

**EVALUACION HIDROLOGICA E HIDRAULICA DE LA CUENCA DEL
“ARROYO GRANDE” Y POSIBLES ALTERNATIVAS DE SOLUCION PARA EL
CONTROL DE LAS INUNDACIONES EN EL SECTOR DE MAMONAL**



**RAUL JOSE ARNEDO PACHECO
YESSID JAVIER SIERRA PASSO**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

2016



**EVALUACION HIDROLOGICA E HIDRAULICA DE LA CUENCA DEL “ARROYO
GRANDE” Y POSIBLES ALTERNATIVAS DE SOLUCION PARA EL CONTROL
DE LAS INUNDACIONES EN EL SECTOR DE MAMONAL**

Grupo de Investigación

HIDRÁULICA Y MANEJO COSTERO (GIHMAC)

Línea de Investigación

MANEJO HIDRÁULICO Y AMBIENTAL DE LA ZONA COSTERA Y FLUVIAL

Investigadores

RAUL JOSE ARNEDO PACHECO

YESSID JAVIER SIERRA PASSO

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

Director

ING. DALIA MORENO EGEL

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

2016



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
1 INTRODUCCIÓN	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 MARCO REFERENCIAL	15
3.1 ANTECEDENTES.....	15
3.2 ESTADO DEL ARTE	17
3.3 MARCO TEORICO.....	24
3.3.1 <i>Hidrometeorología</i>	24
3.3.1.1 <i>Método de los Polígonos de Thiessen.</i>	24
3.3.1.2 <i>Ajuste de datos</i>	25
3.3.1.3 <i>Coefficiente de escorrentía</i>	29
3.3.1.4 <i>Tiempo de concentración</i>	29
3.3.1.5 <i>Periodo de retorno</i>	30
3.3.1.6 <i>Caudales máximos</i>	30
3.3.2 <i>Características morfométricas de una cuenca.</i>	31
3.3.2.1 <i>Área de Drenaje (A).</i>	31
3.3.2.2 <i>Forma de la Hoya o Cuenca.</i>	31
3.3.2.3 <i>Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad. (Kc).</i>	32
3.3.2.4 <i>Factor de Forma (Kt)</i>	32
3.3.2.5 <i>Orden de las Corrientes de Agua.</i>	33
3.3.2.6 <i>Densidad de Drenaje</i>	33
3.3.2.7 <i>Extensión media de la escorrentía superficial</i>	34
3.3.2.8 <i>Sinuosidad de una corriente de agua</i>	34
3.3.2.9 <i>Pendiente de la cuenca</i>	34
3.3.2.10 <i>Curva hipsométrica</i>	35
3.3.2.11 <i>Altura media de la cuenca.</i>	36
3.3.2.12 <i>Pendiente de la corriente principal</i>	36
3.3.2.13 <i>Coefficiente de escorrentía</i>	37
3.3.2.14 <i>Periodo de retorno</i>	38



