936
<b>25</b>	703,12056781799	-0,51987187093
<b>50</b>	756,29665959848	-0,51274643936
<b>100</b>	827,14544951415	-0,51274643936
<b>500</b>	990,86618738983	-0,51274643936
<b>Promedio =</b>	682,32123219276	-0,51376435815

Los valores de las constantes K y m se tendrían mediante las ecuaciones:

$$\ln(K) = \left[ \sum (\ln(x) * \ln(y)) * \ln(x) - \sum (\ln(x)^2 * \ln(y)) \right] / \left[ \left( \sum \ln(x) \right)^2 - \sum \ln(x)^2 * N^o \right]$$

$$m = [\ln(y) - (N^o * \ln(K))] / \ln(x)$$

Donde:

**x**=Periodo de retorno de la lluvia

**y**=Constante de regresión (d)



Tabla 22. Variables de regresión potencial para  $T= 2$  años.

<b>Regresión potencial</b>						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	2	397,5501	0,6931	5,9853	4,1487	0,4805
2	5	512,5612	1,6094	6,2394	10,0420	2,5903
3	10	588,7085	2,3026	6,3779	14,6857	5,3019
4	25	703,1206	3,2189	6,5555	21,1014	10,3612
5	50	756,2967	3,9120	6,6284	25,9306	15,3039
6	100	827,1454	4,6052	6,7180	30,9374	21,2076
7	500	990,8662	6,2146	6,8986	42,8720	38,6214
7	692	4776,2486	22,5558	45,4032	149,7178	93,8667
<b>Ln (K) = 5,9665</b>		<b>K = 390,1369</b>		<b>m = 0,1613</b>		

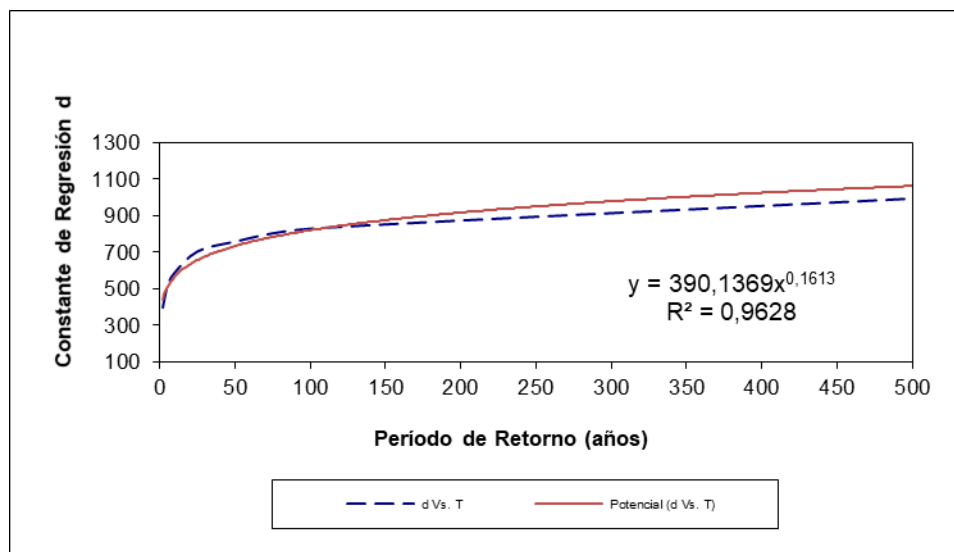


Gráfico 3. Regresión para  $d$ , con un  $T= 2$  años. Fuente: Autores.

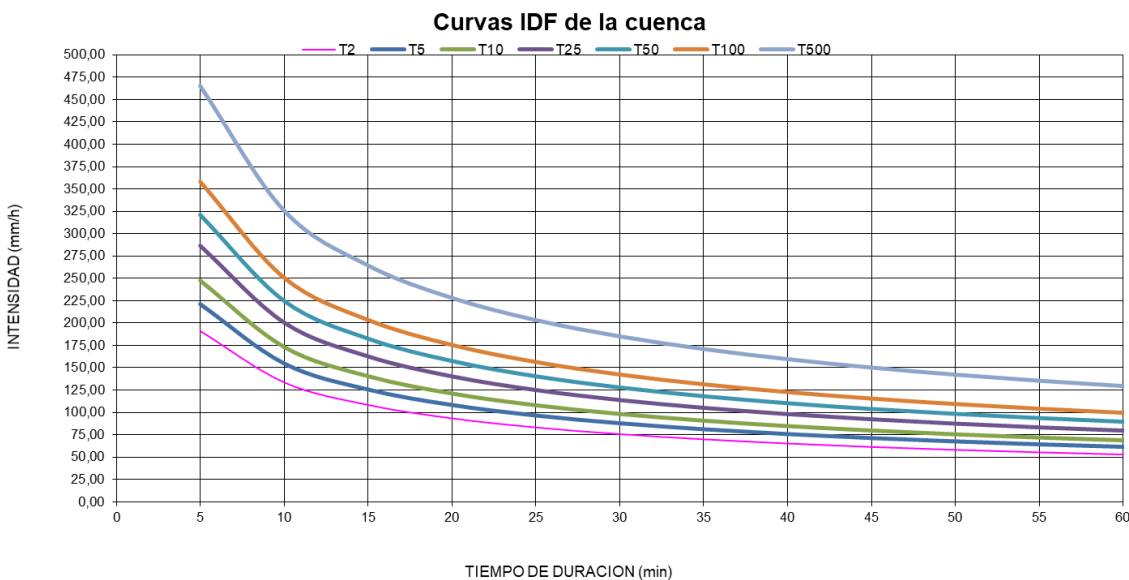
**5.1.1.1.4 Ecuación de Intensidad para la estación Bayunca.**

Luego de lo anterior y por último se obtuvo la ecuación válida para las condiciones específicas de precipitación en la cuenca, por los datos de la estación “BAYUNCA”

$$I = \frac{390,1369 * T^{0,161276}}{t^{0,51376}}$$

*Tabla 23. Intensidades vs Tiempo de duración (Método de Gumbel)*

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	190,84	133,66	108,53	93,61	83,47	76,01	70,22	65,57	61,72	58,46	55,67	53,24
5	221,23	154,95	125,81	108,52	96,77	88,12	81,41	76,01	71,55	67,78	64,54	61,72
10	247,39	173,27	140,69	121,36	108,21	98,54	91,03	85,00	80,01	75,79	72,17	69,01
25	286,79	200,87	163,09	140,69	125,45	114,23	105,53	98,53	92,75	87,86	83,66	80,01
50	320,71	224,62	182,38	157,32	140,28	127,74	118,01	110,19	103,72	98,25	93,56	89,47
100	358,64	251,19	203,96	175,93	156,88	142,85	131,97	123,22	115,99	109,87	104,62	100,05
500	464,93	325,63	264,40	228,07	203,37	185,18	171,08	159,74	150,36	142,44	135,63	129,70



*Gráfico 4. Curvas IDF para T distintos a partir de la estación BAYUNCA. Fuente: Autores.*

### 5.1.1.2 Curvas IDF sintéticas

(Vargas & Diazgranados, 1998) a través del estudio de 165 estaciones pluviográficas en Colombia determinaron nuevas ecuaciones para la obtención de curvas IDF, para ello los investigadores clasificaron las estaciones en 5 regiones y determinaron parámetros de regresión diferentes para cada región.

La ecuación general estimada fue:

$$I = \frac{a * Tr^b * M^d}{(tc/60)^c}$$

Donde:

a,b,c,d: Parámetros de regresión regionalizados.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual.

tc: Tiempo de duración de la precipitación en horas.

*Tabla 24. Constantes de regresión*

<b>Region</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
<b>Andina</b>	<b>0,94</b>	<b>0,18</b>	<b>0,66</b>	<b>0,83</b>
<b>Caribe</b>	<b>24,85</b>	<b>0,22</b>	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>
<b>Pacifico</b>	<b>13,92</b>	<b>0,19</b>	<b>0,58</b>	<b>0,2</b>
<b>orinoquia</b>	<b>5,53</b>	<b>0,17</b>	<b>0,63</b>	<b>0,42</b>

Se determinaron los valores máximos de precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual, a través de la homogenizada del informe histórico del IDEAM (Tabla 13). Teniendo en cuenta los registros homogenizados se determinó que la precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual (M) es: 95,69 mm. Obtenido el valor (M): 95,69 mm y al emplearse la ecuación de intensidad se calcularon los valores de intensidades máximas para cada periodo de duración de la lluvia y los periodos de retorno estudiados en este proyecto.

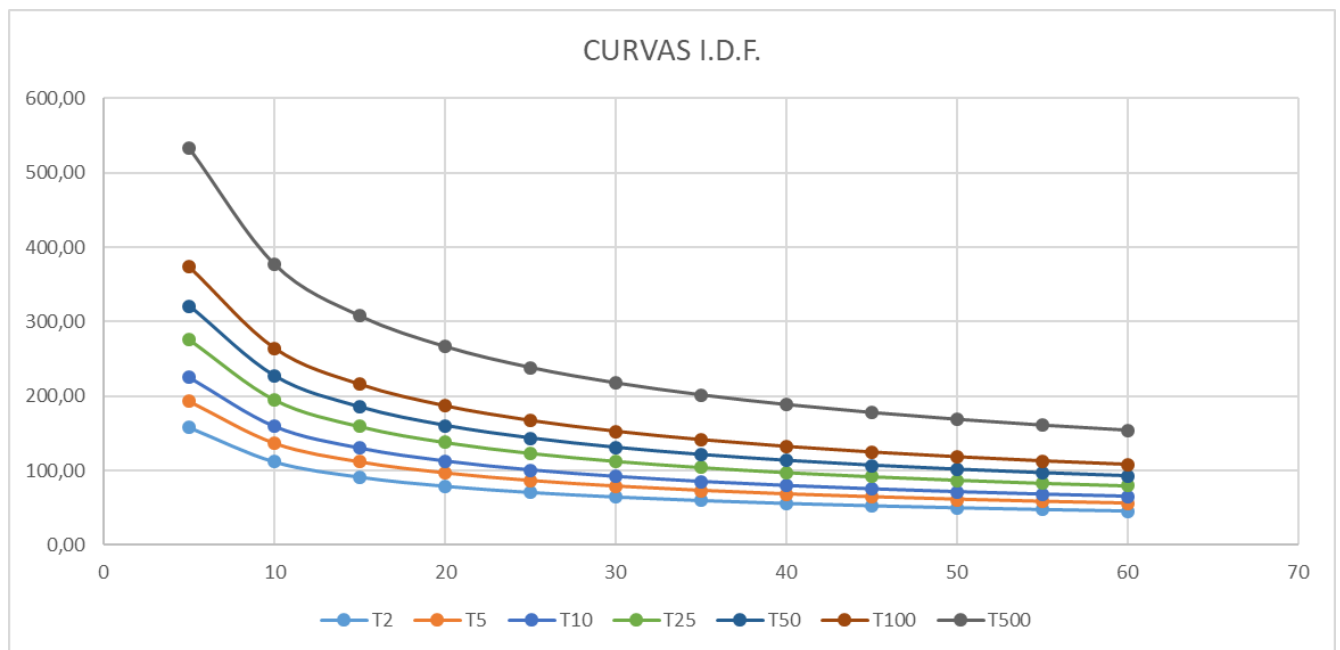
**Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.**



Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 25. Intensidades vs Tiempo de duración (Método de Diazgranados)*

DIAZ GRANADOS-ESTACION BAYUNCA												
PERIODO DE RETORNO (años)	DURACION (min)											
	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	60,00
2	158,21	111,87	91,34	79,10	70,75	64,59	59,80	55,94	52,74	50,03	47,70	45,67
5	193,54	136,86	111,74	96,77	86,55	79,01	73,15	68,43	64,51	61,20	58,36	55,87
10	225,43	159,40	130,15	112,71	100,81	92,03	85,20	79,70	75,14	71,29	67,97	65,07
25	275,77	195,00	159,22	137,89	123,33	112,58	104,23	97,50	91,92	87,21	83,15	79,61
50	321,20	227,12	185,45	160,60	143,65	131,13	121,40	113,56	107,07	101,57	96,85	92,72
100	374,11	264,54	215,99	187,06	167,31	152,73	141,40	132,27	124,70	118,31	112,80	108,00
500	533,06	376,93	307,76	266,53	238,39	217,62	201,48	188,47	177,69	168,57	160,72	153,88



*Gráfico 5. Curvas IDF Sintéticas para T distintos a partir de la estación BAYUNCA.*

*Fuente: Autores*

### 5.1.1.3 Curvas IDF actualizadas por IDEAM.

Durante 2016 el IDEAM a través de la Subdirección de Hidrología actualizó las Curvas IDF para 110 estaciones, empleando la información disponible hasta 2010.

La estimación de intensidad obedece a la relación expuesta a continuación:

$$I = \frac{C1}{(D + X0)^{C2}}$$

La actualización tuvo como base la información pluviográfica desde 1970 a 2010, se usó la distribución de Gumbel para ajustar los datos de intensidades y los parámetros de la ecuación fueron estimados con el método L-Momentos (IDEAM, 2016)

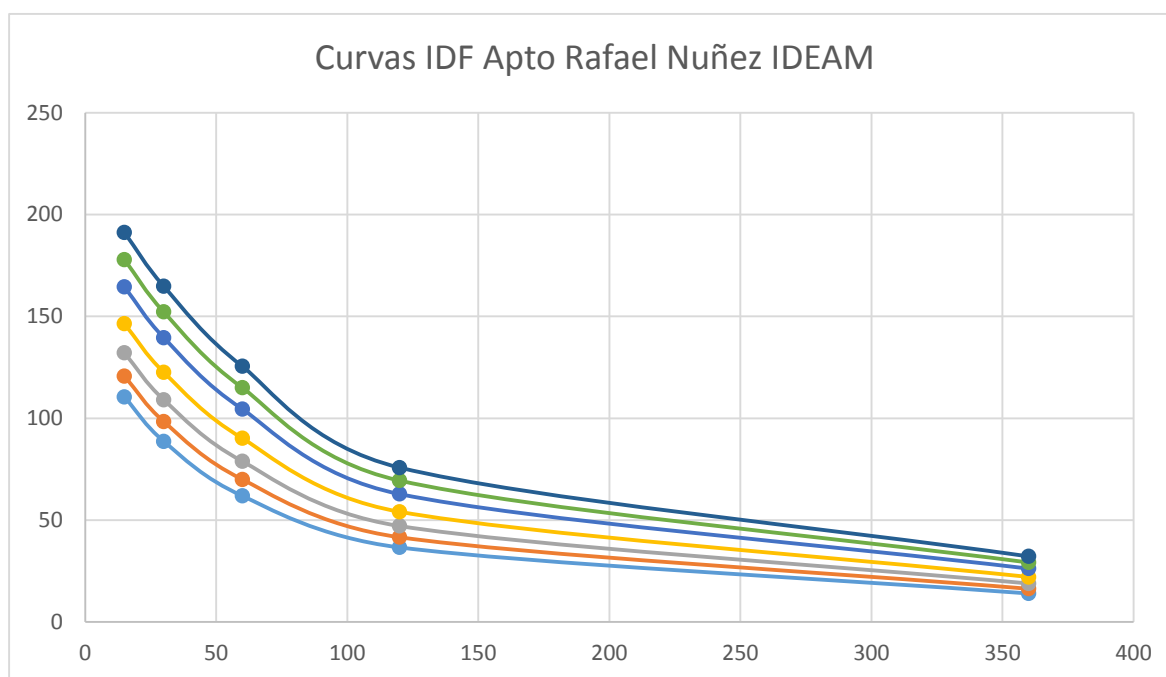
Entre las curvas actualizadas se encuentra la correspondiente a la estación Aeropuerto Rafael Núñez (código: 1401502) la cual se utilizó para este estudio.

*Tabla 26 Coeficientes de la ecuación general de intensidades para estación Aeropuerto Rafael Núñez.*

T (años)	C1	X0	C2
2	19027,095	56,907	1,204
3	24275,161	62,902	1,217
5	31568,636	69,285	1,234
10	43071,436	76,793	1,257
25	61645,82	85,436	1,284
50	78546,079	91,269	1,304
100	98087,189	96,608	1,322

*Tabla 27. Intensidades vs Tiempo de duración (Ecuación actualizada IDEAM).*

Periodo de Retorno	TABLA DE INTENSIDADES-TIEMPO DE DURACION				
	DURACION (min)				
	15	30	60	120	360
<b>2</b>	110,5	88,7	61,9	36,6	14
<b>3</b>	120,7	98,4	70	41,6	16,3
<b>5</b>	132,1	109,1	78,9	47,1	18,9
<b>10</b>	146,4	122,6	90,2	54,1	22,1
<b>25</b>	164,5	139,6	104,5	62,8	26,2
<b>50</b>	177,9	152,2	115	69,4	29,2
<b>100</b>	191,2	164,8	125,5	75,8	32,2



*Gráfico 6. Curvas IDF actualizadas por IDEAM para T distintos a partir de la estación BAYUNCA.*

**Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.**



Tabla 28. Intensidades vs Tiempo de duración (usando Ecuación actualizada por IDEAM)

Fuente: Autores.

IDEAM ACTUALIZADA RAFAEL NUÑEZ												
PERIODO DE RETORNO (años)	DURACION (min)											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	132,47	120,64	110,62	102,02	94,57	88,05	82,32	77,23	72,69	68,62	64,95	61,62
5	155,08	143,10	132,70	123,59	115,56	108,42	102,04	96,31	91,14	86,45	82,18	78,27
10	169,79	157,58	146,87	137,40	128,97	121,43	114,64	108,50	102,93	97,86	93,21	88,95
25	189,65	176,99	165,76	155,73	146,74	138,63	131,28	124,60	118,50	112,92	107,78	103,05
50	203,54	190,54	178,93	168,52	159,13	150,63	142,90	135,84	129,38	123,44	117,97	112,91
100	218,00	204,59	192,56	181,72	171,91	162,99	154,85	147,41	140,56	134,26	128,44	123,05

### 5.1.2 Relación de las intensidades por los 3 métodos

Debido a que el promedio de las relaciones entre el método de Chang y los métodos Diazgranados e IDEAM fueron 1.05 y 0.92; respectivamente y muestran una relación aceptable, se decidió trabajar en este proyecto con las Curvas IDF determinadas con las relaciones de Chang y Bolívar.

Las siguientes tablas muestran las relaciones en mención:

*Tabla 29. Relación de Intensidades Chang/Diazgranados. Fuente: Autores.*

RELACION CHANG/DIAZGRANADO												
PERIODO DE RETORNO (años)	DURACION (min)											
	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	60,00
2	1,21	1,19	1,19	1,18	1,18	1,18	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
5	1,14	1,13	1,13	1,12	1,12	1,12	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,10
10	1,10	1,09	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06
25	1,04	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00
50	1,00	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96
100	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
											PROMEDIO	1,05

*Tabla 30. Relación de Intensidades Chang/IDEAM Fuente: Autores.*

RELACION CHANG/IDEAM												
PERIODO DE RETORNO (años)	DURACION (min)											
	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	60,00
2	1,44	1,11	0,98	0,92	0,88	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,86	0,86
5	1,43	1,08	0,95	0,88	0,84	0,81	0,80	0,79	0,79	0,78	0,79	0,79
10	1,46	1,10	0,96	0,88	0,84	0,81	0,79	0,78	0,78	0,77	0,77	0,78
25	1,51	1,13	0,98	0,90	0,85	0,82	0,80	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78
50	1,58	1,18	1,02	0,93	0,88	0,85	0,83	0,81	0,80	0,80	0,79	0,79
100	1,65	1,23	1,06	0,97	0,91	0,88	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,81
											PROMEDIO	0,92

*Tabla 31. Relación de Intensidades Diazgranados/IDEAM Fuente: Autores.*

RELACION DIAZGRANADO/IDEAM												
PERIODO DE RETORNO (años)	DURACION (min)											
	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	60,00
2	1,19	0,93	0,83	0,78	0,75	0,73	0,73	0,72	0,73	0,73	0,73	0,74
5	1,25	0,96	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
10	1,33	1,01	0,89	0,82	0,78	0,76	0,74	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
25	1,45	1,10	0,96	0,89	0,84	0,81	0,79	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77
50	1,58	1,19	1,04	0,95	0,90	0,87	0,85	0,84	0,83	0,82	0,82	0,82
100	1,72	1,29	1,12	1,03	0,97	0,94	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,88
											PROMEDIO	0,89





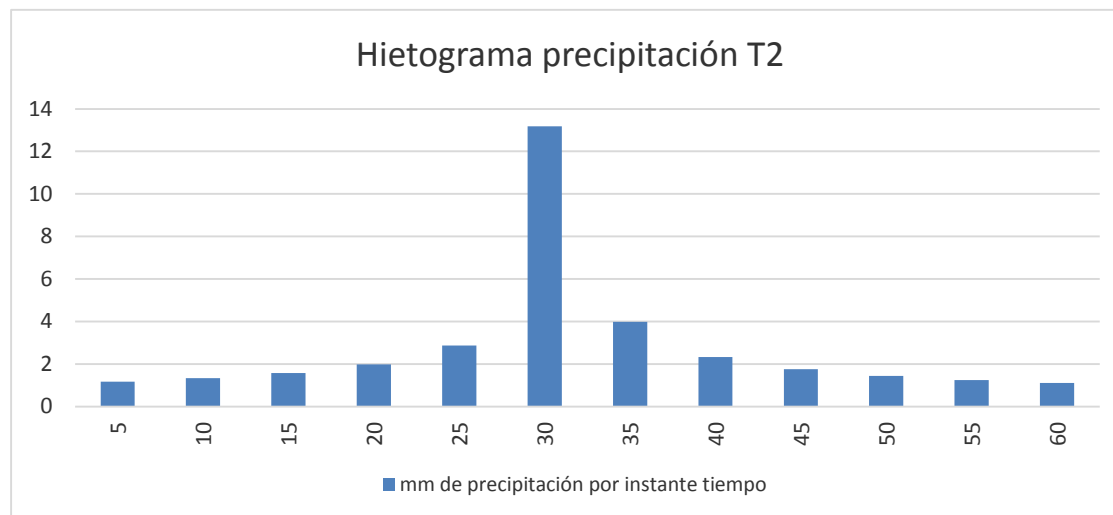
*Tabla 32. Promedio de Intensidades Fuente: Autores.*

PROMEDIO DE LOS 3 METODOS												
PERIODO DE RETORNO (años)	DURACION (min)											
	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	60,00
<b>2</b>	160,50	122,06	103,49	91,58	82,93	76,22	70,78	66,24	62,38	59,04	56,11	53,51
<b>5</b>	189,95	144,97	123,42	109,63	99,63	91,85	85,53	80,25	75,73	71,81	68,36	65,29
<b>10</b>	214,20	163,42	139,24	123,82	112,67	104,00	96,96	91,07	86,03	81,65	77,78	74,35
<b>25</b>	250,74	190,95	162,69	144,77	131,84	121,81	113,68	106,88	101,06	96,00	91,53	87,55
<b>50</b>	281,82	214,10	182,25	162,15	147,69	136,50	127,44	119,86	113,39	107,76	102,79	98,37
<b>100</b>	316,92	240,10	204,17	181,57	165,36	152,86	142,74	134,30	127,08	120,81	115,29	110,36

### 5.1.3 Hietogramas de diseño.

Con base al paso anterior fue posible la obtención de la distribución de la lluvia por medio de un hietograma de diseño por cada periodo de retorno, para conocer el comportamiento evolutivo del evento de precipitación para una duración igual a la obtenida para el tiempo de concentración de la cuenca “ARENA”, para este caso de estudio el tiempo total de la lluvia fue de una hora y la estimación del comportamiento evolutivo de esta se estudió en intervalos de cinco minutos. El método de los bloques alternos fue el llevado a cabo para la elaboración de los hietogramas, en los que la precipitación máxima tiende a estar en el tiempo medio de duración de la lluvia. A continuación, se presentan el hietograma obtenido en este análisis para un periodo de retorno de dos años, los restantes hietogramas se presentan en el Anexo A.

