

EFFECTOS DE LOS PROCESOS DE URBANIZACIÓN EN LA CUENCA
HIDROGRÁFICA DEL ARROYO MAMEYAL



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

Acreditación Institucional de Alta Calidad
Resolución 2583 del 26 de febrero de 2014. Ministerio de Educación Nacional



DANISER ARRIETA GAVIRIA
DAYANA ALEJANDRA ZARAZA CARO

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA
2020

EFFECTOS DE LOS PROCESOS DE URBANIZACIÓN EN LA CUENCA
HIDROGRÁFICA DEL ARROYO MAMEYAL

DANISER ARRIETA GAVIRIA
DAYANA ALEJANDRA ZARAZA CARO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero civil

DIRECTOR: JAVIER MOUTHON BELLO
INGENIERO CIVIL, PhD

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA

2020

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por los ángeles que ha puesto en mi camino desde que abrí los ojos por primera vez, empezando por papá y mamá. Gracias infinitas a mi hermana por ser mi soporte y por darme una razón más para luchar (A.V.A.).

Agradezco el esfuerzo, la paciencia y la dedicación de nuestro director, el Ing. Javier Mouthon y todo lo que trajo consigo, en especial la labor desinteresada del Ing. Andrés Aguirre, que con sus conocimientos llevó a cumplir a feliz termino esta investigación.

Agradecida eternamente con aquellos que, con gestos, palabras y/o acciones, aportaron un granito de arena para culminar este proyecto.

Gracias totales.

Daniser Arrieta G.

Agradezco a Dios por la vida; a mis padres quienes siempre han sido apoyo durante este proceso y creen en cada paso que doy, a mi compañera Daniser Arrieta; a Manuel quien estuvo al inicio de todo y su apoyo en verdad fue valioso.

Al Ing. Javier Mouthon, por su dedicación durante el tiempo que nos llevó este proceso, por ser un ejemplo como ingeniero y por todo el apoyo que recibimos de él.

A mis amigos Mafla y Alberto, que me han acompañado en este proceso y me han alentado a siempre seguir a pesar de las adversidades, me enseñaron que mis triunfos también son los de ellos.

Y agradecida eternamente con la vida por todas las oportunidades que pone en mi camino. Siempre mirando hacia adelante.

Dayana A. Zaraza C.

CONTENIDO

RESUMEN.....	14
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO DE REFERENCIA.....	20
1.1. ESTADO DEL ARTE	20
1.2. ANTECEDENTES	25
1.3. MARCO TEÓRICO	28
1.3.1. MODELACIÓN NUMÉRICA	28
1.3.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	28
1.3.3. MODELO DE SIMULACIÓN.....	30
1.3.4. CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS DE LAS CUENCAS.....	31
1.3.4.1. Método de Horton	33
1.3.5. PRECIPITACIONES.....	35
1.3.6. CURVAS IDF.....	36
1.3.6.1. Curva IDF Almanza, Martínez y Velázquez año 1995.....	37
1.3.6.2. Curva IDF Hydroconsultores Ltda año 2014.....	38
1.3.6.3. Curva IDF Vargas, Díaz-Granados año 1998	39
1.3.6.4. Herrera y Llamas año 2018.....	41
1.3.7. ISOYETAS	41
1.3.8. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN.....	41
1.3.8.1. Ecuación de Kerby	42
1.3.8.2. Soil Conservation Service (SCS)	42
1.3.9. HIETOGRAMA.....	43

1.3.10.	NÚMERO DE CURVA	43
1.3.11.	SCS HIDROGRAMA UNITARIO.....	46
1.3.12.	ONDA CINEMÁTICA	47
1.3.13.1.	Capacidad de infiltración	49
1.3.14.	IMAGEN SATELITAL	50
1.3.14.1.	Google Earth	50
1.3.15.	MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL	51
2.	OBJETIVOS	52
2.1.	OBJETIVO GENERAL	52
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	52
3.	ALCANCE.....	53
4.	METODOLOGÍA.....	57
4.1.1.	Revisión bibliográfica de estudios en la zona y la comunidad	59
4.2.	ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE URBANIZACIÓN	59
4.3.	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	60
4.3.1.	ÁREA, UBICACIÓN, DELIMITACIÓN Y MORFOMETRÍA.....	61
4.3.2.	RED Y DENSIDAD DE DRENAJE	61
4.3.3.	CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS	62
4.3.3.1.	Climatología.....	62
4.3.3.2.	Topografía.....	63
4.3.3.3.	Suelos	63
4.3.3.4.	Uso actual del suelo (cobertura vegetal)	64
4.4.	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	64
4.5.	MODELO HIDROLÓGICO	65

4.5.1.	SUBDIVISIÓN DE LA CUENCA.....	65
4.5.2.	DATOS DE ENTRADA PARA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN HEC – HMS	66
4.5.3.	DATOS DE ENTRADA PARA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN HEC – RAS	67
4.6.	MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA.....	68
4.6.1.	CALIBRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	70
4.7.	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS	70
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
5.1.	ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE URBANIZACIÓN	71
5.2.	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	75
5.2.1.	ÁREA, UBICACIÓN, DELIMITACIÓN Y MORFOMETRÍA.....	75
5.2.2.	RED Y DENSIDAD DE DRENAJE	78
5.2.3.	CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS	84
5.2.3.1.	Climatología.....	84
5.2.3.2.	Suelos	85
5.2.3.2.1.	Uso actual del suelo y Número de Curva	86
5.3.	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	86
5.3.1.	SUBDIVISIÓN DE LA CUENCA.....	86
5.3.2.	MAPAS DE ISOYETAS	88
5.3.3.	CURVAS IDF SINTÉTICAS.....	90
5.3.4.	TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN (TC).....	94
5.3.5.	HIETOGRAMAS	97
5.4.	MODELO HIDROLÓGICO	99
5.5.	MODELO HIDRÁULICO	107

5.6. INFORME DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN	110
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
7. BIBLIOGRAFÍA	124
8. ANEXOS	130
8.1. HIETOGRAMAS RECALCULADOS CON LA PRECIPITACIÓN NETA INGRESADOS EN HEC – RAS PARA LA MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	130
8.2. COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA EN CADA SUBCUENCA PARA CADA PROYECCIÓN DE URBANIZACIÓN Y CADA LLUVIA DE LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO	133

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial. Agregado (a), semidistribuido (b) y distribuido (c)	29
Figura 2. Características de una cuenca.	32
Figura 3. Grilla de análisis cálculo de la pendiente de la cuenca según Horton.	33
Figura 4. Representación de una cuenca en el modelo de Onda Cinemática en HEC – HMS.	47
Figura 5. Ubicación geográfica de la zona de estudio.	53
Figura 6. Zoom Cuenca Arroyo Mameyal y el arroyo Mameyal.....	54
Figura 7. Metodología a utilizar.....	58
Figura 8. Delimitación de la cuenca Arroyo Mameyal.	60
Figura 9. Ubicación de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio. .	63
Figura 10. Diagrama representativo del proceso de escorrentía de una cuenca en HEC – HMS.	66
Figura 11. Diagrama representativo del proceso de simulación hidráulica en HEC – RAS.	67
Figura 12. Diagrama representativo de la modelación hidrológica e hidráulica.....	69
Figura 13. Vista de la cuenca en el año 1969.....	71
Figura 14. Vista de la cuenca en el año 2004.....	72
Figura 15. Vista de la cuenca en el año 2012.....	73
Figura 16. Vista de la cuenca en el año 2019.....	73
Figura 17. Ubicación de la Cuenca Arroyo Mameyal.....	76
Figura 18. Mapa de elevaciones de la cuenca en el software QGIS.	77
Figura 19. Mapa de pendientes de la cuenca en el software QGIS.....	77
Figura 20. Mapa de las corrientes de la zona de estudio.....	78
Figura 21. Ubicación de los puntos de inspección visual.	79
Figura 22. Cruce del arroyo con la Troncal de Occidente en el punto Villa Marta.	80

Figura 23. Obras hidráulicas correspondientes a la urbanización Ciudadela Bonanza (A: Laguna de Ciudadela Bonanza, B: Box Coulvert sobre Troncal de Occidente, C: Punto P4)	81
Figura 24. Cruce del arroyo en el sector La Purina (A: Época de verano, B: Época de invierno).....	82
Figura 25. Sección transversal del punto P5 (A: Época de verano, B: Época de invierno). 82	
Figura 26. Punto de inspección Aguas abajo.	83
Figura 27. Puente peatonal en el punto de inspección Aguas abajo.	83
Figura 28. Procesamiento del DEM de la cuenca Arroyo Mameyal con la herramienta SIG en el software HEC – HMS para obtener la subdivisión de cuencas.	87
Figura 29. Delimitación de subcuencas de la cuenca Arroyo Mameyal en Google Earth Pro.	88
Figura 30. Mapa de isoyetas de precipitaciones totales anuales (el área en amarillo corresponde al punto de estudio).....	89
Figura 31. Mapa de isoyetas de precipitaciones máximas en 24 horas (el área en naranja corresponde al punto de estudio).....	89
Figura 32. Recorrido del punto más alejado de la subcuenca C1 hasta la red principal y de la red principal hasta la salida de la cuenca (color azul).....	96
Figura 33. Modelo de cuenca generado en el software HEC-HMS para el periodo actual y proyecciones urbanísticas de 10, 25, 50 y 100 años, y puntos donde desemboca la escorrentía directa de las subcuencas (cuadro color rojo).....	100
Figura 34. Mapa de Números de Curva en la cuenca Arroyo Mameyal acorde al tipo de cobertura de la zona en la actualidad, año 2019. Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas y leñosos (color verde), Caseríos (color naranja), Caminos con firme (color amarillo), Caminos en tierra (color azul), Pastizales o pastos naturales (color morado).	101
Figura 35. Mapas de Números de Curva en la cuenca Arroyo Mameyal acorde al tipo de cobertura de la zona para las proyecciones urbanísticas de 10, 25, 50 y 100 años. Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas y leñosos (color verde), Caseríos	

(color naranja), Caminos con firme (color amarillo), Caminos en tierra (color azul), Pastizales o pastos naturales (color morado).	103
Figura 36. Modelo de Elevación Digital de la cuenca Arroyo Mameyal.....	107
Figura 37. Malla computacional que representa el área de flujo 2D de la escorrentía en la cuenca Arroyo Mameyal.	108
Figura 38. Mancha de inundación generada para la urbanización actual y la proyectada en 100 años por la crecida del arroyo Mameyal para las lluvias de los distintos periodos de retorno.	109
Figura 39. Mancha de inundación en la cuenca Arroyo Mameyal 9 horas después de una lluvia de 3 horas de duración correspondiente a un periodo de retorno de 10 años.	113
Figura 40. Mancha de inundación en la cuenca Arroyo Mameyal 9 horas después de una lluvia de 3 horas de duración correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.	114
Figura 41. Mancha de inundación en la cuenca Arroyo Mameyal 9 horas después de una lluvia de 3 horas de duración correspondiente a un periodo de retorno de 50 años.	115
Figura 42. Mancha de inundación en la cuenca Arroyo Mameyal 9 horas después de una lluvia de 3 horas de duración correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.	116
Figura 43. Puntos de inspección y sectores de la cuenca Arroyo Mameyal en los que se determinaron los factores de amenaza por inundación.	117
Figura 44. Zona con amenaza de inundación en el sector de Ciudadela Bonanza.....	118
Figura 45. Zonas con amenaza de inundación en el Sector del Centro Recreacional Villa Marta y La Purina.....	119
Figura 46. Zonas con amenaza de inundación en el Sector La Constancia.	120

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de una cuenca respecto a su área.....	32
Tabla 2. Parámetros Región Caribe.	39
Tabla 3. Valores de M, N y PT calculado para el Aeropuerto Rafael Núñez.	39
Tabla 4. Coeficientes correspondientes a cada Región.....	40
Tabla 5. Clasificación Grupo Hidrológico del suelo y Número de Curva.....	44
Tabla 6. Variación del porcentaje de la cobertura vegetal por años en la cuenca.....	74
Tabla 7. Parámetros geomorfológicos de la cuenca Arroyo Mameyal.	78
Tabla 8. Parámetros morfométricos de la red de drenaje.....	79
Tabla 9. Datos de las estaciones del IDEAM utilizadas.	84
Tabla 10. Rango de las precipitaciones mensuales promedio de todas las estaciones.....	90
Tabla 11. Valores de intensidad para las curvas IDF de Almanza et al. 1995.....	91
Tabla 12. Valores de intensidad para las curvas IDF de Díaz Granados 1998.	91
Tabla 13. Valores de intensidad para las curvas IDF de Hidroconsultores 2014.	91
Tabla 14. Valores de intensidad para las curvas IDF de Herrera y Llamas 2018.....	92
Tabla 15. Porcentaje de diferencia entre Herrera y Llamas (2018) vs Almanza et all. (1995).	92
Tabla 16. Porcentaje de diferencia entre Herrera y Llamas 2018 vs Díaz Granados 1998..	92
Tabla 17. Porcentaje de diferencia entre Herrera y Llamas 2018 vs Hidroconsultores (2014).....	93
Tabla 18. Valores de intensidad correspondientes a los distintos periodos de retorno.....	93
Tabla 19. Tiempo de entrada en la subcuenca C1.....	95
Tabla 20. Tiempos de recorrido de los conductos.....	95
Tabla 21. Tiempos de concentración en las subcuencas de la cuenca Arroyo Mameyal.....	96
Tabla 22. Intensidades de lluvia y altura de la lámina de agua para una lluvia de 3 horas en los distintos periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.	97
Tabla 23. Composición de la lluvia de diseño para un periodo de retorno de 10, 25, 50 y 100 años en función de una probabilidad de excedencia del 70%.....	98
Tabla 24. Características de los conductos.	100

Tabla 25. Porcentajes de urbanización proyectados para cada subcuenca.....	102
Tabla 26. Datos de entrada por subcuenca para cada proyección urbanística necesarios para el cálculo de pérdidas por SCS Número de Curva.....	104
Tabla 27. Caudales máximos de escorrentía que generan las subcuencas en mm.....	105
Tabla 28. Caudales máximos que se generan en los tramos del arroyo Mameyal en m ³ /s.	106
Tabla 29. Pérdidas por infiltración en la cuenca Arroyo Mameyal.	110
Tabla 30. Coeficientes de escorrentía calculados en la cuenca Arroyo Mameyal.	111

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Proporción de crecimiento urbano.	20
Gráfica 2. Hietograma de precipitaciones.	36
Gráfica 3. Crecimiento del área de urbanización lineal en porcentaje por año.....	74
Gráfica 4. Datos de temperatura media mensual multianual.	85
Gráfica 5. Curvas IDF del área de estudio.	94
Gráfica 6. Curvas de probabilidad de excedencia para la composición interna de una tormenta de la ciudad de Cartagena.	98
Gráfica 7. Hietogramas de diseño ingresados en HEC – HMS para la modelación hidrológica.....	99
Gráfica 8. Hidrogramas de crecida en la salida de la cuenca para los distintos periodos de retorno	112

RESUMEN

La cuenca Arroyo Mameyal está ubicada a unos 10 km de la ciudad de Cartagena en el municipio de Turbaco, Bolívar. Está comprendida por la zona residencial de Turbaco, espacios recreacionales, zonas verdes y Ciudadela Bonanza, en su mayoría zonas urbanizadas que influyen en la variación del coeficiente de escorrentía de la cuenca. Por esta razón, este proyecto de investigación tiene como objetivo analizar las condiciones hidrológicas e hidráulicas de la cuenca Arroyo Mameyal mediante la simulación de eventos de escorrentía en los softwares HEC-HMS y HEC-RAS, para así predecir el comportamiento de la cuenca con diferentes porcentajes de urbanización y con lluvias a diferentes periodos de retorno, 10, 25, 50 y 100 años, y establecer los riesgos actuales y futuros de las zonas propensas a sufrir desbordamientos e inundaciones aguas abajo de la corriente principal. La investigación está dividida en tres etapas: análisis de la cobertura vegetal y proyección de urbanización, análisis del comportamiento hidrológico y análisis del comportamiento hidráulico.

En la primera etapa, se realizó un análisis de la variación de los porcentajes de cobertura vegetal mediante la comparación de imágenes satelitales desde el año 1969 hasta el año 2019, encontrando que la cuenca en 50 años tuvo una disminución del 15% de la cobertura vegetal y actualmente se encuentra un 37% urbanizada, y se estimó en 100 años la cuenca podría estar urbanizada en un 82%.

En la segunda etapa del proyecto, se estimó el impacto del proceso de urbanización actual y futuro en la cuenca y se determinó que existe un aumento en el Número de Curva ponderado para la cuenca entre el periodo actual y la proyección para 100 años, y por ende, una disminución en la capacidad de retención en la misma. Además, según lo proyectado se podría tener un aumento del coeficiente de escorrentía de hasta un 47%.

Por último, se utilizaron los volúmenes de esorrentía de la cuenca para determinar el potencial de inundación en la misma, consiguiendo que los sectores La Purina y La Constancia son las zonas con mayor potencial de inundación en la cuenca, debido a que estas zonas son relativamente planas y paralelas al arroyo Mameyal

INTRODUCCIÓN

Una cuenca funciona como un sistema en el que interactúan el agua, el suelo, el clima y quienes la habitan, y a pesar de que existe un equilibrio automático de este, urbanizar una cuenca implica construir infraestructura, pavimentar caminos y calles, y todo esto genera un alto grado de impermeabilización del suelo por la remoción de la cobertura vegetal, anulando las condiciones naturales de infiltración y almacenamiento de la misma, es decir, podrían surgir problemas en la capacidad hidrológica e hidráulica de la cuenca que den lugar a eventos catastróficos como crecidas, desbordes e inundaciones de los arroyos y ríos. Algunas de las consecuencias del acelerado crecimiento urbanístico, la deforestación y el cambio del uso del suelo pueden ser la disminución de la capacidad de retención del agua en una cuenca, disminución en la recarga de acuíferos, también un aumento en la escorrentía superficial, cambios en los caudales máximos y/o en la velocidad del agua.

Una cuenca con un porcentaje alto de urbanización o alguna que esté impermeabilizada aguas arriba, podría aumentar el riesgo de inundación aguas abajo o bien podría generar un riesgo puntual, facilitando el arrastre de sedimentos o agentes que no sean naturales que terminen contaminando los ecosistemas. Inclusive, algunas no disponen de un buen manejo pluvial, como es el caso de la ciudad de Barranquilla, en donde la cuenca oriental de la ciudad tiene un porcentaje de urbanización por encima del 90% y carece de un drenaje pluvial, cerca de 100 km de vía se convierten en el drenaje pluvial y aproximadamente entre 30 y 100 m³/s son escorrentía superficial durante la temporada de lluvias, estos caudales son altos y peligrosos que dan lugar a eventos catastróficos como crecidas, desbordes e inundaciones, y ponen en riesgo la vida de las personas, la infraestructura y la economía de la ciudad (Ávila, 2012).

Por esta razón, con el paso del tiempo si en las cuencas que tienen un alto grado de urbanización no se implementan Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), tales como techos verdes, zanjas y pozos de infiltración, cunetas verdes, entre otros; para reducir

los volúmenes de escorrentía, los caudales de escurrimiento serán más altos y las velocidades de escorrentías serán menores, aumentando el riesgo a inundarse las zonas bajas de la cuenca ante las manifestaciones de fenómenos meteorológicos como las lluvias (Martínez, 2017).

Dado que el impacto de la urbanización en el ciclo hidrológico es complejo porque afecta los procesos hidrológicos, estos son analizados usando modelos hidrológicos (Brilly, Rusjan, & Vidmar, 2006). Los modelos hidrológicos más comunes son los que simulan los procesos de transformación lluvia – escorrentía en una cuenca como un sistema en el que todos los componentes se encuentran interconectados, y el uso y la evaluación de dicho modelo son esenciales para entender los cambios en la cuenca, y recuperar y mantener el ciclo del agua (citado por Jiho, Gijung, Chulsang, Sangdan, & Jaeyoung, 2010).

La cuenca en estudio, Arroyo Mameyal, está ubicada en Turbaco, un municipio de Bolívar en Colombia que se encuentra aproximadamente a unos 10 km de la ciudad de Cartagena de Indias, con un área de 648 ha y una altura promedio de 200 m sobre el nivel del mar, con un suelo conformado por calizas arrecifales (Ingeominas, 2001) que permiten la infiltración y conducción de agua hacia otros estratos del suelo. El arroyo Mameyal es la corriente principal que atraviesa la cuenca, tiene una longitud de 4,3 km y hacia él drena toda la escorrentía superficial de la zona, además de que este sirve de fuente de captación para la comunidad. A lo largo de los años el uso del suelo en la cuenca ha sufrido cambios debido al proceso de urbanización en la cuenca y para analizar estos cambios se tendrá en cuenta la zona residencial del municipio de Turbaco, el área con baja urbanización en la cuenca y el proyecto urbanístico Ciudadela Bonanza.

En primer lugar, Turbaco es de relieve ondulado con un moderado drenaje, el suelo está compuesto por roca caliza con restos de corales petrificados, muy permeable a las aguas lluvias, y su casco urbano tiene un área de 725 ha (Alcaldía de Turbaco, 2012), de los cuales el 20% se encuentra en riesgo de inundación, producto de carecer de un sistema de drenaje pluvial, de baja planificación urbana y de la impermeabilización del suelo,

CARDIQUE - Universidad de Cartagena (2011) citado por Guerrero Pájaro (2016). Por otro lado, tenemos el área con poca urbanización en la cuenca que corresponde a haciendas, centros recreacionales y zonas verdes, que por sus condiciones geográficas y ambientales son de gran interés para realizar proyectos urbanísticos en el sector.

En cuanto al proyecto urbanístico Ciudadela Bonanza, está ubicado al lado derecho de la Troncal de Occidente, vía Turbaco – Arjona, actualmente tiene un área construida de 28.5 ha con un registro de 1255 casas y una meta de construir 2400 viviendas. Dentro de la urbanización se encuentra una laguna de origen natural que drena hacia el arroyo Mameyal, la Laguna Bonanza, que tiene un área de 2.5 ha en la que se hacen vertimientos de aguas residuales domésticas previamente tratadas y que a su vez almacena la escorrentía de un área aproximada de 30 ha que corresponden a la zona urbanizada. A través de un canal rectangular de 1.2 m de ancho y 0.4 m de alto y posteriormente mediante un box coulvert de 2 m de alto por 3.5 m de ancho, la laguna aporta un caudal de escorrentía al arroyo Mameyal. Lo anterior permite identificar que existe una alteración en la permeabilidad del suelo gracias a la deforestación necesaria para realizar un proyecto urbanístico de tal magnitud, por lo que se verán afectados los volúmenes de escorrentía superficial que drenan hacia el arroyo Mameyal, afectando así directamente el ciclo hidrológico de la cuenca Arroyo Mameyal.

La deforestación e impermeabilización del suelo son sólo algunas de las consecuencias que trae consigo dicha urbanización, también está el cambio de régimen en la dinámica natural del agua que puede afectar a los ecosistemas o causar inundaciones aguas abajo. Debido a que las comunidades muchas veces desconocen la relación existente entre lo que puede llegar a ser un desastre natural y la alteración de los componentes hidrológicos, las preocupaciones de los habitantes principalmente se deben a la calidad del agua potable o a los olores generados por la contaminación de los cuerpos de agua, sólo hasta que ocurren crecidas e inundaciones indagan acerca de la causa de dicho desastre. Según el periodo invernal de los años 2010 y 2011 (Guzmán, 2011) más de seis barrios organizados del municipio de Turbaco se vieron afectados, presentando un alto índice de inundación.

Actualmente, no existe ningún estudio que permita identificar y señalar cuáles han sido las causas y cómo se ha visto afectada la cuenca Arroyo Mameyal por la transformación de su paisaje ambiental, pero existen investigaciones que proponen la modelación de parámetros de precipitación y caudales para evaluar cómo se podrían mitigar las inundaciones y desbordamientos (Gülbaz & Kazezyilmaz-Alhan, 2013); otras proponen la utilización de modelos como HEC RAS y HEC HMS para el buen manejo de los recursos hídricos, así mismo otros proponen el uso de estos software para mitigar y reducir la extensión de las inundaciones y poder adoptar mejores prácticas de gestión y desarrollar el bajo impacto de los desastres naturales (Thakur, Parajuli, Kalra, Ahmad, & Gupta, 2017)

Pero ¿cuál es el estado en el que se encuentra actualmente la cuenca Arroyo Mameyal? ¿Cuáles han sido los posibles cambios inducidos por la urbanización en las características hidrológicas de la cuenca? ¿Cuáles son los riesgos actuales y futuros generados por la transformación urbanística de la cuenca Arroyo Mameyal? Con el fin de dar respuesta a estos interrogantes en este trabajo de investigación se realizó un análisis de los cambios que ha sufrido la cuenca Arroyo Mameyal en su proceso de urbanización, mediante la simulación de datos meteorológicos e hidrológicos en la herramienta HEC-HMS y el comportamiento hidráulico en HEC-RAS, para realizar un diagnóstico de las condiciones actuales y futuras de la cuenca con diferentes proyecciones de urbanización, 0, 10, 25, 50 y 100 años, y con esto sus factores de amenaza por inundación, encontrando que los sectores La Purina y La Constancia pueden tener una amenaza, ya que son los más vulnerables a inundarse y por ende tienen un riesgo alto a sufrir fenómenos de inundación.

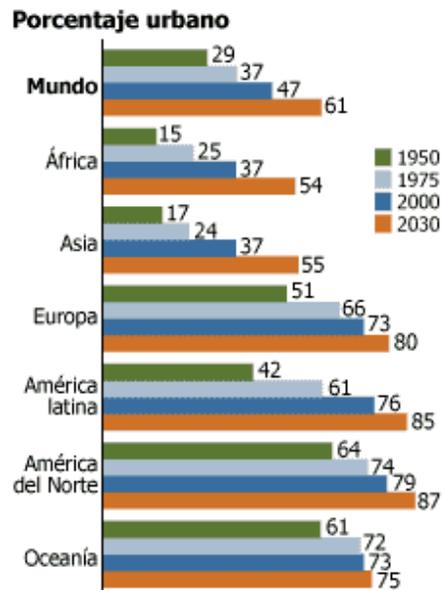
1. MARCO DE REFERENCIA

1.1. ESTADO DEL ARTE

A través del tiempo la humanidad se ha convertido en un factor determinante para los cambios ambientales que se presentan en el planeta, con la llegada de la revolución industrial y el aumento de la población mundial, ha incrementado en mayor proporción sus efectos en el medio ambiente, aún más si se tiene en cuenta que la población mundial se está duplicando, en el caso de la población urbana esta se triplica, debido a las constantes migraciones desde lo rural a lo urbano. Lo que hace que esta interacción entre seres humanos y el medio ambiente sea todavía más importante (Torrey, 2004).

El crecimiento de los procesos urbanísticos es diferente según la región del mundo, como se muestra en la Gráfica 1, los países americanos son los que tienen mayor proporción de su población en áreas urbanas, pero el continente Asiático será la región con mayor crecimiento según las proyecciones para los próximos 30 años (ONU, 2002).

Gráfica 1. Proporción de crecimiento urbano.



Fuente: (ONU, 2002)

Dado que el crecimiento urbano está en aumento, el área rural se ve minimizada y modificada por el hombre, es ahí donde se realizan estudios para determinar de qué manera afecta el crecimiento urbano al área rural. Una forma de hacerlo es evaluando la permeabilidad del suelo que se va a urbanizar, para así conocer los cambios que se generan y como afectan estos a la población que ocupará esas zonas, o que ya las ocupa. Existen diferentes métodos para la comprobación de este aspecto, el más utilizado es una modelación de los parámetros de precipitación y caudales ya que estos son los que sufren los cambios de la urbanización, debido a estos cambios se hace necesaria la investigación de soluciones específicas para evitar inundaciones y desbordamientos (Gülbaz & Kazezyilmaz-Alhan, 2013).

En algunos trabajos de investigación analizados calculan ellos mismos los datos de precipitaciones y caudales necesarios para determinar los efectos de las áreas urbanizadas sobre una cuenca, en este trabajo de investigación se tomó la información de empresas que ya han hecho esta toma de datos puesto que no se cuenta con los equipos para realizarlos, siendo una desventaja en comparación con el proyecto realizado por Chen, Chuang & Cheng en 2014, donde sus datos manejan una mayor veracidad al estar comprobados por ellos mismos en tiempo real.

Un estudio hecho en la ciudad de Posadas-Argentina que tiene como objeto analizar los efectos de la impermeabilización causada por la urbanización presente en la zona de las cuencas urbanas de la ciudad, por medio de datos de estudios de hidrología de arroyos, recopilación de datos de densidad poblacional, utilizando técnicas SIG (Sistema de Información Geográfico), interpretando y analizando las imágenes satelitales, todo esto para plantear dos escenarios, el de una cuenca real aplicando los códigos de planeamiento y edificación de la ciudad y el de una cuenca ideal tomando a Posadas como una ciudad que convive con sus recursos hídricos incorporándolos al paisaje urbano (Gutierrez & Ayala, 2016). Proponiendo al final soluciones como la educación ambiental, la evaluación de alternativas para la protección y recuperación de los cauces naturales y cuerpos de agua, que permitan lograr una buena convivencia entre el agua, la urbanización y los habitantes.

La diferencia de esta investigación en la que se hará un proceso similar al de ellos, es que no se plantearán dos escenarios, sino que será uno solo en el que además de obtener los efectos del proceso de urbanización actual, se estimarán los efectos futuros teniendo en cuenta un posible aumento de la urbanización.

El uso de modelos numéricos para la estimación de los principales parámetros de los cauces fluviales ha estado en constante cambio. La evolución de los ordenadores y los avances en investigación han dado a luz modelos cada vez más robustos para la estimación de los parámetros hidrodinámicos de los cauces. Los modelos unidimensionales pueden representar determinadas ventajas respecto a los bidimensionales, principalmente en los tiempos de cálculo (Sierra Porgutá, 2015).

Los modelos hidrológicos e hidráulicos han permitido grandes avances en los estudios de las cuencas hidrográficas, la utilización de modelos como HEC RAS y HEC HMS los cuales han recibido una gran acogida por la comunidad mundial de ingenieros que se desempeñan en el área de la meteorología, hidrología, hidráulica y otras áreas relacionadas con el manejo del recurso hídrico (Ramos Moreno & Pacheco Fontalvo, 2017).

El cambio climático y el cambio en el uso de la tierra han planteado los desafíos asociados con el aumento de la escorrentía y la gestión de inundaciones. Estudios como el de Balbhadra Thakur y otros, presentado en 2017, evalúa la extensión de la llanura de inundación en el área de estudio: cuenca hidrográfica de cobre (CSW) en Champaign, Illinois; utilizando la precipitación y el uso del suelo conocidos, utilizado en el centro de ingeniería hidrológica-sistema de modelado hidrológico (HEC-HMS) y el Centro de Ingeniería Hidrológica-Sistema de Análisis de Río (HEC-RAS) como la herramienta para desarrollar el modelo de evaluación de escorrentía e inundación de llanuras de inundación para precipitación conocida. El modelo HEC-HMS se calibró ajustando el número de curva y la n de Manning, y la sensibilidad del modelo al número de curva es alta en comparación con la n de Manning. La escorrentía transformada con la ayuda de HEC-HMS se utiliza para la cartografía de inundación con HEC-RAS. El mapa de inundación generado a través

de ese estudio es la predicción del modelo para el flujo máximo de 2015, indicando que se espera que la región se inunde en mayor medida si el evento de lluvia es más intenso y de menor duración en comparación con el evento considerado, y recomienda que para mitigar las inundaciones y reducir su extensión se pueden adoptar mejores prácticas de gestión (Thakur, Parajuli, Kalra, Ahmad, & Gupta, 2017).