3.3.2.15	<i>Estimación de la intensidad de lluvia</i>	38
3.3.2.16	<i>Estimación de los tiempos de concentración</i>	38
3.3.2.17	<i>Método de la velocidad</i>	39
3.3.2.18	<i>Método racional</i>	39
3.3.3	<i>Flujo uniforme.</i>	40
3.3.4	<i>Hidrograma adimensional SCS</i>	42
3.3.5	<i>Fotointerpretación</i>	47
3.4	MARCO LEGAL.....	49
4	METODOLOGÍA	53
4.1	ÁREA DE ESTUDIO	53
4.2	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	53
4.2.1	<i>Análisis de la Información</i>	54
4.2.1.1	<i>Delimitación de la cuenca.</i>	54
4.2.1.2	<i>Fotointerpretación</i>	55
4.3	HIDROMETEREOLOGÍA.....	56
4.3.1	<i>Estaciones seleccionadas.</i>	56
4.3.1.1	<i>Creación de los Polígonos de Thiessen.</i>	57
4.3.1.2	<i>Precipitación máxima de la cuenca.</i>	58
4.3.1.3	<i>Ajuste de los datos de las precipitaciones máximas.</i>	59
4.3.1.4	<i>Calibración de la ecuación que relaciona la Intensidad – Duración – Frecuencia.</i>	60
4.4	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	61
4.4.1.1	<i>Determinación de las características morfológicas de la cuenca.</i>	61
4.4.1.2	<i>Estimación de coeficientes de escorrentía.</i>	62
4.4.1.3	<i>Estimación del tiempo de concentración.</i>	64
4.4.1.4	<i>Determinación del periodo de retorno.</i>	64
4.4.1.5	<i>Estimación de los caudales máximos.</i>	65
4.5	ANÁLISIS HIDRÁULICO.....	67
4.5.1	<i>Recolección de la información</i>	67
4.5.2	<i>Análisis de la información</i>	67
4.6	DETERMINACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS	70
4.7	DISEÑO DE EMBALSE	70
4.8	CREACIÓN DE ESCENARIOS	71
4.9	ALTERNATIVA MÁS ADECUADA.....	71



4.10	ELABORACIÓN DE INFORME.....	72
4.11	ESQUEMA GENERAL.....	72
5	RESULTADOS.....	73
5.1	DELIMITACIÓN DE LA CUENCA.....	73
5.2	FOTOINTERPRETACIÓN.....	73
5.3	ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO.....	75
5.3.1	<i>Polígonos de Thiessen.....</i>	<i>76</i>
5.3.2	<i>Precipitación máxima.....</i>	<i>77</i>
5.3.3	<i>Ajuste de datos de precipitación máxima.....</i>	<i>79</i>
5.3.4	<i>Calibración de la ecuación que relaciona la Intensidad – Duración – Frecuencia.....</i>	<i>85</i>
5.4	ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	89
5.4.1	<i>Delimitación de subcuencas y drenajes.....</i>	<i>89</i>
5.4.2	<i>Parámetros morfométricos de la Cuenca.....</i>	<i>90</i>
5.4.3	<i>Estimación de los Tiempos de Concentración (tc).....</i>	<i>91</i>
5.4.4	<i>Estimación de la intensidad de la lluvia.....</i>	<i>91</i>
5.4.5	<i>Estimación de los caudales máximos.....</i>	<i>92</i>
5.5	ANÁLISIS HIDRÁULICO.....	98
5.5.1	<i>Coefficiente de rugosidad Manning.....</i>	<i>98</i>
5.5.2	<i>Pendiente longitudinal de los cauces.....</i>	<i>99</i>
5.5.3	<i>Geometría de las secciones.....</i>	<i>99</i>
5.5.4	<i>Capacidad Hidráulica.....</i>	<i>100</i>
5.5.5	<i>Capacidad Hidráulica máxima de las Estructuras.....</i>	<i>101</i>
5.6	DETERMINACION DE PUNTOS CRÍTICOS.....	103
5.7	CREACIÓN DE ESCENARIOS.....	105
5.7.1	<i>Alternativa 1.....</i>	<i>105</i>
5.7.2	<i>Alternativa 2.....</i>	<i>106</i>
5.7.3	<i>Alternativa más adecuada.....</i>	<i>113</i>
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	114
6.1	CONCLUSIONES.....	114
6.2	RECOMENDACIONES.....	117
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	118



LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Ubicación geográfica de las estaciones.	57
Tabla 2: Valores del coeficiente de escorrentía según Plan Maestro de Drenajes de Cartagena.	63
Tabla 3: Valores del coeficiente de escorrentía según tipo de terreno.	63
Tabla 4: Coeficientes de Escorrentía	64
Tabla 5: Valores del periodo de retorno según tipo de terreno.	65
Tabla 6: Valores de las áreas de influencia de las estaciones sobre la cuenca.	77
Tabla 7: Cálculo de precipitaciones máximas. Método de los polígonos de Thiessen.	78
Tabla 8: Ajuste de datos de precipitación a partir del Método de Gumbel	80
Tabla 9: Ajuste de datos de precipitación a partir del método de Ajuste Logarítmico	82
Tabla 10: Ajuste de precipitaciones por Gumbel	83
Tabla 11: Precipitaciones máximas para duraciones de 1/4, 1/2, 3/4, 1, 2 y 3 horas	84
Tabla 12: Ajuste para calibración de parámetros a_0 , a_1 y a_2	85
Tabla 13 Sistema de ecuaciones a_0 , a_1 y a_2	86
Tabla 14: Resultados del sistema de ecuaciones a_0 , a_1 y a_2	86
Tabla 15: Parámetros calibrados.	86
Tabla 16: Valores de Intensidad calculados con la ecuación 59.	87
Tabla 17: Parámetros morfométricos de las subcuencas.	90
Tabla 18: Tiempos de concentración para las subcuencas	91
Tabla 19: Intensidad de lluvia.	92
Tabla 20: Datos ingresados al programa HEC-HMS.	92
Tabla 21: Precipitación presentada durante 3 horas	93
Tabla 22: Capacidad hidráulica de las secciones	100
Tabla 23: Capacidad hidráulica máxima de las Estructuras	102
Tabla 24: Comparación hidráulica e hidrológica (Puntos críticos).	104
Tabla 25: Comparación hidráulica e hidrológica (Estructuras Hidráulicas).	105
Tabla 26: Sección recomendada	106
Tabla 27: Características del embalse.	107
Tabla 28: Caudales de entrada y salida del embalse.	108
Tabla 29: Caudales de entrada y salida del embalse.	111
Tabla 30: Características del embalse.	112



LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ubicación del cauce principal de la cuenca del Arroyo Grande en la ciudad de Cartagena. Fuente Google Earth 2013</i>	12
<i>Figura 2. Método de los Polígonos de Thiessens. Fuente (Bateman, 2007)</i>	25
<i>Figura 3. Hidrogramas unitarios sintéticos del Soil Conservation Service a) Hidrograma adimensional y b) hidrograma unitario triangular. (Chow, Hidrología Aplicada, 1994)</i>	43
<i>Figura 4. Componentes Esquemáticos del Sistema. (Martinez Lavalle & Olivo Bustillo, 2012)</i>	44
<i>Figura 5. Hidrograma Unitario Triangular SCS (Chow, 1993)</i>	46
<i>Figura 6. Delimitación de la Cuenca del Arroyo grande. Fuente Google Earth 2014</i>	55
<i>Figura 7. Fotointerpretación años 2007, 2011 y 2013 en la Cuenca del Arroyo grande.</i>	56
<i>Figura 8. Polígonos de Thiessen para la cuenca del Arroyo Grande.</i>	58
<i>Figura 9. Precipitaciones máximas anuales en 24 horas sobre la cuenca del Arroyo Grande</i>	59
<i>Figura 10. Curvas IDF con la ecuación calibrada.</i>	61
<i>Figura 11. División de la cuenca en subcuencas.</i>	62
<i>Figura 12. Hidrograma resultante, muestra los Caudales máximos presentados en la cuenca.</i>	66
<i>Figura 13. Coeficientes de rugosidad de Manning. (Chow, Hidráulica de Canales Abiertos)</i>	68
<i>Figura 14: Esquema general de la metodología.</i>	72
<i>Figura 15: Delimitación de la cuenca del Arroyo Grande. Fuente: Google Earth. 2014</i>	73
<i>Figura 16: Fotografía aérea del 2007 de la cuenca del Arroyo Grande. Fuente: Google Earth.</i>	74
<i>Figura 17: Fotografía aérea del 2011 de la cuenca del Arroyo Grande. Fuente: Google Earth.</i>	74
<i>Figura 18: Fotografía aérea del 2013 de la cuenca del Arroyo Grande. Fuente: Google Earth.</i>	75
<i>Figura 19: Mapa de polígonos de Thiessen.</i>	76
<i>Figura 20: Precipitaciones Máximas de la cuenca Arroyo Grande</i>	79
<i>Figura 21: Ajuste de datos de precipitación a partir del Método de Gumbel.</i>	81
<i>Figura 22: Ajuste de datos de precipitación a partir del método de Ajuste Logarítmico.</i>	82
<i>Figura 23: Curvas IDF (Método de Gumbel)</i>	84
<i>Figura 24: Curvas IDF (Ecuación calibrada)</i>	88
<i>Figura 25: Subdivisión de la cuenca en subcuencas.</i>	89
<i>Figura 26: Subdivisión de la cuenca en subcuencas.</i>	94
<i>Figura 27: Hidrograma SCS y caudal máximo para la subcuenca 1. Fuente HEC-HMS</i>	94
<i>Figura 28: Hidrograma SCS y caudal máximo para las subcuencas 2, 3 y 4 respectivamente.</i>	95
<i>Figura 29: Hidrograma SCS y caudal máximo para las subcuencas 5, 6 y 7 respectivamente.</i>	96