Grafico 7. Hietograma para periodo de retorno de 2 años. Fuente: Autores.

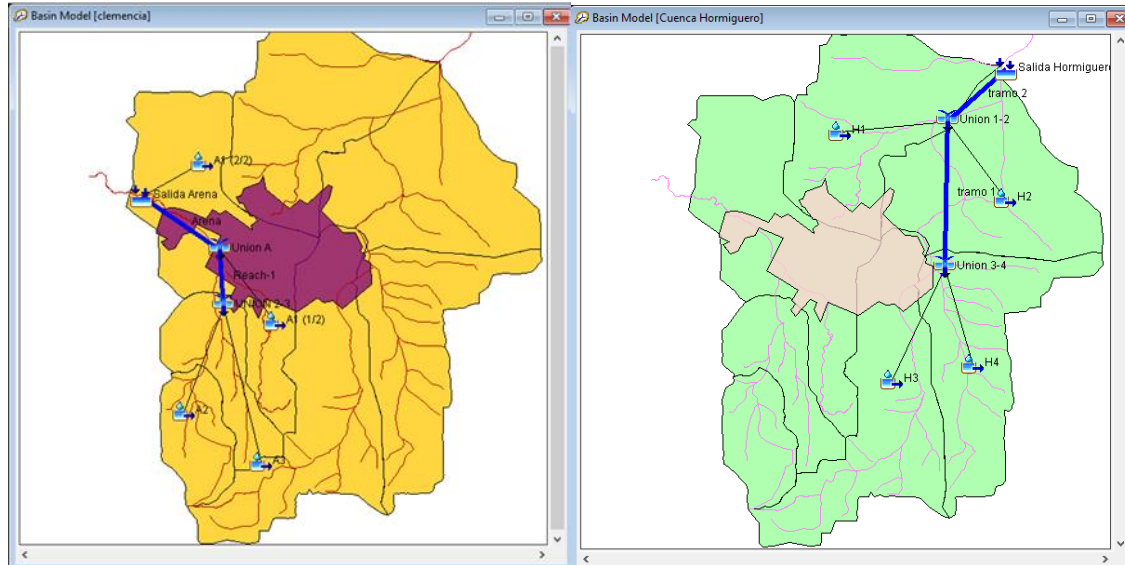


#### 5.1.4 Caudales maximos estimados

Para la obtención del caudal de escorrentía, en el caso de las cuencas de arroyos, se usó el método de numero de curva, como el método de hidrograma unitario en el que se realizó el modelo hidrológico con el Software HEC HMS®. Este caudal fue diferente para cada periodo de retorno y dependió del tipo de cobertura y tipo de textura del suelo, la intensidad de la lluvia y el área aferente al cauce.

Por otro lado, para el caso de las calles se llevó a cabo el método racional ya que se trataba de áreas inferiores a 800 hectáreas y por su simplificación, el cálculo de los caudales en cada tramo de calle se expone en el Anexo E.

A continuación, se presenta los componentes del modelado para las cuencas Hormiguero y Arena y sus respectivos hidrogramas, correspondientes a un periodo de retorno de 2 años, los demás hidrogramas se visualizan en el Anexo B.



*Ilustración 25. Modelo Hidrológico de las Cuencas Arena y Hormiguero en HEC HMS. Fuente: autores*

Gráfico 8. Hidrograma de Crecida del Arroyo Hormiguero para  $T= 2$  años

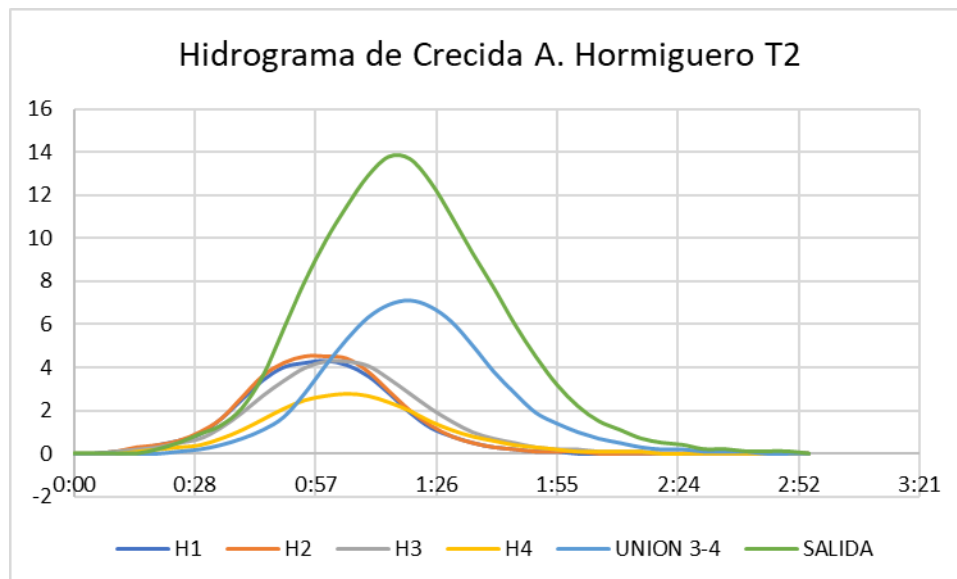
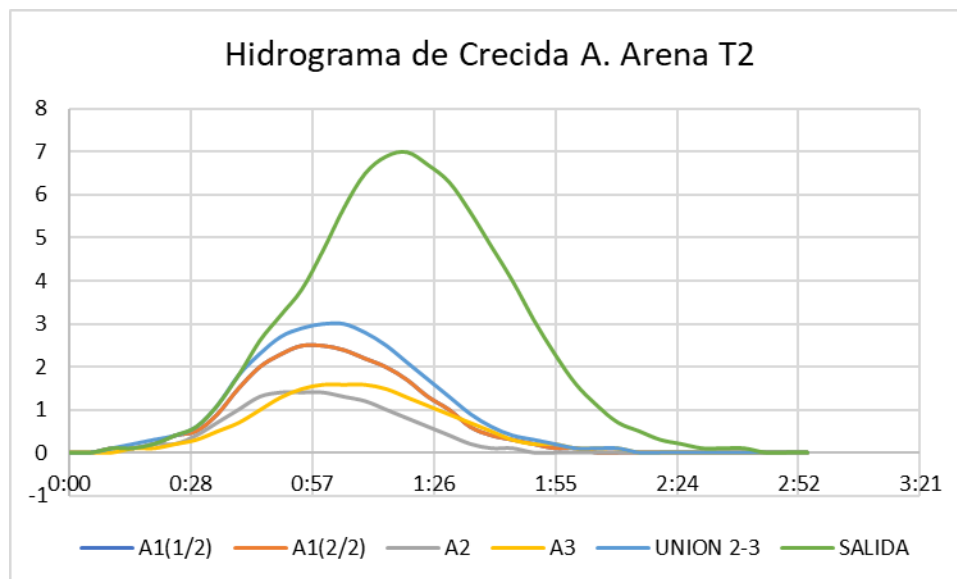


Gráfico 9. Hidrograma de Crecida del Arroyo Arena para  $T= 2$  años





## **5.2 RESULTADOS METODOLOGÍA 1. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA A PARTIR DE DATOS HISTÓRICOS APORTADOS POR LAS COMUNIDADES**

La metodología a partir de la búsqueda de datos históricos se basó en lo expuesto por (Rodríguez Gaviria, 2016) donde se partió de la suposición de que el pasado es un reflejo del futuro y si una inundación alguna vez ha alcanzado ciertos niveles puede hacerlo también en el futuro.

Se propone esta metodología para tener una estimación de cómo ha sido el comportamiento natural de las inundaciones y hacer un reconocimiento de la zona a través del trabajo con las comunidades y el desarrollo de las etapas que se explican a continuación:

### **5.2.1 Construcción de la mancha de inundación**

Toda vez llevado a cabo lo expuesto en la sección 4.1.3 se construyó la mancha de inundación, teniendo en cuenta la clasificación de la amenaza. A continuación, se presenta la distribución espacial de los puntos informados y su relativa clasificación de amenaza, para estimar la mancha de inundación.

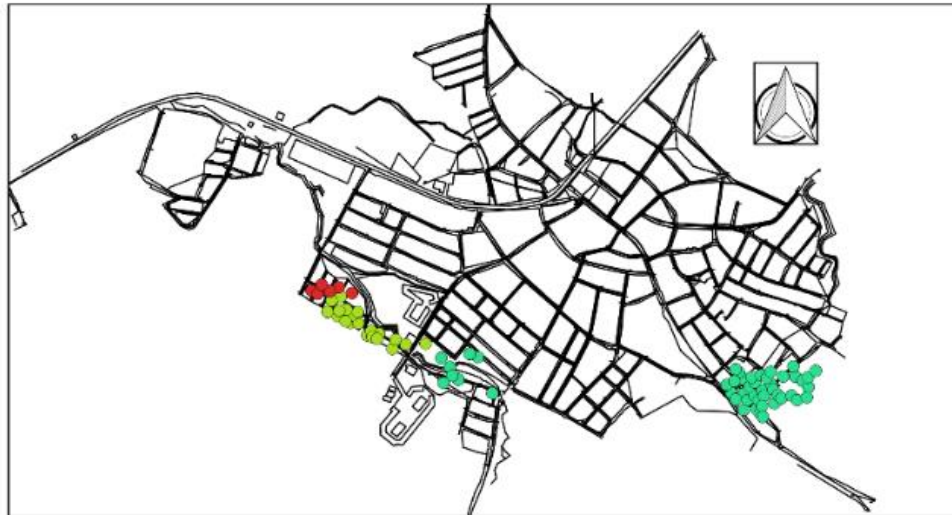


Ilustración 26. Puntos informados de la población Fuente: autores

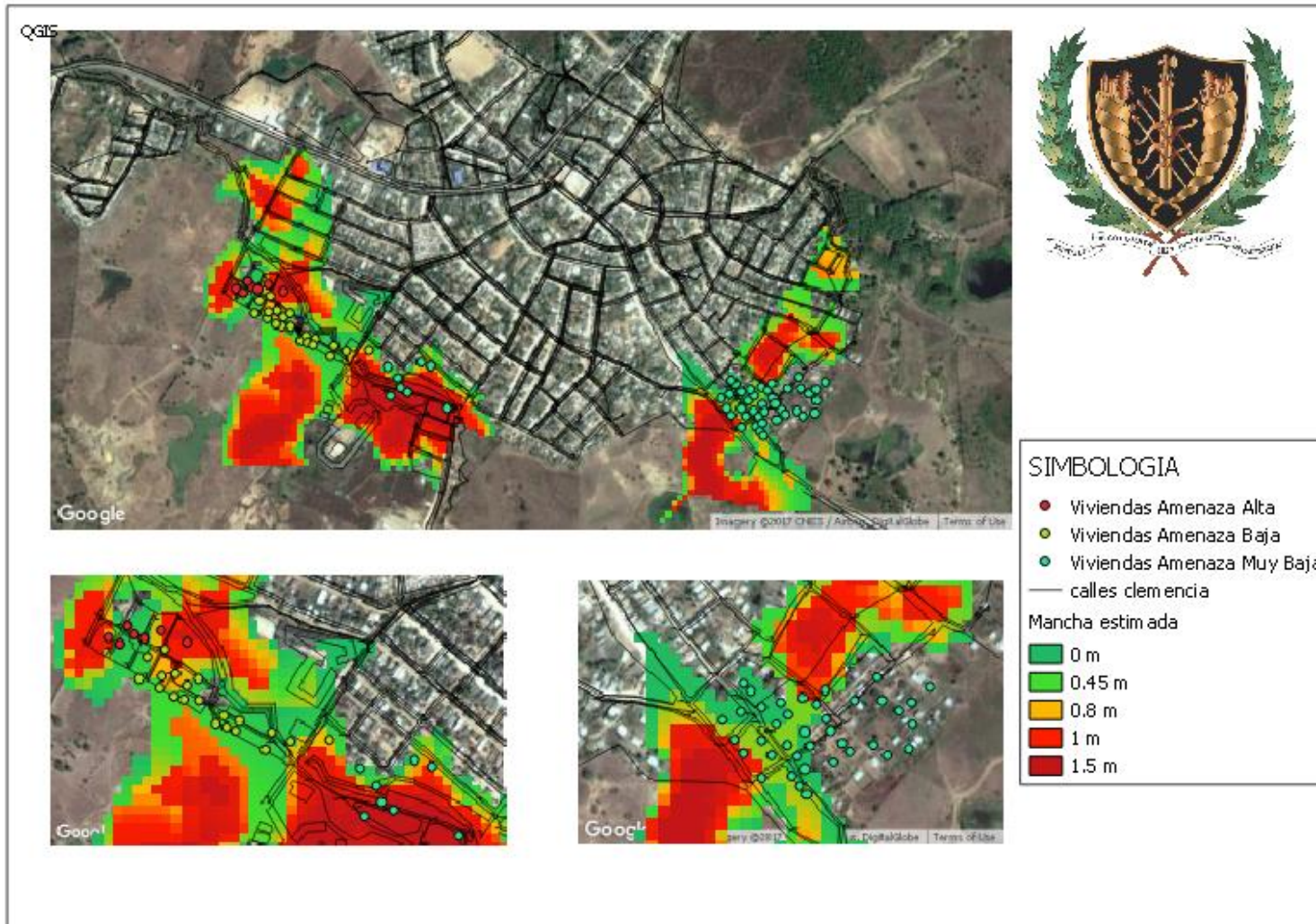
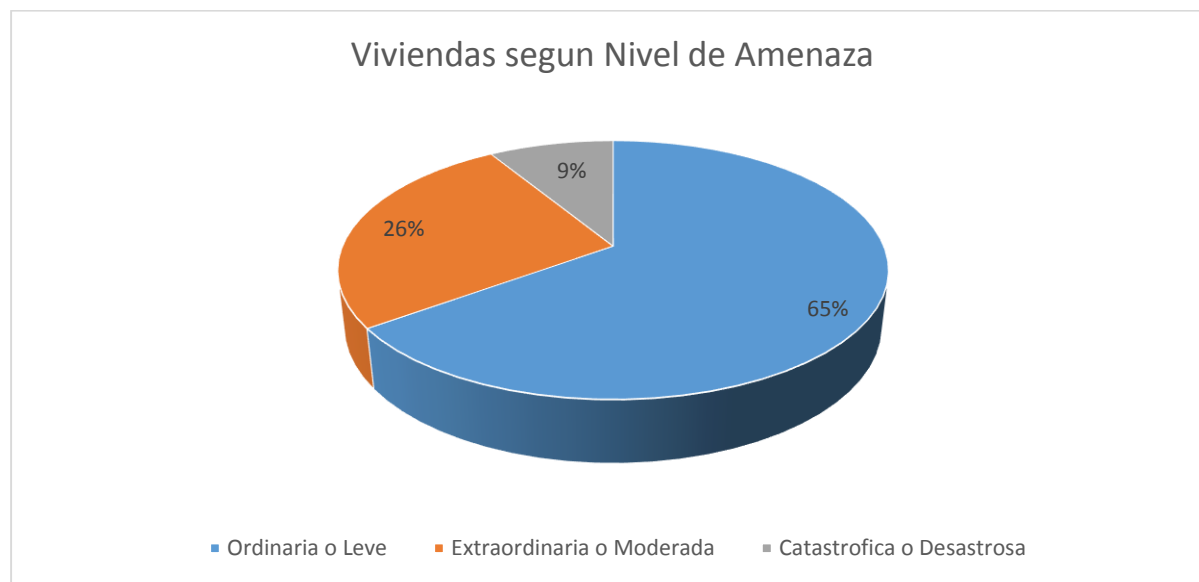


Ilustración 27. Estimación de la mancha Histórica de inundación por información de la comunidad. Fuente: Autores, estimado con QGIS.

### 5.2.2 Clasificación de la inundación.

Guardando relación con lo establecido en la sección 4.1.4 se llevó a cabo esta clasificación. De acuerdo con las encuestas y conversaciones sostenidas con habitantes de los sectores afectados, por efecto de las inundaciones se han presentado pérdidas de bienes materiales como colchones, electrodomésticos, diversos muebles, entre otros bienes; además se han visto involucrados incluso los animales de corral presentes en las viviendas. En la etapa de inspección de campo fue posible apreciar en las paredes de las viviendas marcas del nivel que alcanzaba el agua de la inundación, gracias a estas marcas fue posible determinar la altura aproximada que se alcanzaba en el pico máximo de la inundación. Tomando en cuenta estas referencias, así como las dadas por los pobladores, se pudo cuantificar que cantidad de viviendas se encontraban en el nivel de amenaza dado por la clasificación antes mencionada, obteniendo así el diagrama que se presenta a continuación.

*Grafico 10. Proporción del nivel de amenaza en viviendas. Fuente: Autores.*



Se pudo apreciar entonces que, en base a la muestra encuestada, un 65% de la población afectada por las inundaciones, estaría en riesgo ordinario o leve, un 26% en riesgo extraordinario o moderado, y un 9% en riesgo catastrófico o desastroso.



*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



**Universidad  
de Cartagena**  
Fundada en 1827

Además, se puso de manifiesto por parte de los habitantes que los caudales que fluían por los arroyos socavaban el cauce de los mismos razón por la cual en muchas ocasiones, las viviendas que se encontraban ubicadas en zonas aledañas a ellos sufrían pérdidas de terreno, y hasta afectaciones a sus viviendas, tanto así, que en ocasiones fue necesario reubicar las cercas que delimitaban los patios traseros de sus casas.



## **5.3 RESULTADOS METODOLOGÍA 2. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO**

### **5.3.1 Estimación de encharcamiento por precipitación máxima**

Se consideró en este caso la simulación de la precipitación en el área total de las cuencas basándose en la geometría brindada por el D.E.M, partiendo del valor máximo de intensidad obtenido de los hietogramas correspondientes para cada periodo de retorno estudiado en este proyecto. A continuación, se presenta las proyecciones de los encharcamientos en el área estudiada, para el periodo de retorno de 2 años, la proyección de los demás periodos de retorno se muestra en el anexo C.

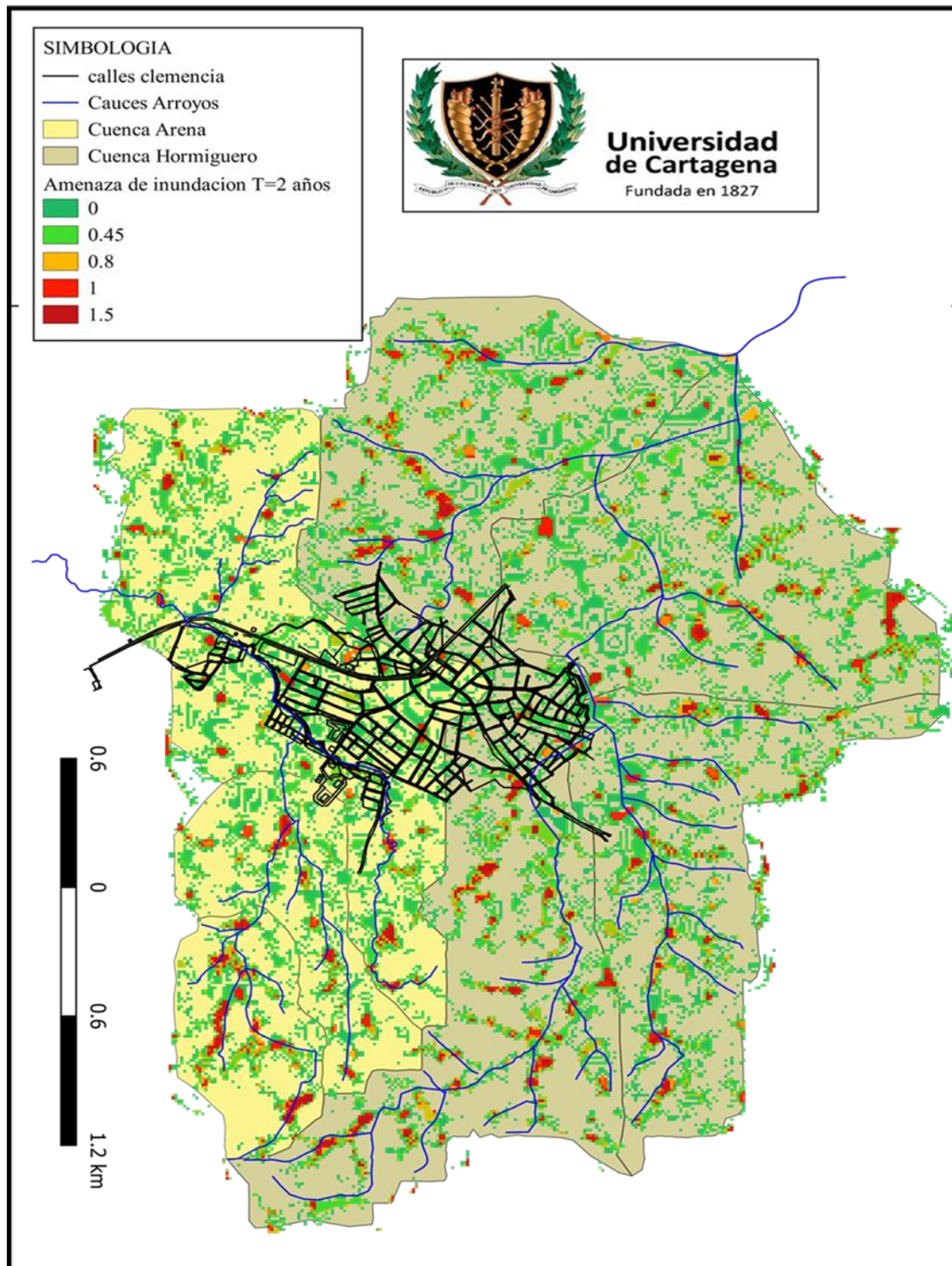


Ilustración 28 Mancha de encharcamiento por precipitación máxima para T =2años.

### 5.3.2 Estimación de llanura de inundación por Arroyos

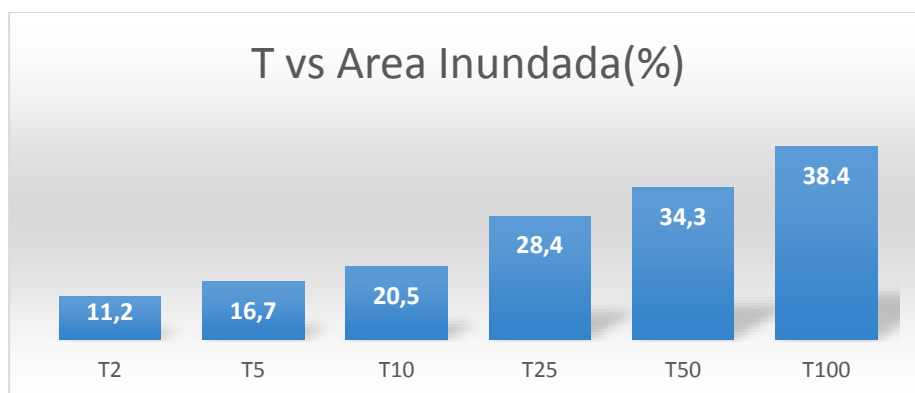
Siguiendo lo propuesto en la sección 4.2 se realizó la estimación de las manchas de inundación sobre la cobertura urbana, para este caso se analizó el comportamiento de la inundación inducida por los arroyos Arena y Hormiguero.

El supuesto fue que los arroyos colectarían la totalidad del caudal de escorrentía producido en las subcuencas ubicadas aguas arriba de la población.

Los hidrogramas usados para la modelación fueron los correspondientes a la unión de las subcuencas A2-A3 y al producido en la subcuenca A1; en el caso del arroyo Arena. En el caso del arroyo Hormiguero se usaron los hidrogramas de las subcuencas H3 y H4.