El estudio de Hadi Tahmasbine y otros, desarrolló un marco teórico para el modelado de inundaciones a escala regional que integra SIG y dos modelos hidrológicos, los modelos del Centro de Ingeniería Hidrológica-Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS) y el Centro de Ingeniería Hidrológica-Sistema de Análisis del Río (HEC-RAS) son utilizados para simular y modelar relaciones entre lluvia y escorrentía en el río Karun, SW Irán. El río Karun es el dominio del estudio porque es una región sujeta a frecuentes inundaciones repentinas. El modelo consta de un modelo de lluvia – escorrentía (HEC-HMS) que convierte el exceso de precipitación en flujo terrestre y escorrentía de canales, así como un modelo hidráulico (HEC-RAS) que modela el flujo de estado inestable a través de la red de canales fluviales basado en el HEC -HMS hidrogramas derivados. De acuerdo a los resultados obtenidos, el sistema de modelado proporciona un entorno en el que todos los cálculos realizados por las diferentes oficinas regionales y municipales involucradas en el entrenamiento fluvial, trabajos hidráulicos y actividades similares convergen, y tienen la posibilidad de compartir los mismos supuestos fundamentales en lo que respecta a los coeficientes de rugosidad y los datos hidrológicos, y mantener así una actualización continua de la base de datos que incluya trabajos en curso, para tener una representación consistente y siempre realista de la red fluvial, sus alcances críticos y las prioridades de intervención (Tahmasbinejad, Feyzolahpour, Mumipour, & Zakerhoseini, 2012)

En el estudio presentado por Luis Sierra en 2015 se analizan las características principales de los modelos hidráulicos IBER y HEC-RAS, con el fin de estimar los parámetros y resultados disponibles en cada modelo realizando una caracterización de cada modelo. El sitio de proyecto resulta ser un lugar de especial importancia principalmente por existir manchas de una creciente máxima asociada a un periodo de retorno alto, por lo tanto, la

comparación de manchas producto de los modelos respecto a un evento real resulta de gran importancia para el estudio de crecientes sobre llanuras de inundación en donde las filosofías de los modelos son eminentemente distintas. Así mismo el municipio de Villapinzón resulta ser un caso especial al encontrarse atravesado por el río Bogotá, y al presentarse la creciete histórica los daños causado fueron altos, por lo tanto, el análisis de las modelaciones se puede enfocar hacia el análisis de riesgos para la zona urbana del municipio (Sierra Porgutá, 2015)

El estudio desarrollado por Alfredo Moreno y José Pacheco en 2017 presentó a través de los modelos de HEC RAS y HEC HMS las modelaciones para determinar el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Frío ubicada en el municipio de Zona Bananera, departamento del Magdalena como producto de las inundaciones que se han presentado en los últimos años. Indicando en sus resultados las áreas donde se presentan los principales inconvenientes de carácter hidráulico e hidrológico, debido, según los autores, a la configuración geométrica de la batimetría del río y al desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas que han generado cambios en el uso del suelo, modificando los números de curva y aumentando la escorrentía hacia los afluentes y finalmente hacia el río principal (Ramos Moreno & Pacheco Fontalvo, 2017)

En el artículo de Erasmo Rodríguez y otros, se presenta la propuesta de una metodología para la generación de mapas de inundaciones y clasificación de zonas de amenaza, utilizando de forma acoplada las herramientas de modelación hidrológica HEC- GeoHMS y HEC-HMS, y las herramientas de modelación hidráulica HEC-GeoRAS y HEC-RAS, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, la cual se aplica utilizando como caso de estudio la cuenca del río Las Ceibas, con un área de aproximadamente 297 km². Utilizando para la calibración del modelo hidrológico HEC-HMS tormentas registradas, y tormentas sintéticas para la generación de eventos torrenciales, que son analizados hidráulicamente utilizando la aplicación de flujo no permanente del modelo HEC- RAS. Los resultados obtenidos permiten concluir que el uso adecuado, sistemático y responsable de herramientas de procesamiento de información geográfica, combinadas con la aplicación de

modelos hidrológicos e hidráulicos, correctamente calibrados y validados, brinda a los tomadores de decisiones información valiosa y oportuna para la implementación de medidas que tiendan a reducir el impacto de eventos torrenciales y catastróficos sobre la población (Rodríguez, González, Medina, Pardo, & Santos, 2007).

Además de estas existen otras bibliografías que no manejan similitud completa con este trabajo, lo que quiere decir que es una investigación innovadora, puesto que trata de una forma diferente el estudio del aumento de la urbanización desarrollado por los autores anteriormente mencionados en este marco de referencia, aunque es posible que genere algunas incertidumbres en los resultados dado que a pesar de no presentar escasez de datos como en el análisis hidrológico desarrollado por Maza, y otros (1995), en este trabajo no se manejan datos propios, sino de entidades que los poseen, como lo son IDEAM y CARDIQUE. Sin embargo, los datos que arroje el modelo utilizado serán de utilidad para bases de planificación urbana futura.

1.2. ANTECEDENTES

En Colombia las problemáticas ecológicas actuales por la urbanización también responden a las lógicas de la globalización, esto es por desconocer que no solo se deben incluir los procesos económicos a la hora de pensar en urbanizar, sino también los procesos referentes al ecosistema y los espacios no urbanos. Actualmente las peores tragedias en Colombia son causadas por inundaciones y deslizamientos debidos en gran parte a la ausencia en la planificación del urbanismo, estos desastres ocurren cada vez con más frecuencia. En 2010 y 2011 ya van contados más de tres millones de personas afectadas, lo que equivale a cerca del 6,5% de la población del país. Anteriormente ya han ocurrido grandes desastres naturales como el terremoto de Popayán, en 1983; la tragedia de Armero, en 1985, la sequía generada por el fenómeno del Niño, en 1992; el derrumbe del relleno sanitario de Doña Juana, en 1997, y el terremoto del Eje Cafetero, en 1999, los cuales después de haber ocurrido llamaron la atención de las entidades con respecto a la optimización e

implementación de las debidas políticas para gestionar y prevenir futuros riesgos en Colombia (Guzmán, 2011). Por lo cual es importante tener una mejor planificación, anticipando, poniendo en marcha planes, estudios y seguimientos para conseguir una mejor urbanización.

Es de vital importancia manejar bases de investigaciones anteriores para el desarrollo y la fundamentación de un proyecto, para de esta manera poder desarrollarlo de manera completa. En Cartagena la empresa encargada de la gestión y protección de los recursos medioambientales es CARDIQUE, en donde se encuentran los expedientes 866-2 y 866-6 que exponen claramente la descripción del proyecto de vivienda Ciudadela Bonanza con estudios hechos para el aprovechamiento del cuerpo de agua que los rodea, sin embargo estos se centran en estudios biológicos por quejas e inconformidad de la comunidad con el abastecimiento de agua y las perturbaciones sufridas a causa del mal uso del cuerpo de agua, también esos mismos expedientes muestran en su recopilación de información entrevistas con la comunidad que manifiesta inundaciones y estanco de agua frente a sus viviendas (CARDIQUE, 2011). Por otra parte, se encuentran los informes No. 0012-15 y No. 0180-15 donde se realizaron seis puntos de muestreos en bonanza, para la entrada, salida, arroyo Mameyal, arroyo Mameyal 2 y la entrada y salida PTAR Bonanza. (CARDIQUE, 2015).

Son notorias las afecciones generadas por la falta de planeación de la alcaldía de Turbaco, que aprueba permisos y no pasa nada (Caracol Radio, 2016), esto genera descontento en la población y deja ver la falta de investigación y planificación para la adecuada utilización y aprovechamiento del suelo.

Estudios similares como el realizado en Cundinamarca, Colombia, sobre la cuenca del río Frío en el municipio de Chía (Perez Romo & Vanegas Sandoval, 2016), permiten comparar y tener una base de un trabajo de grado parcialmente análogo con el presente estudio, puesto que desarrollan una investigación sobre una cuenca y las afecciones que tienen

hidrológica e hidráulicamente, manejando programas como SMADA y HEC-RAS, siendo este último para modelar estructuras de control sobre el río Frío.

A nivel departamental, se realizó recientemente en la Universidad de Cartagena una investigación denominada Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar (Cañaveras Quevedo & Perez Barrios, 2018), en la que se realizaron encuestas a la comunidad para determinar el comportamiento natural de las inundaciones y luego a través de los softwares HEC – HMS, HEC – RAS y QGIS se estimaron las zonas con amenaza de inundación y niveles de lámina de agua, siendo este el estudio con la metodología más similar que se haya realizado a nivel departamental.

Localmente en la Universidad de Cartagena también se desarrolló una investigación denominada Evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca hidrográfica del Arroyo Policarpa (Del Castillo & Ortiz, 2013) para el control de inundaciones, en esta se estudian los aspectos hidrológicos e hidráulicos y por medio de programas como Arcgis, AutoCAD, Google Earth y Global Mapper realizan los análisis correspondientes a ese estudio, el presente trabajo también maneja estudios hidrológicos e hidráulicos y coincide en los programas a utilizar, aunque difiere en la metodología propuesta y maneja un enfoque diferente, pero sigue siendo uno de los pocos estudios similares que se hayan realizado a nivel local.

En la zona de estudio no existen estudios detallados a fines con el objetivo de nuestra investigación, solo archivos y expedientes donde se trata brevemente partes importantes de la problemática causada por la urbanización. Dado esto, es de vital importancia el desarrollo de esta investigación para agrupar de manera eficiente los estudios previos más los nuevos a realizar por los autores y generar soluciones viables ante las consecuencias de la urbanización de cuencas.

1.3. MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo del presente proyecto fue necesario tener en cuenta algunos conceptos y generalidades referentes a un estudio hidrológico e hidráulico en cuencas. Así como también algunos programas que permiten la modelación de los factores hidrológicos e hidráulicos que influyen en la zona de estudio.

1.3.1. MODELACIÓN NUMÉRICA

El modelado numérico (a veces llamado modelización numérica) es una técnica basada en el cálculo numérico, utilizada en muchos campos de estudio (ingeniería, ciencia, etc) desde los años 60 para validar o refutar modelos conceptuales propuestos a partir de observaciones o derivados de teorías anteriores. Un modelo numérico es una herramienta que sirve para proveer respuestas cuantitativas a una serie de preguntas asociadas a un problema.

1.3.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Un modelo hidrológico es aquel que simula los procesos de transformación lluvia – escorrentía en una cuenca representada como un sistema de componentes hidrológicos e hidráulicos interconectados. Existen diferentes tipos de modelos hidrológicos dependiendo de la exactitud que se desee utilizar y los datos que se manejen para esa exactitud. (Menendez & Re, 2009)

Estos tipos de modelos hidrológicos son:

- Agregados o agrupados
- Semidistribuidos
- Distribuidos

Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos superficial y subterráneo. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, sub superficiales y subterráneos, afirmación que es válida para cuencas muy pequeñas. Siendo la cuenca homogénea, se puede representar como un único elemento de características constantes, dando lugar a los llamados “modelos agregados” o “agrupados”.

A medida que el tamaño de la cuenca se incrementa, es más probable que los tipos de suelo y sus características varíen a lo largo y ancho de la cuenca y el uso de éste modelo de representación espacial va perdiendo representatividad. Es así que, a mayores áreas, se puede discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico y analizar cada una de ellas de forma independiente para luego combinar y/o superponer sus efectos. A estos se les conoce como modelos “semidistribuidos”. A pesar que los modelos semidistribuidos representan mejor las posibles variaciones de las características del suelo, efectos de pendiente, entre otros, aun así, representa una simplificación. Con el fin de alcanzar la mayor representatividad, la cuenca se divide en elementos mucho más pequeños, de geometría usualmente uniforme, llamados “grillas”. Estos modelos son llamados “modelos distribuidos” y realizan un balance hídrico en cada grilla, transmitiendo su efecto a las grillas adyacentes. (Cabrera, s.f.)

Figura 1. Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial. Agregado (a), semidistribuido (b) y distribuido (c)



Fuente: (Xu, 2002)

1.3.3. MODELO DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron dos modelos del HEC (Hydrologic Engineering Center), para el cálculo hidrológico se utilizó el HMS (Hydrologic Modeling System) y para el cálculo hidráulico el RAS (River Analysis System).

Básicamente, el HEC – HMS es un modelo matemático que describe la respuesta de una cuenca o varias ante un evento de escorrentía a través de 4 módulos computacionales: Runoff-volume, Direct-runoff, Baseflow y Routing (Hydrologic Engineering Center, 2000). En el caso de esta investigación, existen tres procesos adecuados para cumplir con los objetivos propuestos, Runoff-volume, Direct-runoff y Routing, ya que el primero calcula el volumen de pérdidas por infiltración, almacenamientos, evaporación, transpiración y sustracción del suelo, árboles, techos, parqueaderos, etc.; el segundo realiza el proceso de transformación lluvia – escorrentía para simular qué ocurre con ese exceso de precipitación en la cuenca que no abarca el módulo de pérdidas; y el tercero genera los hidrogramas en la cuenca para conocer el comportamiento hidrológico de los elementos de la cuenca.

El método para el cálculo de pérdidas por infiltración utilizado en esta investigación fue el SCS Número de Curva que utiliza las ecuaciones para Número de Curva (CN) del Soil Conservation Service (SCS), el método de transformación lluvia – escorrentía fue el SCS Hidrograma Unitario que utiliza un modelo simplificado de un hidrograma unitario triangular propuesto por el SCS y para el enrutamiento fue el método de Onda Cinemática que utiliza una combinación de la ecuación de continuidad y de momento (St. Venant).

Por otro lado, se tiene el HEC – RAS, un software que permite realizar modelaciones hidráulicas y que consta de 4 tipos de análisis: Steady Flow, Unsteady Flow, Sediment Transport y Water Quality (Hydrologic Engineering Center, 2016). Para cumplir con los objetivos de la investigación se utilizó Unsteady Flow, este utiliza una combinación de las ecuaciones de continuidad y las de Navier Stokes, se utilizó la herramienta 2D Flow Area para representar el volumen de precipitación neta en la cuenca Arroyo Mameyal.

Las cuencas hidrográficas en el HEC funcionan como una serie de cuencas o subcuencas en las que cae el agua lluvia, se generan unas pérdidas y una escorrentía, por lo que parte de datos de precipitación y otros parámetros meteorológicos para simular la respuesta de la cuenca. A diferencia de otros trabajos realizados como Hydrologic response of a tropical watershed to urbanization en el que utilizaron un modelo hidrológico totalmente distribuido (MOBIDIC) que simula los balances de energía y tiene en cuenta la dinámica de almacenamiento de agua en el suelo como estado básico para el equilibrio hídrico, y este lo relacionan con los datos hidrométricos tomados en tiempo real por los sensores con el fin de caracterizar la respuesta potencialmente no lineal de la cuenca ante la transformación urbana.

1.3.4. CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DE LAS CUENCAS

Una cuenca es una zona de la superficie de la tierra que, si se supone impermeable, al caer alguna precipitación (agua, granizo o nieve) escurrirá o será drenada por un sistema de corrientes a un mismo punto de salida con determinada velocidad y tiempo de escurrimiento. Está delimitada por el parteaguas, que es la línea imaginaria que une los puntos con mayor altitud de la cuenca.

La característica principal de una cuenca es su tamaño, en este caso se hablará de cuencas pequeñas, según (Chow, 1964) una cuenca pequeña es aquella que es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración, es decir, que predominan las características fisiográficas de la cuenca sobre las del cauce, Chow fijó como límite para considerar una cuenca pequeña aquella que fuera menor de 25 km², sin embargo, para I – Pai – Wu y Sprigall este límite es de 250 km² (Aparicio Mijares, 1992). Para cuencas grandes el efecto de almacenamiento en el cauce es muy importante, por lo cual deberá darse mayor atención a las características de éste.

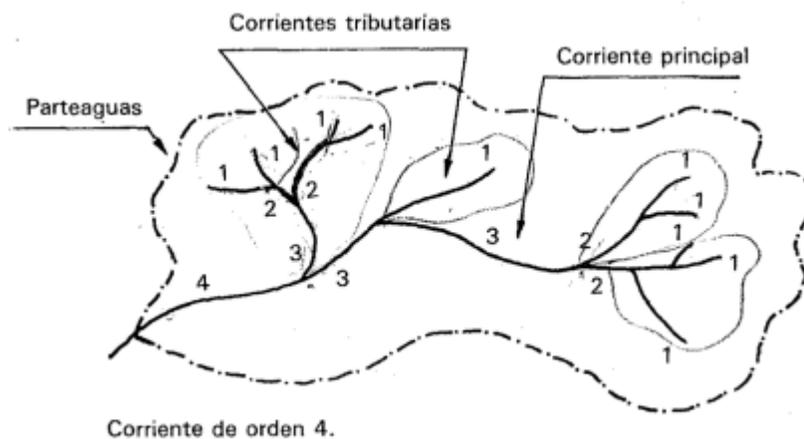
Tabla 1. Clasificación de una cuenca respecto a su área.

Área de la cuenca en km ²	Descripción
< 25	Muy Pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – Pequeña
500 a 2500	Intermedia – Grande
2500 5000	Grande
> 5000	Muy Grande

Fuente: (Aparicio Mijares, 1992)

Una cuenca se entiende como un sistema que puede analizarse a partir de sus entradas, salidas y pérdidas. El área de la cuenca es el parámetro más importante para conocer el promedio del gasto máximo anual de escurrimientos y el volumen de sedimentos ya que está directamente relacionado con ambos. El área está definida como: la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas. Para conocer las dimensiones de una cuenca es necesario contar con cartas topográficas de escala tal, que permitan trazar el parteaguas de la cuenca. El colector principal se define como el cauce que va desde la salida de la cuenca hacia aguas arriba, siendo la corriente de mayor orden, cuando se llega a una bifurcación con dos corrientes del mismo orden se toma la que tiene mayor área de drenaje.

Figura 2. Características de una cuenca.



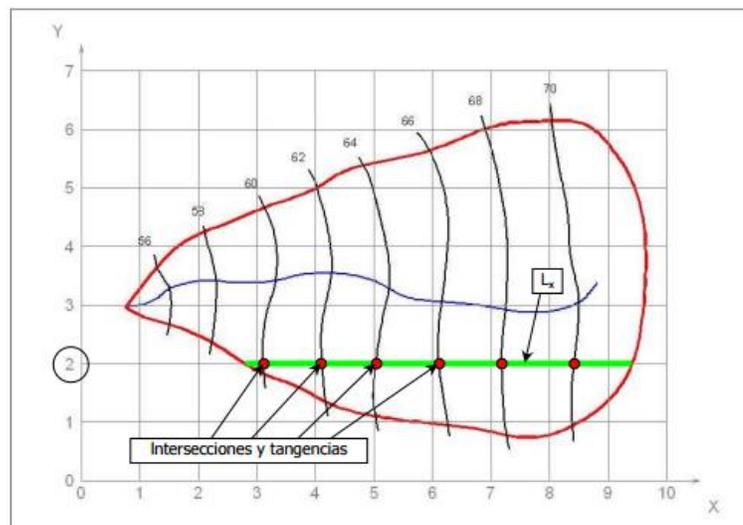
Fuente: (Rivera Molina, 2012)

Definido el cauce o colector principal, se traza su perfil con base en las parejas de valores de distancia y cotas. Se toma como origen la salida de la cuenca o el sitio de interés hacia aguas arriba con las distancias medidas en kilómetros anotadas en las abscisas y las respectivas altitudes en metros sobre el nivel del mar en las ordenadas. Obtenida la gráfica del perfil, se definen otros dos parámetros físicos importantes; la longitud total del cauce o del colector principal, L_c y su desnivel total en metros, H . Conocidos los valores de L_c y H es posible conocer otro parámetro físico de mucha utilidad, que es la pendiente promedio del cauce principal, S_c . Fundamentalmente existen varios métodos para la obtención de la pendiente media, en este caso utilizaremos uno de los más comunes, el Método de Horton.

1.3.4.1. Método de Horton

Consiste en trazar una malla de cuadrados sobre la proyección planimétrica de la cuenca orientándola según la dirección de la corriente principal. Si se trata de una cuenca pequeña, la malla llevará al menos cuatro (4) cuadros por lado, pero si se trata de una superficie mayor, deberá aumentarse el número de cuadros por lado, ya que la precisión del cálculo depende de ello. Una vez construida la malla, en un esquema similar al que se muestra en la Figura 3, se miden las longitudes de las líneas de la malla dentro de la cuenca y se cuentan las intersecciones y tangencias de cada línea con las curvas de nivel.

Figura 3. Grilla de análisis cálculo de la pendiente de la cuenca según Horton.



La pendiente de la cuenca en cada dirección de la malla se calcula así:

$$S_x = \frac{N_x D}{L_x} \quad (1)$$

$$S_y = \frac{N_y D}{L_y} \quad (2)$$

Siendo:

S_x, S_y : Pendiente media en los sentidos X y Y de la ecuación de Horton.

N_x, N_y : Número total de intersecciones y tangencias de líneas de la malla con curvas de nivel, en el sentido X y Y, respectivamente.

D: Equidistancia entre curvas de nivel.

L_x, L_y : Longitud total de líneas de la malla en sentido X y Y, dentro de la cuenca.

Horton considera que la pendiente media de la cuenca puede determinarse como:

$$S = \frac{N D \sec \theta}{L} \quad (3)$$

Siendo θ el ángulo dominante entre las líneas de malla y las curvas de nivel, dado que resulta algo laborioso determinarlo, se considera que $\sec \theta = 1$ o bien se podría tomar el promedio aritmético (4) o geométrico (5).

$$S = \frac{S_x + S_y}{2} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{S_x \times S_y} \quad (5)$$

A partir de dichos métodos es posible obtener la pendiente promedio del cauce, que es el principal parámetro para estimar la velocidad promedio del agua en el cauce y por lo tanto

la capacidad de drenaje de la cuenca. (Universidad Nacional del Noroeste, Departamento de Hidráulica, 2011)

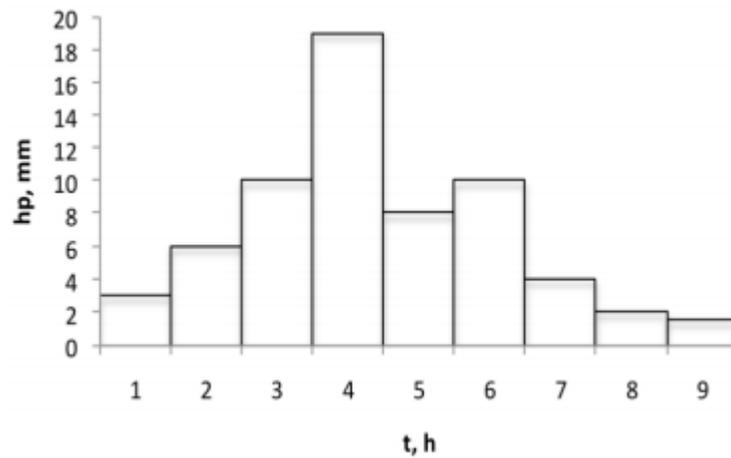
Según la clasificación de López Cardenas de Llano (1998), la pendiente refleja los diferentes tipos de relieve, considerándose muy plano a un relieve menor del 0.5 %; plano a 0.5 a 1 %, de 1 a 3 % suave; de 3 a 12 % presenta lomadas; 12 a 20 % relieve accidentado; 20 a 50% muy fuerte; escarpado cuando se distribuye entre 50 y 75 %, y mayor al 75 % se corresponde a un relieve muy escarpado.

1.3.5. PRECIPITACIONES

La precipitación se presenta en diferentes formas, puede ser lluvia, nieve, granizo, etc. Para la Ingeniería Hidrológica, la lluvia es el punto de partida para el estudio de escurrimientos, uso y control del agua. Las principales características de la precipitación que se deben conocer son: Altura promedio de precipitación, P ; cantidad de agua que se precipita en una tormenta en determinado tiempo, se le llama también lámina de lluvia, tiene dimensiones de longitud y se expresa en mm. Intensidad de precipitación, i ; agua que se precipita en un determinado tiempo, se expresa en mm/h. Duración, d ; intervalo de tiempo en el que se presenta la lluvia, comúnmente se expresa en horas. Para realizar las mediciones de la precipitación, ocurrida en una lluvia o determinado tiempo (normalmente 24 horas), los dispositivos más utilizados son los pluviómetros, que son dispositivos formados por un recipiente cilíndrico graduado de área transversal al que descarga un embudo que capta el agua de lluvia, y cuya área de captación es A . El área de captación A es normalmente diez veces mayor que el área del recipiente a , el objetivo es que, por cada milímetro de lluvia, se deposite un centímetro en el recipiente. De este modo, es posible hacer lecturas a simple vista hasta de una décima de milímetro de lluvia, que corresponde a un milímetro depositado en el recipiente. Además, existen los pluviógrafos, que registran continuamente el incremento de lluvia almacenada en cierto tiempo.

De la gráfica del pluviograma, quitando los descensos, se obtiene una gráfica de precipitación acumulada contra el tiempo llamada curva de masa de precipitación. A partir de esta curva es posible dibujar diagramas de barras que representen las variaciones de la altura de precipitación o de su intensidad en intervalos de tiempo previamente establecidos, a estos diagramas de barras se les llama hietogramas. Los hietogramas (Gráfica 2) se construyen dividiendo el tiempo que duró la tormenta en n intervalos (que pueden ser iguales o no) y midiendo la altura de precipitación que ocurrió en cada intervalo de tiempo. (Rivera Molina, 2012)

Gráfica 2. Hietograma de precipitaciones.



Fuente: (Rivera Molina, 2012)

Del hietograma de precipitaciones se puede obtener el hietograma de intensidades, que resulta de dividir la altura de precipitación de cada barra entre el tiempo. Son diagramas equivalentes, aunque cada uno tiene un uso diferente.

1.3.6. CURVAS IDF

La Curva Intensidad Duración Frecuencia, representa la intensidad (I) o magnitud de una lluvia fuerte expresada en milímetros por hora, para una duración (D) determinada que usualmente puede ser 30, 60, 90, 120 o 360 minutos y que se estima tiene una probabilidad

de ocurrencia, o frecuencia (F) expresada en años, lo que también se conoce como periodo de retorno. (Ideam, 2018)

En este documento se presenta un análisis comparativo de las diferentes curvas IDF y para ello se utilizó la siguiente información:

- Curvas IDF calculadas por Almanza, Martínez y Velázquez en el año 1995, en el desarrollo de la tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Cartagena titulada *Prediseño del Alcantarillado Pluvial del sector San Vicente de Paul*.
- Curvas IDF calculadas por Hidroconsultores Ltda. en el año 2014, en el estudio denominado *Ajuste de los criterios para el acotamiento de rondas hídricas en zonas urbanas e implementación de los criterios en trece cuerpos de agua de la ciudad de Cartagena, Departamento de Bolívar*, desarrollado para el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible - MINAMBIENTE
- Curvas IDF calculadas por Vargas, Díaz-Granados en el año 1998, en el artículo denominado *Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*.
- Curvas IDF calculadas por Herrera y Llamas en el año 2018, en el informe final de grado denominado *Actualización de las Curvas de Intensidad Duración Frecuencia (IDF) para la Estación Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena de Indias D. T. y C.*

1.3.6.1. Curva IDF Almanza, Martínez y Velázquez año 1995

En el año 1995 Ligia Almanza, Omar Martínez y Rubén Velázquez desarrollaron la tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Cartagena titulada *Prediseño del Alcantarillado Pluvial del sector San Vicente de Paul*. En este trabajo calcularon las IDF para el aeropuerto Rafael Núñez utilizando registros pluviográficos de la estación del IDEAM del aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena. Los registros tenían información entre el 24 de noviembre de 1970 a 30 de septiembre de 1994.

Almanza *et al*, realizaron un análisis de frecuencias de todas las lluvias, en el análisis realizado dividieron las lluvias en intervalos de 10 min, 20 min, 30 min, y así sucesivamente hasta completar 9 horas.

Velásquez, Martínez y Almanza, tomaron todas las lluvias existentes hasta el momento, para las cuales determinaron la máxima intensidad para cada duración, y de estas intensidades obtuvieron la serie anual de máximos para cada intensidad. El ajuste de la función se realizó utilizando un procedimiento gráfico. Del análisis realizado, obtuvieron la siguiente ecuación:

$$I(mm/h) = \frac{616,97 \times T^{0,18}}{(t_c \times 60 + 10)^{0,561}} \quad (6)$$

Donde:

T : Es el periodo de retorno en años.

t_c : Es el tiempo de concentración en horas.

1.3.6.2. Curva IDF Hidroconsultores Ltda año 2014

En el año 2014 Hidroconsultores Ltda realizó para el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible – MINAMBIENTE el estudio denominado *Ajuste de los criterios para el acotamiento de rondas hídricas en zonas urbanas e implementación de los criterios en trece cuerpos de agua de la ciudad de Cartagena, Departamento de Bolívar*. En este estudio, aunque no hacía parte de su alcance, con el fin de validar y definir las IDF con las cuales se iba a trabajar, se construyeron las IDF utilizando la metodología propuesta por Vargas y Díaz Granado en el artículo *Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. 1998.

Vargas y Díaz Granado, dedujeron curvas intensidad-duración-frecuencia por correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el número promedio de días de lluvia al año y la precipitación total media anual, obteniendo la siguiente ecuación:

$$I = a \frac{T^b}{t^c} M^d N^e PT^f \quad (7)$$

Donde, se encuentran el periodo de retorno (T) en años, la duración (t) en horas de la precipitación, el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria (M) en mm, el promedio del número de días con lluvia al año (N), la precipitación media anual (PT) en mm, y unos coeficientes correspondientes a cada región (*a, b, c, d, e, f y g*).

En la Tabla 2 se muestra los parámetros *a, b, c, d, e, f y g* regionalizados para la región Caribe.

Tabla 2. Parámetros Región Caribe.

a	b	c	d	e	f
8.51	0.21	0.5	-0.01	-0.08	0.28

Fuente: (Ideam, 2018)

Los valores de M, N y PT calculados para la estación del Aeropuerto Rafael Núñez en el estudio *Ajuste de los criterios para el acotamiento de rondas hídricas en zonas urbanas e implementación de los criterios en trece cuerpos de agua de la ciudad de Cartagena, Departamento de Bolívar*, se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3. Valores de M, N y PT calculado para el Aeropuerto Rafael Núñez.

Variables	Pt	M	N
	954.92	94.92	93.29

Fuente: (Hidroconsultores Ltda., 2014)

1.3.6.3. Curva IDF Vargas, Díaz-Granados año 1998

En el artículo denominado *Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*, se realizó una recopilación de 250 curvas IDF de diferentes estaciones del país, tomadas de diferentes estudios de ingeniería, anuarios meteorológicos y artículos publicados, de todos estos se seleccionaron 170 ya que estos contaban con por lo

menos diez años de registros pluviográficos con lo cual se tendría una mejor calidad de información.

Analizando las ecuaciones de Bernard y Powell, concluyeron lo siguiente: “siendo la ecuación de Powell un caso particular de la ecuación de Bernard, restringe las pendientes de las curvas y la separación entre las mismas” (Vargas M. & Diaz-Granados O., 1998), por consiguiente analizaron la ecuación de Bernard con las curvas IDF que tenían y se obtuvieron los valores de los parámetros de la ecuación de Bernard para cada región del país.

Luego de esto y por medio de correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el número promedio de días de lluvia al año y la precipitación total media anual, obtuvieron la siguiente ecuación:

$$I = a \frac{T^b}{t^c} M^d \quad (8)$$

Donde, se encuentran el periodo de retorno (T) en años, la duración (t) en horas de la precipitación, el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria (M) en mm, y unos coeficientes correspondientes a cada región (a, b, c y d), como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Coeficientes correspondientes a cada Región.

Región	a	b	c	d
Andina	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: (Vargas M. & Diaz-Granados O., 1998)

1.3.6.4. Curva IDF Herrera y Llamas año 2018

En el informe de trabajo de grado como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil de la Universidad de Cartagena, Herrera y Llamas hicieron una actualización de las curvas IDF de la estación Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena en el año 2018, utilizando los datos de la estación proporcionados por el IDEAM desde 1970 a 2016. Además utilizaron los métodos probabilísticos de valores extremos para comparar los resultados con las curvas IDF proporcionadas por estudios previos en la ciudad de Cartagena y así, evaluar la tendencia de cambio de las intensidades y precipitaciones a lo largo de los años. La ecuación para el cálculo de la intensidad propuesta es la siguiente:

$$I = \frac{585,028 * Tr^{0,165}}{(t+10)^{0,546}} \quad (9)$$

Donde:

Tr: Es el periodo de retorno en años.

t: Es el tiempo de duración de la lluvia en minutos.

1.3.7. ISOYETAS

La palabra isoyeta procede del francés isohyète, y este de iso- y el griego ὑετός, que significa lluvia (Educalingo, 2018). De esta forma la isoyeta es una isolínea (líneas de lluvia) que une los puntos, en un plano cartográfico, que presentan la misma precipitación en la unidad de tiempo considerada. Así, para una misma área, se puede diseñar un gran número de planos con isoyetas; como ejemplos, las isoyetas de la precipitación media de largo periodo del mes de enero, de febrero, etc., o las isoyetas de las precipitaciones anuales. (Universidad privada de Tacna, 2011)

1.3.8. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN

Se define como el tiempo que demora una gota de lluvia en recorrer desde el punto más remoto hidráulicamente hablando hasta la salida de la cuenca hidrográfica o sitio de interés de diseño, es decir, 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.

$$T_c = T_e + T_t \quad (10)$$

Existen varios métodos para la determinación del T_c , pueden ser por medio de fórmulas como es el caso de Kerby y del método de Soil Conservation Service (SCS), como lo recomienda el RAS 2000.

1.3.8.1. Ecuación de Kerby

$$T_c = 1.44 \left(\frac{Lm}{S^{1/2}} \right)^{0.467} \quad (11)$$

Dónde:

T_c : Tiempo de concentración

m : tipo de superficie. Se estima de acuerdo al tipo de superficie según la tabla D.4.6 del RAS 2000

L : Longitud del cauce principal

S : Diferencia de cotas sobre L en porcentaje.

1.3.8.2. Soil Conservation Service (SCS)

- Tiempo de entrada: La SCS propone estimar el tiempo de entrada (T_e) con base en la velocidad media de escorrentía superficial sobre el área de drenaje y la distancia de recorrido (RAS 2000, 2000):

$$T_e = \frac{L}{(60 \times V_s)} \quad (12)$$

Dónde:

V_s : puede aproximarse por:

$$V_s = a \times S^{1/2} \quad (13)$$

a es una constante que depende del tipo de superficie, tal como se muestra en la tabla D.4.7 del RAS 2000.