<i>Figura 30: Hidrograma SCS y caudal máximo para la subcuenca 8. Fuente HEC-HMS 2016</i>	<u>97</u>
<i>Figura 31: Hidrograma SCS Total para la Cuenca Hidrográfica de Arroyo Grande.</i>	<u>97</u>
<i>Figura 32: Coeficiente de rugosidad de maning.</i>	<u>98</u>
<i>Figura 33: Geometría de las secciones 1, 2, 3 y 4.</i>	<u>99</u>
<i>Figura 34: Localización de la Estructuras hidráulicas. Fuente Google Earth</i>	<u>102</u>
<i>Figura 35: Sección recomendada.</i>	<u>106</u>
<i>Figura 36: Ubicación de Embalse, Cuenca del Arroyo Grande.</i>	<u>107</u>
<i>Figura 37: Hidrograma de entrada y salida, y profundidad del embalse. Cuenca del Arroyo Grande</i>	<u>111</u>
<i>Figura 38: Esbozo de embalse, para amortiguación de caudal.</i>	<u>112</u>



RESUMEN

El principal objetivo de esta investigación fue conocer el estado actual de la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, mediante una evaluación hidrológica e hidráulica, que permitiera proponer posibles alternativas de solución desde la ingeniería, con el fin de mitigar el impacto de las inundaciones periódicas que se presentan en sectores de la Zona Industrial de Mamonal, en Cartagena, Colombia.

Como un primer paso para el desarrollo de la investigación se realizó un análisis hidrológico a partir de los registros históricos de las precipitaciones máximas desde el año 1974 hasta 2005, presentadas en las estaciones meteorológicas (Aeropuerto Rafael Nuñez, Sincerín, Arjona, Santa Ana, Escuela Naval, Cañaveral y Bayunca), cercanas a la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, para determinar los caudales de escorrentía máximos que descarga la cuenca, obteniendo un caudal máximo de $75.8 \text{ m}^3/\text{s}$; posteriormente se realizó el análisis hidráulico de las secciones de los cauces de la cuenca para determinar su capacidad hidráulica en distintos tramos. Del resultado de estos dos análisis se pudo comparar el caudal de escorrentía que pasa por las secciones transversales del canal, con la capacidad máxima de éstas, logrando encontrar 15 puntos de conflicto donde las secciones de los canales no son suficientes para transportar el caudal calculado. Finalmente, se plantearon dos alternativas con las que se podría solucionar el problema estudiado, que van desde la variación de la sección transversal y el cambio del revestimiento del canal, hasta la construcción de un embalse en la parte alta de la cuenca.