Se determinó por medio de la modelación que el área de la cabecera municipal afectada por la lámina de agua para cada periodo de retorno fue la siguiente:

*Gráfico 11. Proporción de área Urbana inundada por cada periodo de retorno. Fuente: Autores*



A continuación, se presenta el mapa de Amenaza por inundación para un periodo de retorno de 2 años en este se presenta la distribución de la lámina de agua en los dos puntos de amenaza más alta en la población, a saber, el barrio la paz y 13 de junio afectados por los arroyos Arena y hormiguero respectivamente. Los mapas correspondientes a los demás periodos de retorno, estudiados en esta investigación, se presentan en el anexo D.

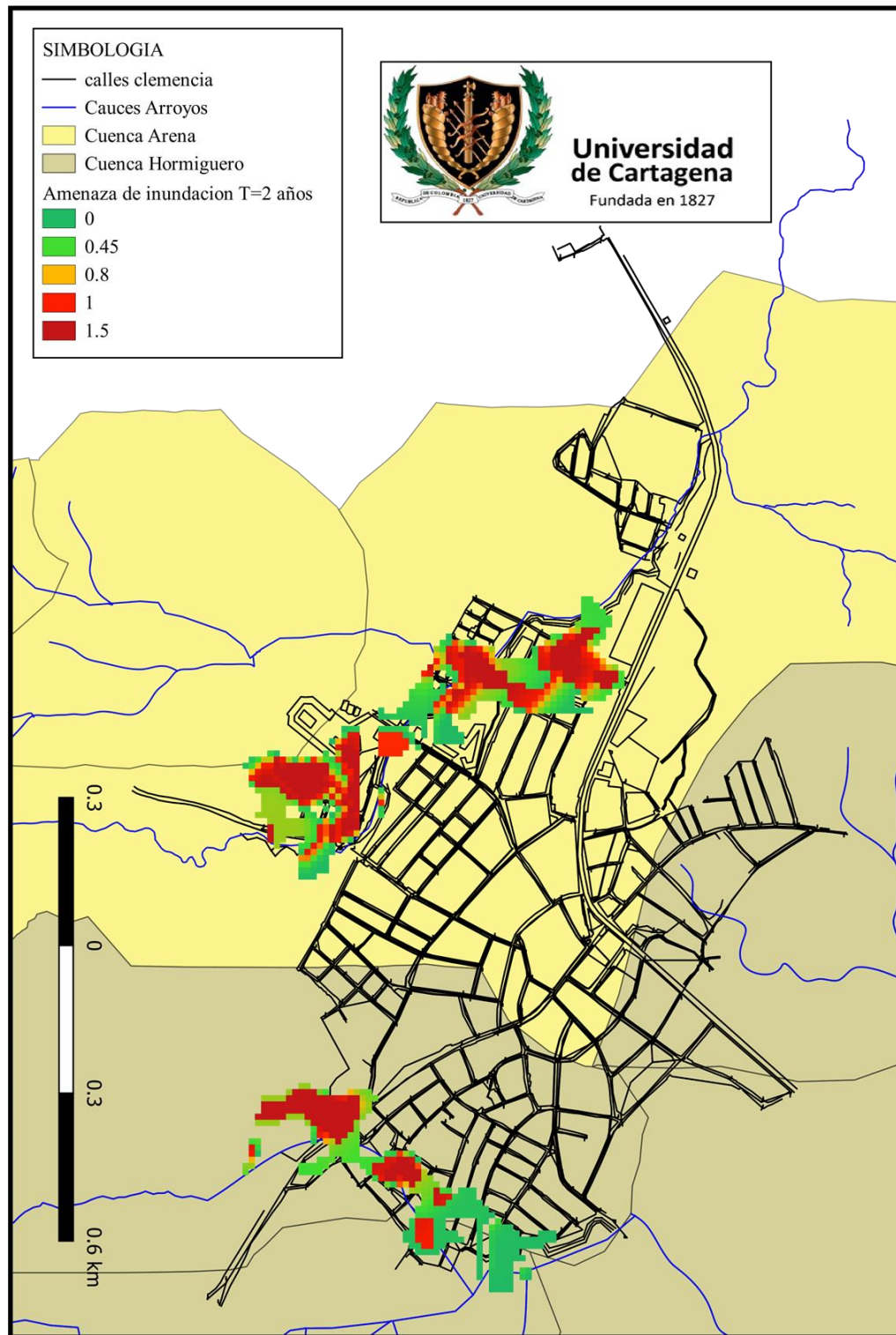
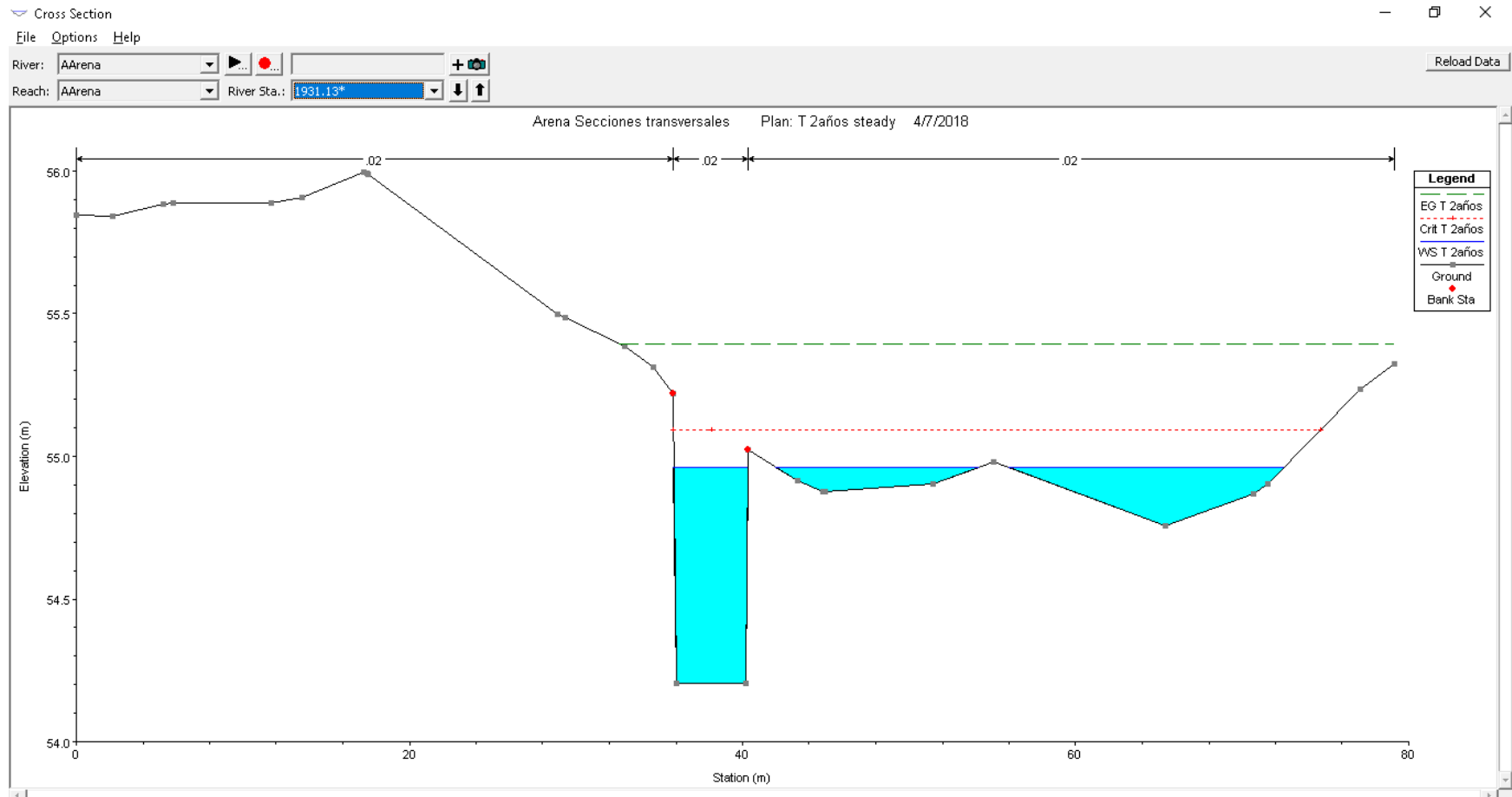


Ilustración 29. Mancha de inundación para T=2 años, inducida por arroyos. Fuente: Autores, formado con HECRAS visualizado con QGIS



*Ilustración 30. Tirante para un T 2 años en sección transversal del arroyo Arena.*

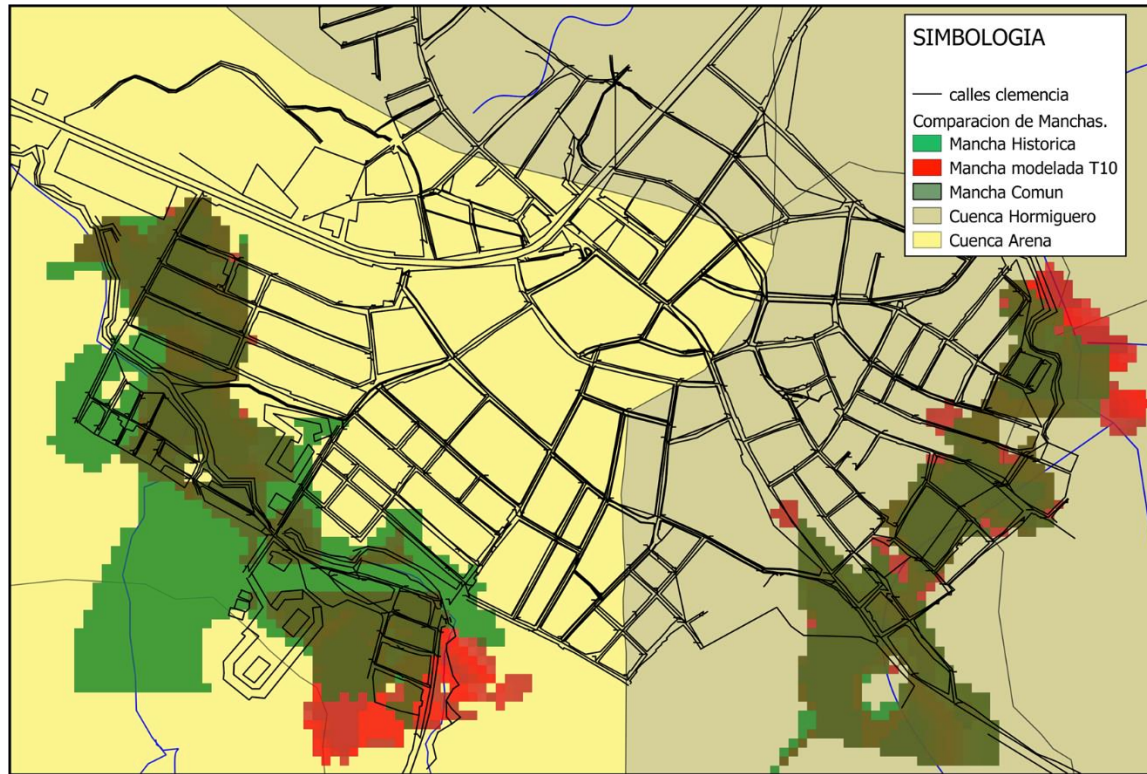


#### **5.4 COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN**

Se llevó a cabo la comparación de la mancha de inundación elaborada por datos obtenidos de la comunidad y las manchas de inundación obtenidas con las modelaciones correspondientes a los periodos de retorno estudiados en este proyecto. Se determinó que las manchas de inundación obtenidas por las modelaciones guardaban relación con la mancha construida con información de la comunidad.

Si bien no se tiene información del periodo de retorno correspondiente a la mancha histórica, se observó que la mancha de inundación más cercana a la estimada por la comunidad fue la de un periodo de retorno de 10 años, por lo que se procedió a analizar estas dos manchas y, se determinó que la diferencia porcentual entre las dos manchas sobre la cobertura urbana fue de 7,2%, para un área urbana total de inundación de 18,6 hectáreas.

Por lo anterior podemos decir que la estimación con datos obtenidos de la memoria de las poblaciones puede ser una fuente de información importante para la predicción de eventos de inundación futuros, siempre que para los proyectos no se tenga la calidad y cantidad de datos necesarios para una proyección de las llanuras de inundación, más precisa.



*Ilustración 31. Comparación de mancha de inundación en el casco urbano. Fuente: Autores, formado en QGIS.*



## 5.5 DIAGNÓSTICO DEL DRENAJE Y ZONAS DE AMENAZA URBANA.

La estimación de zonas de amenaza se basó en la determinación de la capacidad hidráulica de las calles, en la cual se considera la calle como un canal abierto, la capacidad hidráulica de cada calle se definió por el esparcimiento máximo admisible para evitar hidroplaneación en los vehículos y la capacidad de cuneta llena; como se expone en la sección 1.1.9.7.

Con relación al cálculo de la capacidad hidráulica con ayuda de la herramienta informática Excel (Anexo E) se determinó que los tramos de vía más afectados fueron los presentados en las Tablas 35, 36 y 37 y en los mapas del anexo D.



*Ilustración 32 Amenaza urbana por Capacidad hidráulica de vías para  $T = 2$  años*



## **5.6 MEDIDAS DE INTERVENCION PROPUESTAS.**

### **5.6.1 Propuesta para Arroyos.**

De lo estimado en las secciones anteriores se determinó que la población de clemencia se ve afectada directamente por los arroyos en cuestión, más allá de tratarse de arroyos efímeros, por lo que se debe tomar medidas de prevención en la rivera de estos, uno de los problemas en los arroyos es debido a su baja pendiente al atravesar el casco urbano, esto sumado a sedimentación en algunos puntos, tiene influencia en la capacidad hidráulica.

Actualmente algunas viviendas en el sector 13 de junio, se encuentran en una zona con características depresivas, la cual es atravesada por el cauce natural del arroyo Hormiguero, por lo que se puede considerar la reubicación de las viviendas que se encuentren en la llanura inundable. En el caso del arroyo Arena, como medida de prevención se propone un replanteamiento de la sección transversal para aumentar su capacidad hidráulica, siendo más específicos en el tramo que se encuentra comprendido entre la abscisa K1+421 y K2+241, este tramo se encuentra entre el barrio La Paz y Calle Franco, en este documento se propone la constitución de un canal revestido en pasto. Para efectos del diseño planteado por los autores, se diseñó para un caudal correspondiente a un periodo de retorno de 50 años recomendado por él (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016) y se tomó como referencia lo expuesto por (Chow V. T., 1959), escogiendo una mezcla de pastos de verano y leguminosas:

A continuación, se presenta el procedimiento de cálculo correspondiente a las características recomendadas para el replanteo del arroyo Arena.

En la primera tabla se determina el n de Manning apropiado para un nivel de retardo bajo, con una velocidad permisible de 5pies/s, en la segunda se determina la tirante y el n de Manning apropiado para un nivel de retardo moderado.

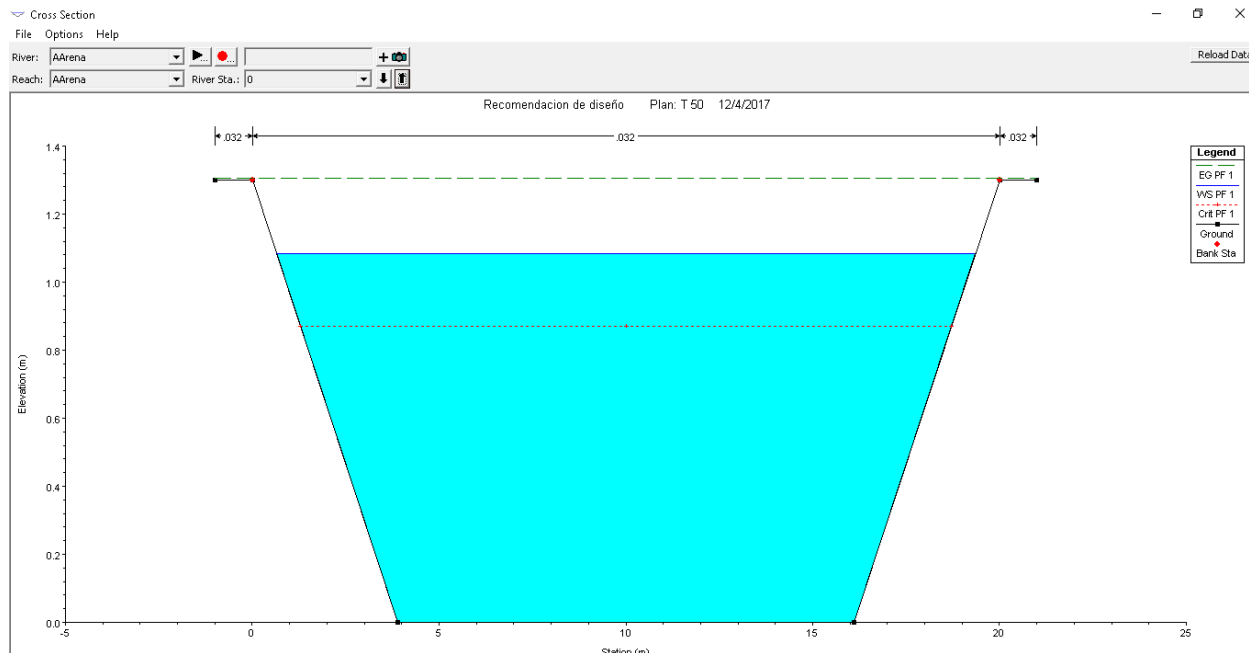


*Tabla 33. Diseño para estabilidad. Fuente: Autores.*

Tanteo	N	VR	R	$(1.49R^{5/3} \cdot S^{1/2}) / n$
1	0,04	1,75	0,35	0,5
2	0,05	0,9	0,18	0,1
3	0,035	5	1	3,1
4	0,03	8,2	1,64	8,2

*Tabla 34. Diseño para capacidad máxima. Fuente: Autores*

Tanteo	Y(pies)	A(pies <sup>2</sup> )	R(pies)	V(pies/s)	VR	n	V= $(1.49R^{2/3} \cdot S^{1/2}) / n$
	pies	pies <sup>2</sup>	Pies	pies/s			
1	10,00	700,00	6,78	2,27	15,36	0,033	11,78
2	20,00	2000,00	12,01	0,79	9,52	0,033	17,24
3	9,00	603,00	6,22	2,63	16,36	0,033	11,12
4	8,00	512,00	5,65	3,10	17,50	0,032	10,76
5	6,00	348,00	4,46	4,56	20,34	0,032	9,19
6	5,00	275,00	3,84	5,77	22,14	0,032	8,31
7	5,75	329,19	4,31	4,82	20,76	0,032	8,98
8	4,00	208,00	3,19	7,62	24,28	0,031	7,58
Z	Y(m)	b(m)	T(m)	A(m <sup>2</sup> )			
3	1,28	12,19	19,87	20,52			



*Ilustración 33. Estimación del nivel del flujo para la sección recomendada con T=50 años Fuente: Autores; formado con HECRAS.*

### **5.6.1 Propuesta para Tramos de Vías.**

Teniendo en cuenta que la capacidad hidráulica de algunos tramos de vías no es el óptimo para acarrear el agua de escorrentía generada, se recomienda la ubicación de sumideros en los tramos donde sea necesario, guardando relación con lo establecido en la sección 1.1.9.7.

Se determino mediante el cálculo de los sumideros; presentado en el anexo E, que los sumideros tipo ventana tienen una mayor capacidad para escurrimiento de caudal, por lo que se recomienda en la mayoría de los tramos de vías la ubicación de este tipo de sumideros.

A continuación, se presentan en las tablas 35 a 37, los tramos de vías a los que se recomienda la disposición de sumideros y en la ilustración 34 y anexo F el mapa de ubicación tentativa de los sumideros sobre el casco urbano, estos se representan como puntos rojos en la ilustración 34. Las dimensiones de los sumideros se encuentran en el Anexo E (anexo digital, documento Excel).

*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



*Tabla 35 Tramo de ubicación y tipo de sumidero recomendado*

Tramo	Pendiente	Tipo de Sumidero	
		Rejilla	Ventana
3	0,479		X
8	0,172		X
13	5,072	X	
18	1,512		X
19	0,327		X
27	0,037		X
369	0,227		X
368	0,694		X
365	3,034	X	
357	0,248		X
338A	0,295		X
340	0,155		X
332	2,652		X
334	1,219		X
337	1,267		X
342	0,42		X
341	0,456		X
343	0,627		X
345	0,073		X
351	0,657		X
352	1,176		X
25	1,415		X
32	2,054		X
37	1,881		X
64	0,618		X
37	1,881		X
113	1,577		X
58	0,964		X
71	0,374		X

*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



*Tabla 36 Continuación Tramo de ubicación y tipo de sumidero recomendado*

Tramo	Pendiente	Tipo de Sumidero	
		Rejilla	Ventana
66	0,135		X
68	0,05		X
67	0,107		X
122	0,761		X
118	0,429		X
280	0,882		X
278	0,321		X
281	2,477		X
88	2,334		X
98	0,017		X
107	8,388	X	
115	1,713		X
144	5,005	X	
142	1,078		X
141	0,885		X
139	1,163		X
154	3,583	X	
165	1,389		X
171	1,257		X
167	0,974		X
164	0,402		X
238	1,861		X
182	0,533		X
179	2,132		X
234	2,039		X
189	1,173		X
191	1,411		X
200	0,692		X
201	0,361		X
213	3,347	X	

**Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.**



*Tabla 37 Continuación Tramo de ubicación y tipo de sumidero recomendado*

Tramo	Pendiente	Tipo de Sumidero	
		Rejilla	Ventana
209	1,733		X
265	0,502		X
224	2,415		X
260	2,934		X
269	0,738		X
274	0,416		X
282	1,037		X
263	1,56		X
282	1,037		X
209	1,733		X
265	0,502		X
224	2,415		X
270	1,222		X
327	6,626	X	
323	1,148		X
321	0,749		X
317	1,24		X
312	0,987		X
291	0,361		X
292	1,365		X
299A	0,364		X
305	0,882		X
309	0,024		X
397	4,539	X	
388	0,711		X
383	0,607		X
382	1,056		X
378	0,061		X
394	0,707		X
213	3,347	X	



*Ilustración 34. Propuesta de distribución de sumideros sobre el casco urbano. Fuente: Autores.*





## **6 CONCLUSIONES.**

### **Del caso de estudio**

Clemencia es un municipio que no dispone de las herramientas suficientes para la gestión del riesgo, principalmente no cuenta con un plan de ordenamiento territorial que considere la afectación de la inundación por los arroyos, no cuenta con información cartográfica ni geográfica, limitándose a lo dispuesto por la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique, que no cuenta tampoco con información oportuna de la región estudiada.

Por tal razón la información brindada por la población se convierte en la principal fuente de datos de esta investigación, ya que con los resultados obtenidos se puede decir que fue acertada, en la definición de la distribución espacial de la inundación

### **De la propuesta metodológica**

Los resultados esperados para esta investigación dependerán en todo momento de la confiabilidad de su fuente y de la cantidad de datos obtenidos, además es relevante el método de análisis utilizado para la investigación, buscando el aprovechamiento de la mayor cantidad de información obtenida. La incertidumbre sobre los resultados de la investigación se relacionará con los recursos con los que se cuenta para la obtención de información complementaria, toda vez que la información con la que se cuente no sea suficiente y además sea poco confiable.

### **De la metodología de evaluación de amenaza**

Sobre la metodología de la evaluación de la amenaza, las modelaciones hidrológico-hidráulicas con las herramientas de información geográfica HEC RAS y HEC HMS han demostrado ser efectivas y eficientes en cuanto al requerimiento de datos, uso computacional y la credibilidad en los resultados. La utilización de la topografía (DEM) y registros pluviométricos disponibles en el IDEAM, brinda resultados consistentes con las evidencias en campo, no requieren de hardware ni software robusto, y el uso de la topografía DEM, así como los registros pluviométricos, son de libre acceso.