- Tiempo de recorrido: El tiempo de recorrido en un colector se puede calcular como:

$$T_t = \frac{L_c}{60 \times V} \quad (14)$$

1.3.9. HIETOGRAMA

Son representaciones gráficas de la intensidad de una lluvia a lo largo del tiempo. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la composición interna de las tormentas registradas en la estación del aeropuerto Rafael Nuñez de la ciudad de Cartagena y las curvas IDF (Arrieta & Martínez, 2019), para determinar los Hietogramas de Diseño.

1.3.10. NÚMERO DE CURVA

El valor del Número de Curva (CN) depende del grupo hidrológico del suelo, los antecedentes de humedad del suelo y su uso. Los grupos hidrológicos se clasifican de acuerdo a la textura del suelo y la capacidad de infiltración de este, y la selección del CN depende de las características de la zona del proyecto (Cañaveras Quevedo & Perez Barrios, 2018). Este número de curvas se encuentran establecidos para relacionar tipos de suelo con cobertura de superficie, con valores desde 30 a 99.

Tabla 5. Clasificación Grupo Hidrológico del suelo y Número de Curva.

Grupo Hidrológico del Suelo		Características			
A	Suelos con alta tasa de infiltración aun cuando están húmedos: Arenas o gravas profundas y excesivamente drenadas				
B	Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están húmedos con texturas moderadamente gruesa y fina: Franco – arenosos.				
C	Suelos con tasa de infiltración lenta cuando están húmedos con texturas moderadamente finas: Franco – arcillosos.				
D	Suelos con tasa de infiltración excesivamente lenta estando húmedos: Suelos arcillosos.				
Tipo de Cobertura y Condición Hidrológica		Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Barbecho	-	77	86	91	94
	Pobre	76	85	90	93
	Buena	74	83	88	90
Cultivos alineados	Pobre	72	81	88	91
	Buena	67	78	85	89
	Pobre	71	80	87	90
	Buena	64	75	82	85
	Pobre	70	79	84	88
	Buena	65	75	82	86
	Pobre	69	78	83	87
	Buena	64	74	81	85
	Pobre	66	74	80	82
	Buena	62	71	78	83
	Pobre	65	73	79	81
	Buena	61	70	77	80
	Pobre	65	76	84	88
	Buena	63	75	83	87
	Pobre	64	75	83	86
Buena	60	72	80	84	
Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos	Pobre	63	74	82	85
	Buena	61	73	81	84
	Pobre	62	73	81	84
	Buena	60	72	80	83
	Pobre	61	72	79	82
	Buena	59	70	78	81
	Pobre	60	71	78	81
	Buena	58	69	77	80
	Pobre	66	77	85	89
	Buena	58	72	81	85
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia	Pobre	64	75	83	85
	Buena	55	69	78	83
	Pobre	63	73	80	83
	Buena	51	67	76	80

Pastizales o pastos naturales	Pobres	68	79	86	89
	Regulares	49	69	79	84
	Buenas	39	61	74	80
Pastizales	Pobres	47	67	81	88
	Regulares	25	59	75	83
	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	-	30	58	71	78
Matorral - herbazal, siendo el matorral preponderante	Pobres	48	67	77	83
	Regulares	35	56	70	77
	Buenas	≤30	48	65	73
Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas leñosos	Pobres	57	73	82	86
	Regulares	43	65	76	82
	Buenas	32	58	72	79
Montes con pastos (aprovechamientos silvopastorales)	Pobres	45	66	77	83
	Regulares	36	60	73	79
	Buenas	25	55	70	77
Bosques	I muy pobre	56	75	86	91
	II pobre	46	68	78	84
	III regular	36	60	70	76
	IV buena	26	52	63	69
	V muy buena	15	44	54	61
Caseríos	-	59	74	82	86
Caminos en tierra	-	72	82	87	89
Caminos con firme	-	74	84	90	99

Fuente: (Maidment, 1993)

Según la metodología propuesta por el SCS, este número de curvas permite estimar la abstracción inicial o umbral de escorrentía (P_o) que representa la cantidad de precipitación a partir de la cual el terreno no es capaz de infiltrar más agua y que por ende, fluirá en la superficie. (CORPOCESAR; CORPOGUAJIRA, 2019)

$$P_o = 0.2 \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad (15)$$

Donde:

CN: Número de curva asignado por la Tabla 5.

Por último el número de curva de cada zona de la cuenca se corrige para considerar las condiciones hidrológicas del suelo para eventos continuos (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005), dicha corrección se realiza con la expresión:

$$CN_{ajustado} = \frac{CN_{ha} - CN}{3} * (1 - 2 * e^{-13.86 * S}) + CN \quad (16)$$

$$CN_{ha} = \frac{23 * CN}{10 + 0.13 * CN} \quad (17)$$

Donde:

CN_{ha} : Número de curva condición de humedad antecedente alta.

CN: Número de curva asignado por la Tabla 5.

S: Pendiente de la cuenca (%).

1.3.11. SCS HIDROGRAMA UNITARIO

Es un hidrograma unitario sintético en el que el caudal se expresa en relación del caudal Q con respecto al caudal pico Q_p , y el tiempo por la relación del tiempo t con respecto al tiempo del pico en el hidrograma unitario T_p (Chow, 1964). El caudal pico se expresa como:

$$Q_p = C \times \frac{A}{T_p} \quad (18)$$

Donde:

Q_p : caudal pico, [m³ /s].

C: 2.08, [constante].

A: área de drenaje, [km²].

T_p : tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma, [h].

El tiempo de ocurrencia T_p está relacionado con el tiempo de retardo t_p y la duración de la lluvia efectiva Δt así:

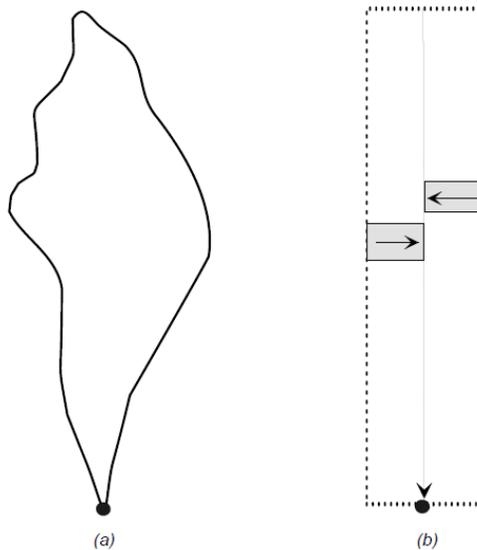
$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_p \quad (19)$$

El SCS sugiere que para cuencas hidrográficas el t_p es el 60% del tiempo de concentración (T_c).

1.3.12. ONDA CINEMÁTICA

En este modelo la cuenca funciona como dos superficies planas sobre las cuales corre el agua hasta llegar al canal principal y luego fluye a través del canal hacia la salida de la cuenca, como se muestra en la Figura 4. Emplea parámetros físicos para caracterizar la cuenca y toma la lluvia efectiva como entrada para predecir el caudal.

Figura 4. Representación de una cuenca en el modelo de Onda Cinemática en HEC - HMS.



Fuente: (Hydrologic Engineering Center, 2000)

El modelo de flujo terrestre de onda cinemática representa el comportamiento del flujo terrestre en las superficies planas, a su vez simula el comportamiento del flujo en los canales de la cuenca y para esto utiliza las ecuaciones de Saint Venant, que son la de

momento (ecuación 23) y la de continuidad (ecuación 24) (Vargas Castañeda, Ibáñez Castillo, Arteaga Ramírez, & Arévalo Galarza, 2018).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (20)$$

$$g \frac{\partial y}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} = g(S_o - S_f) \quad (21)$$

Donde:

Q: caudal.

A: área de sección transversal.

T: tiempo.

x: distancia horizontal.

y: tirante.

v: velocidad de flujo.

g: aceleración gravitacional.

S_o: pendiente del fondo.

S_f: pendiente de fricción.

Para aplicar esta teoría se asume que la onda superficial es larga y plana, por lo que la pendiente de fricción es aproximadamente igual a la pendiente del fondo, por lo que los términos restantes de la ecuación de movimiento se consideran despreciables y hay un balance entre las fuerzas gravitacionales y las de fricción quedando:

$$0 = g(S_o - S_f) \quad (22)$$

$$S_o = S_f \quad (23)$$

Al definir la pendiente de fricción con la fórmula de flujo uniforme, la ecuación puede aplicarse a una corriente específica o a un plano de flujo superficial de la siguiente manera:

$$Q = \alpha A^m \quad (24)$$

En donde α y m son coeficientes definidos para cada sección transversal.

El HEC – HMS, la Onda Cinemática tiene la opción de simular en un plano o dos, áreas naturales y/o urbanizadas, dependiendo de si la subcuenca contiene los dos tipos de áreas.

1.3.13. INFILTRACIÓN

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posteriormente superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos.

1.3.13.1. Capacidad de infiltración

Se denomina capacidad de infiltración a la cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones, valor que es variable en el tiempo en función de la humedad del suelo, el material que conforma al suelo, y la mayor o menor compactación que tiene el mismo. Algunos factores que afectan la capacidad de infiltración:

- Entrada superficial: La superficie del suelo puede estar cerrada por la acumulación de partículas que impidan, o retrasen la entrada de agua al suelo.
- Transmisión a través del suelo: El agua no puede continuar entrando en el suelo con mayor rapidez que la de su transmisión hacia abajo, dependiendo de los distintos estratos.
- Acumulación en la capacidad de almacenamiento: El almacenamiento disponible depende de la porosidad, espesor del horizonte y cantidad de humedad existente.
- Características del medio permeable: La capacidad de infiltración está relacionada con el tamaño del poro y su distribución, el tipo de suelo –arenoso, arcilloso-, la vegetación, la estructura y capas de suelos.
- Características del fluido: La contaminación del agua infiltrada por partículas finas o coloides, la temperatura y viscosidad del fluido, y la cantidad de sales que lleva.

1.3.14. IMAGEN SATELITAL

Una imagen satelital o imagen de satélite se puede definir como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. La fotografía de la superficie terrestre desde el espacio tiene evidentes aplicaciones en campos como la cartografía. Los modernos sistemas de información geográfica, que combinan el reconocimiento por satélite con el procesamiento de datos informatizado, permiten un mayor y más profundo conocimiento de nuestro entorno.

Estas fotografías tienen distintas características entre ellas, varía en los colores, resolución, algunos utilizan la elevación mediante un radar específico, etc. Las imágenes satelitales tienen variados usos; se aplican para la agricultura, geología, ecología, educación, guerra, etc.

Las imágenes satelitales presentan algunas desventajas en su aplicación; la dependencia que tiene la foto frente a la calidad del satélite usado y las condiciones meteorológicas que haya en el minuto de tomar la fotografía puede afectar considerablemente al trabajo final.

1.3.14.1. Google Earth

Es un software gratuito que permite al usuario navegar por imágenes de satélite de toda la Tierra y observar millones de datos. También dispone de información en 3 dimensiones de algunas localidades.

Todas las imágenes y los datos que se muestran en la herramienta están albergados en los servidores de Google, y no se instalan en ningún momento en el ordenador del usuario.

La resolución de estas imágenes de satélite varía en función de la zona donde se encuentre ubicado, Ciudades como Madrid, Barcelona, México DF, Lima o Santiago de Chile están con 70 cm por pixel. Otras (todas estadounidenses) como Boston o Chicago, con 30.5

cm/pixel, y otro grupo como Washington, Nueva York o Los Ángeles, con 15.2 cm/pixel. (INEC, s.f.)

1.3.15. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

Un Modelo de Elevación Digital (MED) es una representación digital de la altitud con respecto al nivel medio del mar, por lo que puede ser interpretado como una forma digital raster que representa las características topográficas de un paisaje determinado (Roa Lobo & Kamp, 2007). Los MED tienen diversos usos, como el uso en el análisis de la topografía, el modelado de procesos hidrológicos y el cálculo de la erosión del suelo.

Los MED se pueden generar a partir de mapas topográficos, fotografías aéreas, datos de radar, sistemas láser o de imágenes satelitales estereoscópicas; estas últimas se representan por sistemas electro-ópticos procedentes del Systeme Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT) o del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), los cuales usan imágenes satelitales en lugar de fotografías aéreas, cubriendo áreas mucho más extensas en una simple toma y generando, de esta forma, un MED más consistente dado que sus datos se generan bajo un mismo momento e igual calibración del sensor (Roa Lobo & Kamp, 2007).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

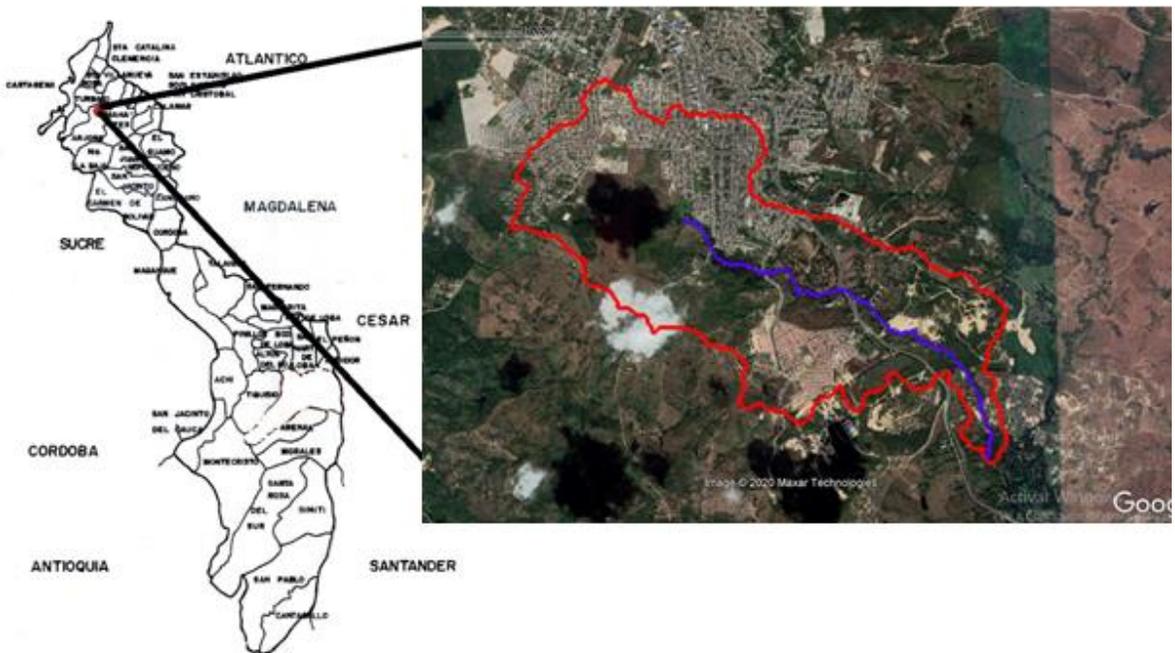
Realizar un diagnóstico de las condiciones hidrológicas e hidráulicas de la cuenca Arroyo Mameyal mediante una modelación de eventos de escorrentía para evaluar los impactos generados por el proceso de urbanización y determinar sus factores de amenazas por inundación.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la variación del coeficiente de escorrentía en el tiempo, mediante la comparación de imágenes satélites disponibles en la herramienta Google Earth e información secundaria, para analizar la evolución del proceso de urbanización del suelo en la cuenca.
- Estimar el impacto del proceso de urbanización actual y futuro en la cuenca sobre el comportamiento hidrológico del arroyo Mameyal mediante la herramienta HEC-HMS.
- Determinar el potencial de inundación actual y futuro del arroyo Mameyal mediante el análisis de la capacidad hidráulica del cauce.

escorrentía de la cuenca desembocando en el Canal del Dique, como se muestra en la Figura 6. En el kilómetro 1 de la vía Turbaco-Arjona cerca de la entrada a la urbanización Ciudadela Bonanza se encuentra el cuerpo de agua Laguna Bonanza que tiene una extensión de 2.5 ha (Google Earth Pro, 2020) y a través de un box coulvert realiza el vertimiento en el arroyo Mameyal. Está comprendida exactamente por las coordenadas $10^{\circ}18'45.57''N$ y $75^{\circ}23'57.79''O$ en la entrada de la Urbanización, y $10^{\circ}18'39.98''N$ y $75^{\circ}23'57.19''O$ al final de ella, (Google Earth Pro, 2020) y el caudal que contribuye al arroyo en ese punto corresponde a la escorrentía que recoge dicha laguna.

Figura 6. Zoom Cuenca Arroyo Mameyal y el arroyo Mameyal.



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

Para el cálculo del volumen total de escurrimiento superficial que se genera a partir de precipitaciones en un tiempo determinado en la cuenca se utilizó el modelo matemático de cuencas hidrográficas HEC-HMS, dichos datos de precipitación fueron basados en un patrón de distribución interna de lluvias para la estación meteorológica del Aeropuerto Rafael Nuñez de la ciudad de Cartagena (Arrieta & Martínez, 2019). Además, para revisar el régimen pluviométrico de la zona también se utilizaron las estaciones de Santa Ana,

Escuela Naval CIOH y de Arjona y Cañaveral (Ideam, 2018) por ser las más cercanas a la zona de estudio.

Para cumplir con los objetivos de la investigación, inicialmente se simuló la lluvia – escorrentía de precipitaciones para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años con el porcentaje de urbanización actual y futuro en la cuenca (0, 10, 25, 50 y 100 años), a través de subcuencas en el software HEC-HMS, para un total de 20 simulaciones. El método para el cálculo de pérdidas por infiltración en el sistema se utilizó el SCS Número de Curva y para la transformación de lluvia – escorrentía el SCS Hidrograma Unitario. Los datos de entrada para el cálculo de pérdidas en cada subcuenca fueron el Número de Curva y su porcentaje de impermeabilización, y para la transformación de lluvia – escorrentía fue el tiempo de retardo. Como método de enrutamiento para los canales de conducción de escorrentía se utilizó la Onda Cinemática, requiriendo longitud, pendiente, coeficiente de Manning, cota del terreno y geometría de la sección.

Posteriormente, se separó la lluvia neta de la precipitación total y se recalcularon los hietogramas de los 20 escenarios simulados anteriormente, estos valores de precipitación se ingresaron en HEC – RAS para representar el exceso o la escorrentía generada en la cuenca y visualizar la mancha de inundación. Se utilizó la herramienta 2D Flow Area de Unsteady Flow para delimitar el área de la cuenca en la que se representaría el volumen de agua.

Finalmente, como resultado se obtuvo un informe de la variación del coeficiente de escorrentía por el proceso de urbanizar y las posibles zonas con amenazas por inundación en la cuenca.

La fase más crítica del desarrollo del modelo hidrológico fue la calibración, ya que el objetivo es mejorar la credibilidad de los datos arrojados, por lo que se introdujeron los datos del sistema, se ejecutó el modelo y se comparó con los niveles que alcanzó el agua en los periodos críticos de lluvias de los años 2010 y 2011, complementando con la

información de las entrevistas realizadas a los habitantes de la zona que señalaron cuáles habían sido los niveles de inundación que se alcanzaron en algunos tramos del arroyo.

La investigación se llevó a cabo en el primer semestre de 2020 con una duración aproximada de cuatro (4) meses. Las principales limitaciones que se presentaron para la obtención de información primaria requerida para los diseños fueron económicas, temporales y espaciales, debido a que era necesario realizar estudios topográficos, hidrológicos e hidráulicos, lo cual implicaba una inversión de recursos económicos para salidas de campo, alquiler o compra de equipos y así mismo de información; además, el tiempo de desarrollo del proyecto fue relativamente corto para realizar dichos estudios de campo y realizar su posterior análisis. Por otro lado, existió una limitación en la calibración del modelo, ya que los datos a introducir en la calibración fueron tomados de entidades que los poseen y no se contó con los equipos para hacer las mediciones de precipitaciones y caudales in situ, esto pudo generar porcentajes de error en los resultados de la investigación. Sin embargo, existen investigaciones de otros autores donde no se realiza la toma de datos en tiempo real y se obtuvieron resultados aceptables.

Este proyecto buscó promover futuras investigaciones encaminadas a evaluar la influencia de la urbanización en los hábitats naturales, y de esta manera poder colaborar en la conservación y sostenibilidad de los ecosistemas urbanos y de zonas naturales, para así lograr un adecuado aprovechamiento del mismo.

4. METODOLOGÍA

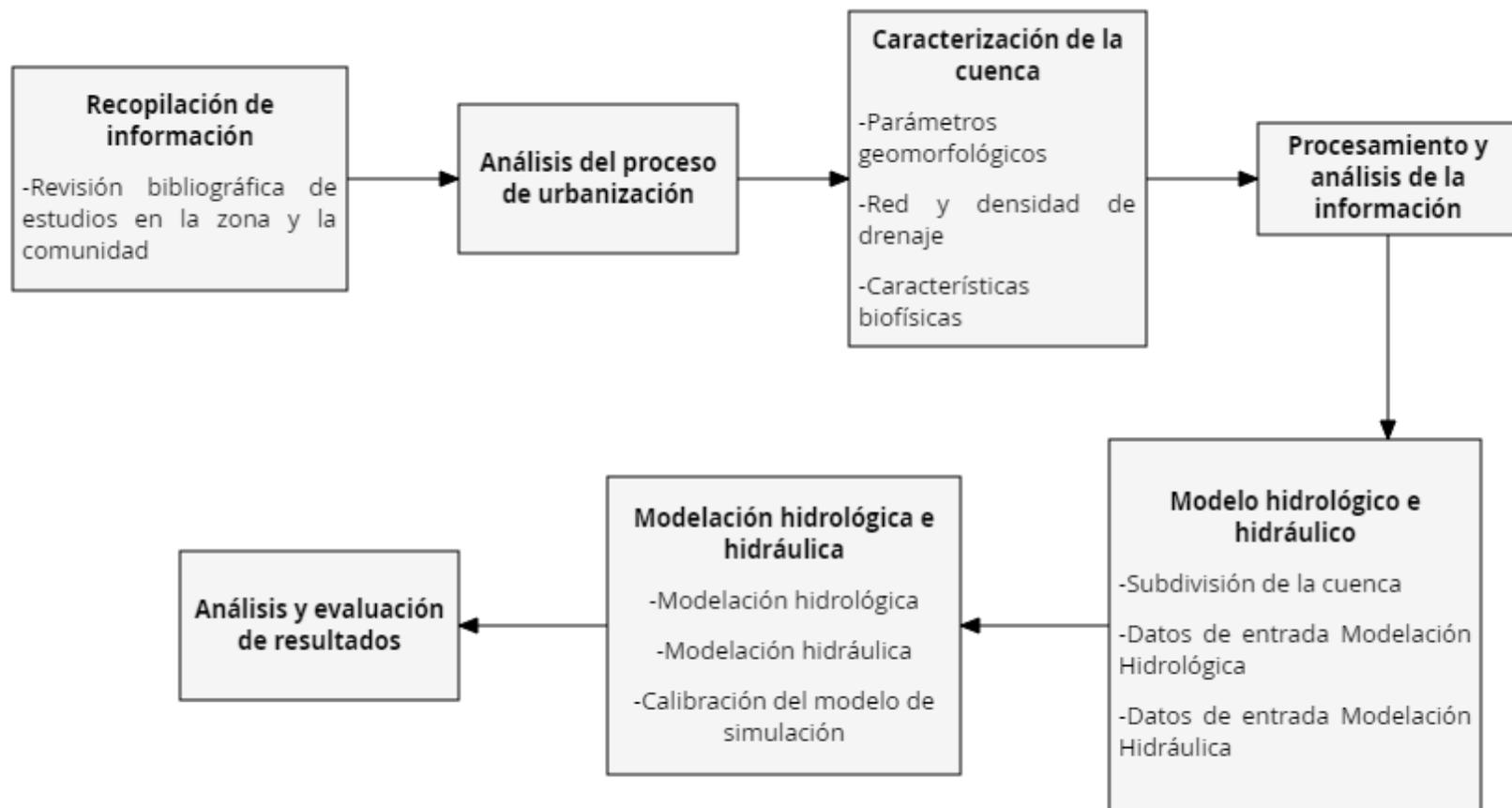
Para llevar a cabo esta investigación fue necesario realizar una revisión bibliográfica detallada en la que se analizó y se clasificó la información seleccionada, identificando variables y conceptos a utilizar, posteriormente se hizo un estudio de tipo correlacional que permitió ver la relación entre las variables y como se vieron afectadas cada una de ellas en el proceso de urbanización de cuencas, para así determinar las condiciones actuales y futuras de la zona de estudio.

Esta investigación manejó un enfoque mixto, ya que presenta un proceso de recolección, análisis y vinculación de datos cuantitativos y cualitativos para responder al planteamiento del problema (Hernández, Fernández, & Baptista, 2006). Estos métodos fueron aplicados para conocer la incidencia del proceso de urbanización en la cuenca Arroyo Mameyal y cómo se vio afectada la respuesta de la cuenca ante los diferentes eventos del ciclo hidrológico a diferentes tiempos de retorno.

No existen estudios detallados a fines con el objetivo de esta investigación, sólo archivos y expedientes donde se trata brevemente la importancia de la problemática, por lo que se toman como referencia algunos estudios donde hacen uso de diferentes métodos para la comprobación de este aspecto. El más común es la modelación de los parámetros de precipitación y caudales, estos dos son los que más sufren los cambios por urbanización, debido a esto se hace necesaria la investigación de soluciones específicas con el fin de evitar inundaciones y desbordamientos (Gülbaz & Kazezyilmaz-Alhan, 2013)

La metodología propuesta para cumplir con los objetivos planteados consistió en la recopilación de información, caracterización de la cuenca, evaluación y procesamiento de la información, modelación hidrológica con el modelo HEC-HMS e hidráulica con el HEC-RAS, posteriormente el análisis y la evaluación de los resultados, y se presenta a continuación:

Figura 7. Metodología a utilizar.



4.1. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

Esta etapa fue fundamental para obtener la información más relevante del proyecto de investigación. Comprendió la búsqueda de información a nivel local, nacional e internacional, acerca de cómo se evalúan los efectos causados por los procesos de urbanización en cuencas, y qué métodos, modelos y/o elementos se utilizan para ello.

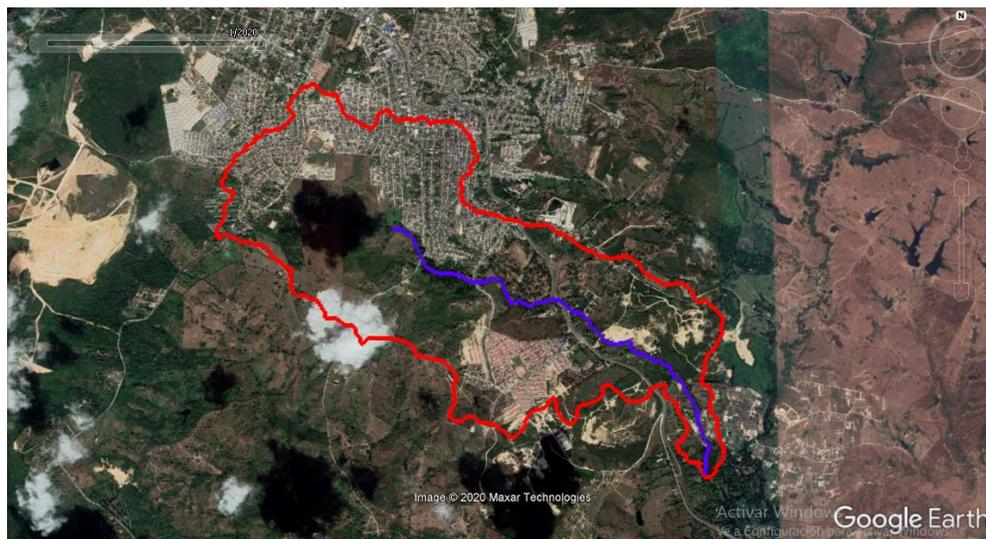
4.1.1. Revisión bibliográfica de estudios en la zona y la comunidad

La información correspondiente fue proporcionada por las entidades estatales de la zona: los planos topográficos y el estudio de suelo fueron del Servicio Geológico Colombiano (SGC), los hidrológicos y meteorológicos en series de tiempo por el Ideam, y se complementó con los recorridos en campo, encuestas, entrevistas y la información que se encontró en la Alcaldía de Turbaco y CARDIQUE correspondiente a estudios, quejas y soluciones.

4.2. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE URBANIZACIÓN

Inicialmente, se realizó la delimitación de la cuenca hidrográfica y la división en subcuencas de la misma, utilizando un Modelo de Elevación Digital (DEM) en la herramienta GIS del software HEC – HMS, exportando el polígono al software QGIS y posteriormente a Google Earth. El resultado final se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Delimitación de la cuenca Arroyo Mameyal.



Fuente: (Google Earth Pro, 2020)

En pos de analizar el cambio de la cobertura vegetal a través del tiempo en la zona de estudio se aplicó el método de la cuadrilla (similar al método de Horton) en las 4 imágenes satelitales obtenidas a través de Google Earth de los años 1969, 2004, 2016 y 2019. Esto permitió evaluar el impacto de los procesos de urbanización e indicó qué zonas tienen tendencia a tener coeficientes de escorrentía más altos, a través de la variación en el porcentaje de cobertura vegetal y el uso del suelo que históricamente ha sufrido la cuenca, desde 1969 hasta la actualidad. También se hizo una visita de campo para complementar, verificar y conocer detalladamente las características de las zonas permeables e impermeables de la zona urbanizada.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

La caracterización de la cuenca estuvo orientada a describir e interpretar las condiciones generales y cuantificar los parámetros que sirven de base para identificar las zonas con mayor amenaza en la cuenca. Los parámetros que se tuvieron en cuenta fueron la

ubicación, delimitación, área, morfometría, red y densidad de drenaje, el clima, la topografía, el tipo del suelo y su uso actual.

4.3.1. ÁREA, UBICACIÓN, DELIMITACIÓN Y MORFOMETRÍA

La cuenca Arroyo Mameyal tiene un área de 648 ha y un perímetro de 19.8 km que comprende la cabecera municipal de Turbaco, la urbanización Ciudadela Bonanza y la zona con tendencia a ser urbanizada en la cuenca. La información cartográfica requerida para la delimitación fue de 1:25000 del IGAC y el DEM fue generado por el satélite de observación japonés ALOS PALSAR, posteriormente procesado por el Sistema de Información Geográfica integrado en el software HEC – HMS.

Por otro lado, para la caracterización morfométrica de la cuenca se identificó el talweg o línea trayectoria del cauce principal, en este caso el arroyo Mameyal; los afluentes que corresponden a la esorrentía de la cabecera municipal de Turbaco y Ciudadela Bonanza; también se tuvo en cuenta el orden de las corrientes para la red de drenaje; las vertientes, el parte aguas o línea divisoria y el punto de salida o desembocadura de la cuenca, y finalmente con ayuda de algunas herramientas del software QGIS se calcularon algunos parámetros.

Otras características morfométricas calculadas fueron el factor de forma de la cuenca, su coeficiente de compacidad, el índice de alargamiento, el radio de circularidad, el índice de asimetría y la relación de elongación.

4.3.2. RED Y DENSIDAD DE DRENAJE

Para las características de la composición de drenaje se tuvo en cuenta la metodología propuesta por Horton que considera el orden de ramificación o magnitud de las corrientes, ya sean de primer orden, segundo orden, etc., identificando el arroyo Mameyal como la corriente de mayor importancia dentro de la cuenca, siendo esta de segundo orden. El

arroyo tiene una longitud de 4.3 km y nace a la altura de la finca que lleva como nombre Manzanares en el municipio de Turbaco, con unas coordenadas de 10°19'18.50" N y 75°24'49.92" O, recibiendo diferentes nombres a medida que pasa por algunas propiedades, hasta converger aguas abajo con la Quebrada Aguas Vías 2 con coordenadas 10°18'9.71" N y 75°23'22.59" O.

Además de la longitud del cauce principal también se calculó la longitud recta del cauce, la longitud total de drenaje, la cota mínima, máxima y media del cauce, la sinuosidad del cauce y la densidad de drenaje.

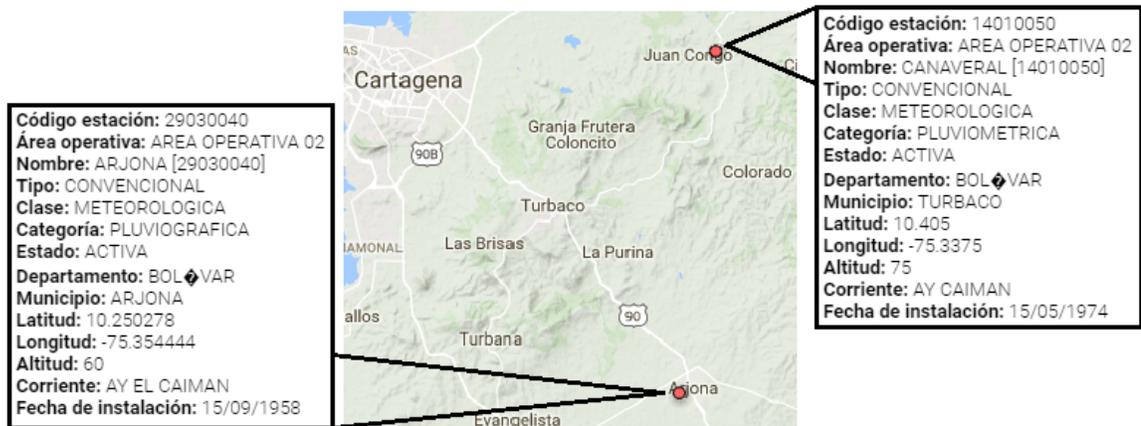
Con el fin de evaluar sus características físicas y morfológicas se hizo un recorrido a pie a partir del centro recreacional Villa Marta, pasando por Ciudadela Bonanza hacia aguas abajo, para determinar la convergencia del arroyo Mameyal con otras corrientes.