Finalmente se llegó a la conclusión de que la alternativa económica y espacialmente más viable es garantizar una sección transversal trapezoidal con ancho de base mínimo de 6,5 m, taludes 1:2 (V:H) con un revestimiento en enrocado consolidado, con capacidad para transportar un caudal de hasta $78 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente.



ABSTRACT

The main objective of the present research work was to know the current state of the watershed of Arroyo Grande, through a hydrologic and hydraulic assessment, that could suggest possible solutions from an engineering point of view, in order to mitigate the impact of periodic floods that occur in sectors of the Mamonal Industrial Zone in Cartagena, Colombia.

As a first step of the research, a hydrological analysis was developed which took into account the historical records of maximum precipitations from years 1974 to 2005 from meteorological stations (Airport Rafael Nuñez, Sincerín, Arjona, Santa Ana, Escuela Naval, Cañaveral and Bayunca), close to the Arroyo Grande watershed, in order to determine the maximum flow of runoff over the watershed area of Mamonal, obtaining a maximum flow rate of $75.8 \text{ m}^3 / \text{s}$; subsequently a hydraulic analysis of the channel flows of the basin was conducted to determine the hydraulic capacity of the stream in different sections

From the results of these two analyzes the flow rate of runoff passing through the channel sections were compared with the maximum capacity of these, finding 15 points of conflict where sections of channels are not sufficient to carry out the calculated flow. Finally, two alternatives were studied that could solve the problem, ranging from the variation of the cross sections and changing the lining of the canal, to the construction of a water reservoir on the upper part of the basin

Finally, it was concluded that the most economic and spatially more viable alternative is to ensure a trapezoidal cross section with a minimum base width of 6.5m, slopes 1:2 (V: H) with a consolidated coating rockfill, which could convey a flow rate of approximately $78 \text{ m}^3/\text{s}$.



1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas Colombia se está viendo afectada por altas temporadas invernales, las cuales ocasionan problemas de inundaciones, deslizamientos y en general pérdidas económicas a muchos sectores de la población. En un caso más local, Cartagena se caracteriza por su creciente actividad industrial, la cual se ve afectada año tras año por la ola invernal, generando innumerables daños al patrimonio, tanto en las localidades rurales como en el casco urbano de la ciudad.

La Zona Industrial de Mamonal, ubicada en la parte sur-occidental de la ciudad de Cartagena, es uno de los complejos industriales más importantes del país debido a su proximidad con el Mar Caribe, generando el 4% de PIB industrial del país y más del 40% de empleos en Cartagena y simboliza tanto para la ciudad como para el país un potencial económico muy importante, (Meisel Roca & Aguilera Díaz, 2004). Esta zona sufre los estragos del crudo invierno, especialmente con las fuertes precipitaciones del año 2010, causando perjuicios para las personas y procesos industriales que se generan en el sector. La cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, constituye una de las principales corrientes naturales que atraviesa este tramo de la ciudad, y es el causante de muchas inundaciones en su entorno, generando el cierre completo de las vías y perjuicios en las actividades y procesos de las industrias de la zona.

Con el fin de mitigar los efectos antes mencionados, se han realizado estudios relacionados con el manejo de las cuencas del sector y del recurso hídrico presente. Un ejemplo es el estudio “Bases para el ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica que atraviesa la vía a Mamonal” (García Narváez & Díaz Herazo, 1996), que consistió en la selección de una cuenca dentro de la zona industrial, realizando la caracterización hidrológica para posteriormente crear un modelo que evaluó el tránsito de las crecientes a través de las estructuras hidráulicas existentes. De igual forma, en el año 2007 se realizó un nuevo Plan Maestro de Drenaje Pluviales para el Distrito de Cartagena en el que se reorganizó y se incluyó todo el territorio del Distrito,. También se han realizado otros estudios como el estudio de Tapias y Torres, 2008, Herrera Melendez en 2007 y el estudio en modelos con la

utilización de un GIS, de Chen, Hill y Urbano, 2009 en la Universidad de Memphis, Tennessee.