También es fundamental complementar el análisis con los datos proporcionados por la comunidad durante las entrevistas, transectos y encuestas sobre cómo ha sido el comportamiento de la inundación a lo largo del tiempo.

Los datos históricos aportados por las comunidades sirvieron para elaborar un mapa de inundaciones, gracias a la utilización de una herramienta que permitió la georreferenciación de estos. Además, este método valida los resultados obtenidos mediante la modelación hidrológico-hidráulica.

Al comparar la mancha de inundación obtenida por el método histórico con las manchas de inundación resultantes de la modelación hidrológico-hidráulica, se nota que existe mucha similitud entre estos resultados. Se concluye que el conocimiento de la amenaza se construye con la ayuda de sus propias fuentes de información, tales como sus registros históricos meteorológicos, el conocimiento de las comunidades asentadas en su zona urbana y la inspección de evidencia de inundación en la zona estudiada.

### **Del análisis de los resultados encontrados**

Uno de los principales problemas en los arroyos es debido a su baja pendiente al atravesar el casco urbano, esto sumado a sedimentación en algunos puntos, tiene influencia en su capacidad hidráulica.

Se concluye que el sistema natural de arroyos es insuficiente para acarrear el caudal pico producido, se determinó que zonas como La paz, San José, Calle Franco y 13 de junio tienen problemas aun con un periodo de retorno de 2 y 5 años, que suponen el caudal de escorrentía más bajo entre los periodos de retorno estudiados.

Más allá de la insuficiencia hidráulica de los arroyos, se analizó con base al D.E.M. y a la disposición de las curvas de nivel, que el área afectada se encuentra ubicada en una zona de características depresivas, que naturalmente serviría como reguladora de caudales, caso particular 13 de junio, en el cual se evidencian formaciones de pequeños lagos aguas arriba del asentamiento humano, si bien la pendiente que se presenta en esta zona no permite la evolución de grandes velocidades, implica que el tiempo de encharcamiento sea más prolongado, conllevando además a

*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



Universidad  
de Cartagena  
Fundada en 1827

pérdidas materiales en los bienes de los pobladores, como se evidencio en la información recolectada por la encuesta llevada a cabo.

Por otro lado, La Paz se encuentra justo aguas abajo de la unión de tres subcuencas del arroyo Arena, incrementándose el caudal en el cauce principal aproximadamente en 2,2 veces al que se presenta aguas arriba de dicha unión, en este punto el área total drenada es 2,24 Km<sup>2</sup>, mientras que aguas arriba del cauce el área drenada es aproximadamente 1,0 Km<sup>2</sup>.

Para el caso del drenaje urbano se tiene que para un periodo de retorno de 2 años existe rebasamiento en la capacidad hidráulica de algunas cunetas, pero la amenaza está catalogada como muy baja, presentándose el nivel máximo en el tramo 224 con un calado de 20 cm sobre el nivel de la cuneta. La totalidad de los tramos a intervenir serian 89 de los cuales 9 serían de rejilla y 80 de ventana.

Es de destacar que de acuerdo con la interpretación de los resultados arrojados por la modelación hidrológica hidráulica el modelo fue acertado, ya que las zonas de amenaza corresponden a las estimadas por la U.N.G.R.D. y en la validación y comparación de la mancha modelada con un periodo de retorno de 10 años con la mancha histórica se presentó una diferencia de 7,2% del área urbana total inundada. No obstante, fue necesario la modificación del relieve propio del D.E.M. ya que en este no se visualizaba la profundidad de los arroyos; quizás por la resolución espacial con la que se adquirió. De acuerdo con esto la modelación con el D.E.M. sin modificaciones daría espacio a sobreestimaciones en la mancha de inundación obtenida.



## **7 RECOMENDACIONES**

Se recomienda tener en cuenta los resultados de esta investigación en la generación de los próximos planes de gestión del riesgo, planes de desarrollo urbano y planes de ordenamiento territorial, ya que cuenta con información importante respecto a la toma de futuras decisiones para la población estudiada.

Llevar a cabo la constitución de planes de mitigación y prevención para aumentar la resiliencia de la población afectada por las inundaciones, considerando las medidas de intervención propuestas en este documento. Las propuestas de intervención que aquí se han generado se consideran de importancia para reducir la amenaza especialmente de la comunidad que se encuentra en la zona de incidencia de las inundaciones.

Se recomienda llevar a cabo planes de educación a la población, donde se dé a conocer el grado de amenaza en el que se encuentran sus viviendas y el riesgo que implica la construcción en las zonas afectadas por la mancha de inundación.

Realizar investigaciones enfocadas en el riesgo y la vulnerabilidad por inundación, principalmente en las zonas clasificadas con el grado de amenaza alta según este documento, para tener una perspectiva más amplia acerca de los efectos producidos por la inundación en la comunidad.

Para futuras investigaciones se recomienda hacer una caracterización completa de las cuencas para así determinar información más específica del comportamiento de las inundaciones, integrando la información recolectada a un sistema de información geográfica S.I.G. en el que se recomienda trabajar con base en un modelo digital de elevación con una resolución espacial más detallada.

Cuando el municipio tenga acceso o los recursos para adquirir topografías más detalladas como una LIDAR, es posible obtener manchas de inundación más precisas. Otra ventaja de adquirir una topografía LIDAR es poder acceder a una ortofoto del área de estudio, que serviría para otros fines o aplicaciones, tales como actualización catastral, identificación de amenazas y elementos expuestos, cambios ambientales en vegetación y ecosistemas, generación de información ambiental y de ordenamiento territorial.



La elaboración de una batimetría también es un método aceptable, pero requiere de una campaña de campo con personal y equipos especializados para hacerlo. La ventaja se da al obtener modelos hidráulicos que estimarían manchas de inundación más detalladas y precisas.

Los resultados por medio de un método geomorfológico también son útiles, pero requieren de la ayuda de un geólogo experto y de la búsqueda y reconstrucción de información espacial que lo hace dispendioso, conllevando a mayores costos de parte de una administración municipal.



## 8 Bibliografía

- ERN-CAPRA. (2009). *Metodología de Modelacion Probabilistica de Riesgos Naturales*. Bogota.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrologia de Superficie*. Mexico D.F.: Editorial Limusa.
- Arnedo Pacheco, R., & Sierra Passo, Y. (2006). *Evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca del “Arroyo Grande” y posibles alternativas de solución para el control de las inundaciones en el sector de Mamonal*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- AROS, V. (1997). *Apuntes de Hidrología. Ingeniería Civil*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Arrieta Pastrana, A. (Mayo de 2011). Medio ambiente y salud. Riesgos por inundaciones. *UNICARTA. Revista de la Universidad de Cartagena.*, 62-75. Obtenido de <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/1227>
- Barkau. (1982). Aplicacion de las ecuaciones de flujo no permanent en HEC-RAS. En k. Ahmed Hamad, *Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el analisis del flujo no permanente con superficie libre* (pág. 109). Quito: Escuela politecnica Nacional.
- Barriendos, M., & Coeur. (2016). Clasificacion de la Inundacion. En E. Rodríguez Gaviria, *Diseño metodológico para la evaluación del riesgo por inundación a nivel local con información escasa* (págs. 93-94). Medellin: universidad Nacional de Colombia.
- Becerra Vargas, O., & Quiroga Garzon, D. (2014). *Estudio hidrológico de la cuenca del rio Chípalo*. Bogota, Colombia: Universidad Catolica de Colombia.
- Botero Pareja, C., Guardo Castaño, L., Nieto Parra, G., & Castaño Rodríguez, G. (2008). *Caracterización hidrológica de la cuenca del arroyo Matute como el elemento para considerar un posible ordenamiento territorial*. Cartagena: Pontificia Universidad Javeriana.

***Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.***



**Universidad  
de Cartagena**  
Fundada en 1827

- Brewer, E., & Herrera, J. (2015). *Evaluación del drenaje pluvial existente con descarga al mar Caribe frente a la alternativa solución con descarga sobre la bahía de Cartagena, en el área comprendida entre las avenidas primera y san Martín*. Cartagena, Colombia: Universidad de Cartagena.
- Cañate Lara, D., & Guzmán Torres, M. (2017). *Proyección de los niveles de inundación actual y futura en el sistema de caños y lagos de la ciudad de Cartagena*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Chang, & Bolívar. (1997). Relaciones entre la precipitación en 24 horas y una duración menor. En A. Arrieta, *Hidrología práctica para ingenieros*. (pág. 77). Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Chardon, A.-C., & González, J. L. (2002). *Indicadores para la Gestión de Riesgos*. Universidad Nacional de Colombia, Caldas. Manizales: BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. Recuperado el 3 de Marzo de 2017, de <http://idea.unalmz.edu.co/documentos/Anne-Catherine%20fase%20I.pdf>
- Chow, V. T. (1959). *HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Illinois: McGRAW-HILL.
- Chow, V., Midment, D., & Mays, L. (1993). *Hidrología aplicada*. McGrawHill.
- Colombia, U. N. (30 de 11 de 2016). *Portal, Gestión del Riesgo*. Obtenido de <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co>:  
<http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2016/Colombia-ejemplo-manejo-riesgo-inundaciones.aspx>
- Colombia, U. N. (30 de Noviembre de 2016). *UNGRD*. Obtenido de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co>:  
<http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20686>
- Del Castillo, L., & Ortiz, M. (2013). *Evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca hidrográfica del arroyo Policarpa para el control de inundaciones*. Cartagena, Colombia.: Universidad de Cartagena.



- Diaz, H. R. (2013). *DRENAJE URBANO ELEMENTOS DE DISEÑO*. Bogota: Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito.
- Dirección General de Carreteras(España). ((s.f.)). [estimación empírica del tiempo de concentración de una cuenca]. En S. Ibáñez, H. Moreno, & J. Gisbert, *Métodos para la determinación del tiempo de concentración de una cuenca* (pág. 9). Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Fread. (1976). Aplicación de las ecuaciones de flujo no permanente en HEC-RAS. En k. Ahmed Hamad, *Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre* (pág. 108). Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- GAMA. (2015-2016). <http://www.floodup.ub.edu>. Obtenido de 2015-2016
- Geographic, R. d. (6 de Enero de 2010). *National Geographic*. Obtenido de National Geographic Web site en Español: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/inundaciones>
- Giandotti. ((s.f.)). [estimación empírica del tiempo de concentración de una cuenca]. En S. Ibáñez, H. Moreno, & J. Gisbert, *Métodos para la determinación del tiempo de concentración de una cuenca* (pág. 8). Valencia, España.: Universidad Politécnica de Valencia.
- Gomez Sierra, J., & Pinto Bermudez, J. (2004). *Diseño de las obras de drenaje de las aguas lluvias como solución a los problemas de inundación de barrios del sur de la ciudad de Riohacha*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Gonzalez. (2010). Un modelo integral para la valoración del riesgo de inundación en centros urbanos y/o suburbanos. Caso: Pueblo Vijeo, Veracruz, Mexico. *UAT (Universidad Autónoma de Tamaulipas)*, 16.
- Hamad, K. M. (2008). *Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Hernandez Rodriguez, L. (2012). *Una metodología de evaluación del riesgo público por inundación por falla del sistema de alcantarillado pluvial - caso de la cuenca del río Salitre, Bogotá*. Bogotá.: Universidad Nacional de Colombia.





- IDEAM. (9 de 2 de 2011). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>
- IDEAM. (2016). *Curvas Intensidad duracion frecuencia-IDF*.
- Instituto Colombiano de Hidrologia, M. y.-H. (Octubre de 1988). *UNGRD*. Obtenido de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co>:  
<http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/20.500.11762/18954/1/1384.pdf>
- Maskrey, A. (1993). *Los Desastres No Son Naturales*. Bogotá: Tercer Mundo Editores. Recuperado el 3 de Marzo de 2017, de <http://www.oei.es/historico/decada/portadas/Desnat.pdf>
- MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. (2010). *DECRETO NUMERO 798-11 MAR 2010*. Bogota, D.C.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (Noviembre de 2016). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. Bogota, Colombia.: MINVIVIENDA. Obtenido de [http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/6.\\_Sistemas\\_de\\_recoleccion\\_de\\_aguas.pdf](http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/6._Sistemas_de_recoleccion_de_aguas.pdf)
- Moreno, M., & Hernandez, G. (2008). *Determinación de zonas de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales*. Bogota: XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Sociedad Colombia de Ingenieros.
- Munera, C. (2013). *Análisis Comparativo de los modelos HEC-RAS, CCHE2D, G-STARS Y BRI-STARS, para la modelación Hidráulico-Morfométrica en una cauce aluvial*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Olivares, J. (2 de 12 de 2017). *hidrojING*. Obtenido de hidrojING: <http://www.hidrojing.com>
- Pacheco, R., & Sierra, Y. (2016). *Evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca del "Arroyo Grande" y posibles alternativas de solución para el control de las inundaciones en el sector de Mamonal*. Universidad de Cartagena, Bolívar. Cartagena: Universidad de Cartagena. Obtenido de <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/2969>



- Passini. ((s.f.)). [estimacion empirica del tiempo de concentracion de una cuenca]. En S. Ibáñez, H. Moreno, & J. Gisbert, *Métodos para la determinación del tiempo de concentracion de una cuenca* (pág. 8). Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.
- Perez, G. (s.f.). *CicloHidrologico*. Recuperado el 02 de Junio de 2017, de CicloHidrologico Web site: [http://www.ciclohidrologico.com/escorrenta\\_superficial](http://www.ciclohidrologico.com/escorrenta_superficial)
- PIZARRO, R., PIZARRO, J., SANGÜESA, C., & MARTÍNEZ, E. C. (s.f.).
- Rauch. (2012). Modelación hidráulica del sistema de drenaje urbano (A\_H\_MH). En L. Hernandez Rodriguez, *Una metodología de evaluación del riesgo público por inundación por falla del sistema de alcantarillado pluvial - caso de la cuenca del río Salitre, Bogotá* (pág. 49). Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Robayo Mejia, L. (2014). *Analisis de amenaza por inundacion para la localidad de Tunjuelito, desarrollado a traves de sistemas de informacion geografica*. Bogota, Colombia: Universidad Catolica de Colombia.
- Rodríguez Gaviria, E. (2016). *Diseño metodológico para la evaluación del riesgo por inundación a nivel local con información escasa*. Medellin: Universidad Nacional de Colombia.
- Schutze, & Alex. (2012). Modelación hidráulica del sistema de drenaje urbano (A\_H\_MH). En L. Hernandez Rodriguez, *Una metodología de evaluación del riesgo público por inundación por falla del sistema de alcantarillado pluvial - caso de la cuenca del río Salitre, Bogotá* (pág. 48). Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2011). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (S.U.D.S.) para el Plan de Ordenamiento Zonal Norte (P.O.Z.N.)*. Bogota, Colombia.: Alcaldia Mayor de Bogota.
- Smith. (1978). Aplicacion de las ecuaciones de flujo no permanent en HEC-RAS. En k. Ahmed Hamad, *Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el analisis del flujo no permanente con superficie libre* (pág. 108). Quito: Escuela politecnica Nacional.

*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



Universidad  
de Cartagena  
Fundada en 1827

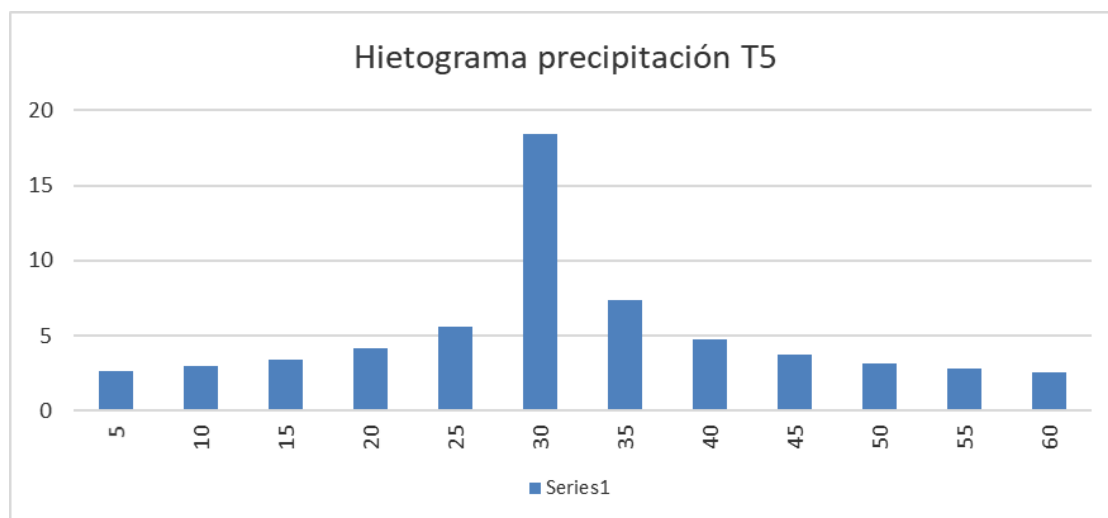
- Temez, J. (1978). *Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en*. Madrid, España: Direccion General de Carreteras.
- Unidad Nacional de Gestion del Riesgo de Desastres. (2012). Plan municipal de gestion del riesgo de desastres-Clemencia, Bolivar. Clemencia, Bolivar, Colombia.
- Vargas, R., & Diazgranados, M. (1998). Curvas IDF Sinteticas aplicadas a Colombia.
- Vargas, R., & Diaz-Granados, M. (1999). *Curvas Sinteticas Regionalizadas de INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA para Colombia*. Bogota: Universidad de los Andes.
- Ventura, & Heras. ((s.f.)). [estimacion empirica del tiempo de concentracion de una cuenca]. En S. Ibáñez, H. Moreno, & J. Gisbert, *Métodos para la determinación del tiempo de concentracion de una cuenca* (pág. 8). Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.
- Villegas Yepes , P. P. (15 de Octubre de 2013). *aguaysig*. Obtenido de aguaysig Web site: <http://www.aguaysig.com/2013/10/analisis-morfometrico-de-una-cuenca.html>
- Wenzel. (1982). [Deduccion de la formula de intensidad de la lluvia]. En V. Chow, D. Midment, & L. Mays, *Hidrologia aplicada*. McGrawHill.