4.3.3. CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS

4.3.3.1. Climatología

Las características hidrológicas utilizadas para determinar la climatología fueron las arrojadas por las estaciones meteorológicas de Arjona y Cañaveral para el municipio de Turbaco por su proximidad y estrecha relación con la cuenca Arroyo Mameyal, como se muestra en la Figura 9. El uso de las estaciones Aeropuerto Rafael Núñez, Santa Ana y Escuela Naval CIOH también fue necesario para determinar el régimen pluviométrico de la zona. El IDEAM proporcionó los registros de la temperatura, humedad, viento y brillo solar, para complementar los datos de entrada para la modelación hidrológica.

Figura 9. Ubicación de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio.



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

4.3.3.2. Topografía

Los planos topográficos de la cuenca los proporcionó el IGAC, del año 2007 con una escala de 1:25000, necesarios para realizar una delimitación más precisa del área de estudio. Las curvas de nivel permitieron ubicar los puntos más altos y bajos que fueron indispensables para conocer el comportamiento del agua superficial e identificar la pendiente de la cuenca, por lo que se hace necesario identificar el plano horizontal del arroyo proyectado en el terreno (planimetría) y las diferencias de nivel en el terreno (altimetría). Esta última fue de gran importancia ya que está directamente relacionada con la velocidad del escurrimiento superficial.

Para estimar la capacidad hidráulica de la cuenca fue necesario conocer la pendiente y las secciones transversales del arroyo Mameyal, por lo que se hizo un recorrido a pie para determinar las características y su posterior análisis e interpretación detallada de las zonas afectadas por el crecimiento del caudal de escorrentía de la cuenca.

4.3.3.3. Suelos

Conocer el tipo de suelo fue de gran importancia porque este interviene en el ciclo hidrológico debido a su comportamiento y funcionalidad, por lo que fue necesario clasificar

el tipo de suelo de la zona y escoger el grupo hidrológico del suelo, según los valores dados en la Tabla 5.

4.3.3.4. Uso actual del suelo (cobertura vegetal)

Los suelos de las cuencas tienen superficies permeables e impermeables, por lo que fue necesario conocer las diferentes superficies que se presentan en la cuenca para la determinación del Número de Curva y del n de Manning a ingresar en los datos de entrada de ambas modelaciones, hidrológica e hidráulica, según lo expuesto en el libro de Hidráulica de Canales Abiertos (Chow, 1964). Para determinar el Número de Curva y la condición hidrológica de cada tipo de suelo en la cuenca se hizo uso de la Tabla 5.

4.4. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

En esta etapa se transformaron los datos obtenidos con anterioridad. Para determinar el régimen pluviométrico de la zona de estudio se hicieron unos mapas de isoyetas a partir de los registros de las precipitaciones de las 5 estaciones, para el valor total anual, el valor máximo en 24 horas y los promedios de precipitaciones mensuales.

Luego, con el fin de conocer las intensidades de lluvia según la precipitación y la duración de la tormenta para los distintos periodos de retorno, se hizo un análisis comparativo de las curvas IDF calculadas por cuatro autores: Almanza, Martínez y Velázquez (1995); Vargas, Díaz-Granados (1998), Hydroconsultores (2014), y Herrera y Llamas (2018). Para distribuir dichas intensidades de lluvia y así elaborar los hietogramas de las lluvias de diseño para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, se utilizaron las curvas del patrón de distribución interna de lluvias de la ciudad de Cartagena (Arrieta & Martinez, 2019).

Luego para hallar el tiempo de concentración, según las recomendaciones del RAS 2000, se calculó el tiempo que se demora el flujo superficial desde el punto más alejado de la cuenca hasta llegar a la red de drenaje principal, mediante el promedio de los métodos Kerby y

SCS; y luego se calculó el tiempo que demora el agua en salir de la cuenca a través del drenaje principal. De igual manera se hallaron los tiempos de concentración de todas las subcuencas de la cuenca Arroyo Mameyal.

4.5. MODELO HIDROLÓGICO

Se utilizó el modelo de lluvia – escorrentía HEC-HMS para procesos hidrológicos y el modelo unidimensional HEC-RAS para procesos hidráulicos. Una vez se evaluó y se procesó la información necesaria para la modelación, ambas herramientas simularon las condiciones hidrológicas e hidráulicas de la cuenca.

4.5.1. SUBDIVISIÓN DE LA CUENCA

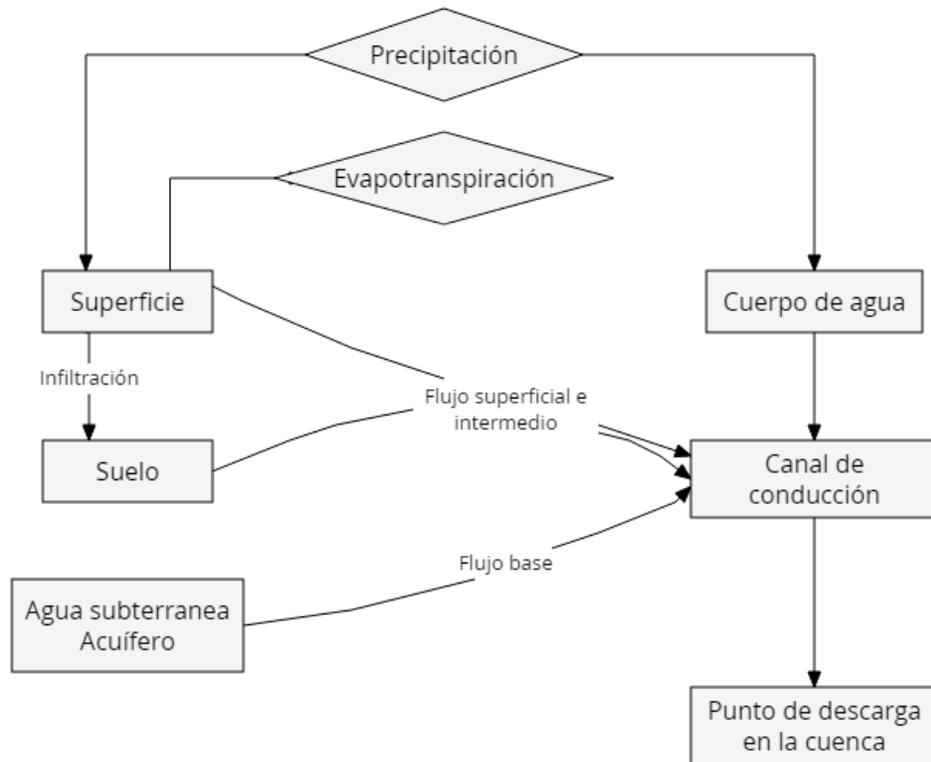
Como primera instancia, se adquirió un DEM del satélite japonés ALOS a través de su sensor PALSAR que tiene una resolución espacial de 12.5 m y una capacidad de colección de 50 km x 70 km. Dicha imagen se importó en HEC – HMS y se sometió a los procesos de escurrimiento y drenaje de la cuenca, luego se identificó la corriente principal, el arroyo Mameyal, y el punto hasta dónde se evaluaría la cuenca. Finalmente, se generó la delimitación obteniendo 12 subcuencas con ayuda de la herramienta GIS del software HEC – HMS.

La subdivisión de la cuenca fue necesaria para la modelación hidrológica en el mismo software HEC-HMS, puesto que requiere que los datos de la cuenca se introduzcan en subcuencas, cada una de estas con sus respectivas características superficiales, redes de drenaje, coeficientes de rugosidad de Manning, escorrentía y porcentajes de permeabilidad diferentes.

4.5.2. DATOS DE ENTRADA PARA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN HEC – HMS

En la Figura 10 se muestra el esquema del comportamiento de una cuenca en el modelo HEC – HMS.

Figura 10. Diagrama representativo del proceso de escorrentía de una cuenca en HEC – HMS.



Fuente: (Hydrologic Engineering Center, 2000)

A cada subcuenca se le asignó su número de identificación y área. Los datos de precipitación se ingresaron en hietogramas, por lo que se necesitaron las curvas IDF y el patrón de curvas de tormentas en la ciudad de Cartagena para calcular las lluvias para los distintos periodos de retorno.

Para el cálculo de pérdidas por infiltración se escogió el método del SCS Número de Curva y como método de transformación lluvia – escorrentía el SCS Hidrograma Unitario, con el fin de conocer el volumen de flujo superficial e intermedio en las subcuencas. En el SCS, la

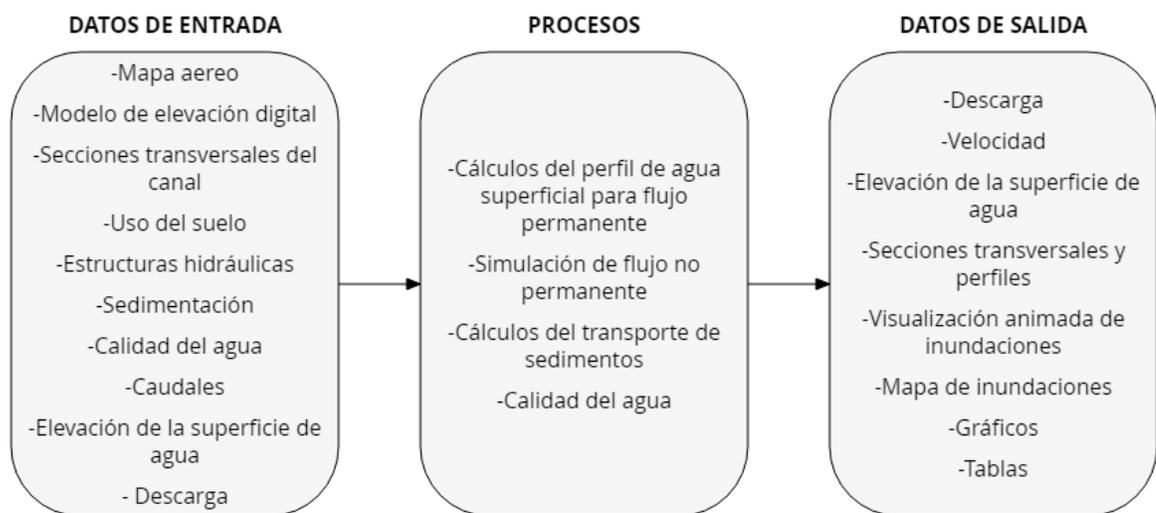
escorrentía se calcula en función de la altura de la lámina de agua y el potencial máximo de retención (valor del Número de Curva que va de 0 a 100); por lo que las pérdidas o abstracciones se separan de la precipitación que genera escorrentía directa, es decir, a la altura de la lámina de agua que cae se le resta lo que se infiltra. Este procedimiento se aplicó a las 12 subcuencas, obteniendo la escorrentía directa de cada subcuenca y las pérdidas o abstracciones de las mismas.

En cuanto a los conductos se definió el método de enrutamiento de la Onda Cinemática, de estos se hallaron los caudales pico necesarios para la modelación hidráulica. Algunos parámetros a ajustar en este módulo fueron la fecha y el tiempo de simulación, y el sistema de unidades, que se trabajará con el Sistema Internacional.

4.5.3. DATOS DE ENTRADA PARA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN HEC – RAS

En la Figura 11 se muestra un esquema del proceso de simulación hidráulica de canales en el modelo HEC – RAS.

Figura 11. Diagrama representativo del proceso de simulación hidráulica en HEC – RAS.



Inicialmente, se cargó el DEM en la herramienta RAS Mapper del software HEC – RAS y en el componente geométrico se delimitó el área (2D Area Flow) de la cuenca Arroyo Mameyal como posible área en la que podría generarse la mancha de inundación. Luego, se ingresaron los valores de precipitación, pero esta vez sólo la que generaba escorrentía en la cuenca, es decir, la precipitación neta de los 20 escenarios simulados en HEC – HMS, y de igual forma se realizaron las 20 simulaciones para el modelo hidráulico.

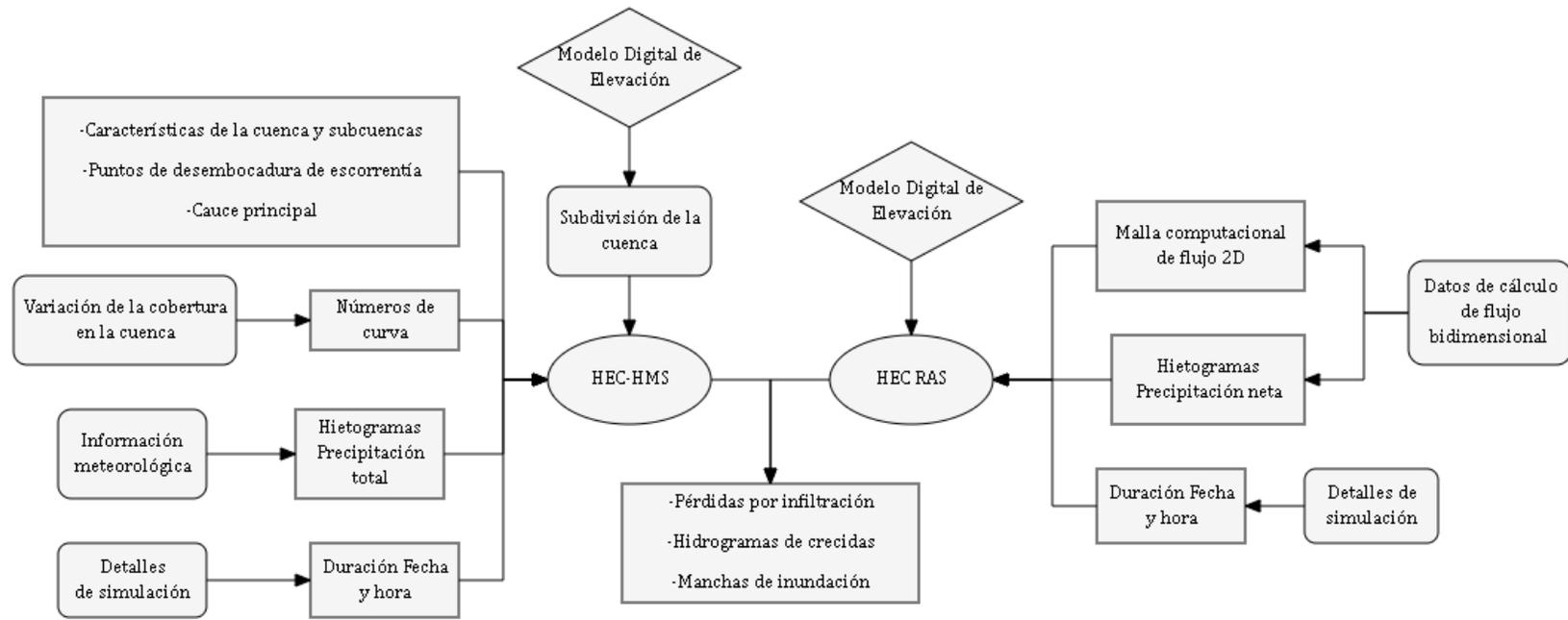
4.6. MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

Para la modelación hidrológica en HEC-HMS se ingresaron las subcuencas con sus respectivos porcentajes de urbanización, los colectores y sus características, se especificaron los hietogramas correspondientes a cada lluvia de los periodos de retorno, y por último se ajustó la hora y fecha de las simulaciones, luego se simularon los 20 escenarios para estimar la variación del coeficiente de escorrentía en la cuenca.

Posteriormente, se recalcularon los hietogramas, uno por cada escenario simulado, utilizando esta vez solo la precipitación neta para la modelación hidráulica en el software HEC – RAS. De igual manera se cargó el DEM y sobre este se señaló el área correspondiente a la cuenca de estudio, se ingresó la fecha y la duración de la simulación en este, obteniendo finalmente 20 representaciones de la escorrentía superficial en la cuenca y las zonas con riesgo de inundación

A continuación, se mostrará un esquema general del proceso:

Figura 12. Diagrama representativo de la modelación hidrológica e hidráulica.



4.6.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

En la realización de la calibración del modelo de simulación hidrológica existió una limitación, puesto que los datos a introducir en la calibración eran tomados de entidades que los poseían y no se contaba con los equipos necesarios para hacer las mediciones de precipitaciones y caudales in situ. Se introdujeron los datos al sistema y se ejecutó el modelo, dado esto se hizo una comparación con la información recolectada en la zona de estudio por medio de encuestas a los habitantes acerca de sus experiencias en las épocas de lluvias y así poder hacer la comparación con los datos históricos existentes proporcionados por el IDEAM., de esta manera se mejoró la bondad de los datos. En caso de que existiera una discrepancia entre los resultados modelados y los reales, se modificarían los datos de entrada y se iteraría el proceso hasta obtener los datos que se ajustaran a la realidad.

4.7. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Se hicieron un total de 20 simulaciones en el software HEC-HMS, que representan el comportamiento hidrológico de la cuenca con el porcentaje de urbanización actual y futuro (0, 10, 25, 50 y 100 años) ante lluvias con periodo de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, calculando así la escorrentía superficial de la cuenca para las 20 simulaciones. Luego, la precipitación neta para cada escenario simulado se ingresó en el software HEC-RAS para la representación hidráulica del modelo, obteniendo mapas con las zonas con riesgos a sufrir inundaciones en la cuenca.

Finalmente, se hizo un reporte que dio a conocer la variación del coeficiente de escorrentía en la cuenca y el hidrograma de crecida para cada escenario simulado, con el fin de conocer el comportamiento hidrológico e hidráulico actual y futuro, y las posibles zonas con amenaza por inundación de la cuenca a partir del modelo hidráulico.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la revisión bibliográfica realizada, tanto nacional como internacional, los resultados obtenidos no fueron del todo satisfactorios, ya que no se encontraron coincidencias al presente trabajo de investigación a nivel nacional. Sin embargo, a nivel internacional existen algunas coincidencias de desarrollo de los procedimientos y utilización de las herramientas descritas en este proyecto, que fueron útiles para tomarlas de guía.

5.1. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE URBANIZACIÓN

La variación en el tiempo de los porcentajes de cobertura vegetal de la cuenca Arroyo Mameyal se muestran con las imágenes satélites obtenidas a través de Google Earth Pro para los años 1969, 2004, 2012 y 2019. Inicialmente, en la Figura 13, vista del año 1969, se aprecia una densa capa vegetal y algunos cuerpos de agua, con un porcentaje aproximado global de vegetación del 78% y un porcentaje de urbanización del 22%.

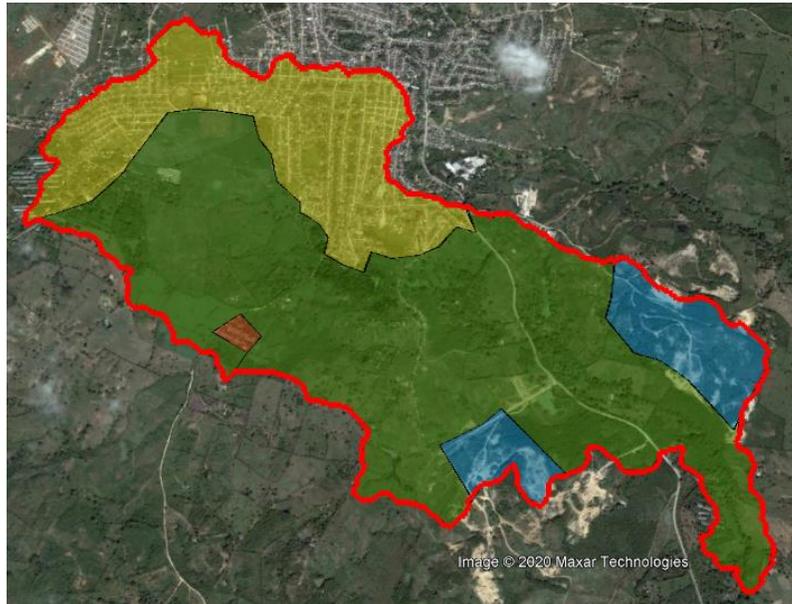
Figura 13. Vista de la cuenca en el año 1969.



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

Para el año 2004, Figura 14, la capa vegetal disminuye de un 78% a 74% con respecto al año 1969, teniendo un total de porcentaje de urbanización de 26%.

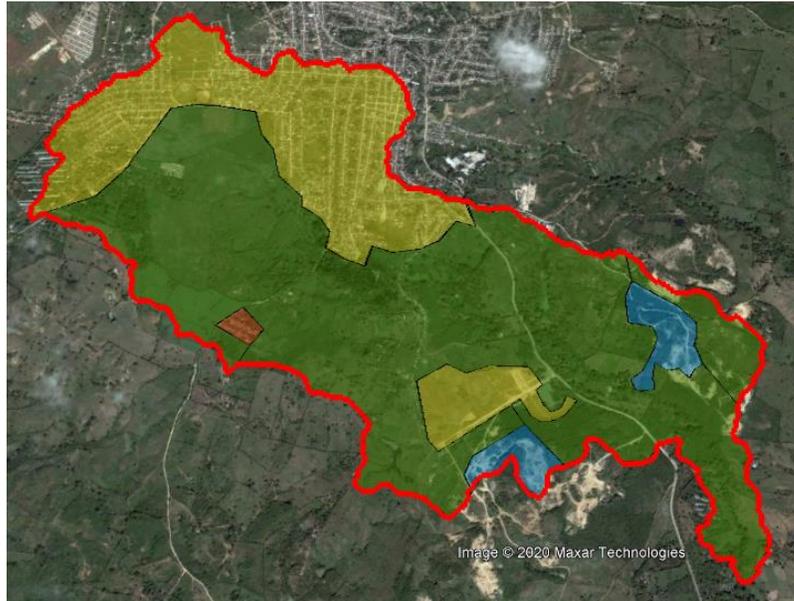
Figura 14. Vista de la cuenca en el año 2004.



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

De igual forma se realizó el análisis para el año 2012, Figura 15, en el que se visualiza un crecimiento urbanístico notable en la zona residencial de Turbaco y en el sur de la cuenca debido a la construcción de la urbanización Ciudadela Bonanza, lo que implicó la deforestación de la zona y por tanto la disminución de la cobertura vegetal en un 4% aproximadamente. Esto se traduce en el aumento del coeficiente de escorrentía de las zonas urbanizadas, pasando de un porcentaje global de urbanización de 26% a 30% aproximadamente, con respecto al año anteriormente analizado.

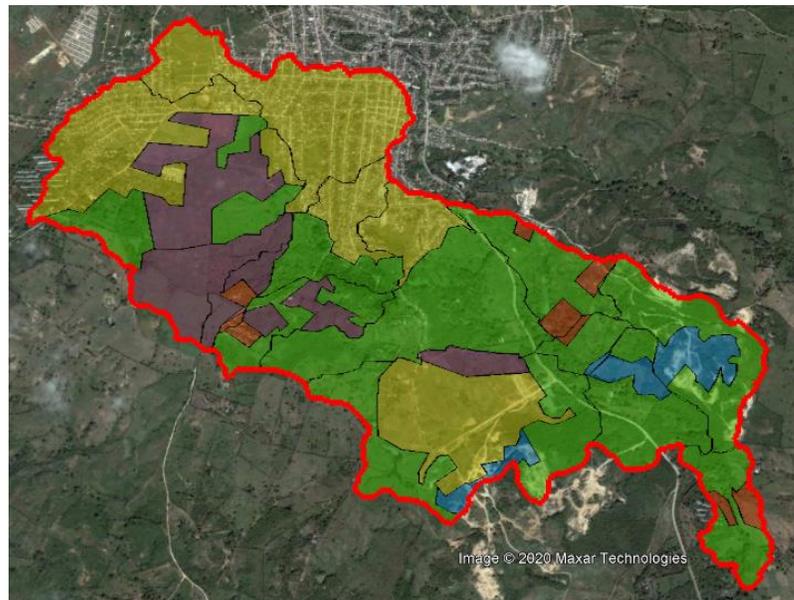
Figura 15. Vista de la cuenca en el año 2012.



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

En los próximos cuatro años, la cuenca sufrió un aumento del 7% en su porcentaje de urbanización, pasando a un total de 37% de urbanización, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Vista de la cuenca en el año 2019.



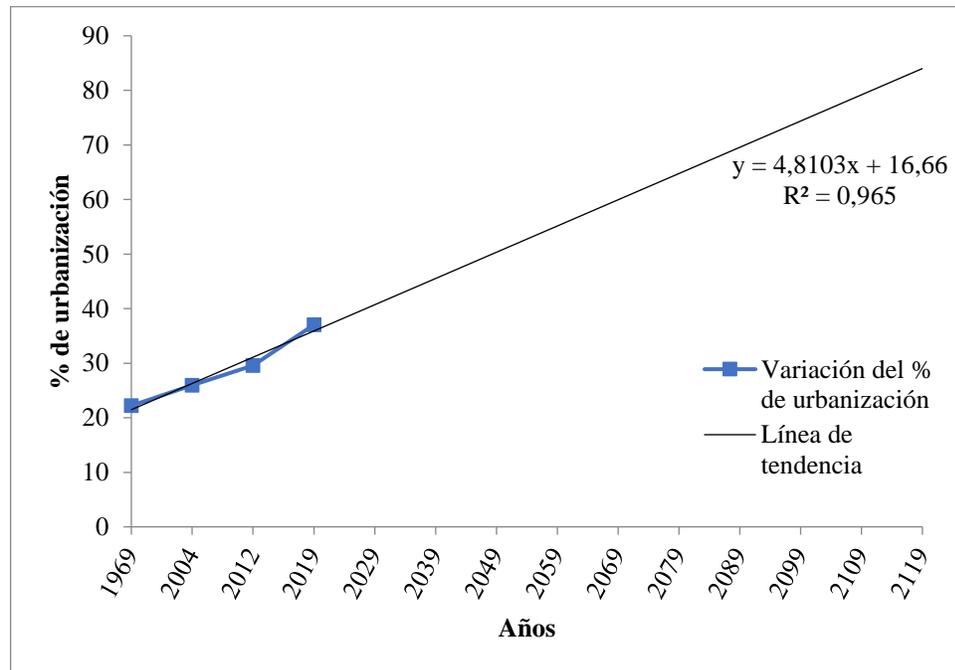
Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

En la actualidad, debido a la ubicación y los recursos naturales que posee la cuenca, esta se ha convertido en un foco de inversión nacional y extranjero, por lo que está atravesando un proceso de expansión urbanística, por lo que del año 1969 al 2019, la cuenca sufrió un aumento del 15% en su urbanización, pasando de un 22% a 37% total de urbanizado en la cuenca. En la Tabla 6 se presenta un resumen de dichos porcentajes.

Tabla 6. Variación del porcentaje de la cobertura vegetal por años en la cuenca.

Año	% Veg	% Urb	Variación de Crecimiento (%)	Reducción de Cobertura Vegetal Total (%)
1969	78	22	-	15%
2004	74	26	4	
2012	70	30	4	
2019	63	37	7	

Gráfica 3. Crecimiento del área de urbanización lineal en porcentaje por año.



Para realizar una mejor visualización, comprensión y análisis del fenómeno de crecimiento urbanístico se necesita implementar herramientas como la teledetección y los sistemas de

información geográfica vectorial, como la metodología aplicada en la ciudad de Santiago de Chile (Departamento de geografía del Instituto Nacional de Estadísticas; Comisión de estudios habitacionales y urbanos del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2018). Sin embargo, en este estudio se utilizaron imágenes satelitales de muy buena resolución espacial que permitieron realizar un estudio semi – detallado es una escala mediana de 1:25000.

Además, se resalta la importancia de evaluar las tendencias y las consecuencias de las cuencas ante estos procesos de urbanización para proyectar el comportamiento de la misma y los posibles cambios en su caudal de escorrentía, todo esto con el fin de estimar las zonas vulnerables y expuestas de la cuenca a sufrir desbordamientos e inundaciones.

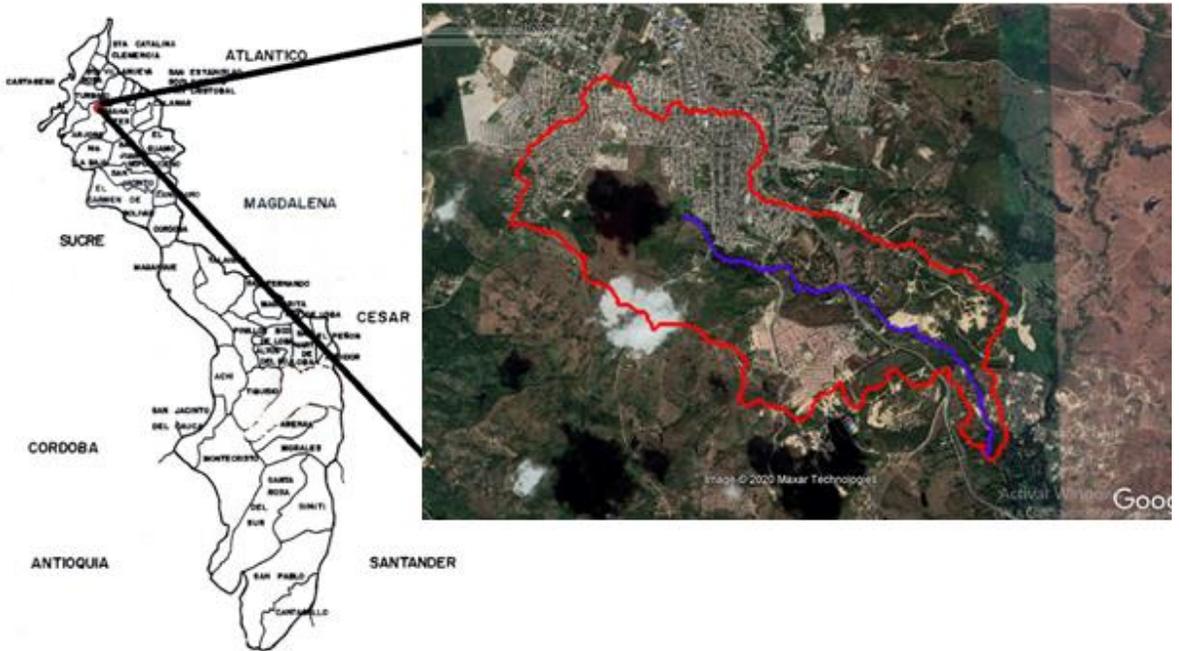
5.2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

5.2.1. ÁREA, UBICACIÓN, DELIMITACIÓN Y MORFOMETRÍA

La cuenca Arroyo Mameyal tiene una extensión aproximada de 648 ha y ubicada en Turbaco, un municipio de Bolívar (Colombia) que se encuentra a 10 km aproximadamente de la ciudad de Cartagena de Indias. Según la clasificación de cuencas (Aparicio Mijares, 1992) se considera una cuenca muy pequeña.

Se identificó el arroyo Mameyal como el colector principal, Figura 17, este tiene una longitud de 4.3 km y nace en una finca que lleva como nombre Manzanares en la parte superior de la cuenca con coordenadas $10^{\circ}19'18.50''$ N y $75^{\circ}24'49.92''$ O, recibiendo diferentes nombres a medida que pasa por algunas propiedades, hasta converger aguas abajo con la Quebrada Aguas Vías 2 con coordenadas $10^{\circ}18'9.71''$ N y $75^{\circ}23'22.59''$ O.

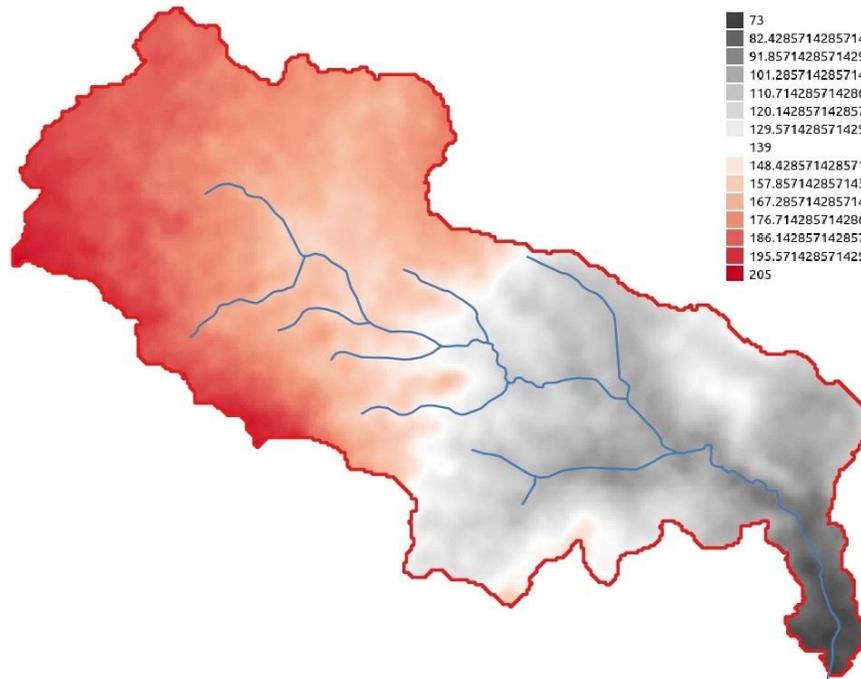
Figura 17. Ubicación de la Cuenca Arroyo Mameyal.