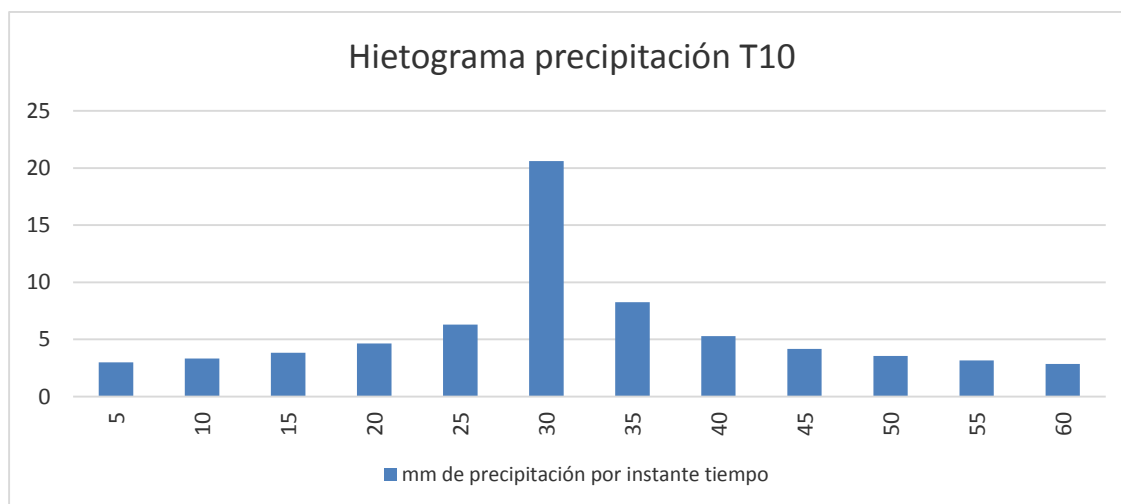
## ANEXOS

### ANEXO A. HIETOGRAMAS DE DISEÑO

*ANEXO A 1. Hietograma de precipitación para T=5años*

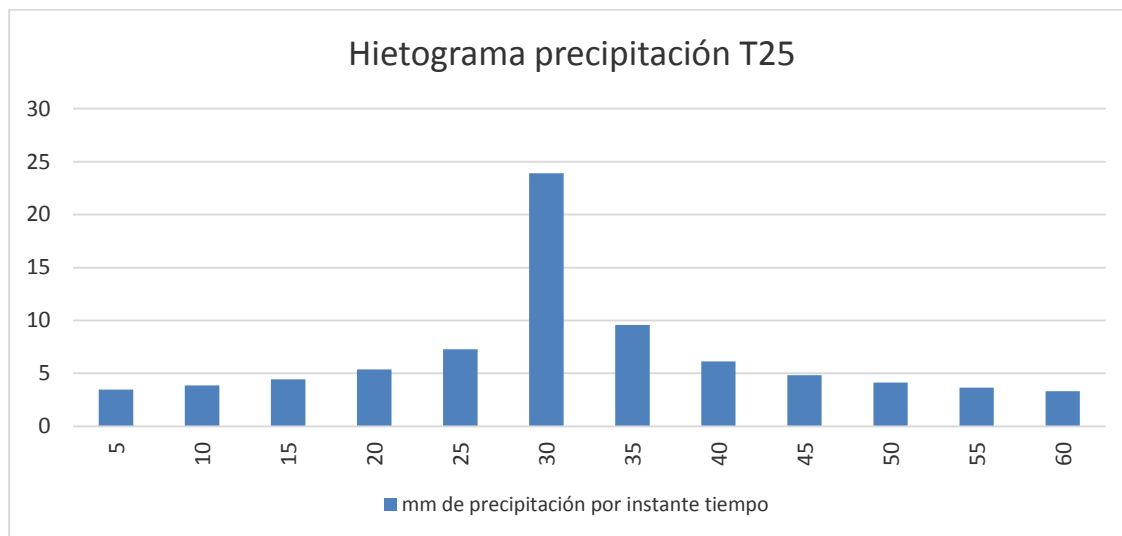


*ANEXO A 2. Hietograma de precipitación para T=10 años*

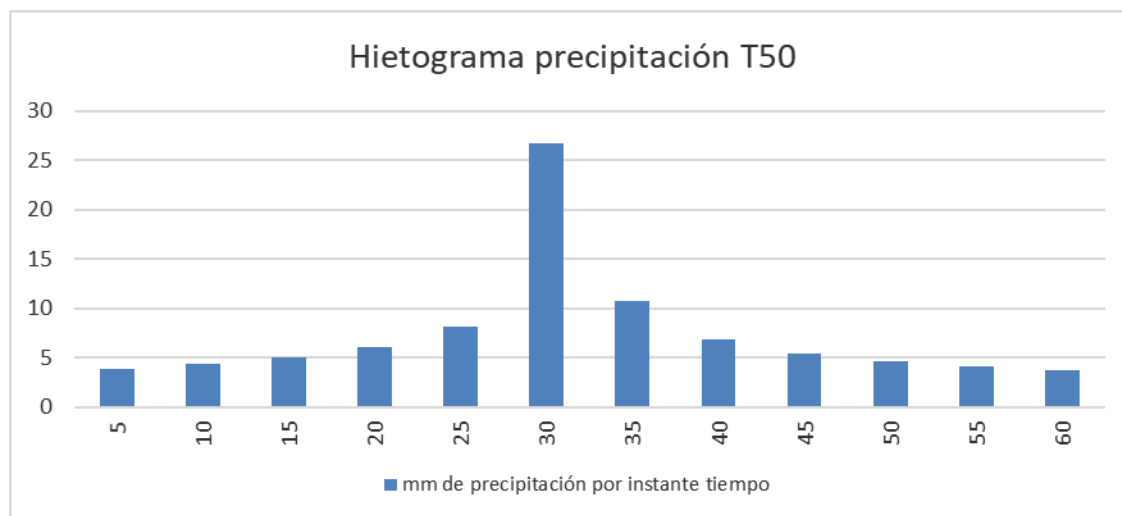




*ANEXO A 3. Hietograma de precipitación para T=25 años*

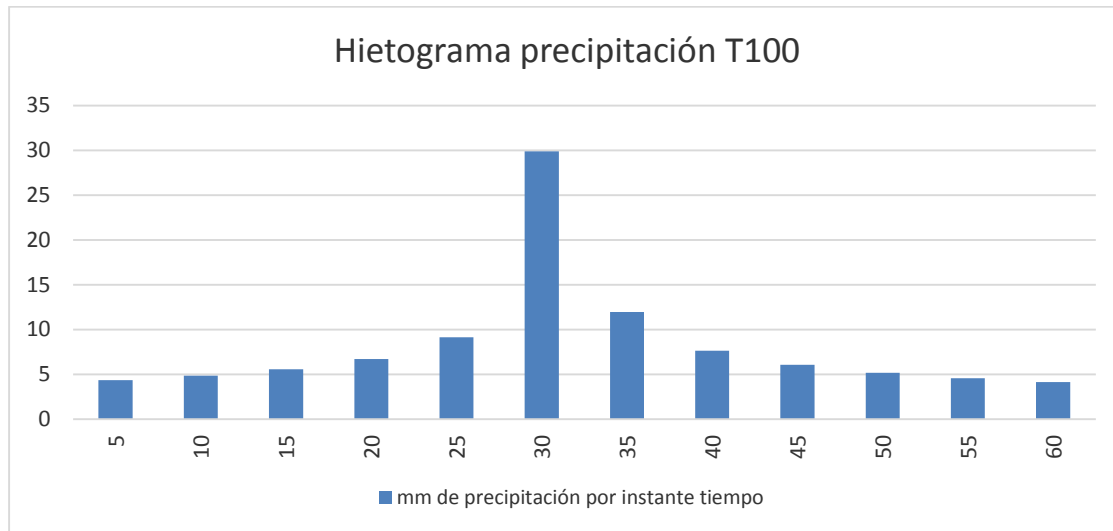


*ANEXO A 4. Hietograma de precipitación para T=50 años*



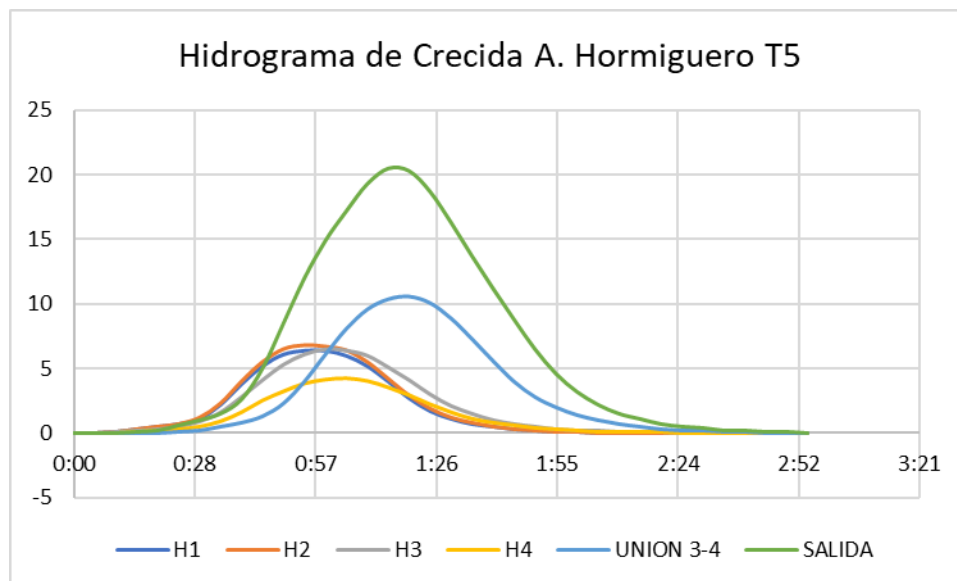


*ANEXO A 5. Hietograma de precipitación para T=100 años*

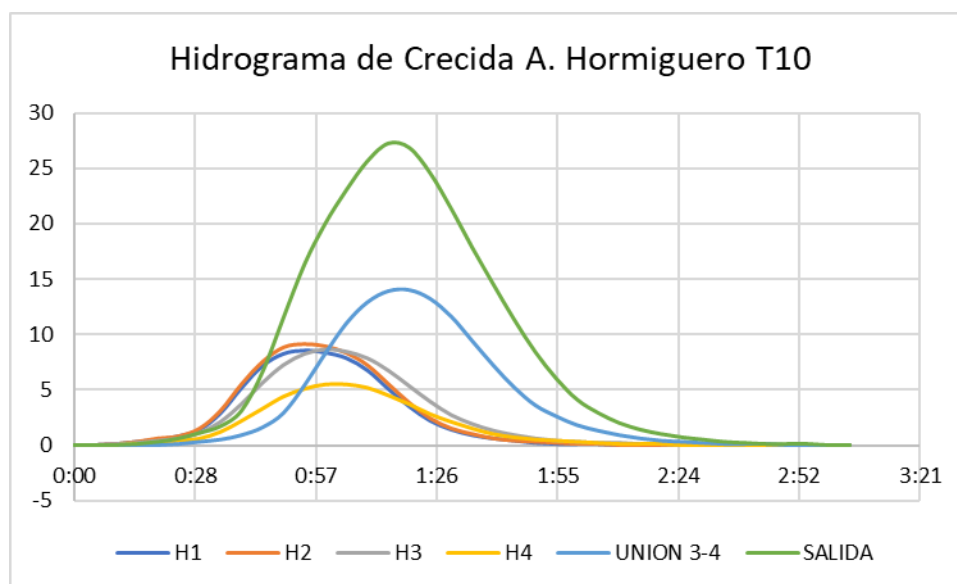


### ANEXOS B. HIDROGRAMAS DE DISEÑO

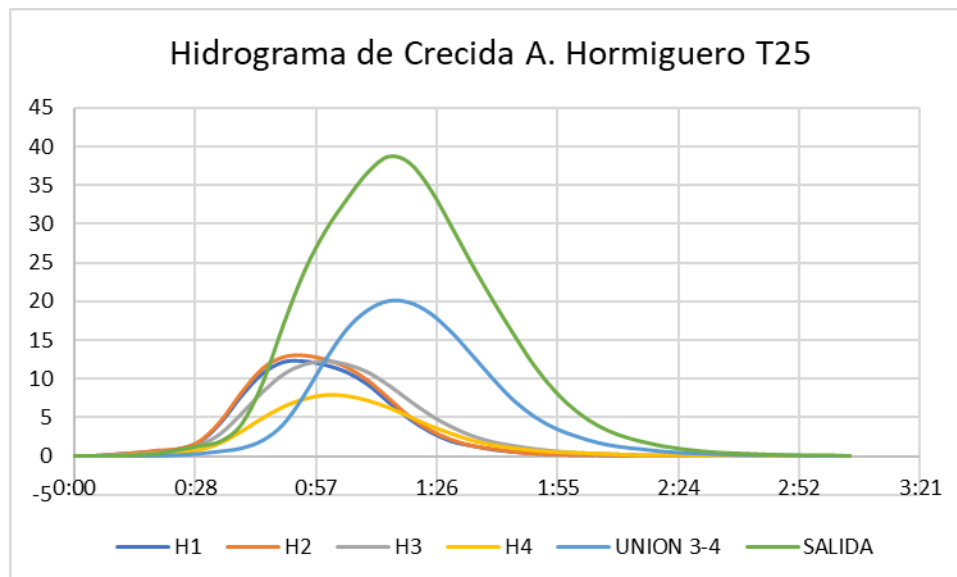
ANEXO B 1. Hidrograma de diseño Arroyo Hormiguero para  $T= 5$  años



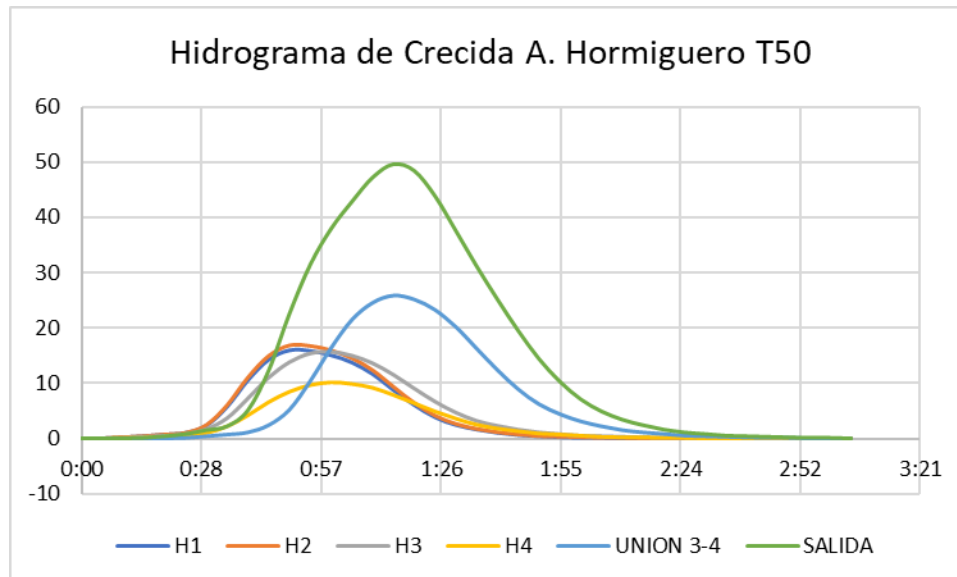
ANEXO B 2. Hidrograma de diseño Arroyo Hormiguero para  $T= 10$  años



*ANEXO B 3. Hidrograma de diseño Arroyo Hormiguero para T= 25 años*

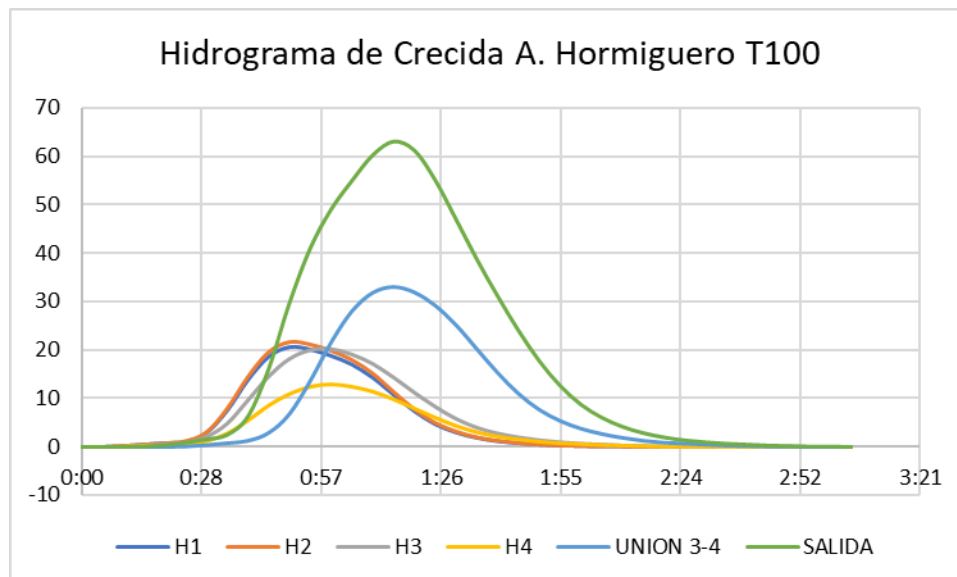


*ANEXO B 4. Hidrograma de diseño Arroyo Hormiguero para T= 50 años*

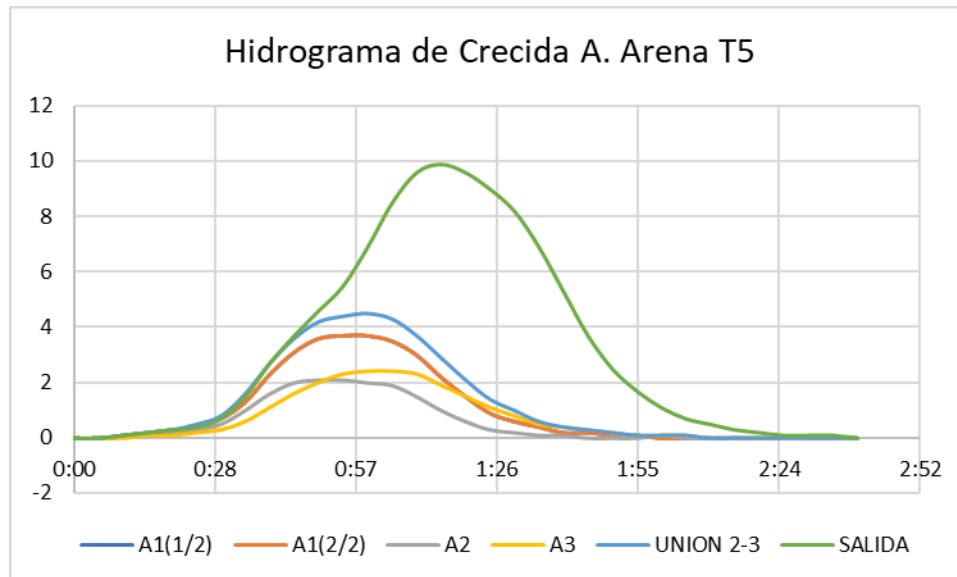




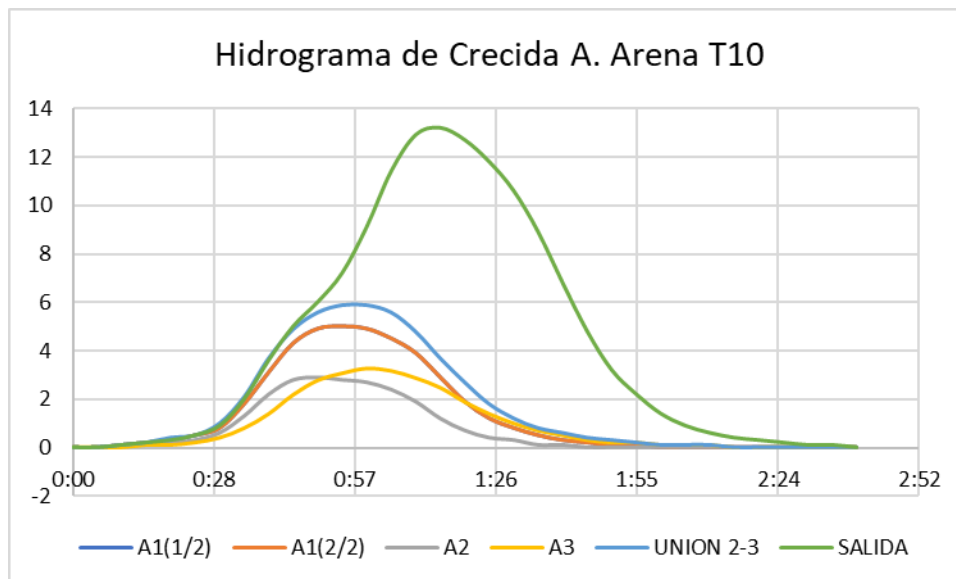
ANEXO B 5. Hidrograma de diseño Arroyo Hormiguero para  $T= 100$  años



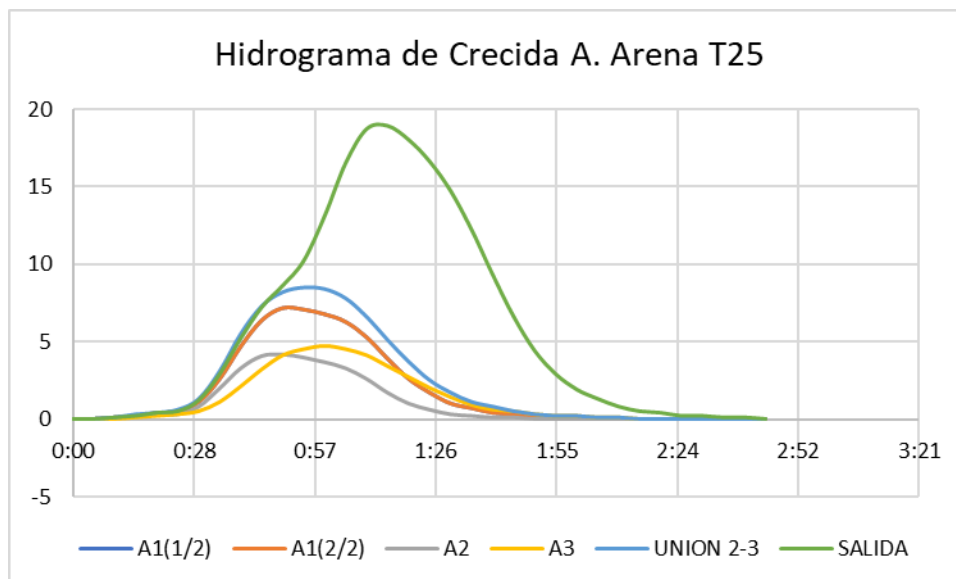
ANEXO B 6. Hidrograma de diseño Arroyo Arena para  $T= 5$  años



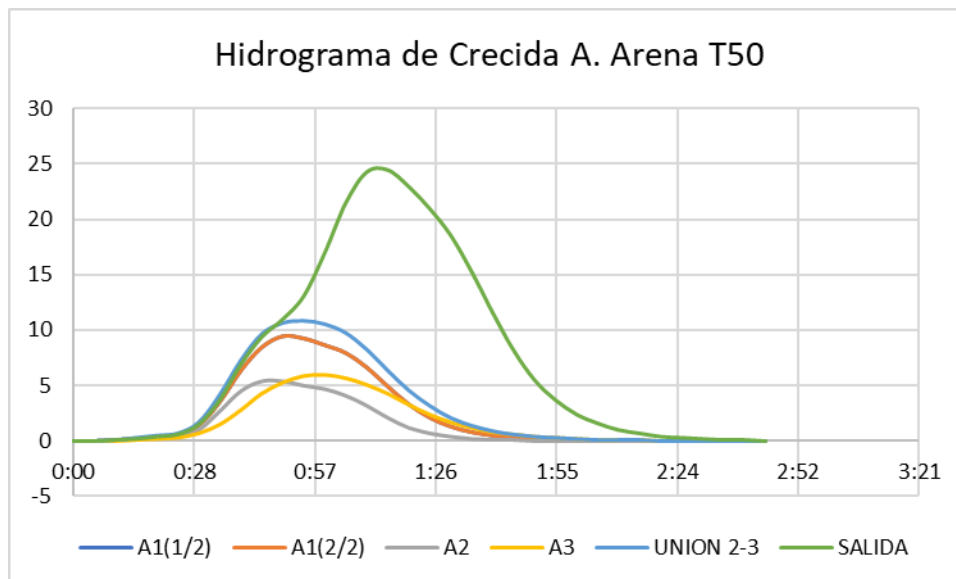
ANEXO B 7. Hidrograma de diseño Arroyo Arena para T= 10 años



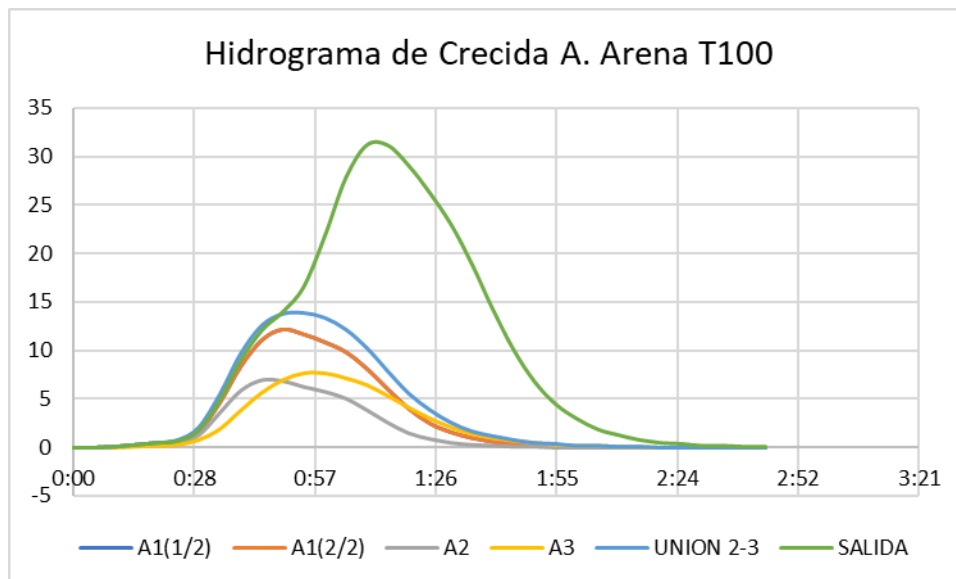
ANEXO B 8. Hidrograma de diseño Arroyo Arena para T= 25 años



*ANEXO B 9. Hidrograma de diseño Arroyo Arena para T= 50 años*

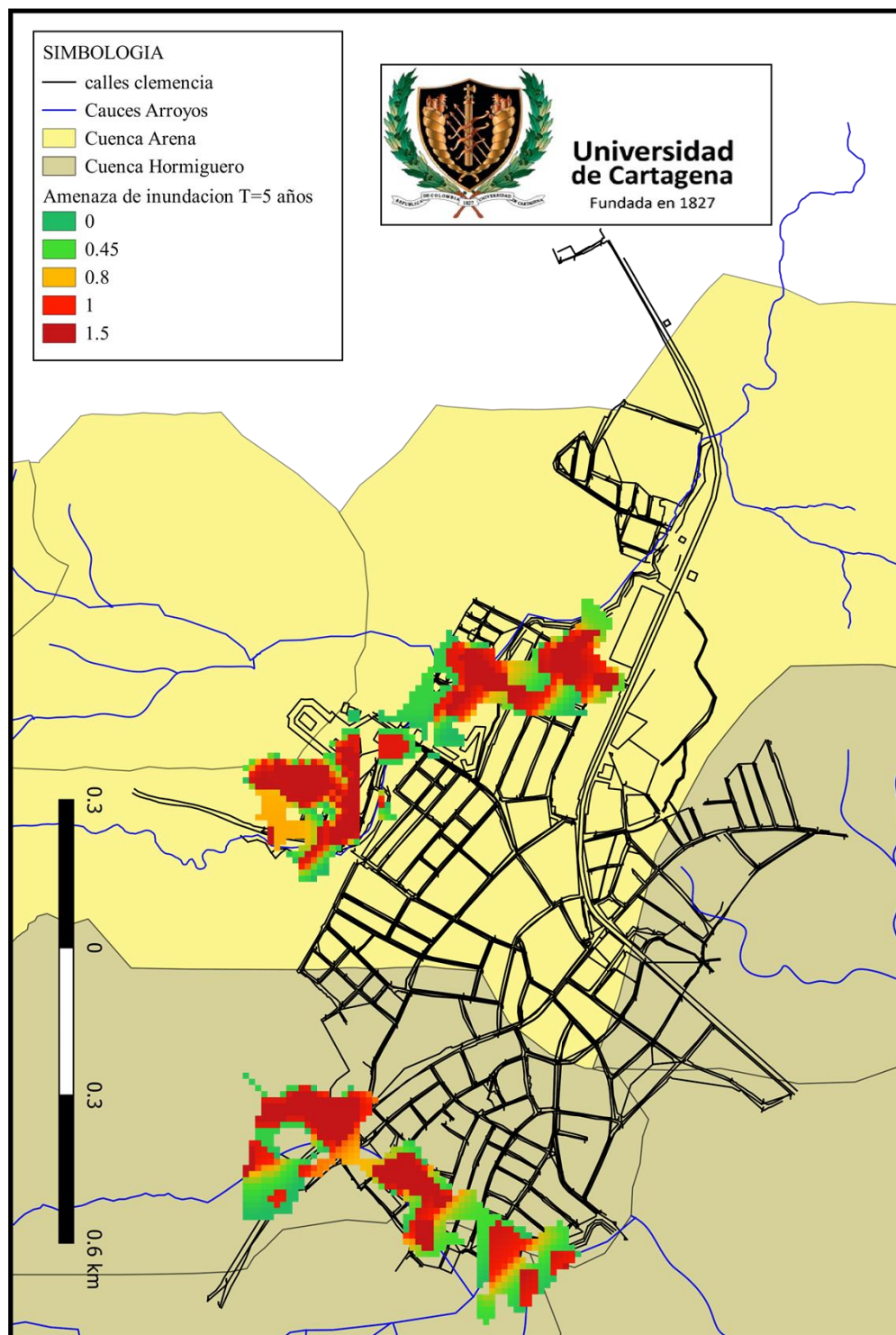


*ANEXO B 10. Hidrograma de diseño Arroyo Arena para T= 100 años*



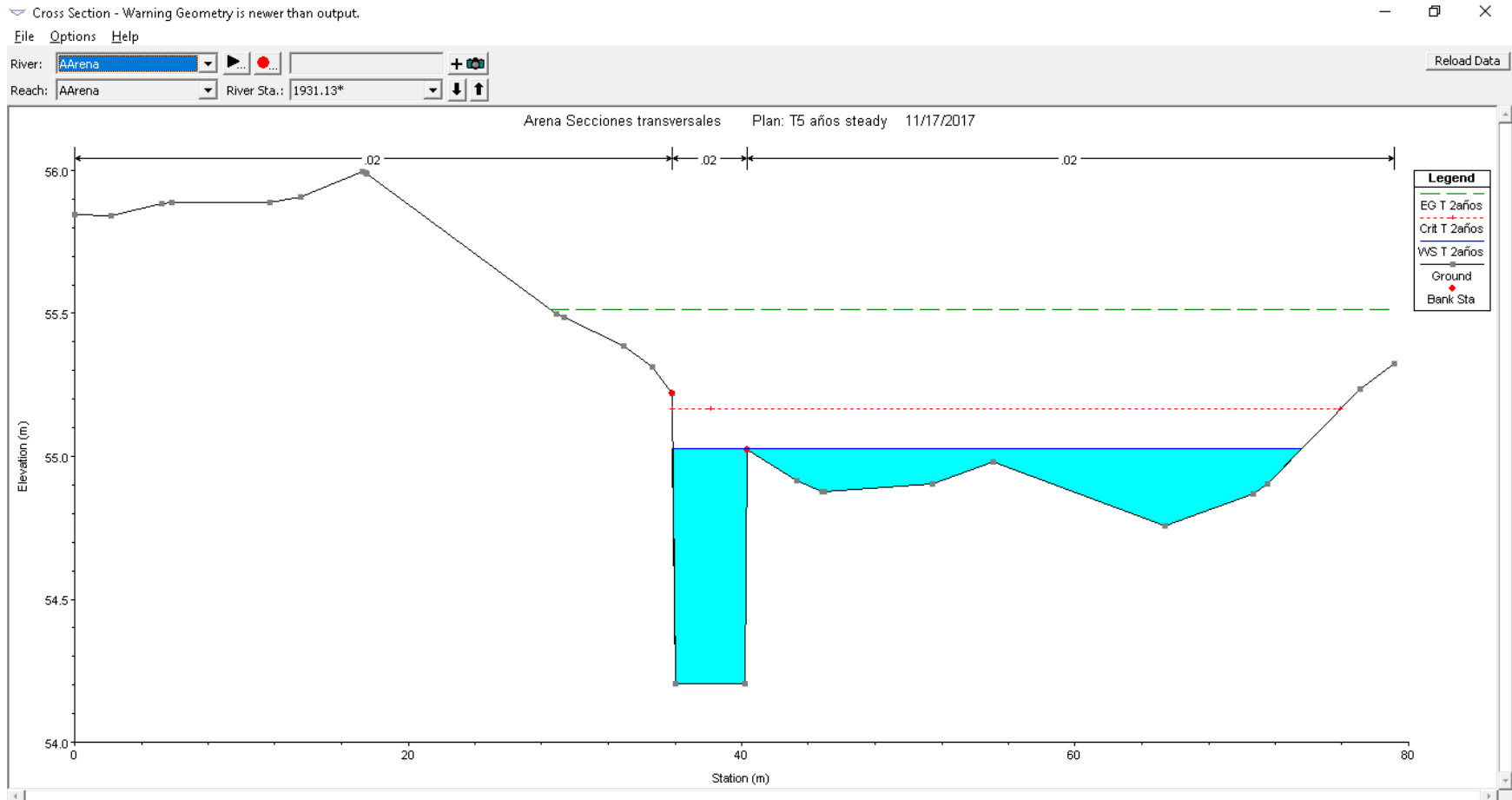
### ANEXO C. RESULTADOS MODELAMIENTO HIDRAULICO HIDROLOGICO

#### ANEXO C 1. Mancha de inundación para T= 5 años, inducida por arroyos.



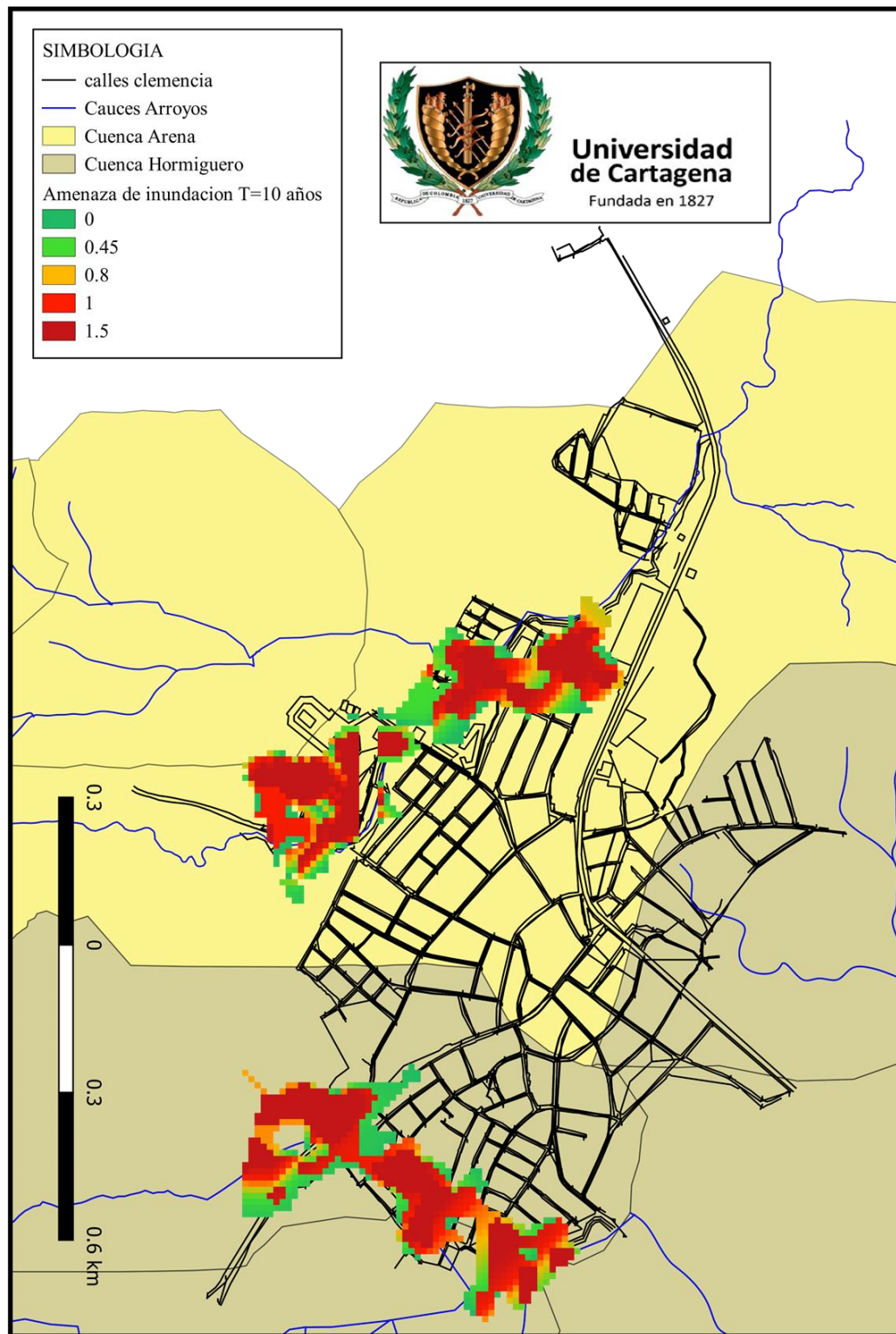


*ANEXO C 2. Tirante para un T=5 años en sección transversal del arroyo Arena.*



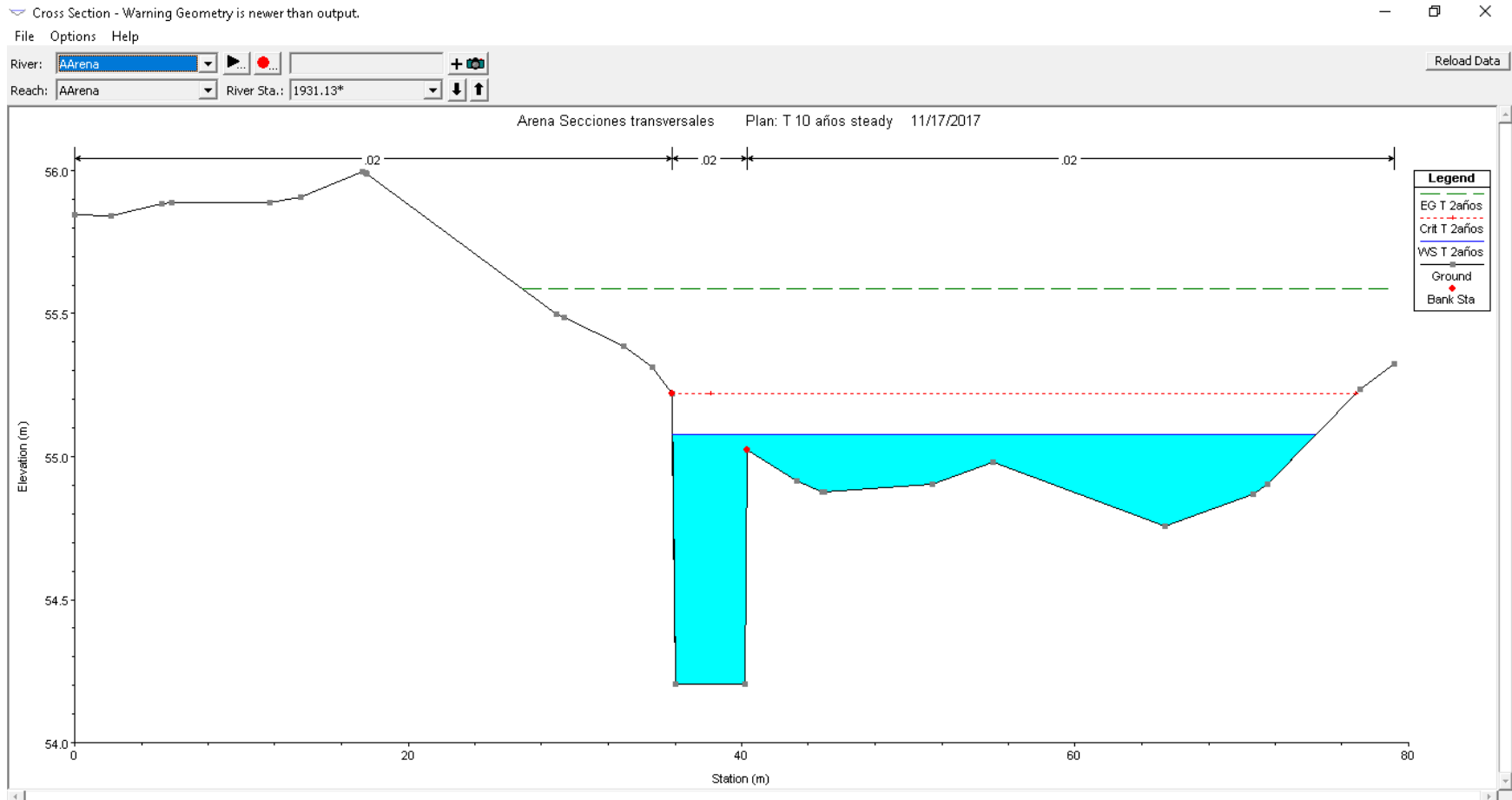


*ANEXO C 3. Mancha de inundación para T= 10años, inducida por arroyos*



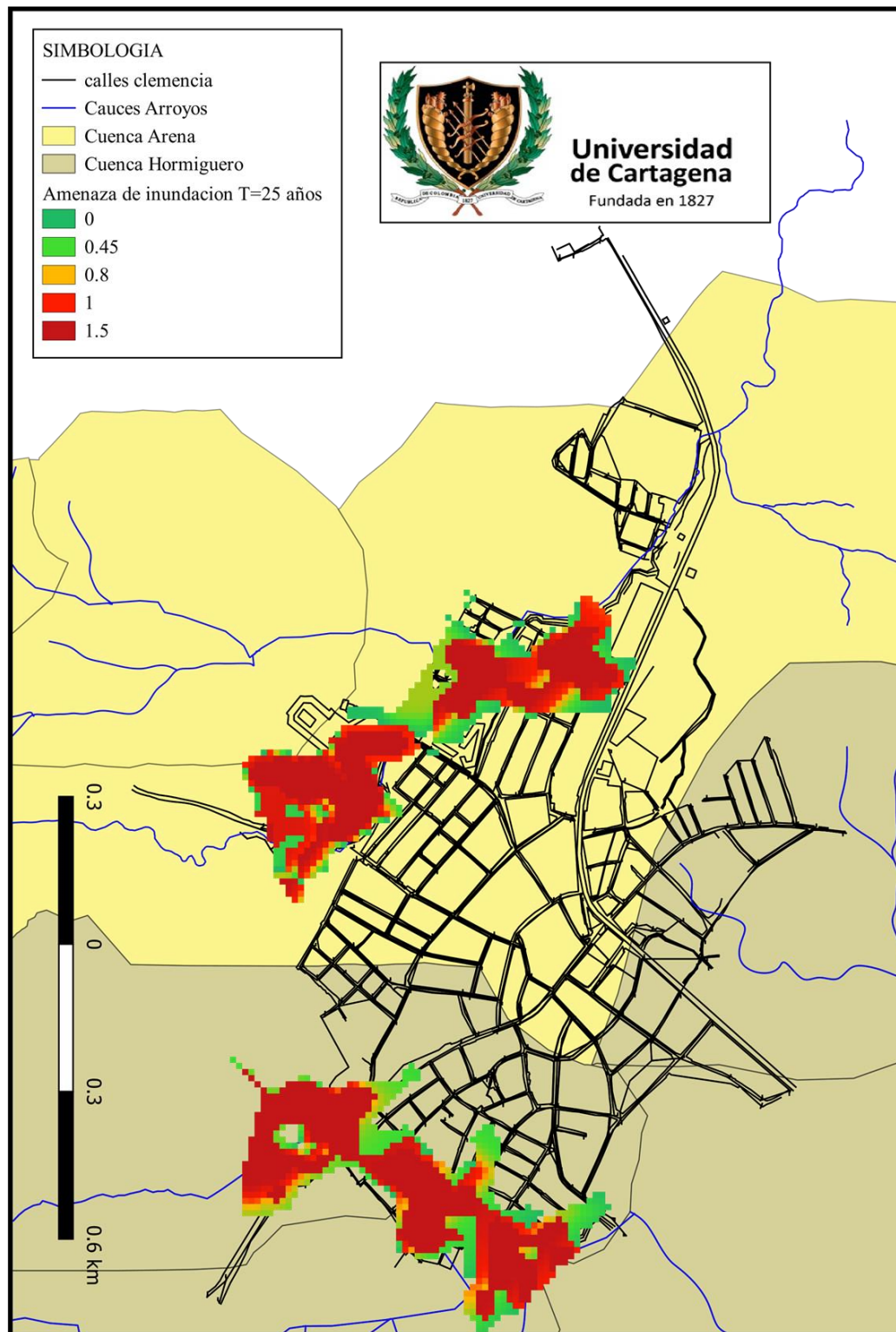


*ANEXO C 4. Tirante para un T=10 años en sección transversal del arroyo Arena.*





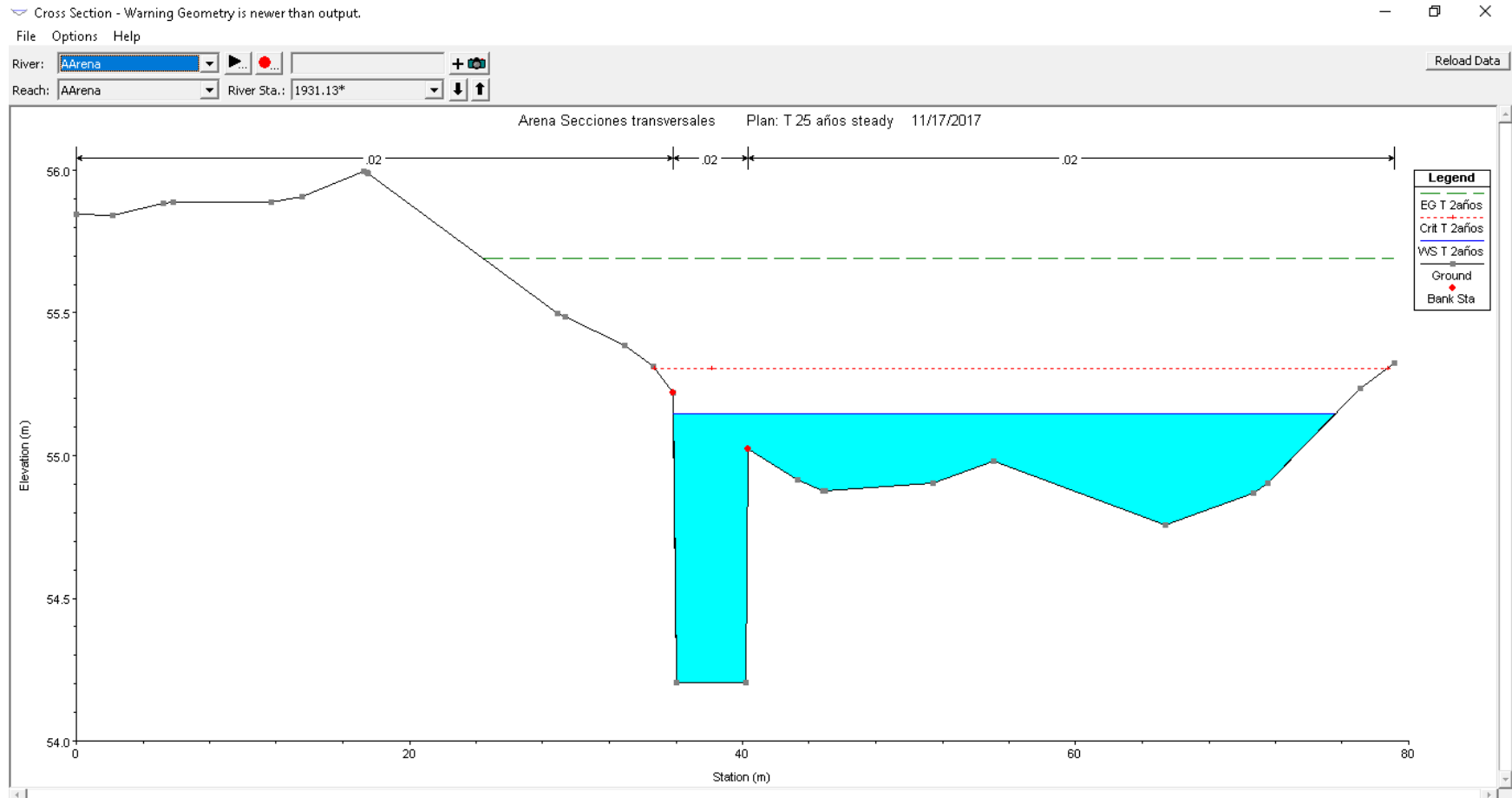
*ANEXO C 5. Mancha de inundación para T= 25años, inducida por arroyos*





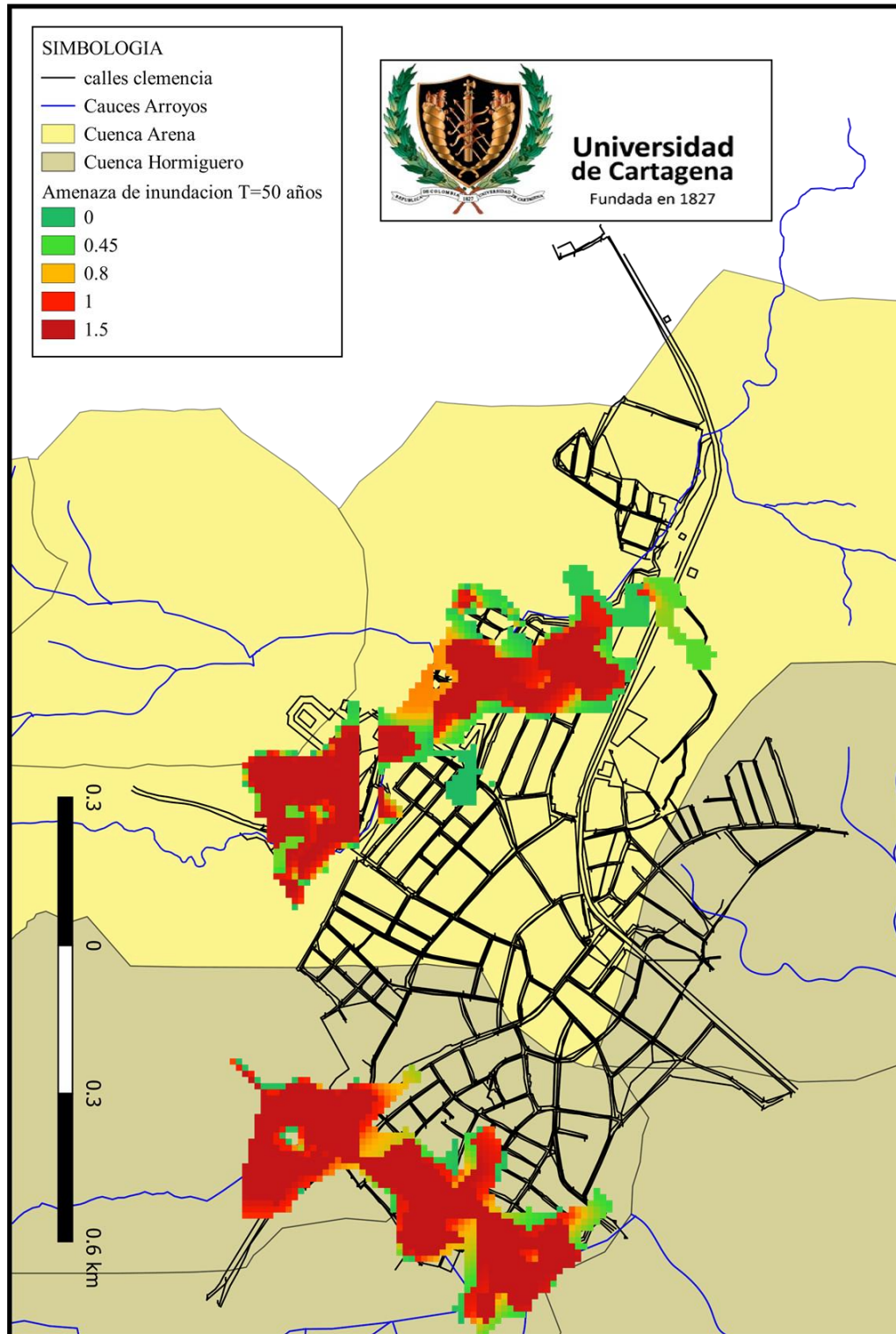


ANEXO C 6. Tirante para un T=25 años en sección transversal del arroyo Arena.