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

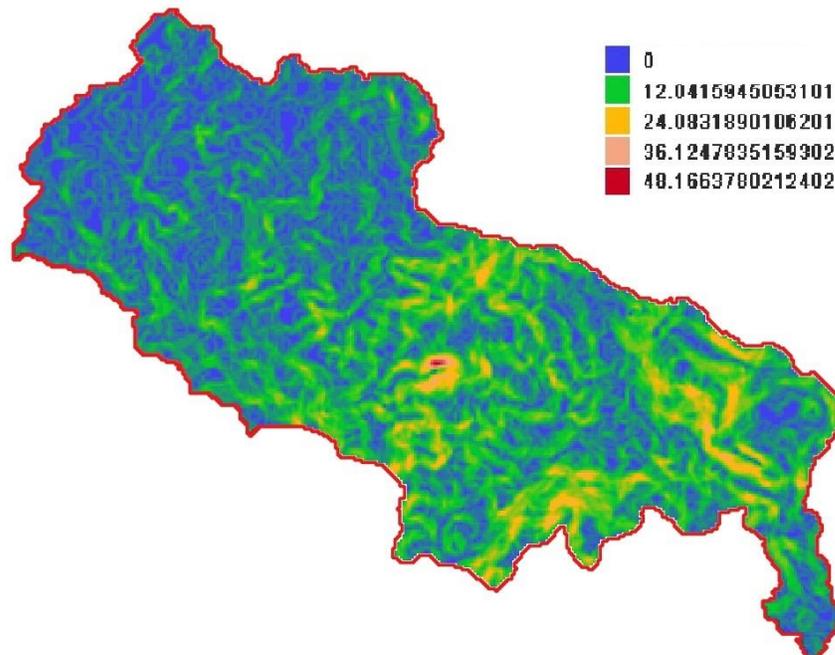
Para conocer la geomorfología de la cuenca, inicialmente se cargó el modelo digital de elevación en QGIS y se hallaron las cotas máximas y mínimas en la cuenca, las pendientes y la longitud axial. En la Figura 18 se observa el mapa de elevaciones y en la Figura 19 el mapa de pendientes, posteriormente se exponen los datos en la Tabla 7.

Figura 18. Mapa de elevaciones de la cuenca en el software QGIS.



Fuente: Tomado y modificado (QGIS, 2020)

Figura 19. Mapa de pendientes de la cuenca en el software QGIS.



Fuente: Tomado y modificado (QGIS, 2020)

Tabla 7. Parámetros geomorfológicos de la cuenca Arroyo Mameyal.

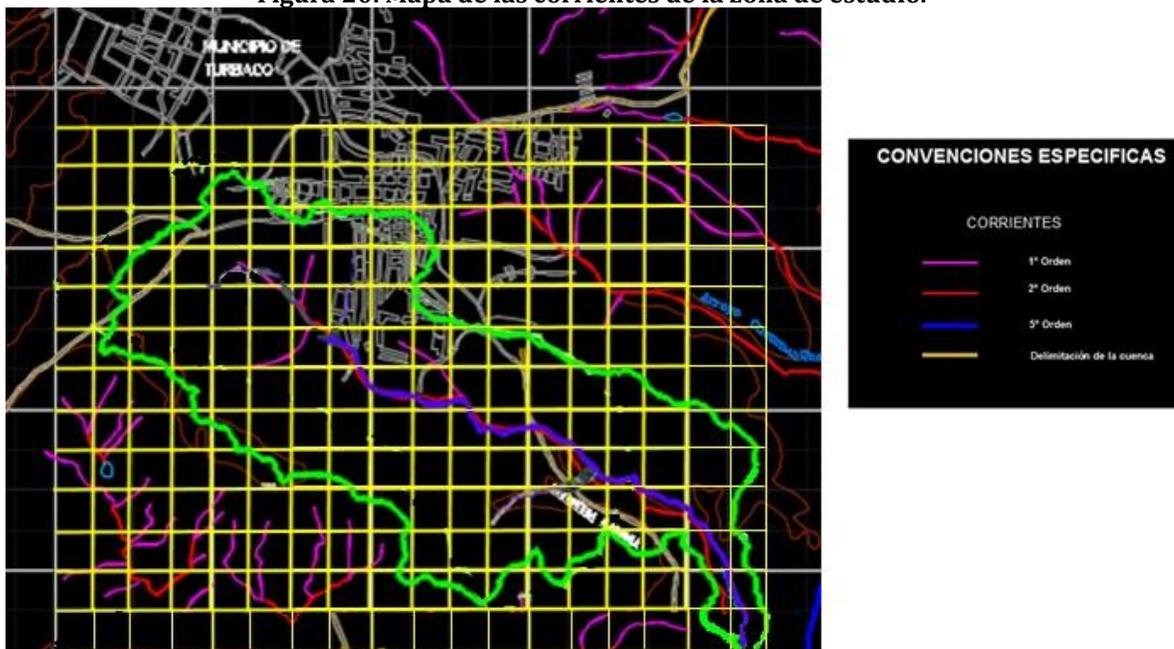
Área (km ²)	6.48
Perímetro (km)	19.8
Cota máxima (m)	205
Cota mínima (m)	73
Cota media (m)	144
Longitud axial (km)	5.04
Pendiente media (%)	8.4

Según la clasificación de López Cardenas de Llano (1998), para el porcentaje de pendiente obtenido, el relieve de la zona se califica como lomadas, dado que está entre 3% a 12%.

5.2.2. RED Y DENSIDAD DE DRENAJE

La cuenca Arroyo Mameyal está conformada por cuatro corrientes de 1° orden y una de 2° orden identificado como el arroyo Mameyal, como se muestra en la Figura 20, que tiene una longitud de 4.3 km. En la Tabla 8 se muestran los parámetros morfométricos de la red de drenaje.

Figura 20. Mapa de las corrientes de la zona de estudio.



Fuente: Tomado y modificado (AutoCAD, 2020)

Tabla 8. Parámetros morfométricos de la red de drenaje.

Longitud cauce principal (km)	4.3
Longitud recta del cauce (km)	3.64
Longitud total de drenaje (km)	9.39
Cota máxima del cauce (m)	178
Cota mínima del cauce (m)	76
Cota media del cauce (m)	127
Sinuosidad del cauce	1.18
Densidad de drenaje (km/km²)	1.44
Patrón de drenaje	Rectangular
Pendiente media (%)	2.3

Según (Cortolima, 2008), el arroyo Mameyal se considera un cauce mediano, la densidad de drenajes es baja y tiene una pendiente suave.

Con el fin de complementar información se realizó una inspección visual a lo largo del arroyo Mameyal y sus puntos de convergencia con los afluentes, Figura 21. El recorrido se inició a la altura del Centro Recreacional Villa Marta (Punto Villa Marta), en donde la vía Troncal de Occidente pasa sobre el arroyo en el sentido Turbaco – Arjona (Figura 22).

Figura 21. Ubicación de los puntos de inspección visual.



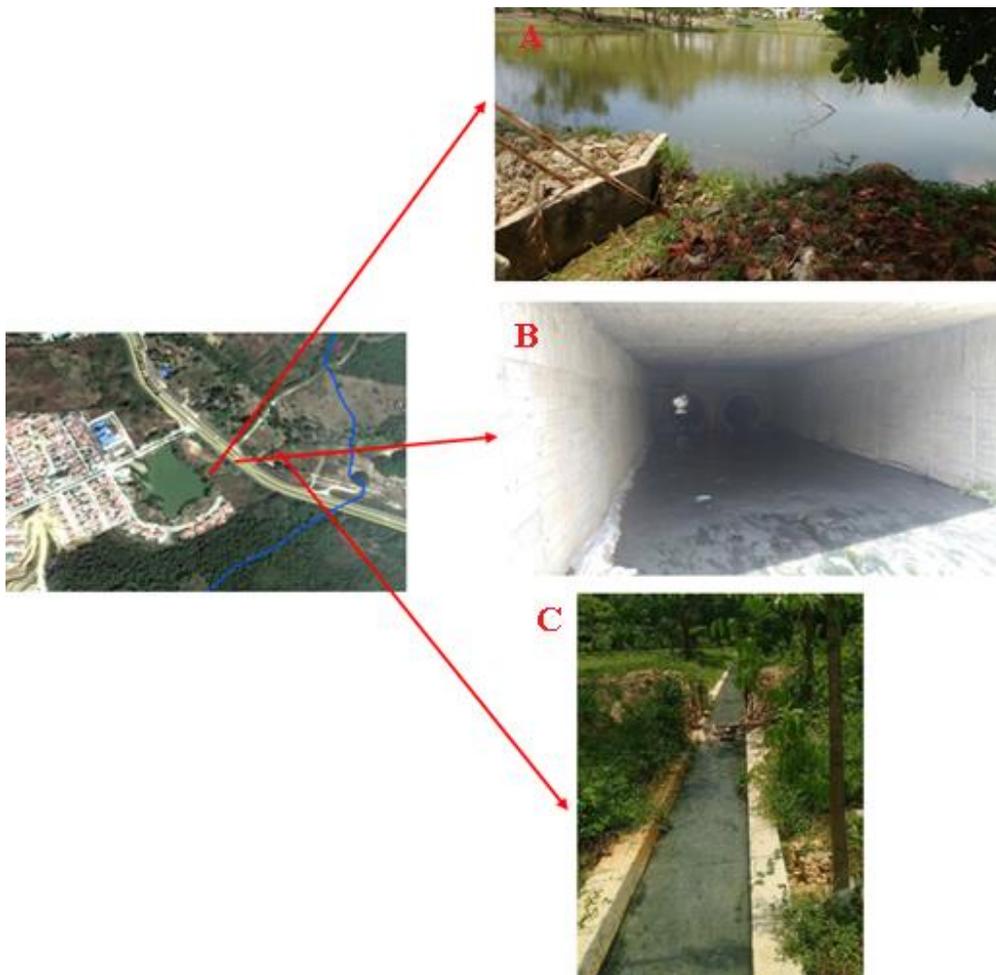
Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

Figura 22. Cruce del arroyo con la Troncal de Occidente en el punto Villa Marta.



Continuando con el recorrido, en la Figura 23 se observa la laguna Bonanza (A), esta tiene un área de 2.5 ha y recoge el agua de escorrentía de la zona, además el agua residual de la urbanización Ciudadela Bonanza con previo tratamiento. Ésta drena a un canal de sección rectangular de 1.2 m de ancho y 0.3 m de alto que se encuentra en buen estado, aunque en épocas de lluvia tienden a acumularse residuos que obstruyen el paso del flujo. Siguiendo, se encuentra el box coulvert (B), está en buen estado, no presenta taponamiento ni obstrucción por basuras y tiene un tamaño adecuado, sus medidas son 2 m de alto y 3.5 m de ancho aproximadamente, el flujo es dirigido a un canal de sección rectangular de 1 m de ancho y 0.25 de profundidad (C).

Figura 23. Obras hidráulicas correspondientes a la urbanización Ciudadela Bonanza (A: Laguna de Ciudadela Bonanza, B: Box Couvert sobre Troncal de Occidente, C: Punto P4)



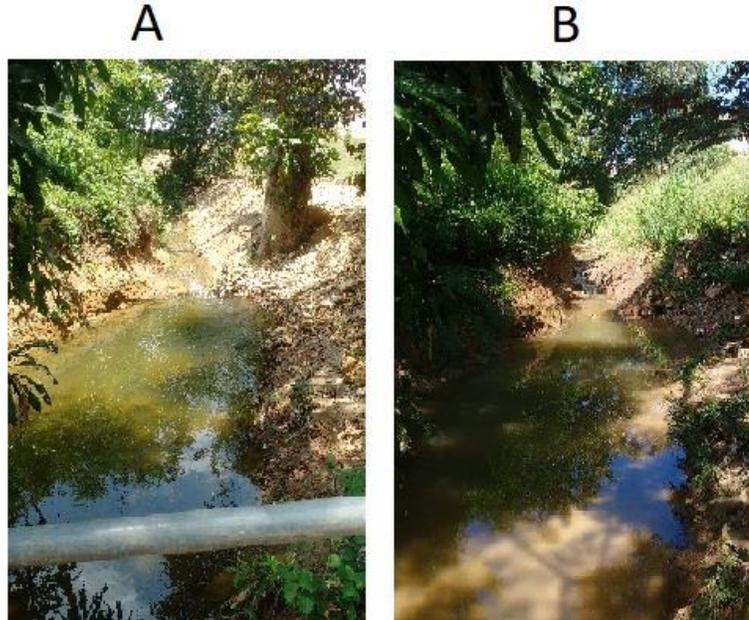
El siguiente punto se encuentra 350 m más adelante, en la Figura 24 se observa un pequeño hilo del arroyo de 1 m de ancho que se reduce por la obstrucción de la vegetación y residuos, propenso a generar desbordes e inundación. Los habitantes de las propiedades aledañas manifestaron que en épocas de invierno se triplica el caudal en este punto del arroyo.

Figura 24. Cruce del arroyo en el sector La Purina (A: Época de verano, B: Época de invierno).



En la Figura 25 se puede observar el punto P5 del recorrido, existe socavación en las paredes del canal en época de verano (A) motivando a los habitantes de la zona a hacer rellenos artesanales, y peor aún en época de lluvias, que el camino existente desaparece por el desborde del arroyo (B). Además de esto, presenta erosión en la parte superior de la pared del canal.

Figura 25. Sección transversal del punto P5 (A: Época de verano, B: Época de invierno).



Continuando el recorrido nos encontramos con un punto Aguas abajo en el que se ensancha el canal, como se observa en la Figura 26. En este punto del arroyo mediante entrevistas

que se les hicieron a los habitantes de la zona se pudo conocer que en épocas de grandes lluvias el arroyo cubre el puente que se encuentra en la zona (Figura 27) causando desbordamientos e inundaciones en las zonas aledañas, a pesar de que este se encuentra 2 metros por encima del nivel frecuente del arroyo.

Figura 26. Punto de inspección Aguas abajo.



Figura 27. Puente peatonal en el punto de inspección Aguas abajo.



5.2.3. CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS

5.2.3.1. Climatología

Los datos utilizados fueron los arrojados por las estaciones meteorológicas de Arjona y Cañaveral para el municipio de Turbaco por su proximidad, y de las estaciones Aeropuerto Rafael Núñez, Santa Ana y Escuela Naval CIOH para determinar el régimen pluviométrico de la zona. Todos los registros fueron proporcionados por el IDEAM.

Tabla 9. Datos de las estaciones del IDEAM utilizadas.

Estación	Municipio	Coord. Geográficas		Altura (m.s.n.m)
		Norte	Oeste	
Aeropuerto Rafael Núñez	Cartagena	10° 26' 31"	75° 31' 13"	2
Escuela Naval (CIOH)	Cartagena	10° 23' 08"	75° 32' 17"	1
Santa Ana	Cartagena	10° 15' 01"	75° 21' 16"	1
Cañaveral	Turbaco	10° 24' 18"	75° 20' 15"	75
Arjona	Arjona	10° 15' 01"	75° 21' 16"	60

- Humedad relativa

La zona de estudio presenta una humedad relativa media multianual de 80%, con valores cercanos a 87% en los meses más lluviosos y en los más secos alrededor de 75%

Vientos

Las velocidades de viento más altas se presentan de diciembre a abril, con velocidades mayores a 28 km/h, y las más bajas en la temporada lluviosa del año.

- Brillo solar

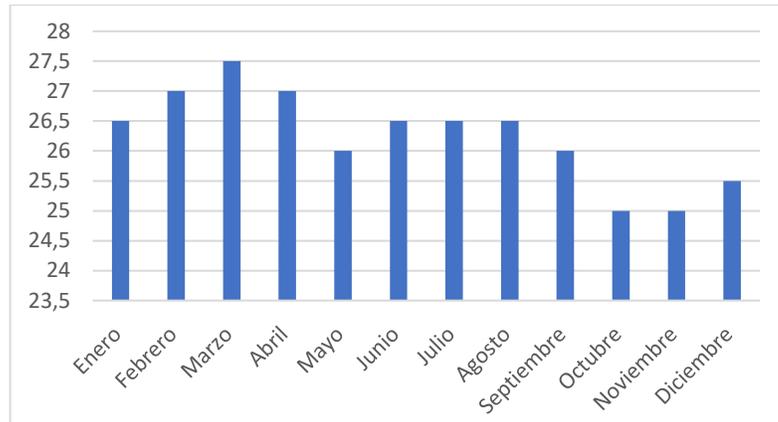
El promedio de horas de sol al año es de 1985 horas, lo que representa 82.7 días plenos de sol al año. El mes más soleado es enero, con 20.9 días de sol.

- Temperatura

Las temperaturas máximas diarias medias varían de 29 °C a 33 °C en los meses más calurosos del año que son los meses de enero a mayo, y de octubre a diciembre las más

bajas, registrando temperaturas mínimas diarias medias de 28 °C a 30 °C. La temperatura media multianual más alta es la del mes de marzo con 27.5 °C.

Gráfica 4. Datos de temperatura media mensual multianual.



Fuente: (Ideam, 2018)

- Precipitaciones

Los valores de precipitación que se usaron en esta investigación fueron el patrón de distribución interna de las precipitaciones máximas en 24 horas de la estación del aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena.

5.2.3.2. Suelos

El territorio del municipio de Turbaco, está formado por depósitos que en su mayoría corresponden a la época del Pleistoceno y al Plioceno superior (Ingeominas, 2001). En general, la agrupación de estos materiales se conoce como formación Popa, está conformada por calizas arrecifales compactas, cristalinas y arenosas de color amarillo claro, coralinas con conchas de moluscos, con intercalaciones de limolitas y arcillolitas calcáreas (margas) (Ingeominas, 1996), lo que permite clasificar a la zona en una marga. Este tipo de suelo presenta un moderado bajo potencial de escorrentía, por lo que podría clasificarse en el grupo hidrológico B.

5.2.3.2.1. Uso actual del suelo y Número de Curva

En la cuenca predominan cinco tipos de cobertura: caminos con firme, caseríos, caminos en tierra, pastizales o pastos naturales, y combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas y leñosos. Con base a los valores de la Tabla 5, los valores de Número de Curva son 84, 74, 84, 69 y 58, respectivamente. En el capítulo MODELO HIDROLÓGICO se mostrarán detalladamente las zonas y el cálculo del Número de Curva ajustado.

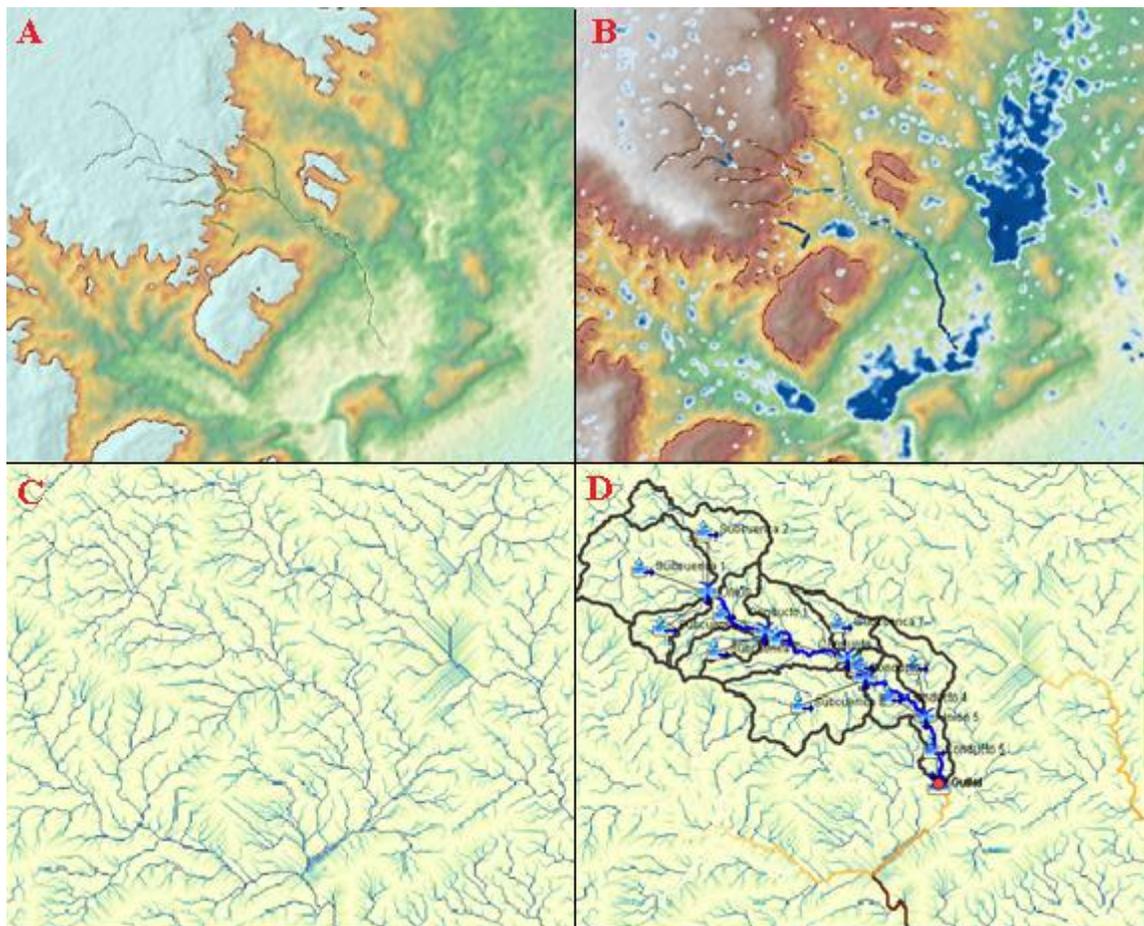
5.3. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Luego de recolectar toda la información necesaria, se subdividió la cuenca con la herramienta GIS del software HEC - HMS, se transformaron los datos de precipitación en mapas de isoyetas para determinar el régimen pluviométrico del área de estudio. Luego se construyeron las curvas IDF sintéticas y los hietogramas, se hallaron los tiempos de concentración y finalmente se estimaron los caudales de escorrentía.

5.3.1. SUBDIVISIÓN DE LA CUENCA

Esta división fue de elaboración propia en el software HEC – HMS, a partir de un DEM del satélite japonés ALOS PALSAR. Inicialmente, se cargó el DEM en el componente de Terrain Data, luego se procesó la imagen para identificar sumideros, drenajes y corrientes, en el menú GIS con las herramientas Preprocess Sinks (A), Preprocess Drainage (B) y Identify Streams (C); finalmente se determinó el punto hasta donde se evaluaría la cuenca a través del arroyo Mameyal, obteniendo así un total de 12 subcuencas en la cuenca Arroyo Mameyal (D). En la Figura 28, se muestran las 4 etapas del procesamiento del DEM para la subdivisión de la cuenca.

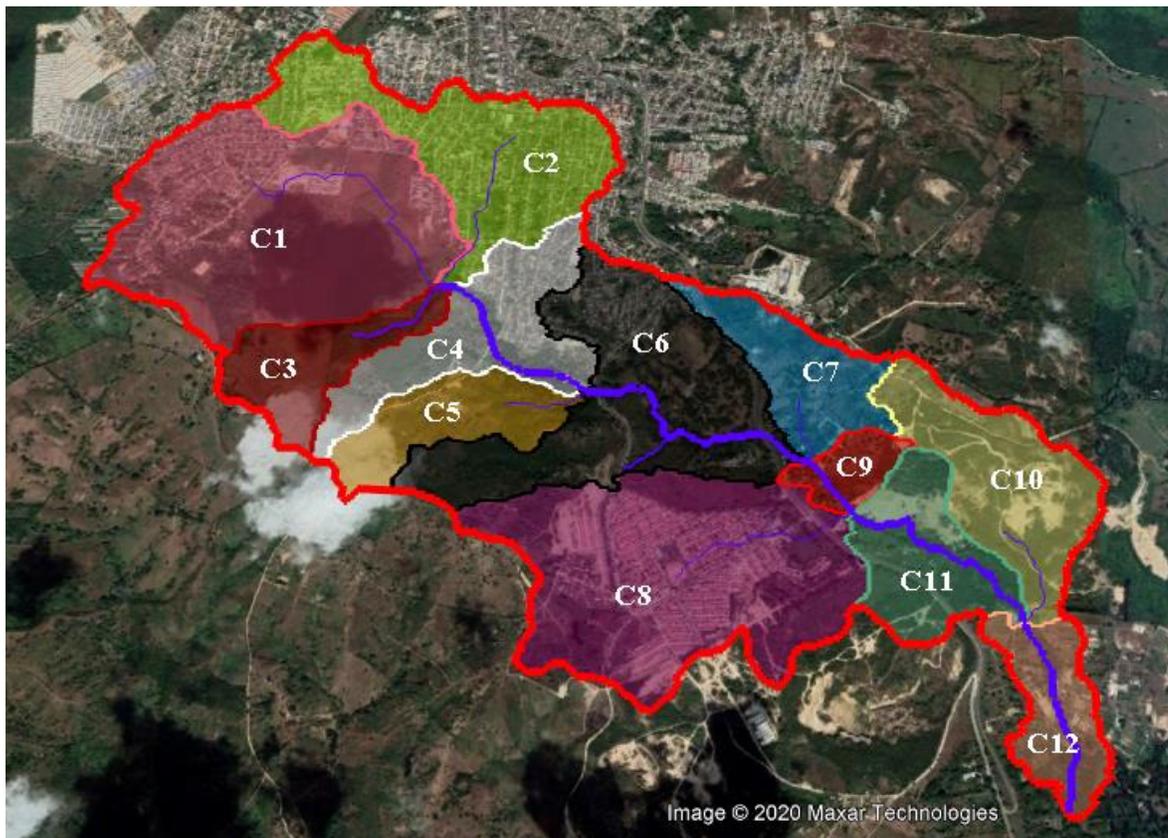
Figura 28. Procesamiento del DEM de la cuenca Arroyo Mameyal con la herramienta SIG en el software HEC - HMS para obtener la subdivisión de cuencas.



Fuente: Tomado y modificado (HEC - HMS, 2020)

Luego se importó la delimitación a QGIS para convertir el archivo de .shp a .kml y posteriormente poder visualizarlo en Google Earth Pro, como se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Delimitación de subcuencas de la cuenca Arroyo Mameyal en Google Earth Pro.



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

5.3.2. MAPAS DE ISOYETAS

Se elaboraron tres diferentes mapas de isoyetas, con las precipitaciones anuales, mensuales y máximas en 24 horas, para conocer el comportamiento pluvial de la zona.

En el primer mapa de isoyetas (Figura 30) se puede observar que para el área de estudio el valor total anual de precipitaciones está entre 1233 mm y 1283 mm, mientras que los valores de precipitaciones máximas en 24 horas están entre 83.1 mm y 85.94 mm, como lo muestra la Figura 31. El rango de las precipitaciones mensuales promedios puede verse en la Tabla 10.

Figura 30. Mapa de isoyetas de precipitaciones totales anuales (el área en amarillo corresponde al punto de estudio).

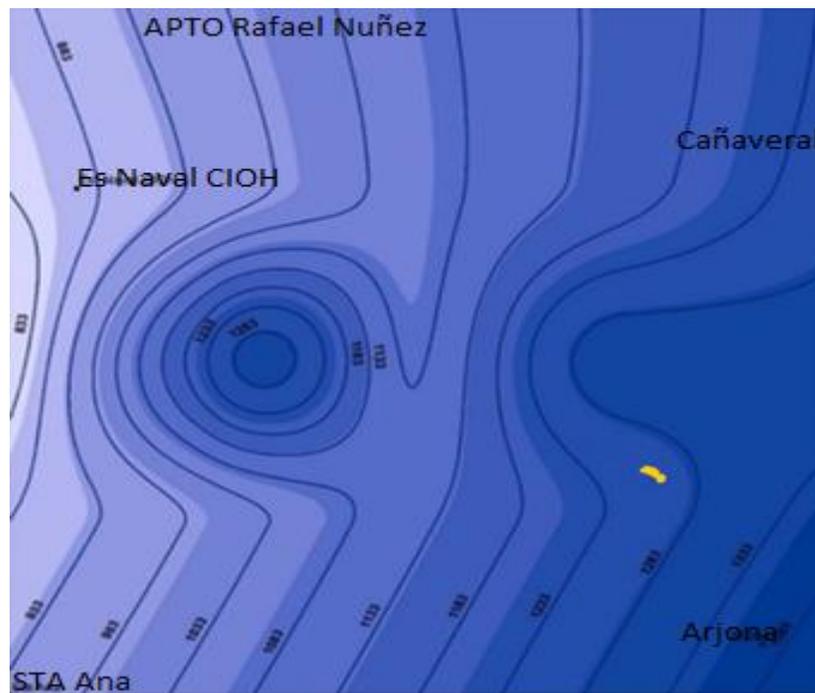


Figura 31. Mapa de isoyetas de precipitaciones máximas en 24 horas (el área en naranja corresponde al punto de estudio).

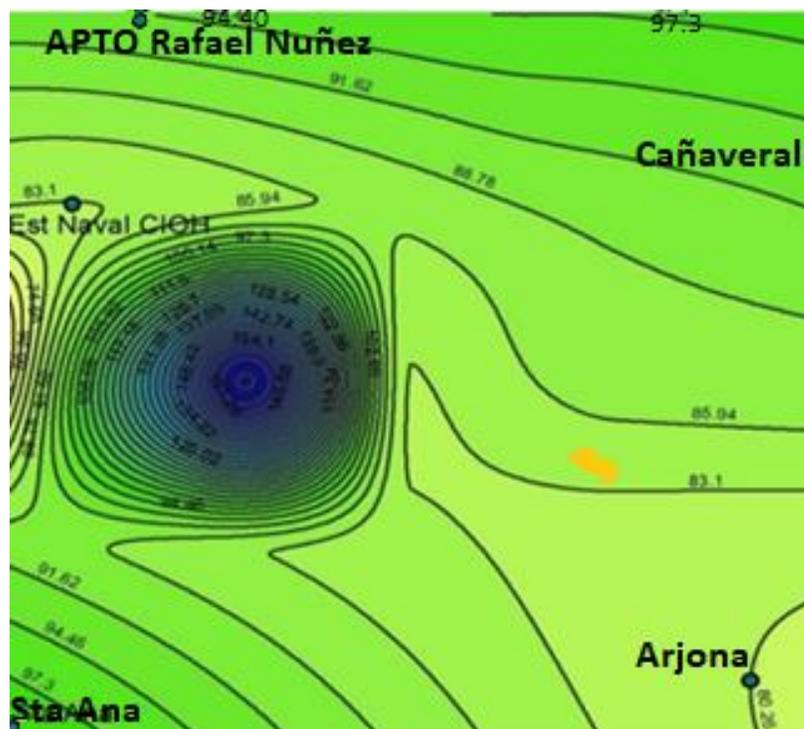


Tabla 10. Rango de las precipitaciones mensuales promedio de todas las estaciones.

Mes	Prec.
	(mm./mes)
Enero	14.2 – 12.2
Febrero	12.1 – 10.1
Marzo	28 – 20
Abril	103.7 – 79.7
Mayo	146.5 – 137.5
Junio	129.9 – 122.9
Julio	124 – 116
Agosto	152 – 143
Septiembre	163 – 155
Octubre	214 – 194
Noviembre	164 – 158
Diciembre	56 – 53

5.3.3. CURVAS IDF SINTÉTICAS

Para la creación de las curvas IDF se hizo un análisis comparativo de la ecuación de Almanza et al. (1995); la de Vargas M. & Diaz-Granados O. (1998) con sus coeficientes propuestos para la región Caribe; las construidas por Hidroconsultores Ltda (2014) basadas en la metodología propuesta por Vargas M. & Diaz-Granados O. y los parámetros calculados para el Aeropuerto Rafael Nuñez de la ciudad de Cartagena; y la actualización de estas curvas por Herrera y Llamas (2018). Se escogió como referencia para el análisis comparativo las curvas IDF calculadas por Herrera y Llamas por ser el estudio más reciente.

Los coeficientes que se utilizaron para la ecuación de Vargas M. & Diaz-Granados O. fueron $a=24.85$ $b=0.22$ $c=0.5$ y $d=0.1$ correspondientes a la región Caribe de Colombia (propuestos en la Tabla 4) y el valor promedio de los valores multianuales de precipitación máximos en 24 horas $M=84.52$ mm estimado como el promedio de isoyetas en las que se encuentra el área de estudio. Mientras que Hidroconsultores Ltda utilizó los coeficientes

a=8.51 b=0.21 c=0.5 d=(-0.01) e=(-0.08) y f=0.28, y el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria M=94.92 mm, además tienen en cuenta parámetros como el promedio del número de días de lluvia al año N=93.29 y la precipitación anual PT=954.92 (propuestos en la Tabla 2 y Tabla 3 respectivamente).

En la Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14 se muestran las intensidades para los diferentes periodos de retorno 10, 25, 50 y 100 años, en 90 minutos para los cuatro autores.

Tabla 11. Valores de intensidad para las curvas IDF de Almanza et al. 1995.

I (mm/h)				
Min	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100
15	153.47	180.99	205.04	232.28
30	117.90	139.04	157.52	178.45
45	98.61	116.29	131.75	149.25
60	86.13	101.58	115.07	130.37
75	77.24	91.09	103.20	116.91
90	70.51	83.16	94.21	106.72

Tabla 12. Valores de intensidad para las curvas IDF de Díaz Granados 1998.

I (mm/h)				
Min	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100
15	128.54	157.25	183.16	213.33
30	90.89	111.19	129.51	150.85
45	74.22	90.79	105.75	123.17
60	64.27	78.63	91.58	106.67
75	57.49	70.33	81.91	95.40
90	52.48	64.20	74.77	87.09

Tabla 13. Valores de intensidad para las curvas IDF de Hidroconsultores 2014.

I (mm/h)				
Min	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100
15	125.31	151.90	175.70	203.23
30	88.61	107.41	124.24	143.71
45	72.35	87.70	101.44	117.34
60	62.66	75.95	87.85	101.62
75	56.04	67.93	78.58	90.89
90	51.16	62.01	71.73	82.97

Tabla 14. Valores de intensidad para las curvas IDF de Herrera y Llamas 2018.

Min	I (mm/h)			
	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100
15	147,54	171,62	192,41	215,73
30	114,14	132,77	148,86	166,90
45	95,93	111,58	125,10	140,26
60	84,09	97,82	109,67	122,96
75	75,63	87,98	98,64	110,59
90	69,21	80,51	90,26	101,20

En la Tabla 15 se muestra el porcentaje de diferencia entre las intensidades calculadas por Herrera y Llamas (2018) vs Almanza et al. (1995), siendo estas últimas las mayores, con porcentajes de diferencia no mayores a 7,68%.

Tabla 15. Porcentaje de diferencia entre Herrera y Llamas (2018) vs Almanza et all. (1995).

Min	% diferencia intensidad			
	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100
15	-4,02%	-5,46%	-6,56%	-7,68%
30	-3,29%	-4,72%	-5,81%	-6,92%
45	-2,80%	-4,22%	-5,31%	-6,41%
60	-2,43%	-3,84%	-4,93%	-6,03%
75	-2,13%	-3,54%	-4,62%	-5,72%
90	-1,88%	-3,29%	-4,37%	-5,46%

En la Tabla 16 se muestra el porcentaje de diferencia para Herrera y Llamas (2019) vs Díaz Granados (1998), estando Díaz Granados (1998) por debajo, con un porcentaje de diferencia de hasta 24,18%.

Tabla 16. Porcentaje de diferencia entre Herrera y Llamas 2018 vs Díaz Granados 1998.

Min	% diferencia intensidad			
	10	25	50	100
15	12,87%	8,37%	4,81%	1,11%
30	20,37%	16,25%	13,00%	9,62%
45	22,63%	18,63%	15,47%	12,19%
60	23,57%	19,62%	16,49%	13,25%
75	23,99%	20,06%	16,96%	13,73%
90	24,18%	20,26%	17,16%	13,94%

Por último, en la Tabla 19 se muestran las diferencias entre los dos estudios más recientes de las curvas IDF para la ciudad de Cartagena, siendo estas las que presentan mayor discrepancia. Las curvas IDF calculadas por Hidroconsultores son menores, con diferencias de hasta un 26% con respecto a las actualizadas por Herrera y Llamas en 2018.

Tabla 17. Porcentaje de diferencia entre Herrera y Llamas 2018 vs Hidroconsultores (2014).

Min	% diferencia intensidad			
	10	25	50	100
15	15,06%	11,49%	8,68%	5,79%
30	22,37%	19,10%	16,54%	13,90%
45	24,58%	21,40%	18,91%	16,35%
60	25,49%	22,35%	19,89%	17,36%
75	25,90%	22,79%	20,34%	17,82%
90	26,08%	22,97%	20,53%	18,01%

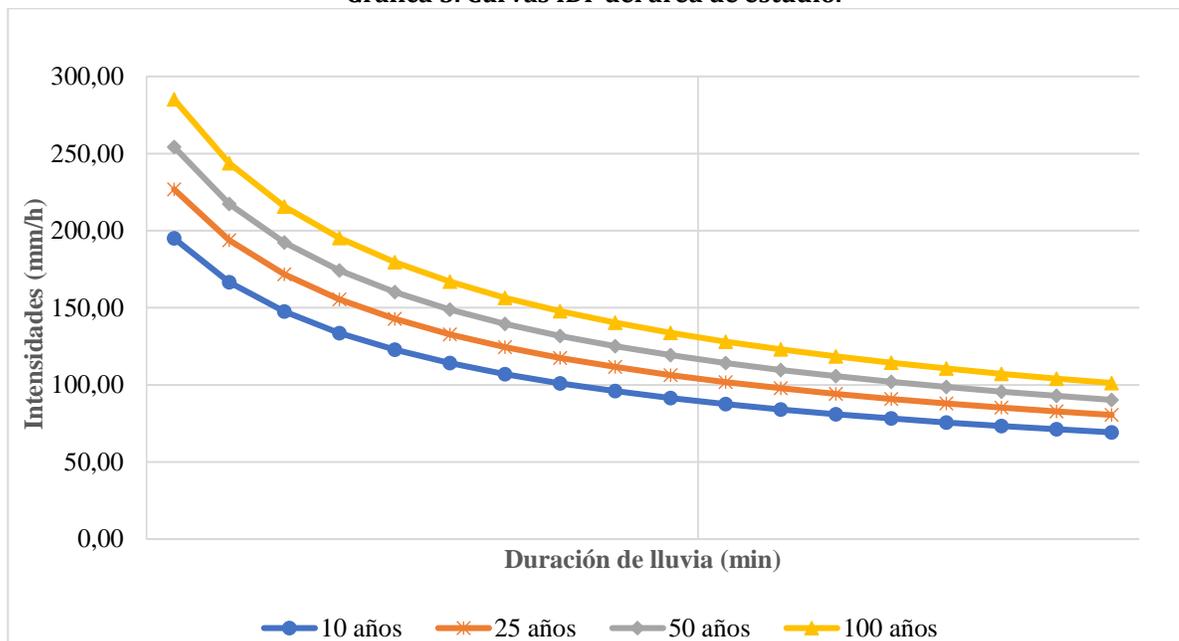
Como conclusión general se escoge la ecuación de intensidad que corresponde al estudio más reciente para la ciudad de Cartagena, (Herrera & Llamas, 2018). En esta actualización de curvas se utilizó la teoría de valores extremos y esta fue aplicada a las curvas IDF previas a la actualización, realizando una comparación entre estas. En la Tabla 18 se encuentran los valores de intensidad para los distintos periodos de retorno para una lluvia de 90 minutos en intervalos de 5 minutos calculados con la ecuación de Herrera y Llamas.

Tabla 18. Valores de intensidad correspondientes a los distintos periodos de retorno.

	Periodo de retorno				
	(min)	10	25	50	100
Duración de lluvia (min)	5	195,00	226,83	254,31	285,12
	10	166,65	193,85	217,34	243,68
	15	147,54	171,62	192,41	215,73
	20	133,56	155,36	174,18	195,28
	25	122,78	142,82	160,12	179,52
	30	114,14	132,77	148,86	166,90
	35	107,03	124,50	139,59	156,50
	40	101,05	117,54	131,79	147,75
	45	95,93	111,58	125,10	140,26

Periodo de retorno				
(min)	10	25	50	100
50	91,48	106,41	119,30	133,75
55	87,56	101,86	114,20	128,03
60	84,09	97,82	109,67	122,96
65	80,98	94,20	105,61	118,41
70	78,18	90,94	101,96	114,31
75	75,63	87,98	98,64	110,59
80	73,31	85,27	95,61	107,19
85	71,18	82,79	92,83	104,07
90	69,21	80,51	90,26	101,20

Gráfica 5. Curvas IDF del área de estudio.



5.3.4. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN (TC)

Para hallar el tiempo de concentración de la cuenca, en primera instancia se calculó el tiempo de entrada (Te) que corresponde a la subcuenca C1 por poseer el punto más alejado de la cuenca que drena hasta la red principal. En la Tabla 19 se observan los parámetros

utilizados por los métodos Kerby y SCS para esta subcuenca, obteniendo un tiempo de entrada de 19.74 minutos.

Tabla 19. Tiempo de entrada en la subcuenca C1.

PARÁMETROS	Kerby	SCS
Longitud al sumidero (m)	1520	1520
Pendiente promedio (%)	2.83	2.83
m	0.02	-
a	-	6.5
Tiempo de espera (min)	16.31	23.17
	19.74	

Luego se halló el tiempo de recorrido (Tt) para cada colector del drenaje principal hasta la salida de la cuenca como se muestra en la Tabla 20, obteniendo 56.85 minutos de tiempo de recorrido entre el colector T-1 y T-5.

Tabla 20. Tiempos de recorrido de los conductos.

Conducto	Forma	b (m)	y (m)	R (m)	n	Lc (m)	S (%)	V (m/s)	Tt (min)
T-1	Rectangular	3	0,7	0,48	0,07	936	0,02	1,31	11,94
T-2	Rectangular	2	2,5	0,71	0,07	1230	0,03	1,90	10,80
T-3	Rectangular	1,5	3	0,60	0,07	304	0,01	1,01	5,02
T-4	Rectangular	1,3	2	0,49	0,07	1010	0,01	1,05	16,09
T-5	Rectangular	1,5	2	0,55	0,07	821	0,01	1,05	13,00
									56,85

Finalmente, al sumar el tiempo de entrada con el tiempo de recorrido se obtiene un tiempo de concentración 76.59 minutos, aproximadamente 77 minutos, que es lo que demora el agua en llegar a la salida de la cuenca desde el punto más alejado (Figura 32).

Figura 32. Recorrido del punto más alejado de la subcuenca C1 hasta la red principal y de la red principal hasta la salida de la cuenca (color azul).



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

Por otra parte, HEC-HMS requiere que a cada subcuenca se le asigne su propio tiempo de concentración, esta información se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 21. Tiempos de concentración en las subcuencas de la cuenca Arroyo Mameyal.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Longitud al sumidero (m)	1520	1400	1000	1120	1130	1680	1000	1610	400	1260	850	750
Pendiente promedio	0,03	0,02	0,04	0,03	0,05	0,05	0,05	0,04	0,08	0,03	0,05	0,01
m	0,02	0,02	0,3	0,02	0,3	0,3	0,3	0,02	0,3	0,2	0,3	0,3
a	6,5	6,5	2	6,5	2	2	2	6,5	2	3,1	2	2
Tiempo de espera Kerby	16,31	17,02	44,90	13,73	44,12	52,42	41,40	15,15	24,29	41,91	38,04	49,51
Tiempo de espera SCS	23,17	25,38	43,92	16,02	42,30	61,17	36,90	19,80	11,79	36,67	30,79	54,13
	19,74	21,20	44,41	14,87	43,21	56,79	39,15	17,48	18,04	39,29	34,41	51,82

5.3.5. HIETOGRAMAS

Para esta investigación, se escogió una duración de tormenta de 3 horas, ya que en la ciudad de Cartagena la mayor cantidad de precipitación se presenta en un tiempo menor que el 20% de la duración de una lluvia registrada en 24 horas (Arrieta & Martinez, 2019). Lo anterior con el fin de tener una representación del hidrograma de la cuenca más real y así poder analizar su comportamiento y los caudales máximos de esta.

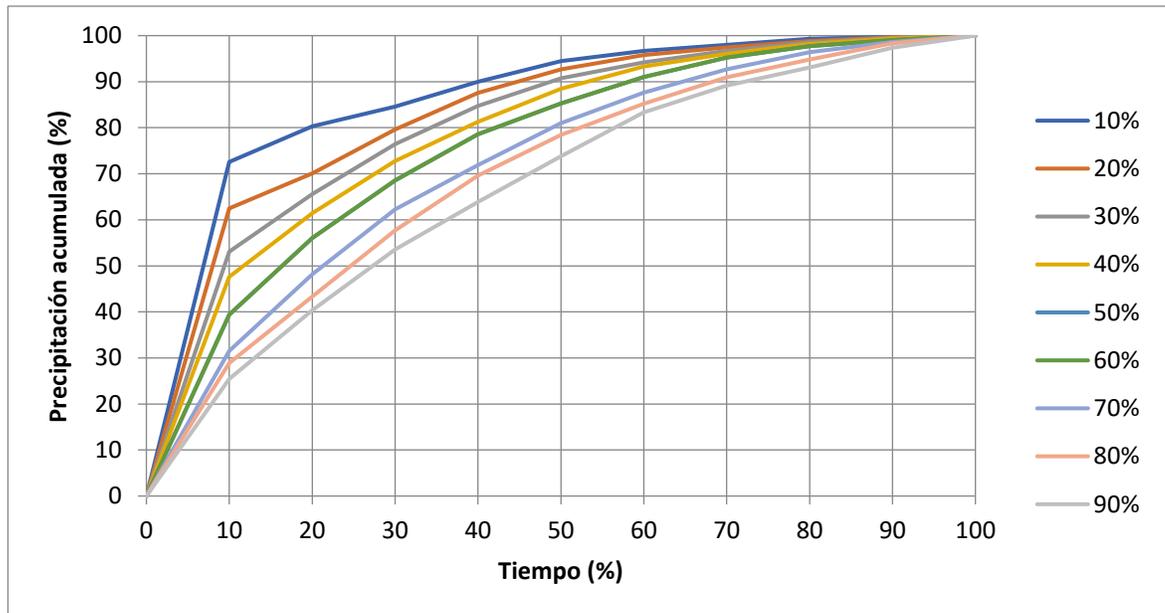
A partir de las curvas IDF (Gráfica 5) se calcularon las intensidades para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años para una lluvia de 3 horas como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Intensidades de lluvia y altura de la lámina de agua para una lluvia de 3 horas en los distintos periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

	Tiempo (h)	I (mm/h)	P (mm)
Pr 10	3	48,75	146,25
Pr 25	3	56,71	170,12
Pr 50	3	63,58	190,73
Pr 100	3	71,28	213,84

Siguiendo la metodología propuesta en el libro de Aplicaciones Hidrológicas en la Ingeniería (Arrieta & Martinez, 2019), en la Gráfica 6 se presentan las curvas para los distintos porcentajes de excedencia y se considera que las 3 horas corresponden al 100% de la duración de la tormenta. Las curvas del 70%, 80% y 90% de probabilidad de excedencia son consideradas las más críticas porque es más probable que el evento hidrológico se presente más veces a lo largo de los años, por lo que para esta investigación se escogió la curva del 70% de probabilidad.

Gráfica 6. Curvas de probabilidad de excedencia para la composición interna de una tormenta de la ciudad de Cartagena.



Fuente: Fuente (Arrieta & Martínez, 2019)

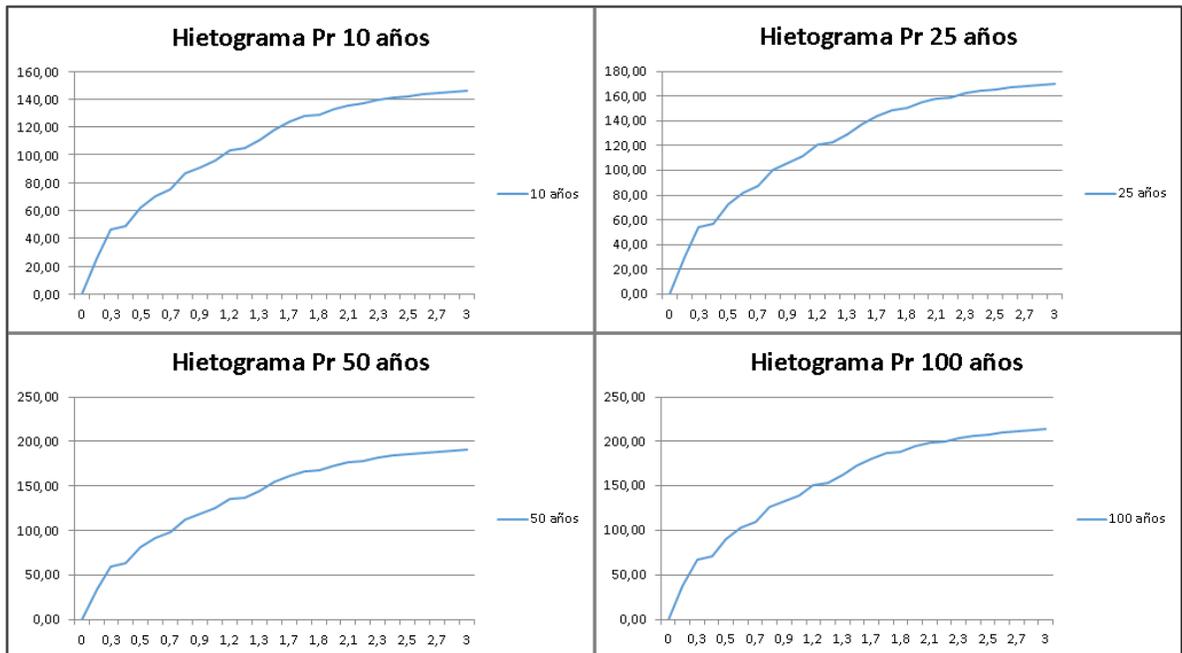
En la Tabla 23 se muestra la composición de la lluvia de diseño para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 23. Composición de la lluvia de diseño para un periodo de retorno de 10, 25, 50 y 100 años en función de una probabilidad de excedencia del 70%.

Tiempo	Composición de la tormenta		Precipitación (mm)				
	%	Horas	P70%	10 años	25 años	50 años	100 años
0%	0	0,00%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10%	0,3	31,54%	46,13	53,66	60,16	67,45	
20%	0,6	48,14%	70,41	81,90	91,82	102,94	
30%	0,9	62,27%	91,07	105,93	118,77	133,16	
40%	1,2	71,90%	105,15	122,32	137,14	153,75	
50%	1,5	80,99%	118,45	137,78	154,48	173,19	
60%	1,8	87,61%	128,13	149,04	167,10	187,35	
70%	2,1	92,65%	135,50	157,62	176,72	198,13	
80%	2,4	96,41%	141,00	164,01	183,89	206,17	
90%	2,7	98,64%	144,26	167,81	188,14	210,94	
100%	3,0	100,00%	146,25	170,12	190,73	213,84	

Finalmente, se interpolaron los datos para tener una distribución de lluvia de 3 horas con intervalos de 10 minutos y se obtuvieron los 4 hietogramas a ingresar en el software HEC – HMS correspondientes a las lluvias para los distintos periodos de retorno 10, 25, 50 y 100 años. Los hietogramas se presentan a continuación:

Gráfica 7. Hietogramas de diseño ingresados en HEC – HMS para la modelación hidrológica.



5.4. MODELO HIDROLÓGICO

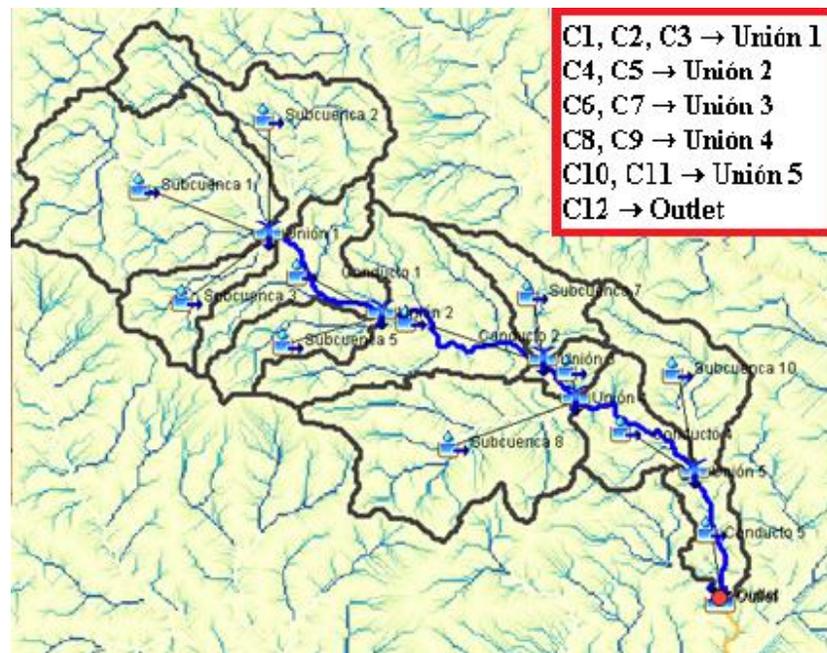
El modelo creado por medio de la herramienta GIS del software HEC – HMS posee 12 subcuencas, 5 conductos, 5 uniones y 1 punto de descarga. A cada subcuenca se le ingresó el área correspondiente, a cada conducto se le escogió como método de ruta Onda Cinemática y se indicaron longitud, pendiente, n de Manning, cota del terreno, forma de la sección transversal y el ancho a cada uno (Tabla 24).

Tabla 24. Características de los conductos.

Conducto	Longitud (m)	S (%)	n de Manning	Elevación Invertida	Forma sección transversal	Ancho (m)
T-1	936	0,00	0,07	164	Rectangular abierto	3
T-2	1230	0,00	0,07	143	Rectangular abierto	2
T-3	304	0,00	0,07	109	Rectangular abierto	1,5
T-4	1010	0,00	0,07	106	Rectangular abierto	1,3
T-5	821	0,00	0,07	92	Rectangular abierto	1,5

Luego, se indicó el punto donde desemboca la escorrentía directa de cada subcuenca a la corriente principal, se conectaron estos a las uniones y a su vez estas a los conductos, como se observa en la Figura 33.

Figura 33. Modelo de cuenca generado en el software HEC-HMS para el periodo actual y proyecciones urbanísticas de 10, 25, 50 y 100 años, y puntos donde desemboca la escorrentía directa de las subcuencas (cuadro color rojo).

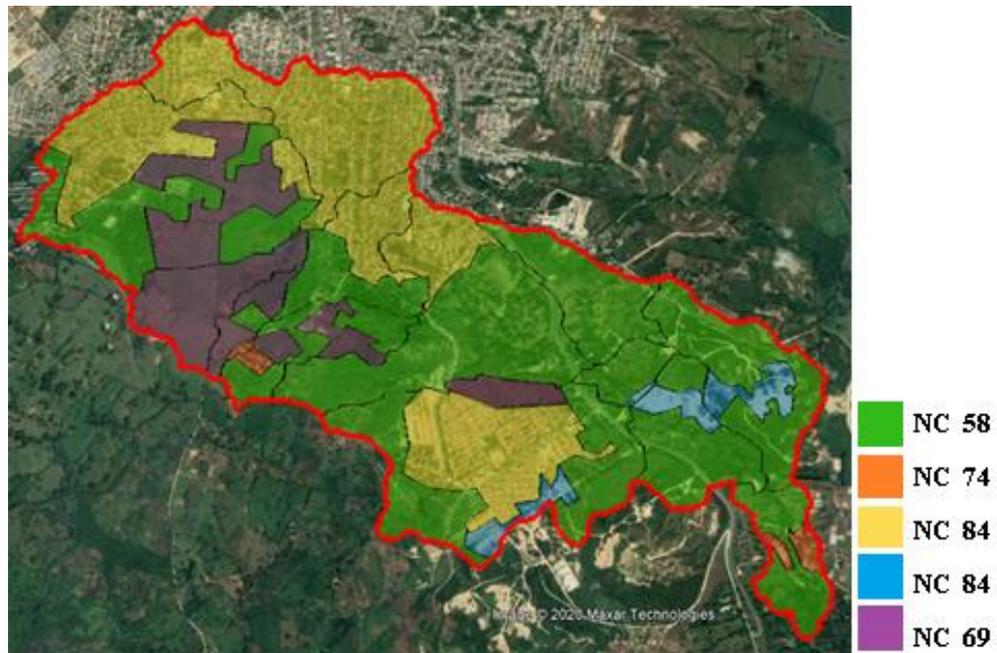


Fuente: Tomado y modificado (HEC - HMS, 2020)

Además, para el cálculo de pérdidas por el método del SCS Número de Curva (NC) se asignaron los NC de acuerdo al tipo de cobertura que existe actualmente en cada subcuenca. El mapa de número de curvas para el año 2019 que se usó con el fin de estimar

los NCajustados en las 12 subcuencas se presenta en la Figura 34. De igual manera para las proyecciones urbanísticas de 10, 25, 50 y 100 años, se copió el modelo de cuenca actual 4 veces para proceder a estimar los NCajustados correspondientes.

Figura 34. Mapa de Números de Curva en la cuenca Arroyo Mameyal acorde al tipo de cobertura de la zona en la actualidad, año 2019. Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas y leñosos (color verde), Caseríos (color naranja), Caminos con firme (color amarillo), Caminos en tierra (color azul), Pastizales o pastos naturales (color morado).



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

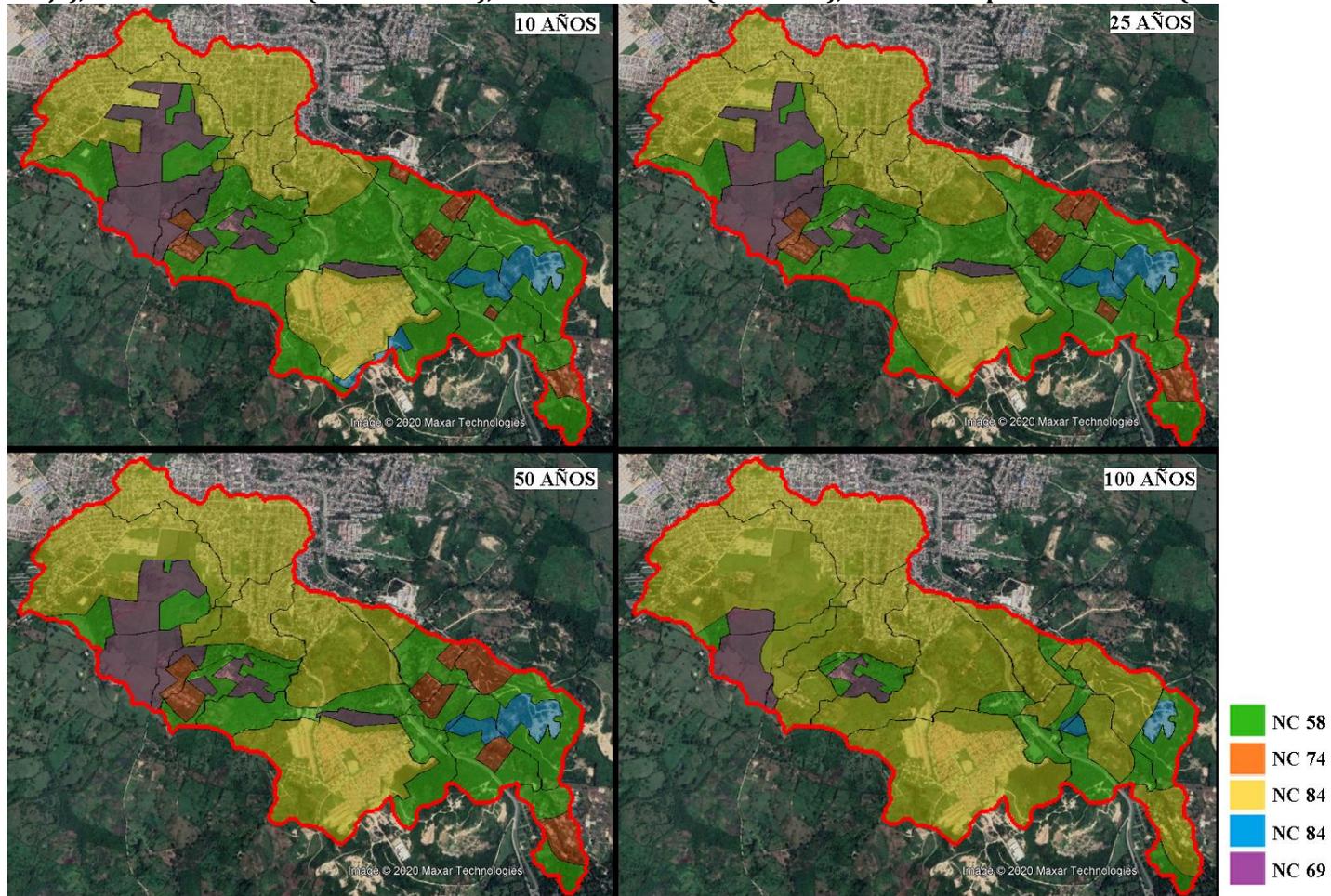
Para calcular los NCajustados para las proyecciones de urbanización anteriormente mencionadas se tuvieron en cuenta los porcentajes de urbanización proyectados para la cuenca que se muestran en la Tabla 25. Aunque es evidente que para hacer un mejor análisis y tener una tendencia de crecimiento de la zona que diste menos de la realidad se precisan procesos más complejos y dinámicos (Polo, 2013), de acuerdo a la proyección lineal que se hizo del crecimiento de la cuenca se estimó que en 100 años la cuenca iba a estar en un 82% urbanizada.

Tabla 25. Porcentajes de urbanización proyectados para cada subcuenca.

Subcuenca	Área (ha)	Urb 0 (37%)	Urb 10 (41%)	Urb 25 (49%)	Urb 50 (60%)	Urb 100 (82%)
C1	130,42	49	52	59	68	93
C2	78,22	94	94	95	96	97
C3	29,03	0	3	7	18	40
C4	46,58	44	50	63	74	96
C5	28,55	6	10	12	18	42
C6	85,59	22	32	45	66	94
C7	31,55	23	30	37	51	84
C8	104,97	45	53	64	76	91
C9	10,94	9	13	15	31	60
C10	47,12	0	2	8	23	55
C11	33,61	0	2	5	13	45
C12	21,84	18	23	28	37	79
	648					

En la Figura 35 se presentan los 4 mapas de números de curvas correspondientes a cada proyección y en la Tabla 26 se presentan los NCajustados en cada subcuenca para cada proyección urbanística, cada una de estas con sus respectivas abstracciones iniciales.

Figura 35. Mapas de Números de Curva en la cuenca Arroyo Mameyal acorde al tipo de cobertura de la zona para las proyecciones urbanísticas de 10, 25, 50 y 100 años. Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas y leñosos (color verde), Caseríos (color naranja), Caminos con firme (color amarillo), Caminos en tierra (color azul), Pastizales o pastos naturales (color morado).



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

Tabla 26. Datos de entrada por subcuenca para cada proyección urbanística necesarios para el cálculo de pérdidas por SCS Número de Curva.

Subcuenca	Área (km ²)	Actualidad		10 años		25 años		50 años		100 años	
		NC ajustado	Po (mm)								
C1	1,3042	73	17,6	74	17,0	75	15,8	77	14,3	82	10,2
C2	0,7822	83	9,5	83	9,5	83	9,5	83	9,5	83	9,5
C3	0,2903	68	22,6	69	22,2	69	21,8	71	20,0	75	16,7
C4	0,4658	71	19,5	72	18,0	75	15,9	77	13,8	83	9,9
C5	0,2855	63	29,6	63	29,4	64	29,1	64	28,0	72	20,1
C6	0,8559	64	28,4	67	25,2	70	21,5	76	16,4	83	10,7
C7	0,3155	62	30,7	64	28,5	66	26,0	70	22,1	80	12,9
C8	1,0497	71	19,8	73	18,2	75	16,8	78	14,1	81	11,3
C9	0,1094	63	32,7	63	31,9	64	31,7	65	29,0	76	17,1
C10	0,4712	64	26,7	64	26,3	65	25,1	68	22,7	75	15,9
C11	0,3361	63	30,4	63	29,9	63	29,3	64	28,7	71	20,4
C12	0,2184	57	31,9	58	30,9	59	30,1	60	28,1	77	13,2
	6,48										

Para el método de transformación lluvia – escorrentía SCS Hidrograma Unitario sólo se requería el tiempo de retardo, que corresponde al 60% del tiempo de concentración de cada subcuenca.

Posteriormente, se crearon cuatro modelos meteorológicos correspondientes a las diferentes lluvias de los periodos de retorno (10, 20, 25 y 100 años), cada uno con su respectivo hietograma de duración de 3 horas, y finalmente se ajustó un tiempo de simulación de 9 horas para observar el comportamiento de la cuenca.

Una vez todos estos datos fueron introducidos al software HEC-HMS, se procedió a realizar las 20 simulaciones correspondientes a los cinco modelos de cuenca (urbanización actual y las proyecciones de urbanización para 10, 25, 50 y 100 años) con cada uno de los hietogramas para lluvias con periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

En la Tabla 27. Caudales máximos de escorrentía que generan las subcuencas en mm.Tabla 27 se muestran los volúmenes de escorrentía superficial en cada subcuenca por las lluvias de los distintos periodos de retorno para cada proyección de urbanización calculados por HEC-HMS, estos ya tienen incluidos el cálculo de pérdidas por infiltración.