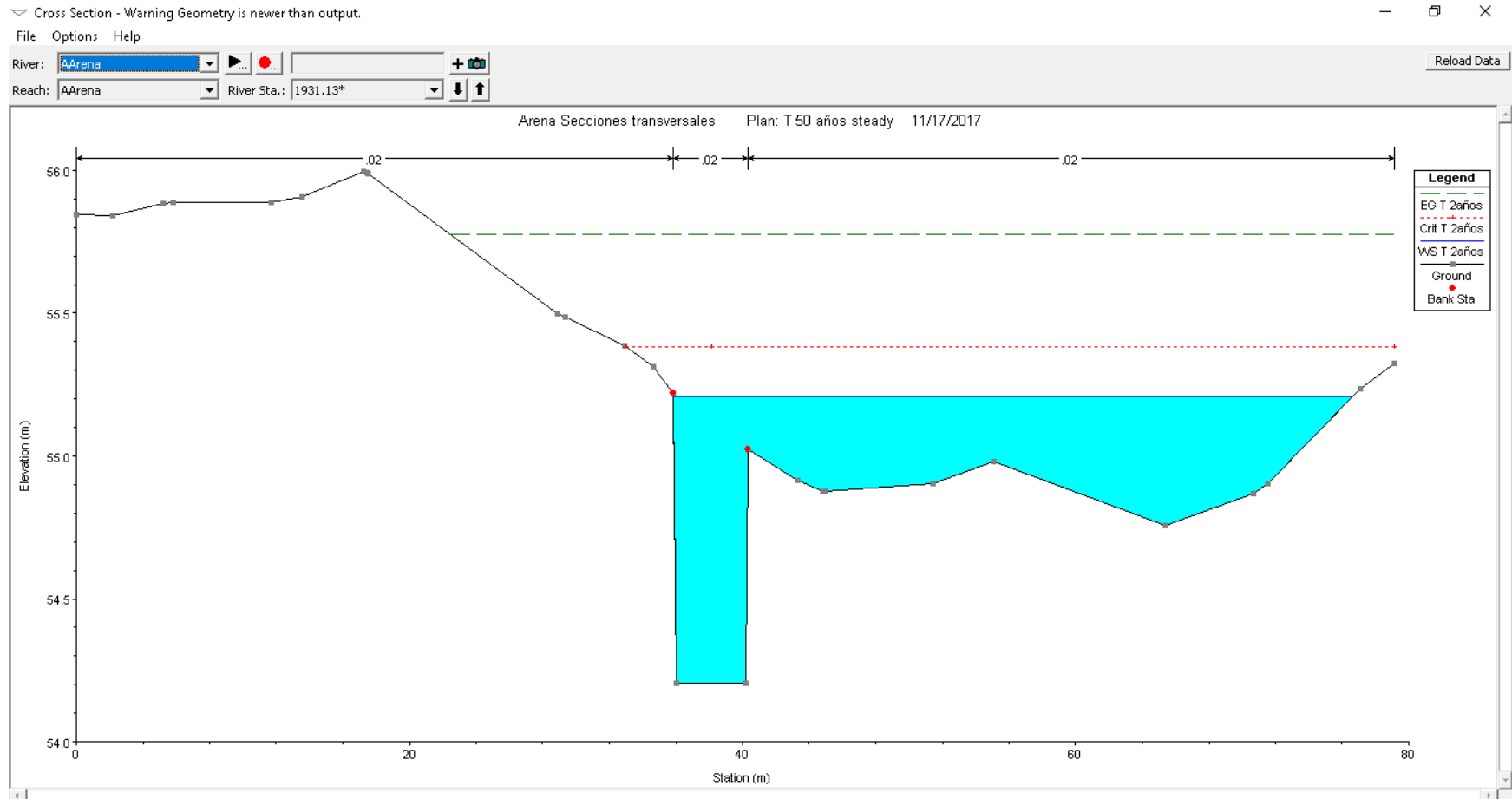


*ANEXO C 7. Mancha de inundación para T= 50años, inducida por arroyos*



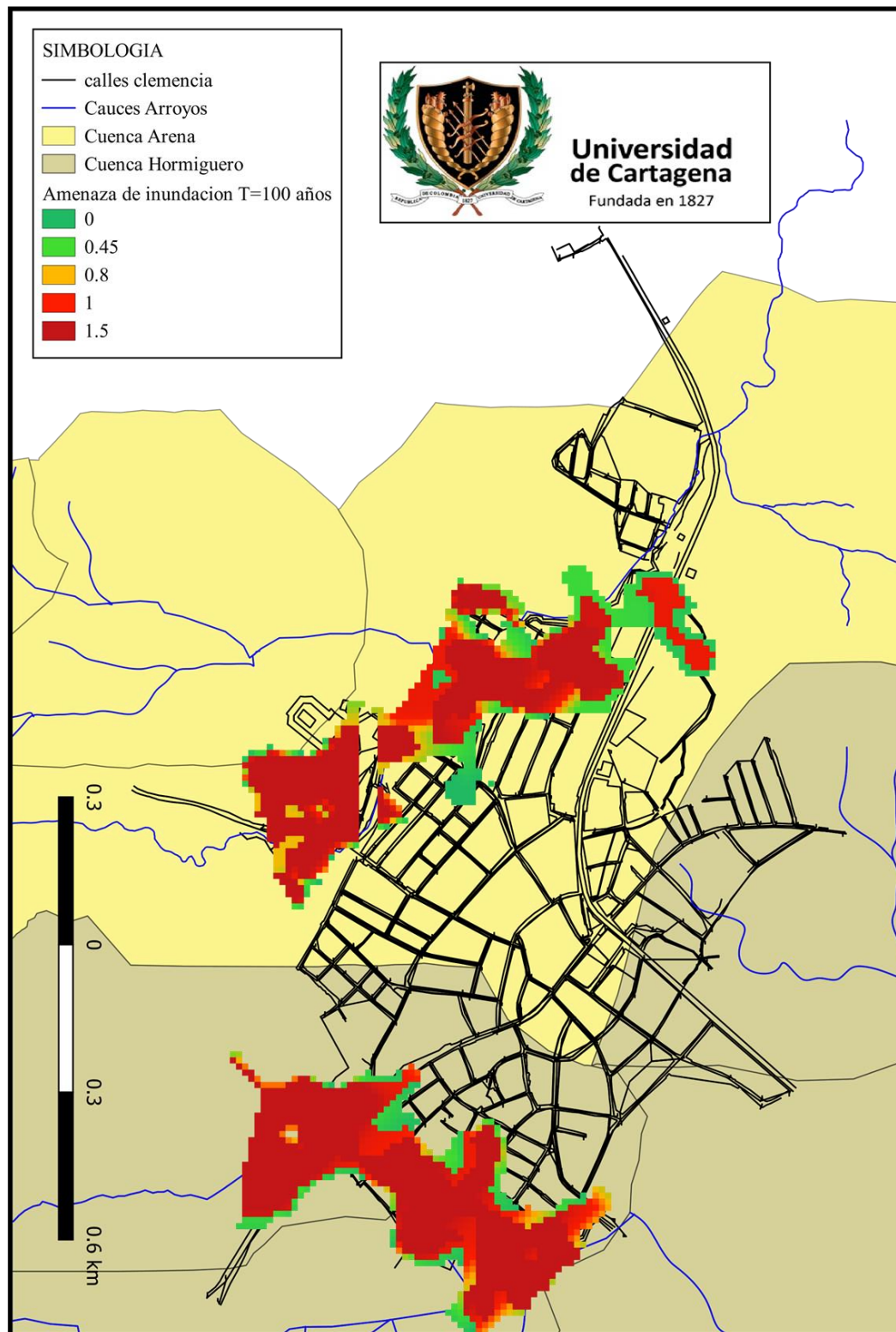


ANEXO C 8. Tirante para un T=50 años en sección transversal del arroyo Arena.



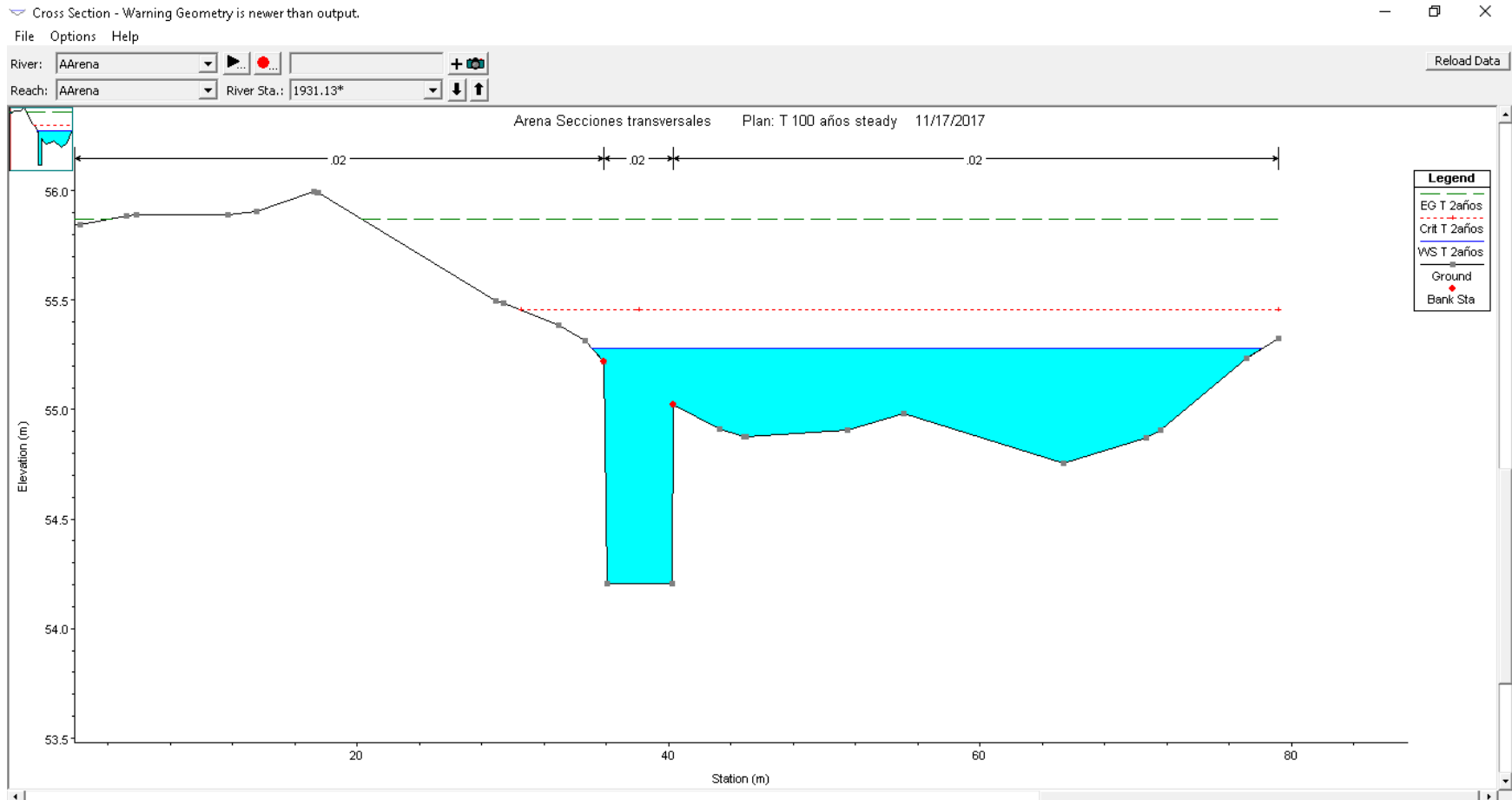


*ANEXO C 9. Mancha de inundación para T= 100años, inducida por arroyos*



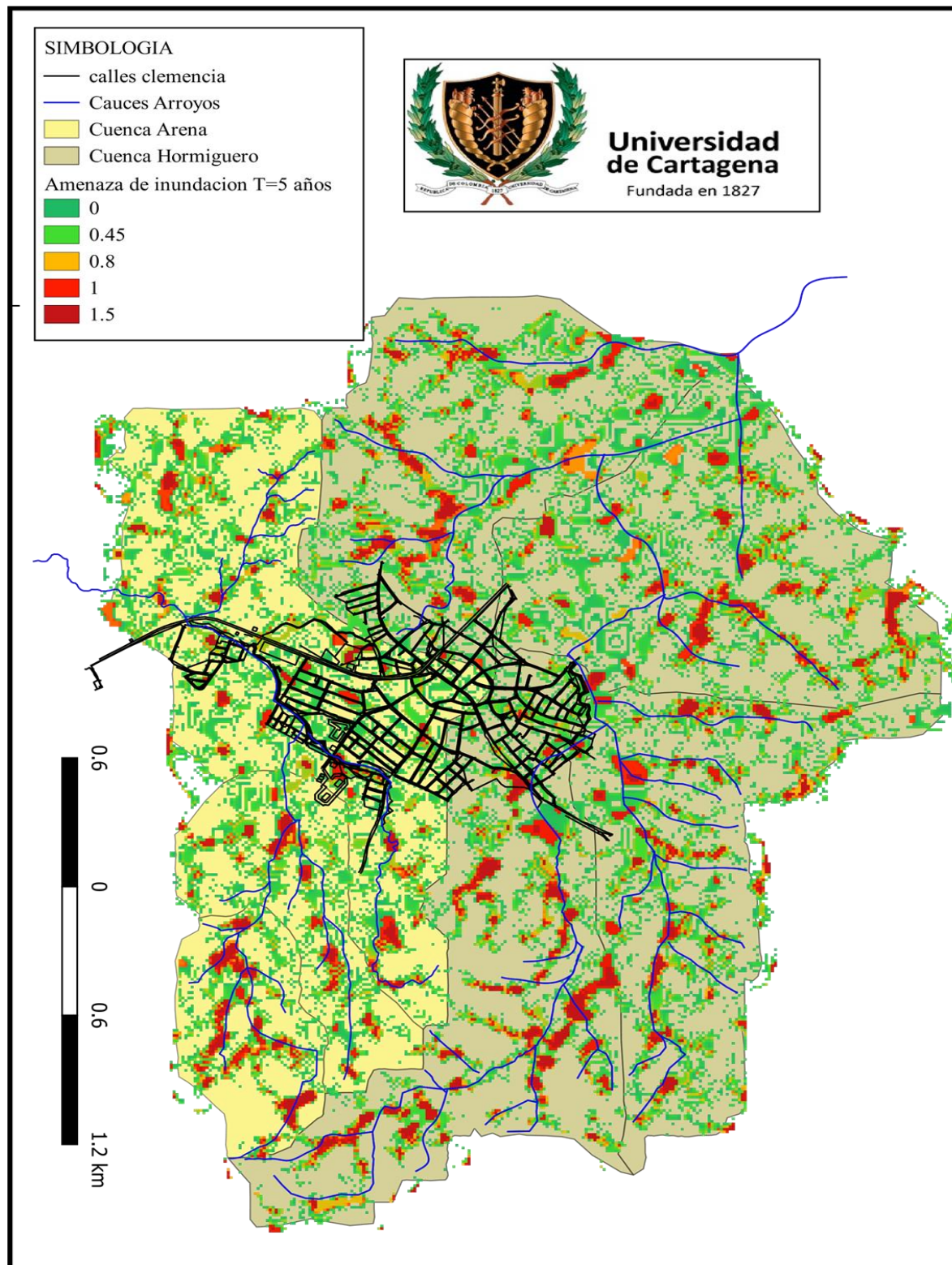


ANEXO C 10. Tirante para un  $T=100$  años en sección transversal del arroyo Arena



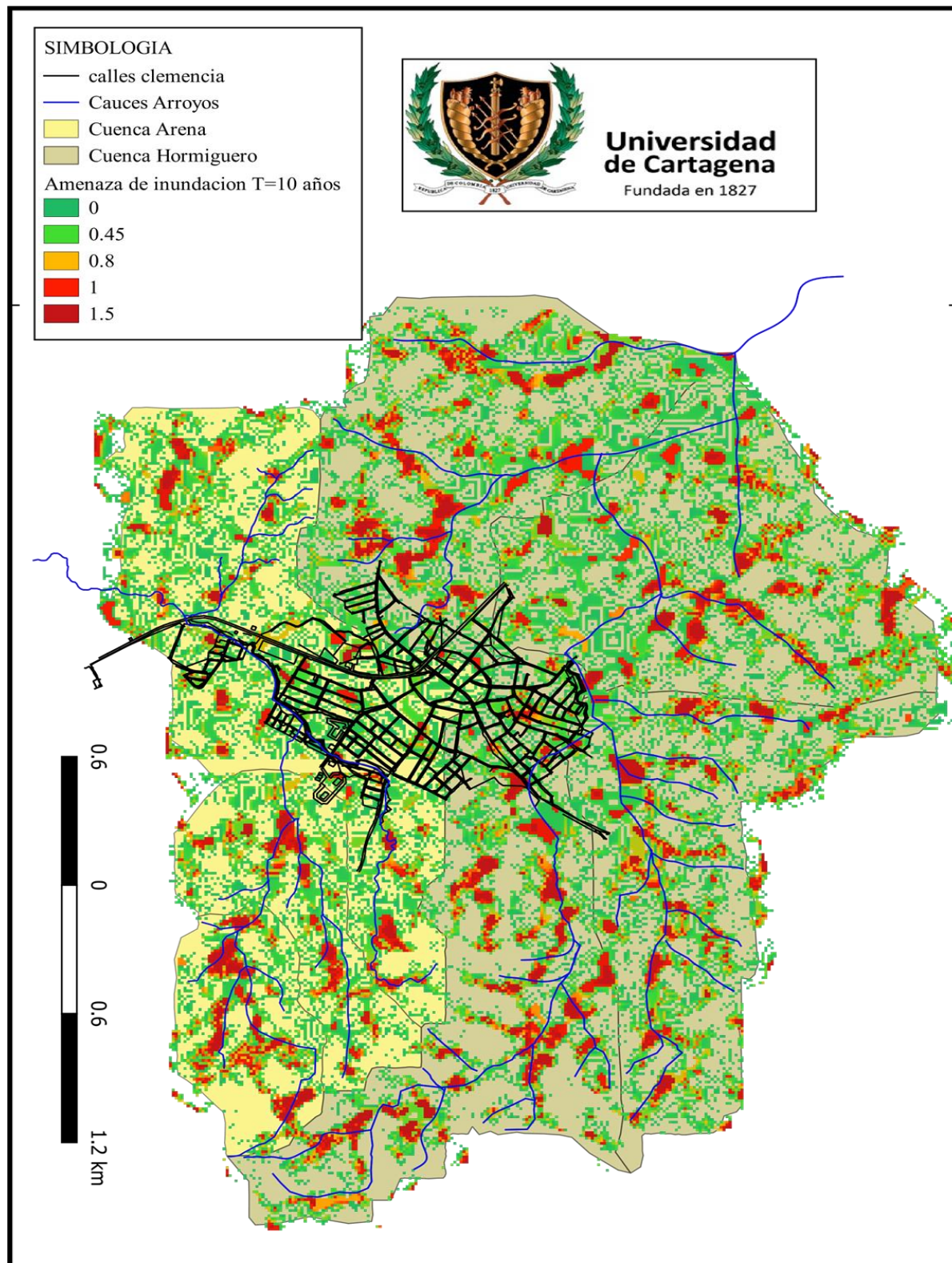


*ANEXO C 11. Mancha de encharcamiento por precipitación máxima para  $T = 5$  años*





*ANEXO C 12. Mancha de encharcamiento por precipitación máxima para  $T = 10$  años*