Tabla 27. Caudales máximos de escorrentía que generan las subcuencas en mm.

	TR=10; P=146,25mm					TR=25; P=170,12mm				
	Urb 0	Urb 10	Urb 25	Urb 50	Urb 100	Urb 0	Urb 10	Urb 25	Urb 50	Urb 100
C1	109	112	118	126	143	131	135	141	149	166
C2	143	143	144	144	145	167	167	168	168	169
C3	62	67	70	83	105	80	86	89	103	127
C4	103	109	121	130	144	124	130	144	153	168
C5	57	61	64	70	103	74	78	82	88	124
C6	74	87	102	124	143	92	107	124	147	167
C7	71	81	90	107	137	90	100	110	129	161
C8	104	112	122	132	141	125	134	144	155	165
C9	60	63	67	83	120	77	81	85	103	143
C10	53	55	63	81	116	70	72	81	101	138
C11	51	53	56	65	104	68	70	73	83	125
C12	58	65	72	82	133	75	82	90	101	156

	TR=50; P=190,73mm					TR=100; P=213,84mm				
	Urb 0	Urb 10	Urb 25	Urb 50	Urb 100	Urb 0	Urb 10	Urb 25	Urb 50	Urb 100
C1	150	154	160	169	191	172	176	183	191	210
C2	188	188	188	189	212	211	211	211	212	212
C3	97	103	106	121	141	117	122	126	141	168
C4	143	150	163	173	196	164	171	186	196	212
C5	90	94	99	105	124	108	113	118	124	164
C6	109	125	142	167	189	129	146	164	189	211
C7	106	118	128	148	169	125	137	149	169	204
C8	144	153	164	175	198	165	175	186	198	209
C9	93	97	102	120	141	112	116	121	141	185
C10	86	88	97	119	139	105	107	116	139	180
C11	83	86	89	100	119	102	104	107	119	165
C12	90	98	106	118	138	107	116	125	138	199

Por otro lado, se encuentran los caudales máximos que se generan a lo largo del canal de conducción, el arroyo Mameyal, para las diferentes lluvias de los periodos de retorno y los diferentes porcentajes de urbanización en la cuenca, estos se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Caudales máximos que se generan en los tramos del arroyo Mameyal en m³/s.

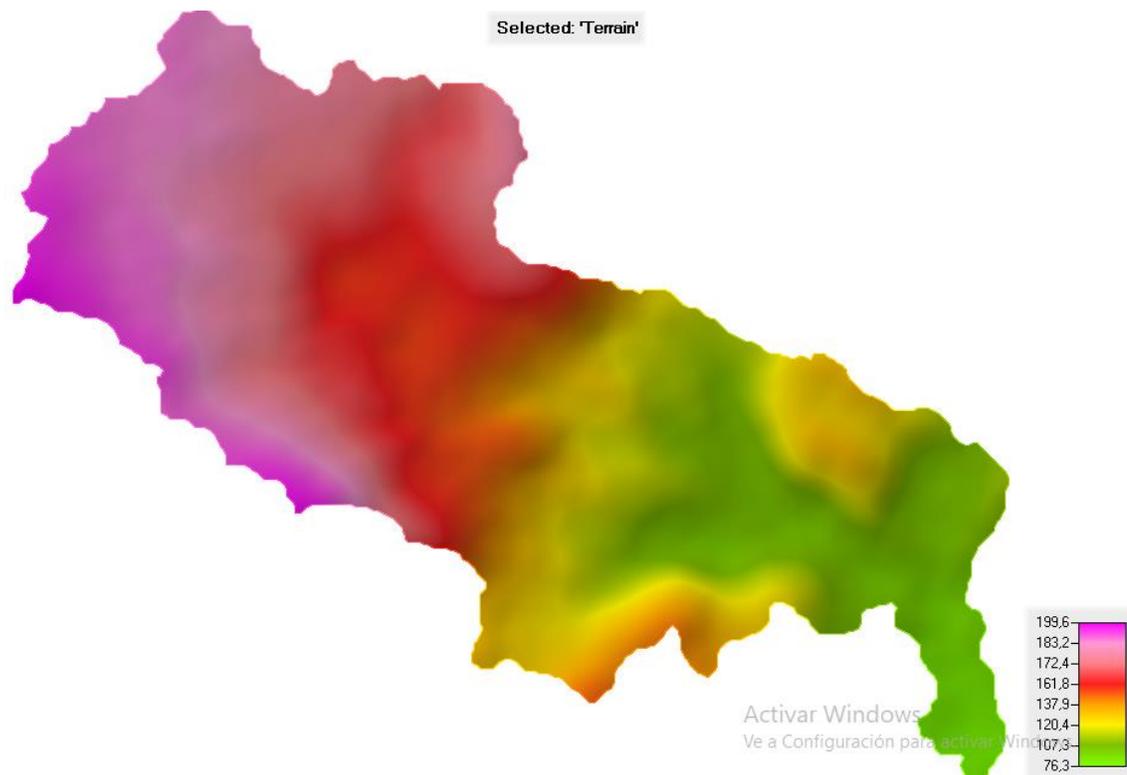
	TR=10					TR=25				
	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
Unión-1	52	54	57	61	71	63	65	68	72	83
Unión-2	62	64	69	75	88	74	77	83	89	103
Unión-3	66	71	77	87	104	80	85	92	102	121
Unión-4	86	93	103	116	138	105	112	124	138	161
Unión-5	88	95	106	121	149	107	115	127	144	175
Outlet	88	96	107	122	152	108	116	128	145	178

	TR=50					TR=100				
	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
Unión-1	72	74	77	82	93	82	85	88	93	105
Unión-2	85	89	94	101	115	98	102	108	115	131
Unión-3	92	98	106	116	132	106	112	121	132	153
Unión-4	121	130	141	156	178	140	149	162	178	204
Unión-5	125	133	146	164	187	145	154	168	187	223
Outlet	126	135	147	166	189	146	156	170	189	227

5.5. MODELO HIDRÁULICO

Inicialmente, para crear el modelo hidráulico en el software HEC – RAS se cargó el DEM en la herramienta RAS Mapper y se delimitó la zona correspondiente a la cuenca Arroyo Mameyal, como se muestra en la Figura 36.

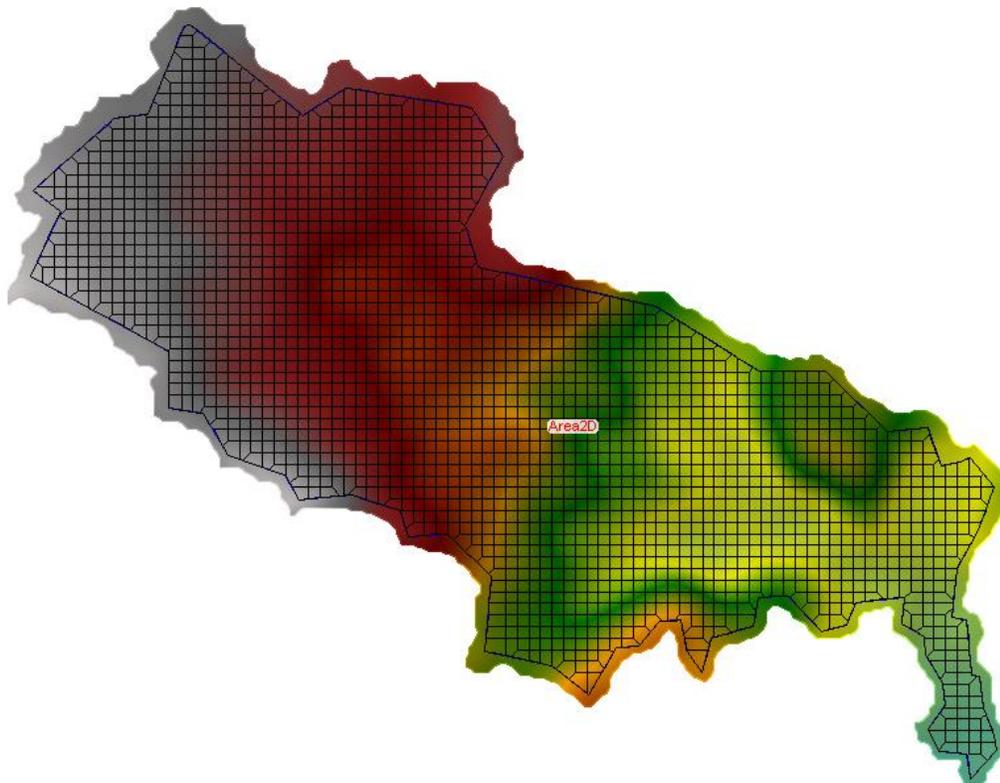
Figura 36. Modelo de Elevación Digital de la cuenca Arroyo Mameyal.



Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

La principal limitación que se tuvo en este modelo fue que no se contaba con unas secciones transversales a lo largo del arroyo Mameyal con un buen nivel de detalle, por lo que en lugar de utilizar la geometría del arroyo, se determinó un área de flujo en la cuenca utilizando la herramienta 2D Flow Area (Figura 37) en la que a través de un polígono el modelo calcularía el flujo bidimensionalmente utilizando la precipitación neta, es decir, solo la lluvia que genera escorrentía en la cuenca.

Figura 37. Malla computacional que representa el área de flujo 2D de la escorrentía en la cuenca Arroyo Mameyal.

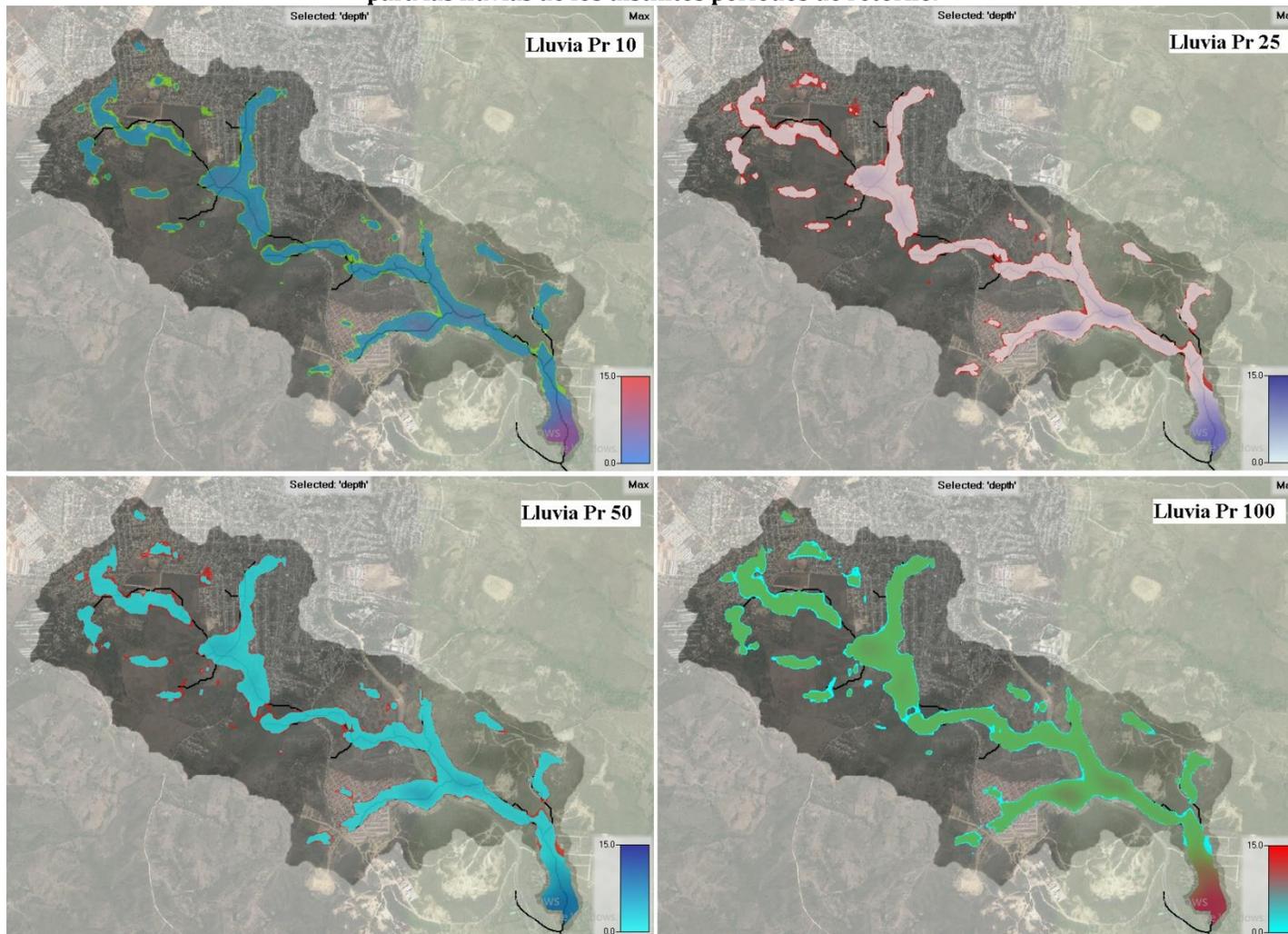


Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

De igual manera se crearon los 20 escenarios correspondientes a las lluvias de los periodos de retorno 10, 25, 50 y 100 años, con cada una de las proyecciones de urbanización actual y futura (0, 10, 25, 50 y 100 años); cada una de estas con su respectivo hietograma de duración de 3 horas recalculado (VER ANEXO HIETOGRAMAS RECALCULADOS CON LA PRECIPITACIÓN NETA INGRESADOS EN HEC – RAS PARA LA MODELACIÓN HIDRÁULICA). Finalmente, se ajustó un tiempo de simulación de 9 horas para observar el comportamiento de la cuenca.

Los mapas de inundación mostrados en la Figura 38 permiten ver de manera general las zonas con mayor amenaza de inundación en la cuenca ante una crecida del arroyo Mameyal por las lluvias de los distintos periodos de retorno. Sólo se muestra el momento de inundación máximo de cada lluvia para la urbanización actual y la proyectada en 100 años.

Figura 38. Mancha de inundación generada para la urbanización actual y la proyectada en 100 años por la crecida del arroyo Mameyal para las lluvias de los distintos periodos de retorno.



Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

5.6. INFORME DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN

De acuerdo a los caudales máximos superficiales calculados por HEC-HMS en cada subcuenca y las pérdidas por infiltración de estas, se pudo observar cómo el incremento en el porcentaje de área urbanizada origina una reducción en la capacidad de infiltración de la cuenca.

En el caso de la lluvia con una altura de lámina de agua de 146,25 mm para un periodo de retorno de 10 años y el porcentaje de urbanización actual (Urb0) se infiltran 54,85 mm, es decir, que 91,38 mm es el exceso que corresponde a la escorrentía superficial. Sin embargo, para la misma lluvia pero con la urbanización proyectada para 100 años, sólo se infiltrarían 11,85 mm. En la Tabla 29 se observan las abstracciones de la cuenca arroyo Mameyal en los 20 escenarios simulados.

Tabla 29. Pérdidas por infiltración en la cuenca Arroyo Mameyal.

	Precipitación (mm)	Urb 0	Urb 10	Urb 25	Urb 50	Urb 100
Pr 10	146,25	54,87	49,35	41,90	31,04	11,85
Pr 25	170,12	58,62	52,55	44,44	33,02	12,50
Pr 50	190,73	61,26	54,82	46,45	34,45	12,61
Pr 100	213,84	64,07	57,08	48,34	35,72	13,09

Por consiguiente, para la lluvia del periodo de retorno de 10 años y el porcentaje de urbanización actual de la cuenca (37%) se tiene un coeficiente de escorrentía del 62%, y luego de someterse a un proceso de urbanización proyectado para 100 años, alcanzando un 82% de urbanización en la cuenca, se tendría un coeficiente de escorrentía del 92%, presentando un aumento del 30% con respecto al coeficiente de escorrentía actual. En la Tabla 30 se muestran los coeficientes de escorrentía calculados para los 20 escenarios planteados.

Tabla 30. Coeficientes de escorrentía calculados en la cuenca Arroyo Mameyal.

	Urb 0	Urb 10	Urb 25	Urb 50	Urb 100
Pr 10	62%	66%	71%	79%	92%
Pr 25	66%	69%	74%	81%	93%
Pr 50	68%	71%	76%	82%	93%
Pr 100	70%	73%	77%	83%	94%

Cabe resaltar que cada subcuenca posee un crecimiento urbanístico diferente y que las 12 subcuencas poseen variaciones en la escorrentía, pero en este informe se mostró de manera general para una mejor interpretación (para mayor detalle ver ANEXO COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA EN CADA SUBCUENCA PARA CADA PROYECCIÓN DE URBANIZACIÓN Y CADA LLUVIA DE LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO).

En cuanto al comportamiento del flujo en el arroyo Mameyal se obtuvo que el caudal pico se da en la salida de la cuenca, donde converge toda la escorrentía de las 12 subcuencas. Además, se estimó que el caudal pico de la cuenca con el porcentaje de urbanización actual es generado a las 3 horas y 34 minutos y ese mismo caudal tras el aumento del porcentaje de urbanización proyectado para 100 años se da aproximadamente 15 minutos antes, es decir, los cuatro hidrogramas correspondientes a las lluvias de los distintos periodos de retorno vs el porcentaje de urbanización actual y futuro en la cuenca presentan una disminución del tiempo al pico de aproximadamente 15 minutos. En la Gráfica 8 se muestran los hidrogramas de crecida de las 20 simulaciones, clasificados por las distintas lluvias de los periodos de retorno.

Por último, después de simular las diferentes lluvias de los periodos de retorno, cada una de estas con 3 horas de duración, se observó el comportamiento de la cuenca con el porcentaje de urbanización actual y futuro durante 9 horas, mostrando una cuenca que pasado este tiempo aún presenta manchas de inundación en algunas zonas. En la Figura 39, Figura 40, Figura 41 y Figura 42 se muestran las manchas de inundación agrupadas por las diferentes lluvias de los periodos de retorno.

Gráfica 8. Hidrogramas de crecida en la salida de la cuenca para los distintos periodos de retorno

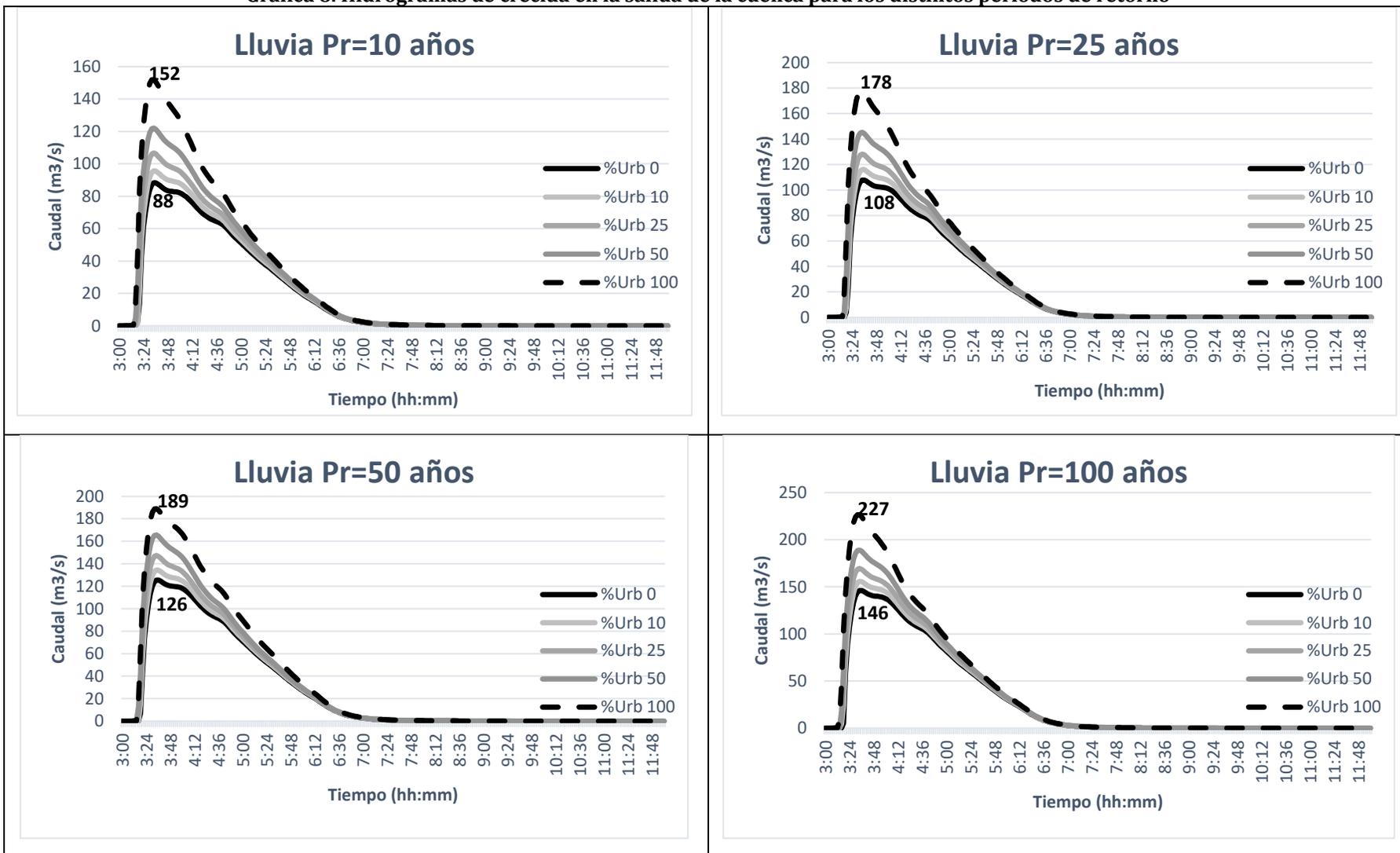
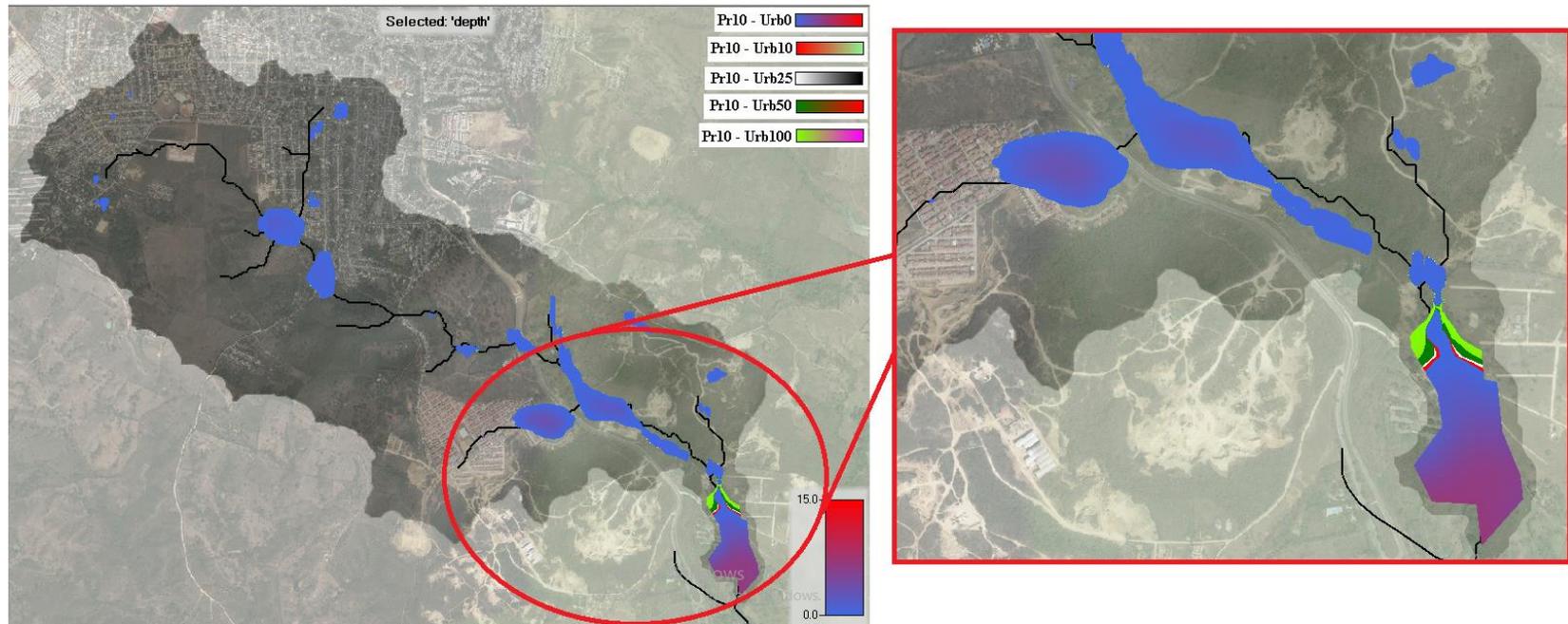
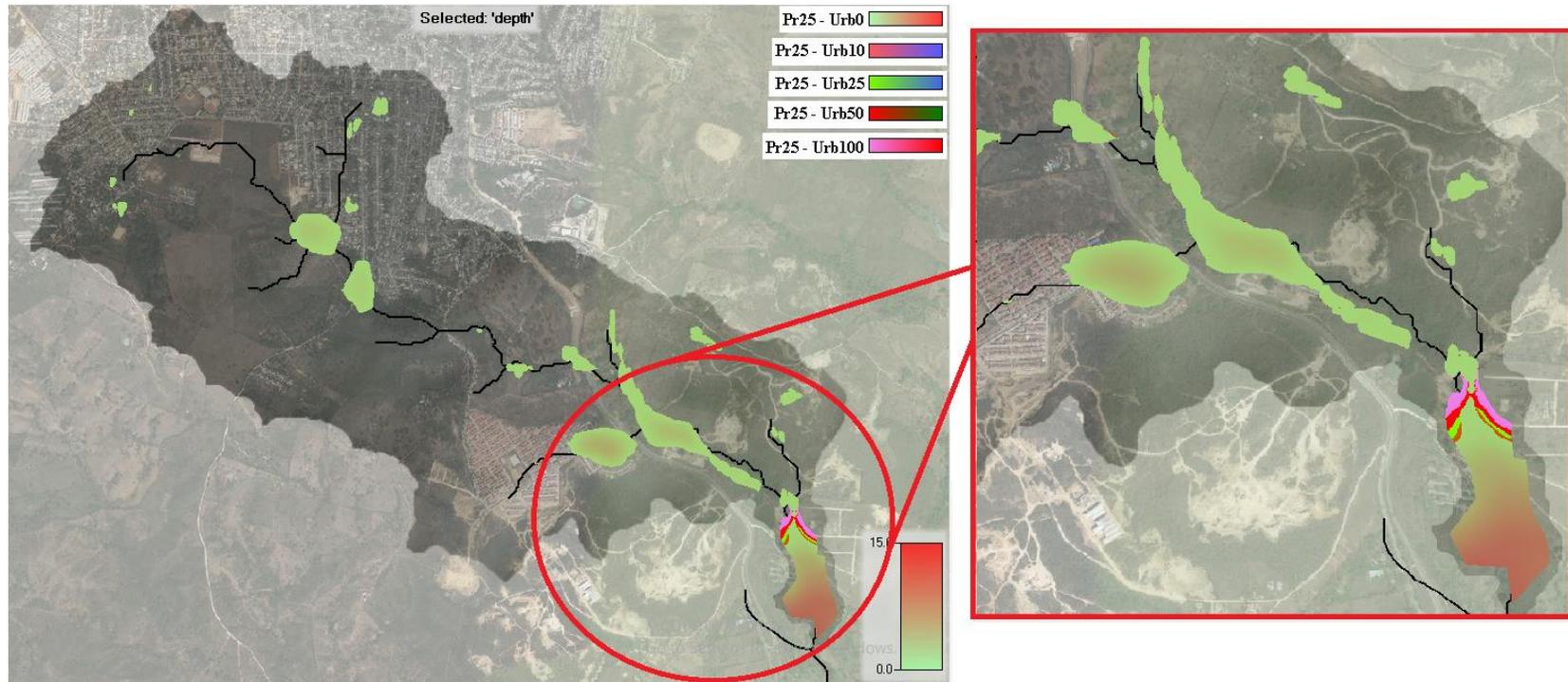


Figura 39. Mancha de inundación en la cuenca Arroyo Mameyal 9 horas después de una lluvia de 3 horas de duración correspondiente a un periodo de retorno de 10 años.



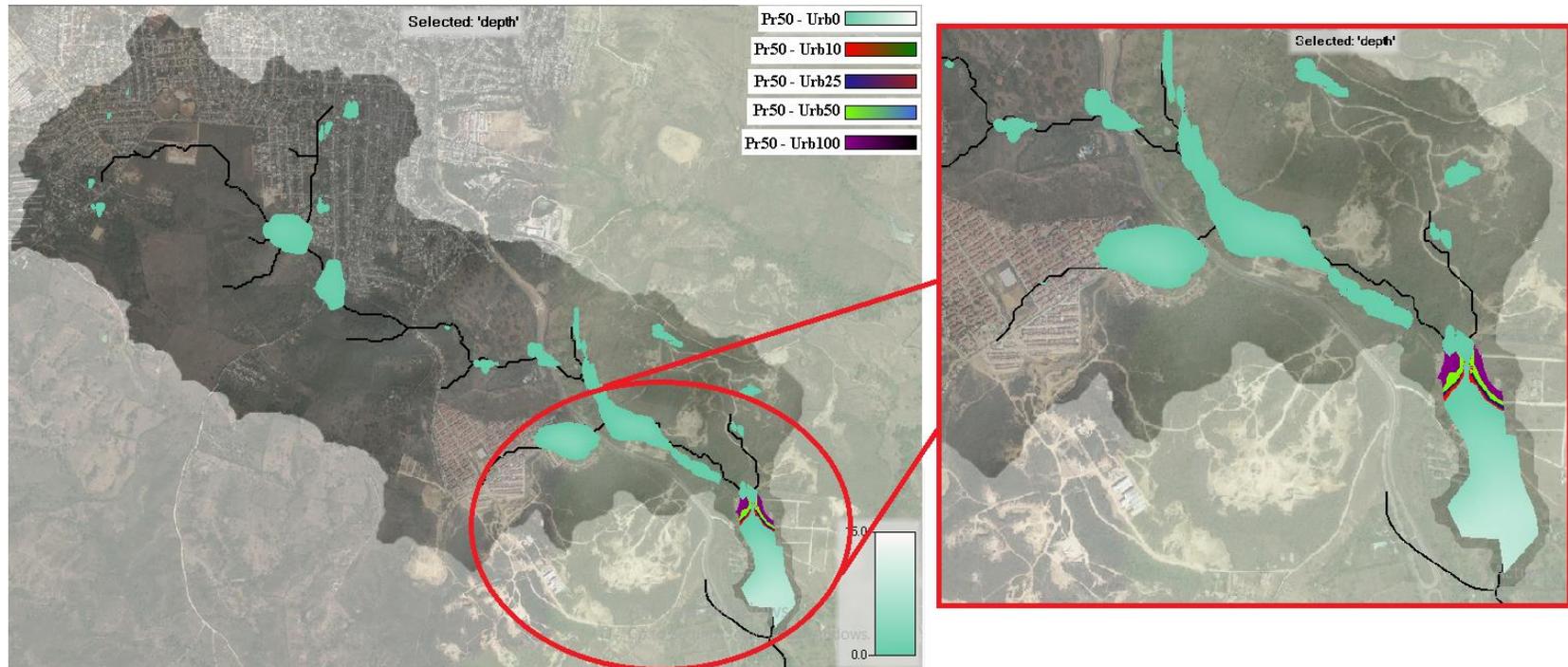
Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

Figura 40. Mancha de inundación en la cuenca Arroyo Mameyal 9 horas después de una lluvia de 3 horas de duración correspondiente a un periodo de retorno de 25 años.



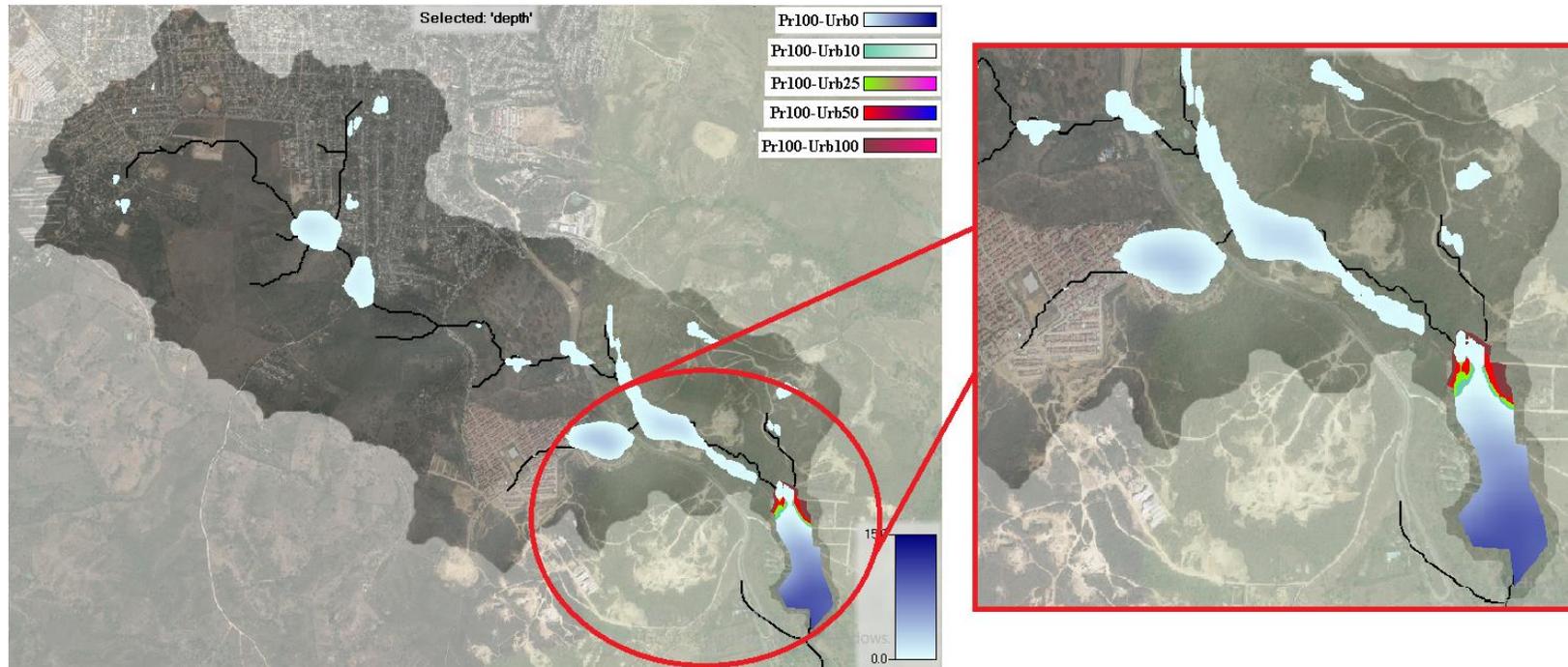
Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

Figura 41. Mancha de inundación en la cuenca Arroyo Mameyal 9 horas después de una lluvia de 3 horas de duración correspondiente a un periodo de retorno de 50 años.



Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

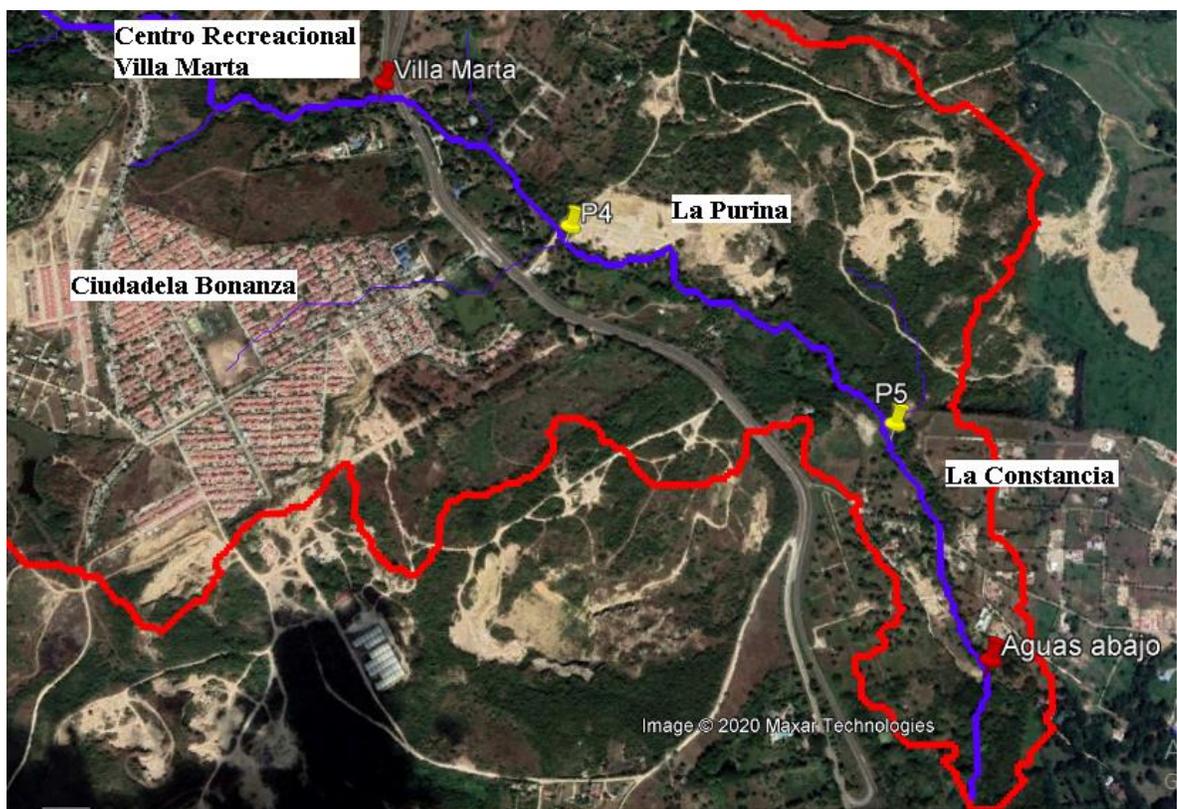
Figura 42. Mancha de inundación en la cuenca Arroyo Mameyal 9 horas después de una lluvia de 3 horas de duración correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.



Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

Para los 20 escenarios simulados coinciden las zonas vulnerables y propensas a sufrir inundaciones, las de mayor área pertenecen a la zona de la laguna de Ciudadela Bonanza y la zona residencial de la urbanización, el sector que comprende el cruce del arroyo con la Troncal de Occidente en el punto Villa Marta y el punto P4, y la zona en la que se encuentra el punto P5 y el punto Aguas Abajo, todos estos señalados en la Figura 43, algunos corresponden a los puntos de inspección visual de la investigación.

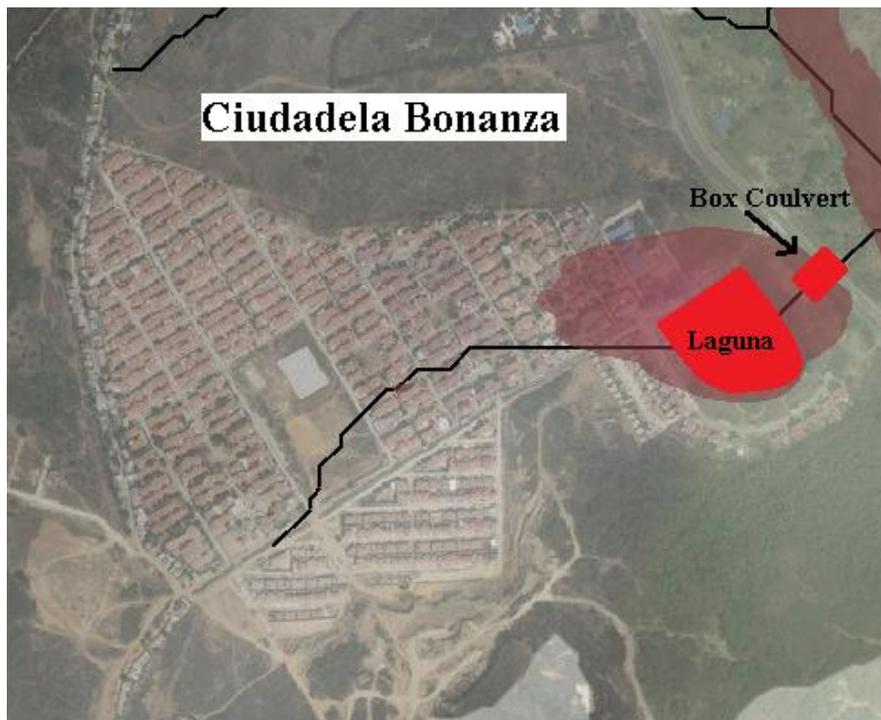
Figura 43. Puntos de inspección y sectores de la cuenca Arroyo Mameyal en los que se determinaron los factores de amenaza por inundación.



Fuente: Tomado y modificado (Google Earth Pro, 2020)

En la Figura 44 se muestra la mancha de inundación en el sector de la Urbanización Ciudadela Bonanza, esta zona posee cotas similares o menores a las del fondo del arroyo Mameyal por la presencia de una laguna natural, por lo que es normal que en esta zona se presente una acumulación de flujo.

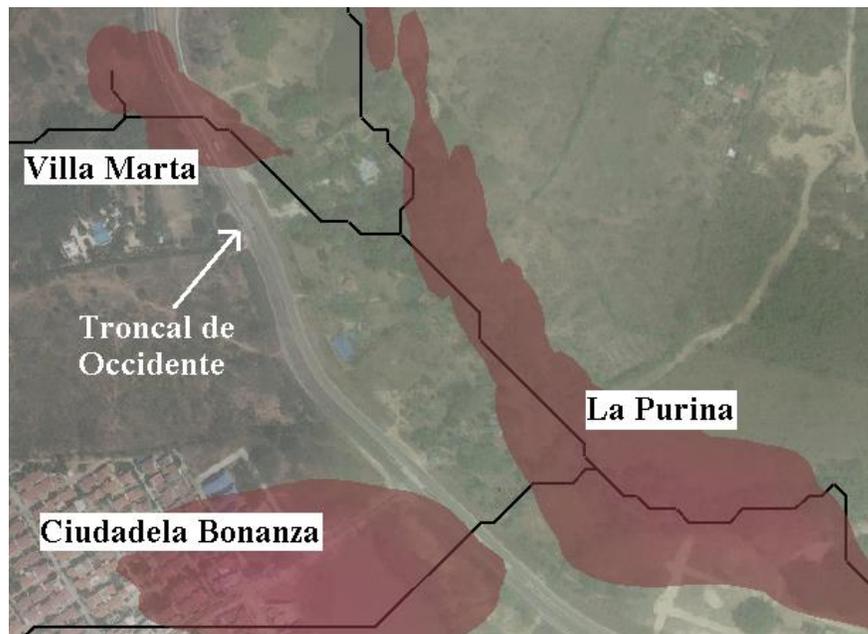
Figura 44. Zona con amenaza de inundación en el sector de Ciudadela Bonanza.



Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

Por otro lado, se encuentra el sector del Centro Recreacional Villa Marta (Punto Villa Marta) que en épocas de invierno, acorde a lo conversado con los habitantes, el arroyo Mameyal presenta desbordamientos y el nivel del agua en ocasiones supera la capa de rodadura de la Troncal de Occidente, tal como se muestra en la Figura 45. También encontramos que en el sector La Purina, donde se encuentra el punto de inspección Punto 4, hay desbordamientos del arroyo Mameyal, siendo esta también una zona con amenaza por inundación.

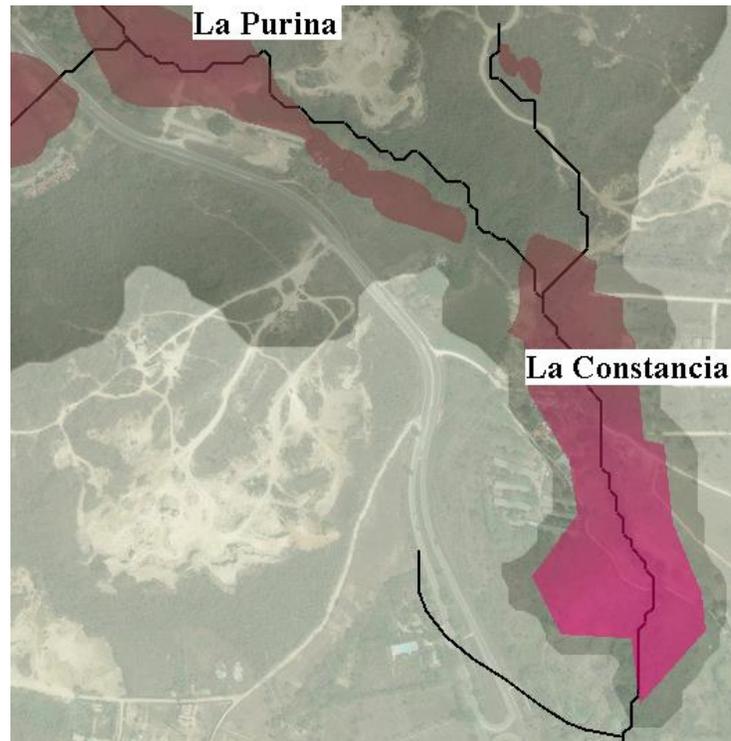
Figura 45. Zonas con amenaza de inundación en el Sector del Centro Recreacional Villa Marta y La Purina.



Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

Por último, tenemos el punto de inspección Aguas Abajo que se encuentra en el sector La Constancia. A pesar de que en este punto del cauce existe un puente peatonal que se encuentra 2 metros por encima del nivel frecuente del arroyo, según los habitantes de estos predios, en las épocas de lluvias más fuertes el nivel del arroyo supera la placa del puente y se inundan las zonas aledañas debido a que estas zonas son relativamente planas y paralelas al arroyo Mameyal. En esta zona existió una limitante, en la Figura 46 se observa una mancha de agua definida por la zona de flujo de la simulación, que probablemente sería de mayor área si la delimitación de la cuenca en esta zona no fuese estrecha.

Figura 46. Zonas con amenaza de inundación en el Sector La Constancia.



Fuente: Tomado y modificado (HEC - RAS, 2020)

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Siguiendo la metodología propuesta para esta investigación, se recopiló información básica para la caracterización de la cuenca Arroyo Mameyal, ubicada en Turbaco, un municipio del departamento de Bolívar en Colombia, tiene un área de 6.48 km² y una pendiente media de 8.4%, y su cauce principal, el arroyo Mameyal, tiene una longitud de 4.3 km con una pendiente media de 2,3% y este converge con otras corrientes.

A partir de la comparación de imágenes satélites disponibles en la herramienta Google Earth de los años 1969, 2004, 2012 y 2019, se observó una disminución del 15% de la cobertura vegetal desde el año 1969 hasta el año 2019, es decir, el proceso de urbanización en la cuenca en 50 años aumentó de un 22% a un 37%, en su mayoría para uso residencial, y si las tendencias de crecimiento se conservan se estima que para los próximos 100 años la urbanización aumentará en un 45%, llegando a un porcentaje de área urbanizada de 82%.

Se estimó dicho impacto del proceso de urbanización actual y futuro en la cuenca sobre el comportamiento hidrológico del arroyo Mameyal mediante el modelo de pérdidas del SCS utilizado en la herramienta HEC – HMS, y se determinó que existe un aumento del 15% del Número de Curva ponderado para la cuenca entre el periodo actual y la proyección para 100 años, pasando de 70 a 80; lo cual genera una disminución de la capacidad de infiltración en un rango de 78% a 80% con respecto a la capacidad actual. Además, para la proyección de urbanización de 100 años se tendría un aumento de los coeficientes de escorrentía del 47%, 41%, 38% y 34% para las lluvias de los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, respectivamente, tomando como referencia los coeficientes en la actualidad.

Se determinó el potencial de inundación actual y futuro del arroyo Mameyal mediante el análisis de inundabilidad a partir de los volúmenes de agua escurridos en la cuenca y en el cauce, consiguiendo que los sectores La Purina y La Constancia son las zonas con mayor potencial de inundación en la cuenca, sin descartar que existen otras pequeñas zonas en la

cuenca que también presentan amenazas ante una crecida. Posiblemente la mancha de inundación no presentó mayor variación al aumentar el porcentaje de urbanización debido a que la investigación se hizo a partir de un modelo de elevación digital y no se contaba con un buen nivel de detalle del arroyo Mameyal.

La importancia que ha cobrado este tipo de estudios en el ámbito ambiental radica en la necesidad de conocer cómo se ve afectada la cuenca por la variación de la retención o la infiltración del agua, cuál es el impacto del aumento de los volúmenes de escorrentía, qué zonas presentan amenazas de inundación, en pocas palabras, cuáles son los efectos tras deforestar y reemplazar las zonas naturalmente permeables por infraestructura y/o pavimentos. En esta investigación se demuestra que la cuenca Arroyo Mameyal no ha estado exenta de dicho proceso de urbanización y que los cambios en el uso y cobertura del suelo que ha sufrido la cuenca conllevan a una disminución en la capacidad de infiltración de esta, siendo esto un gran indicador para mejorar la planeación de estrategias de conservación de los recursos en las zonas de la cuenca que no han sido totalmente urbanizadas, y así reducir el grado de exposición de las zonas inundables aguas abajo del arroyo Mameyal y en las zonas aledañas.

Las zonas de desborde simuladas presentan similitudes con las zonas afectadas en las altas temporadas de lluvia señaladas en las declaraciones de los habitantes, por consiguiente esta investigación podría considerarse para futuros estudios y planes de gestión urbana y de ordenamiento territorial de la zona en estudio, así mismo para desarrollar estrategias, definir el nivel de amenaza de la cuenca y determinar el riesgo en la misma, ya que esta no cuenta con un número considerable de estudios reportados para determinar la vulnerabilidad de los sectores y el nivel de amenaza de estos.

Para futuras investigaciones se recomienda hacer una delimitación y caracterización de la cuenca detallada y completa, con información más específica que mejore la calidad de los resultados; también se recomienda y se hace un énfasis en la recolección de información in situ correspondiente a la topografía, estudios de suelo, secciones transversales de la

corriente principal, datos meteorológicos, instalación de pluviógrafos en la zona de estudio y la comparación entre softwares y métodos, con el fin de obtener resultados acertados de los efectos de los procesos de urbanización en la cuenca hidrográfica del Arroyo Mameyal.

7. BIBLIOGRAFÍA

- RAS 2000. (noviembre de 2000). Obtenido de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_d_.pdf
- Slide Share. (03 de 11 de 2012). Obtenido de SlideShare.net: https://es.slideshare.net/metal_javier/distribuciondeweibull
- Educalingo. (Enero de 2018). Obtenido de educalingo.com: <https://educalingo.com/es/dic-es/isoyeta>
- Alcaldía de Turbaco. (04 de Noviembre de 2012). *turbaco-bolívar.gov*. Obtenido de http://www.turbaco-bolivar.gov.co/informacion_general.shtml
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Noriega Editores.
- Arrieta, A., & Martinez, E. (2019). *Aplicaciones Hidrológicas en la Ingeniería*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- AutoCAD. (20 de Agosto de 2020).
- Ávila, H. (2012). *Perspectiva del Manejo del Drenaje Pluvial frente al Cambio Climático - Caso de Estudio: Ciudad de Barranquilla, Colombia*. Barranquilla: Universidad del Norte.
- Brilly, M., Rusjan, S., & Vidmar, A. (2006). Monitoring the impact of urbanization on the Glinscica stream. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(17), 1089 - 1096.
- Cabrera, J. (s.f.). *Modelos hidrológicos*. Obtenido de IMEFEM: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf
- Cañaveras Quevedo, E. A., & Perez Barrios, A. F. (2018). *Análisis de amenaza por inundación y diagnóstico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolívar*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Caracol Radio. (4 de Octubre de 2016). Condominio estrato 6, afectado por inundación en Turbaco, Bolívar. *Caracol Radio*.
- CARDIQUE. (2011). *Expediente 866-2;866-6*. Cartagena.

- CARDIQUE. (2015). *Informe de gestión 2015*. Obtenido de Cardique.gov: <http://www.cardique.gov.co/public/userFiles/file/INFORMEDEGESTION2015ASAMBLEACORPORATIVA.pdf>
- Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Company.
- Consuegra Martinez, C. S. (2013). *Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos, resultados y posibles consecuencias*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- CORPOCESAR; CORPOGUAJIRA. (2019). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica de los Ríos Chiriaimo y Manaure*. Valledupar.
- Cortolima. (2008). *Plan de ordenación y manejo ambiental de la microcuenca de las quebradas Las Panelas y La Balsa*.
- Del Castillo, L. C., & Ortiz, M. A. (2013). *Evaluación hidrológica de hidráulica de la cuenca hidrográfica del Arroyo Policarpa para el control de inundaciones*. Cartagena.
- Departamento de geografía del Instituto Nacional de Estadísticas; Comisión de estudios habitacionales y urbanos del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). *Metodología para medir el crecimiento urbano de las ciudades de Chile*. Santiago de Chile: Comisión de estudios habitacionales y urbanos del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Google Earth Pro. (12 de Agosto de 2020).
- Gülbaz, S., & Kazezyilmaz-Alhan, C. M. (19 de Enero de 2013). Calibrated hydrodynamic model for sazlidere watershed in stambul and investigation or urbanization effects. *Revista de Ingeniería Hidrológica*, 18(1), 75 - 84.
- Gutierrez, M. A., & Ayala, A. R. (2016). *Efectos de la impermeabilización en las cuencas urbanas de la ciudad de Posadas*.
- Guzmán, A. M. (25 de Enero de 2011). Dimensión ambiental y problemáticas urbanas en Colombia (1960-2010)*. *Cuadernos de vivienda y urbanismo Vol. 4 No. 7*, 90-109.
- HEC - HMS. (9 de Septiembre de 2020).
- HEC - RAS. (20 de Agosto de 2020).

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). *Métodología de la investigación*. Iztapalapa, México D.F: McGrawHill.
- Herrera, J., & Llamas, A. (2018). *Actualización de las Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) para la estación Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena de Indias D. T. y C. (1970 - 2016)*. Cartagena.
- Hidroconsultores Ltda. (2014). *Ajuste de los criterios para el acotamiento de rondas hídricas en zonas urbanas e implementación de los criterios en trece cuerpos de agua de la ciudad de Cartagena, Departamento de Bolívar*. Cartagena.
- Hydrologic Engineering Center. (2000). *Hydrologic Modeling System - Technical Reference Manual*. Washington DC.
- Hydrologic Engineering Center. (2016). *River Analysis System - Technical Reference Manual*. Washington DC.
- Ideam. (2018). Solicitud de informacion.
- INEC. (s.f.). *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*. Recuperado el 09 de Marzo de 2019, de ecuadorencifras.gob.ec: http://www.inec.gob.ec/nuevo_inec/items/gestion_eficiente/cartografia/anexos/CAPACITACIONES/INSTRUCTIVOS%20AMANZANADO/IMAGENES%20SATELITALES.pdf
- Ingeominas. (julio de 1996). *Plan de manejo minero ambiental de la industria extractiva de materiales de construcción en Cartagena*. Obtenido de [iaea.org](http://www.iaea.org): http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/036/36036642.pdf
- Ingeominas. (2001). *Ingeominas.gov.co*. Recuperado el marzo de 2018, de sgc.gov.co: http://aplicaciones1.sgc.gov.co/Bodega/i_vector/130/10/0100/02332/documento/pdf/0101023321101000.pdf
- Kenneth R., B., Dripps, W., Hankley, C., Anderson, M. P., & Potter, K. W. (2000). *Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates*. University of Wisconsin.
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*.

- Martínez, J. (2017). *Metodología para Determinar el Potencial de Implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles (SUDS) en Áreas Residenciales, a partir de Análisis de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Caso de Estudio Bogotá D.C., Colombia*. Bogotá: Universidad de Los Andes.
- May, C., Horner, R., Karr, J., Mar, B., & Welch, E. (1998). *Effects of urbanization on small streams in the Puget sound coreion. Watershed protection techniques*. Seattle, Washington: Universidad de Seattle.
- Menendez, Á., & Re, M. (2009). *Códigos numéricos para la hidráulica urbana*. Obtenido de INA-Instituto Nacional del Agua Argentina: http://www.ina.gov.ar/pdf/INA-PHC-CodNumHidUrb_01Oct2009.pdf
- Minitab-Inc. (2019). *MiniTab 18*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2018, de minitab.com: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/distributions/weibull-distribution/>
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Texas.
- ONU. (2002). World Urbanization Prospects. *The 2001 Revision*. Nueva York.
- Perez Romo, A. T., & Vanegas Sandoval, L. J. (2016). *Estudio hidrológico e hidráulico en la zona baja de la cuenca del Río Frío en el Municipio de Chía*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Polo, I. (2013). *Proyección del Crecimiento Urbano del Área Metropolitana de Barranquilla a 20 años, mediante el Uso de los SIG*. Barranquilla: Universidad del Norte.
- QGIS. (25 de Agosto de 2020).
- Ramos Moreno, A., & Pacheco Fontalvo, J. A. (2017). Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Frío, municipios de Ciénaga y zona bananera, departamento del Magdalena. *LOGOS CIENCIA & TECNOLOGÍA*, 156-178.
- Rivera Molina, S. D. (2012). *Metodología para el análisis hidrológico de cuencas rurales de pequeñas dimensiones*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Roa Lobo, J., & Kamp, U. (2007). *Digital Elevation Models (DEM) from spaceborne systems. An introduction and comparative analyses in the cordillera of Mérida-Venezuela*. Michigan: Universidad de Michigan.
- Rodríguez, E. A., González, R. A., Medina, M. P., Pardo, Y. A., & Santos, A. C. (2007). Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del Río Las Ceibas (Neiva-Huila). *Avances en Recursos Hidráulicos*, 65-78.
- Sierra Porgutá, L. F. (2015). *Escuela Colombiana de Ingeniería*. Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/193>
- Tahmasbinejad, H., Feyzolahpour, M., Mumipour, M., & Zakerhoseini, F. (2012). Rainfall-runoff Simulation and Modeling of Karun River Using HEC-RAS and HEC-HMS Models, Izeh District, Iran. *Journal of Applied Sciences*, 1900-1908.
- Thakur, B., Parajuli, R., Kalra, A., Ahmad, S., & Gupta, R. (2017). Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in Precipitation Runoff Modelling and Evaluating Flood Plain Inundation Map. *CIVIL & ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION FACULTY PUBLICATIONS*, 240-251.
- Torrey, B. B. (Abril de 2004). La urbanización: una fuerza ambiental considerable. Population Reference Bureau.
- (2005). Manual de hidrología básica para estructuras de drenaje. En D. N. Transporte. Río de Janeiro: Ministerio de Transportes.
- Universidad Nacional del Noroeste, Departamento de Hidráulica. (19 de Junio de 2011). *Determinación de las Características Físicas de la Cuenca*. Obtenido de slideshare.net: <http://es.slideshare.net/ycycyujay/hidro-tp1calculo>
- Universidad privada de Tacna. (30 de Diciembre de 2011). *Isoyetas*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/76781342/informe-de-Isoyetas>
- Vargas Castañeda, G., Ibáñez Castillo, L. A., Arteaga Ramírez, R., & Arévalo Galarza, G. (2018). *Modelo hidrológico de onda cinemática de la cuenca del río Turbio, Guanajuato, México*. Guanajuato: Universidad Autónoma Chapingo.

- Vargas M., R., & Diaz-Granados O., M. (1998). *Curvas Sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Viessman, W., & Lewis, G. I. (2002). *Introduction to Hydrology*. Pearson.
- Xu, C.-Y. (2002). *The water and Snow Balance Modeling System*. Oslo: Water Resources Publications.

8. ANEXOS

8.1. HIETOGRAMAS RECALCULADOS CON LA PRECIPITACIÓN NETA INGRESADOS EN HEC – RAS PARA LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

Distribución de la precipitación neta para una lluvia de un periodo de retorno de 10 años (mm)					
Tiempo (min)	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	16.01	16.98	18.28	20.19	23.55
20	14.49	15.37	16.55	18.27	21.32
30	8.43	8.94	9.62	10.62	12.39
40	7.93	8.40	9.05	9.99	11.66
50	7.17	7.61	8.19	9.04	10.55
60	5.80	6.15	6.63	7.32	8.53
70	4.89	5.18	5.58	6.16	7.19
80	4.67	4.95	5.33	5.89	6.87
90	4.61	4.89	5.27	5.82	6.79
100	3.36	3.56	3.84	4.24	4.94
110	3.20	3.39	3.65	4.03	4.71
120	2.56	2.71	2.92	3.23	3.76
130	2.30	2.44	2.62	2.90	3.38
140	1.91	2.02	2.18	2.41	2.81
150	1.44	1.53	1.65	1.82	2.12
160	1.13	1.20	1.29	1.43	1.67
170	0.78	0.83	0.89	0.98	1.15
180	0.69	0.73	0.79	0.87	1.02

Distribución de la precipitación neta para una lluvia de un periodo de retorno de 25 años (mm)					
Tiempo (min)	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	19.54	20.60	22.02	24.02	27.62
20	17.69	18.65	19.94	21.75	25.00
30	10.28	10.84	11.59	12.64	14.54
40	9.67	10.20	10.90	11.89	13.67
50	8.75	9.23	9.87	10.76	12.37
60	7.08	7.47	7.98	8.71	10.01

Distribución de la precipitación neta para una lluvia de un periodo de retorno de 25 años (mm)

Tiempo (min)	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
70	5.97	6.29	6.72	7.33	8.43
80	5.70	6.01	6.42	7.01	8.05
90	5.63	5.94	6.35	6.92	7.96
100	4.10	4.32	4.62	5.04	5.80
110	3.90	4.12	4.40	4.80	5.52
120	3.12	3.29	3.52	3.84	4.41
130	2.80	2.96	3.16	3.45	3.97
140	2.33	2.46	2.63	2.86	3.29
150	1.76	1.86	1.98	2.16	2.49
160	1.38	1.46	1.56	1.70	1.95
170	0.95	1.00	1.07	1.17	1.34
180	0.84	0.89	0.95	1.04	1.19

Distribución de la precipitación neta para una lluvia de un periodo de retorno de 50 años (mm)

Tiempo (min)	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	22.69	23.81	25.28	27.38	31.21
20	20.54	21.56	22.89	24.79	28.25
30	11.94	12.53	13.31	14.41	16.43
40	11.23	11.79	12.51	13.55	15.45
50	10.16	10.67	11.33	12.27	13.98
60	8.22	8.63	9.16	9.92	11.31
70	6.93	7.27	7.72	8.36	9.53
80	6.62	6.95	7.37	7.99	9.10
90	6.54	6.86	7.29	7.89	9.00
100	4.76	5.00	5.31	5.75	6.55
110	4.53	4.76	5.05	5.47	6.24
120	3.63	3.81	4.04	4.38	4.99
130	3.26	3.42	3.63	3.93	4.48
140	2.70	2.84	3.01	3.26	3.72
150	2.04	2.15	2.28	2.47	2.81
160	1.60	1.68	1.79	1.94	2.21
170	1.10	1.16	1.23	1.33	1.52
180	0.98	1.03	1.09	1.18	1.35

Distribución de la precipitación neta para una lluvia de un periodo de retorno de 100 años (mm)					
Tiempo (min)	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	26.24	27.47	29.00	31.21	35.18
20	23.76	24.87	26.25	28.25	31.84
30	13.81	14.46	15.26	16.43	18.51
40	12.99	13.60	14.35	15.45	17.41
50	11.76	12.31	12.99	13.98	15.76
60	9.51	9.95	10.51	11.31	12.75
70	8.01	8.39	8.85	9.53	10.74
80	7.65	8.01	8.46	9.10	10.26
90	7.56	7.92	8.36	9.00	10.14
100	5.51	5.77	6.09	6.55	7.38
110	5.25	5.49	5.80	6.24	7.03
120	4.19	4.39	4.63	4.99	5.62
130	3.77	3.94	4.16	4.48	5.05
140	3.13	3.27	3.46	3.72	4.19
150	2.36	2.48	2.61	2.81	3.17
160	1.86	1.94	2.05	2.21	2.49
170	1.28	1.34	1.41	1.52	1.71
180	1.13	1.18	1.25	1.35	1.52

8.2. COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA EN CADA SUBCUENCA PARA CADA PROYECCIÓN DE URBANIZACIÓN Y CADA LLUVIA DE LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

Coefficientes de escorrentía en cada subcuenca para una lluvia con periodo de retorno de 10 años					
	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
C1	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0
C2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7
C4	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0
C5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
C6	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
C7	0.5	0.6	0.6	0.7	0.9
C8	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0
C9	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8
C10	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8
C11	0.3	0.4	0.4	0.4	0.7
C12	0.4	0.4	0.5	0.6	0.9

Coefficientes de escorrentía en cada subcuenca para una lluvia con periodo de retorno de 25 años					
	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
C1	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0
C2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7
C4	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0
C5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.7
C6	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0
C7	0.5	0.6	0.6	0.8	0.9
C8	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0
C9	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8
C10	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8
C11	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
C12	0.4	0.5	0.5	0.6	0.9

Coefficientes de escorrentía en cada subcuenca para una lluvia con periodo de retorno de 50 años					
	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
C1	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0
C2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1
C3	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7
C4	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0
C5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7
C6	0.6	0.7	0.7	0.9	1.0
C7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9
C8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0
C9	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7
C10	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7
C11	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
C12	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7

Coefficientes de escorrentía en cada subcuenca para una lluvia con periodo de retorno de 100 años					
	Urb0	Urb10	Urb25	Urb50	Urb100
C1	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0
C2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8
C4	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0
C5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.8
C6	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
C7	0.6	0.6	0.7	0.8	1.0
C8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0
C9	0.5	0.5	0.6	0.7	0.9
C10	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8
C11	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8
C12	0.5	0.5	0.6	0.6	0.9