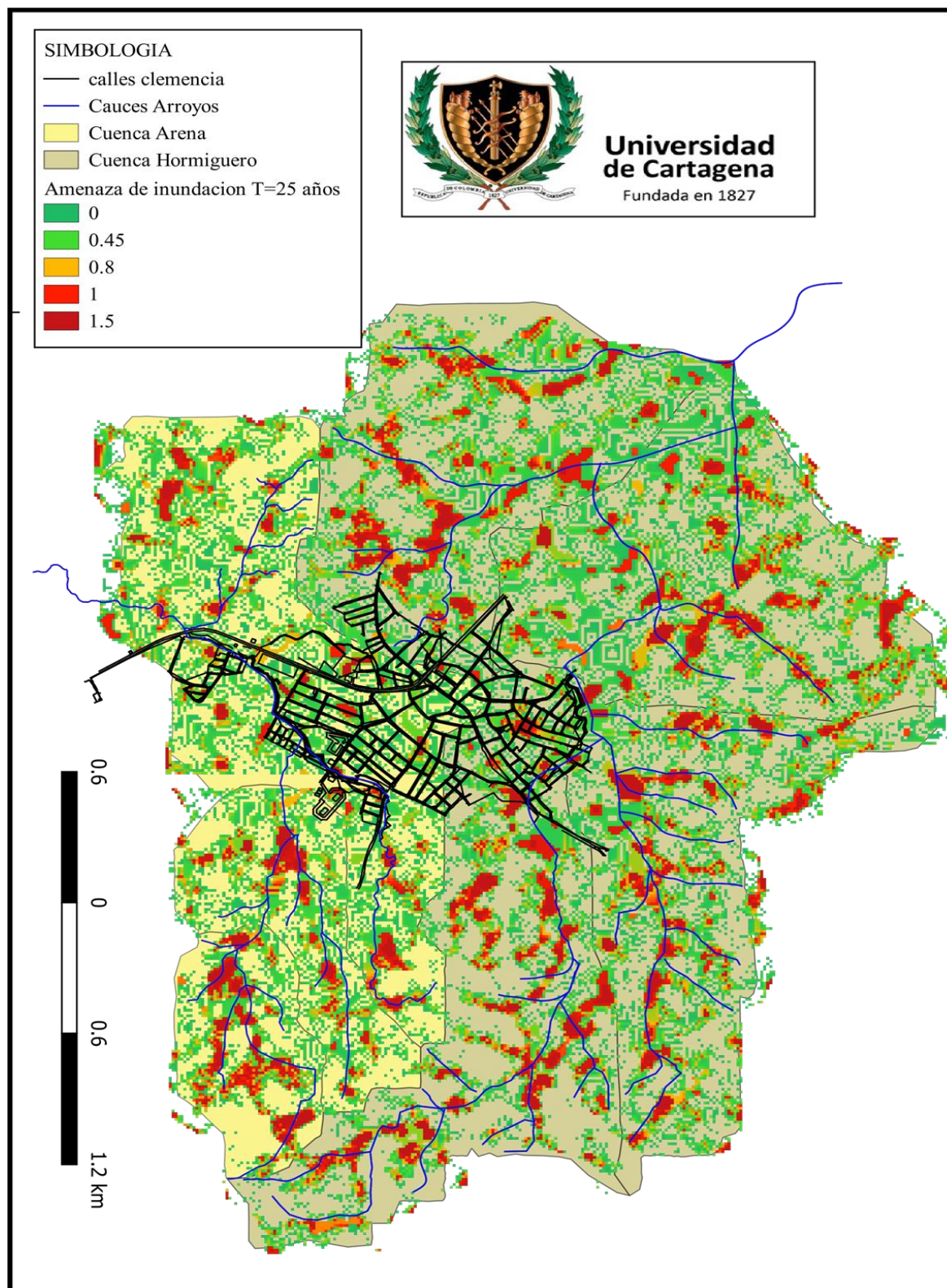


*Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar.*



Universidad de Cartagena  
Fundada en 1827

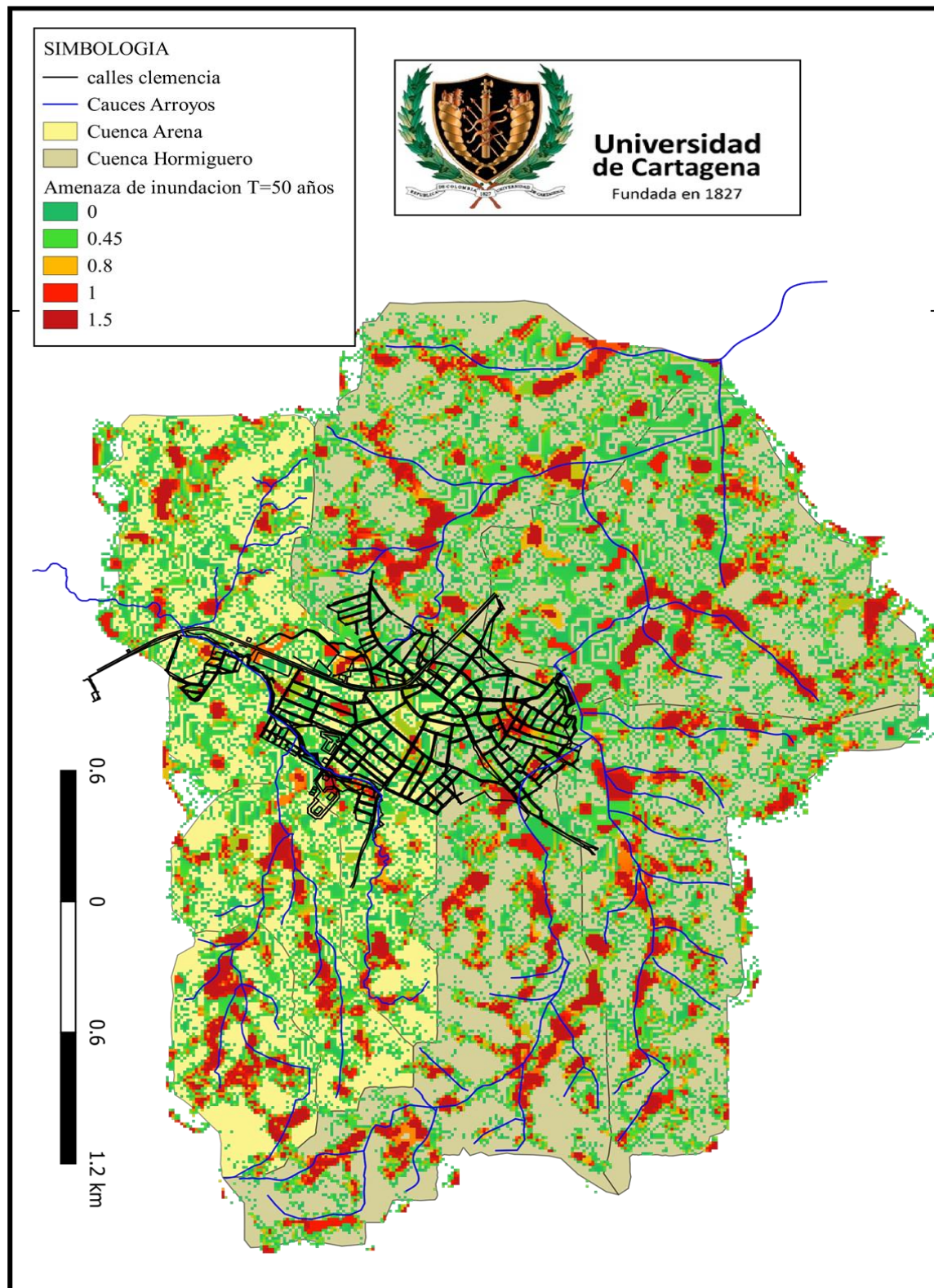
ANEXO C 13. Mancha de encharcamiento por precipitación máxima para  $T = 25$  años





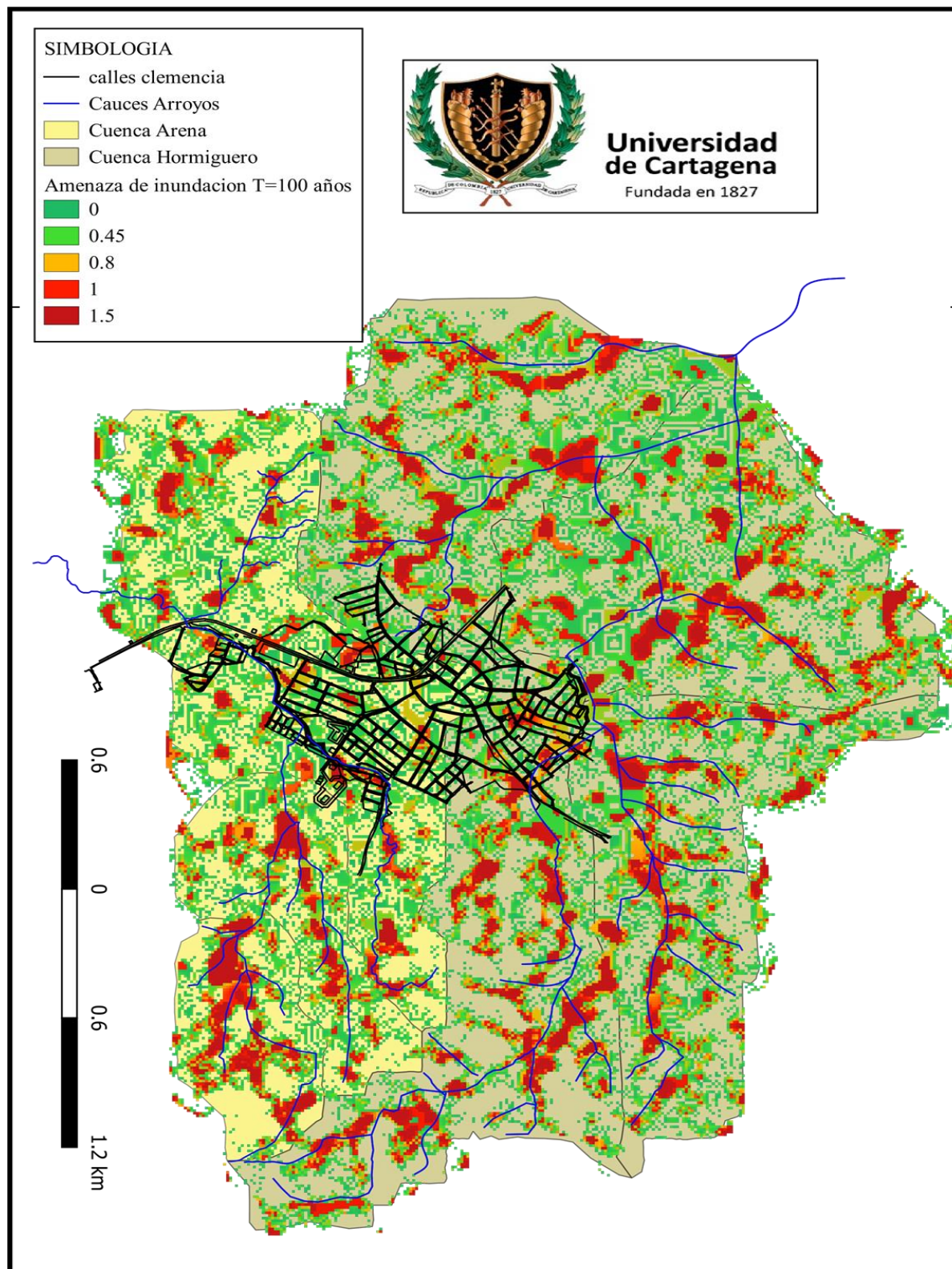


*ANEXO C 14. Mancha de encharcamiento por precipitación máxima para  $T = 50$  años*








ANEXO C 15. Mancha de encharcamiento por precipitación máxima para  $T = 100$  años

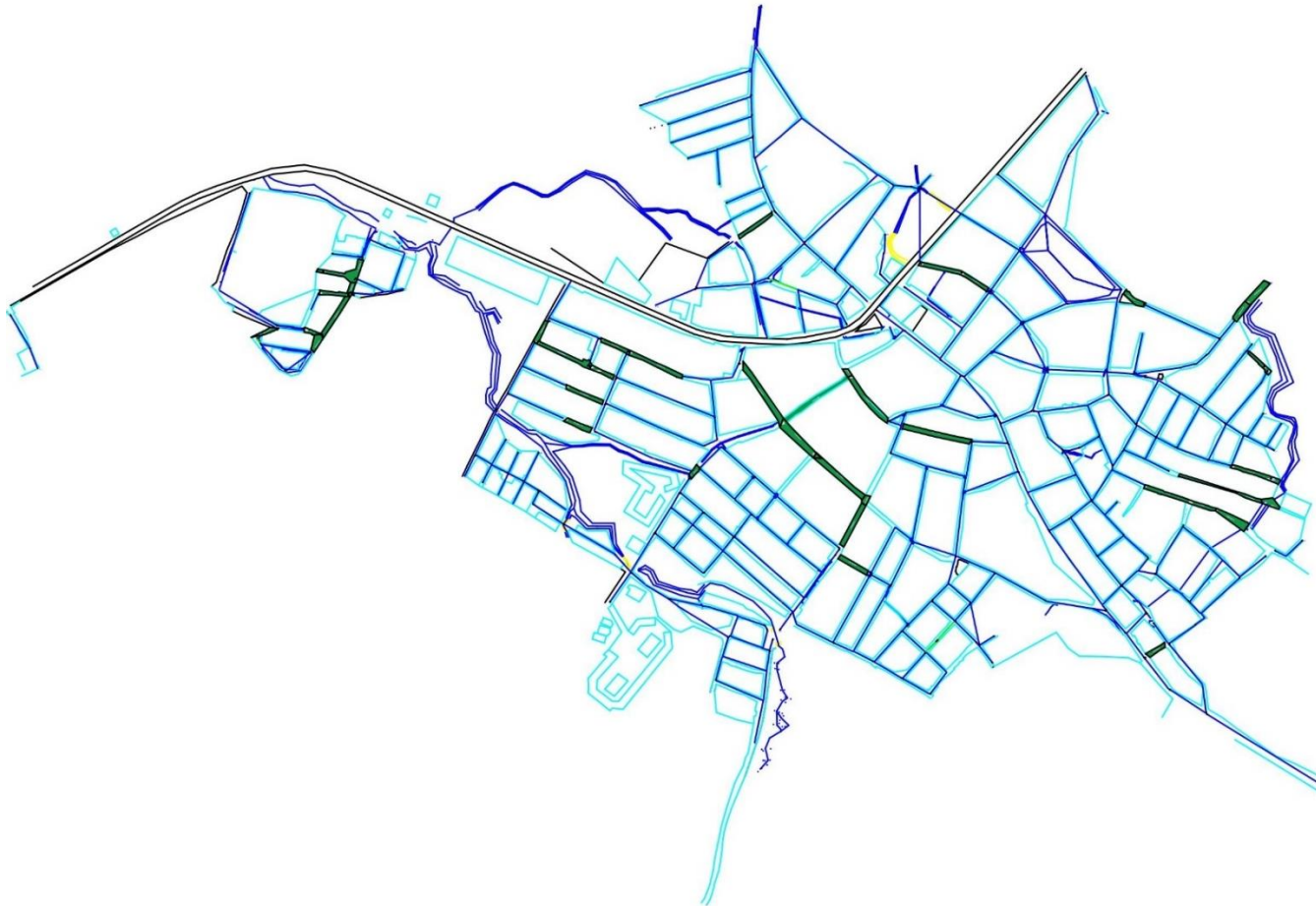


**ANEXO D. AMENAZA POR CAPACIDAD HIDRAULICA DE VIAS.**

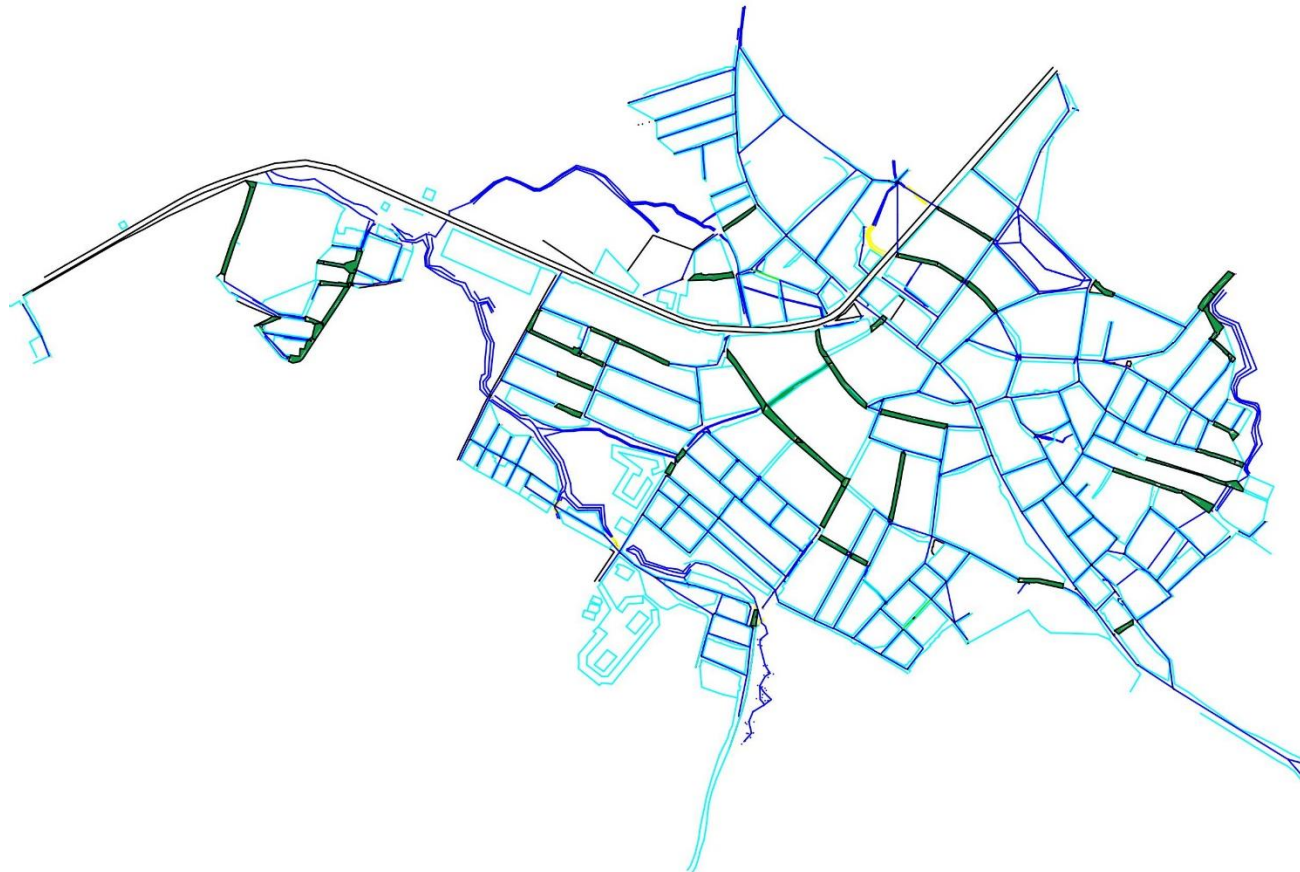
*ANEXO D 16. Capacidad hidráulica de vías para  $T = 5$  años*

**SIMBOLOGIA**

	>0 m
	>0,45 m
	>0,8 m
	>1 m



*ANEXO D 2. Capacidad hidráulica de vías para  $T = 10$  años*

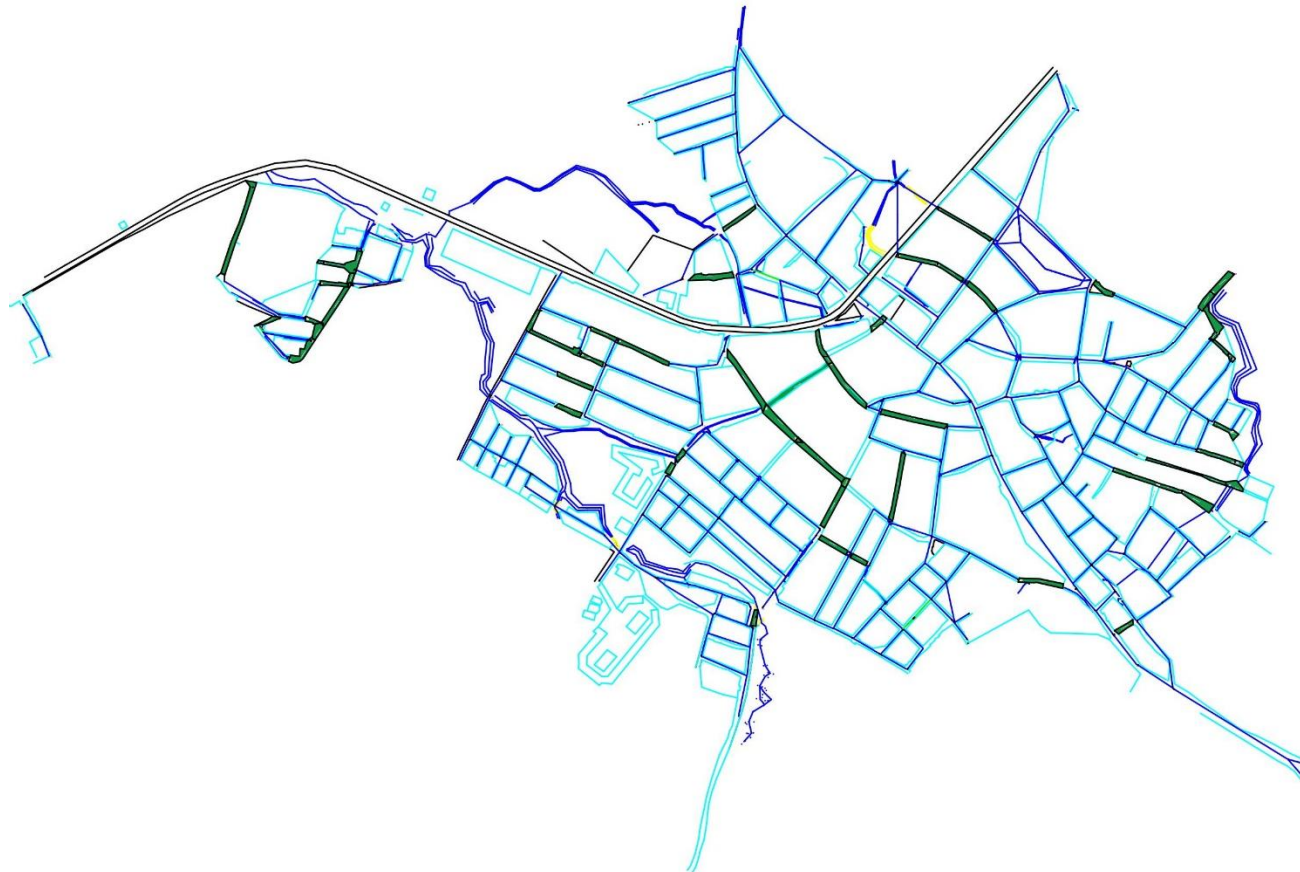


**SIMBOLOGIA**





>0 m
>0,45 m
>0,8 m
>1 m



*ANEXO D 3. Capacidad hidráulica de vías para  $T = 25$  años*

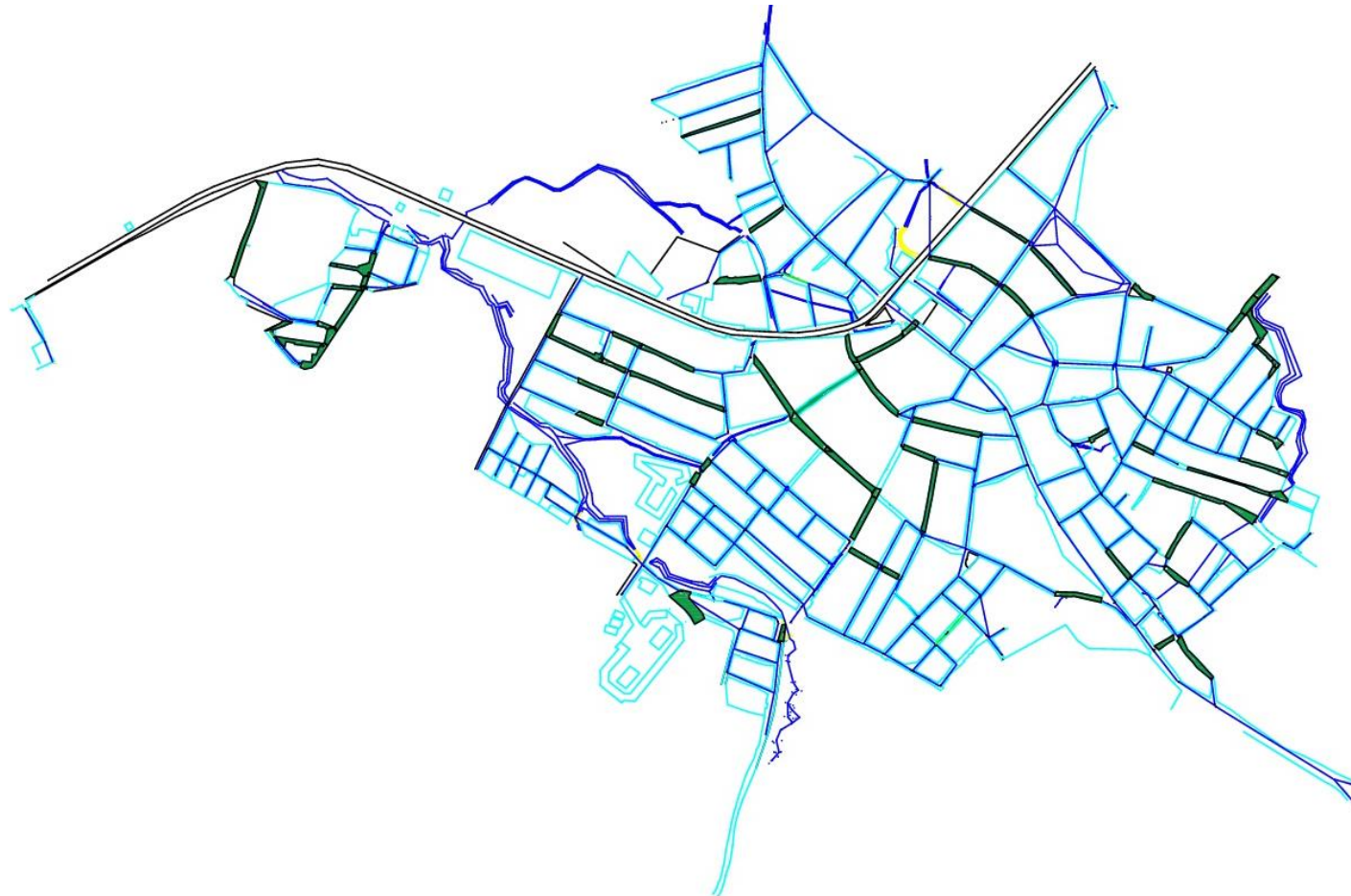


**SIMBOLOGIA**





	>0 m
	>0,45 m
	>0,8 m
	>1 m



*ANEXO D 4. Capacidad hidráulica de vías para T = 50 años*



**SIMBOLOGIA**

	>0 m
	>0,45 m
	>0,8 m
	>1 m

*ANEXO D 5. Capacidad hidráulica de vías para  $T = 100$  años*





*ANEXO D 6. Capacidad hidráulica de vías para  $T = 500$  años*







**ANEXO E. CALCULO DE CAPACIDAD HIDRAULICA DE VIAS (CD).**



**ANEXO F. PLANO DE PROYECCION DE LOS SUMIDEROS SOBRE TRAMOS DE VIAS AMENAZADOS POR INUDACION PLUVIOMETRICA.**