La cuenca del Arroyo Grande se encuentra ubicada en el sector sur-occidental de la ciudad de Cartagena, en la zona industrial de Mamonal y desemboca en la Bahía de Cartagena. El cauce atraviesa toda la Refinería de Ecopetrol en Cartagena, y aunque no posee una escorrentía permanente, en las épocas de lluvia genera una creciente lo suficientemente abundante como para sobrepasar el nivel de su sección natural, provocando así desastres en su recorrido.

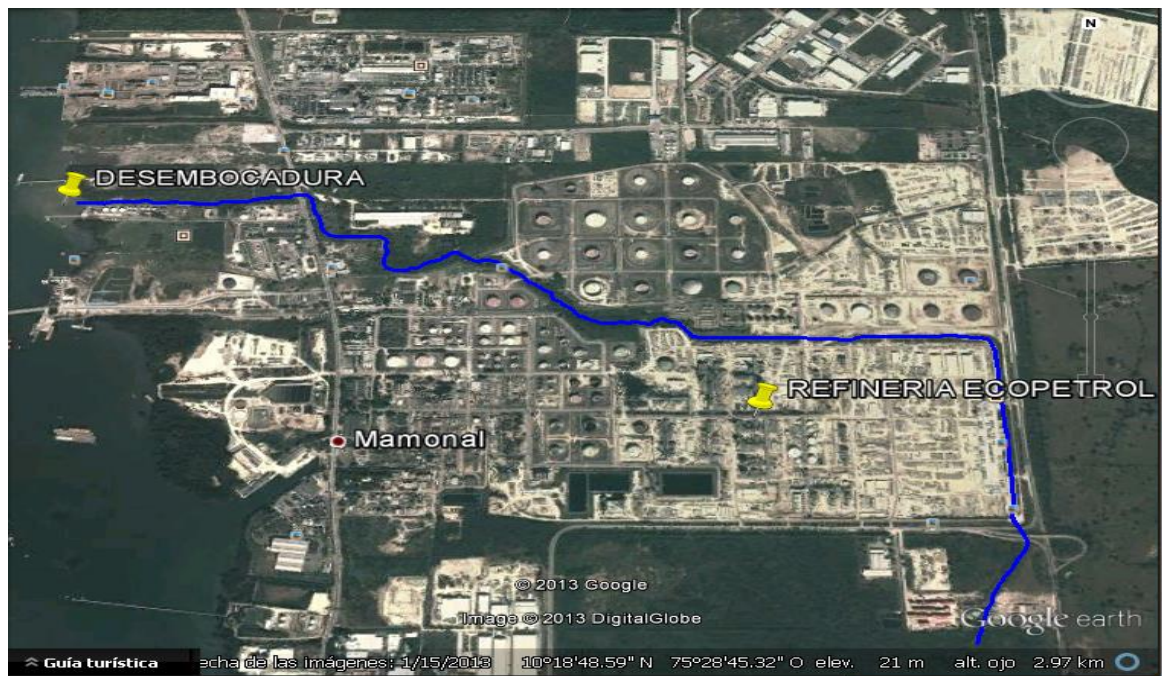


Figura 1. Ubicación del cauce principal de la cuenca del Arroyo Grande en la ciudad de Cartagena. Fuente Google Earth 2013

Sabiendo los problemas y las consecuencias que ha traído el invierno en la Zona Industrial de Cartagena, se desarrolló el estudio para diagnosticar el estado actual de la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, mediante una evaluación hidrológica e hidráulica, que permitiera proponer posibles alternativas de solución desde la ingeniería, con el fin de mitigar el impacto de las inundaciones periódicas que se presentan en sectores de la Zona Industrial de Mamonal.



Para la realización de la investigación se tuvo en cuenta la evaluación de los parámetros influyentes en la hidrografía de la cuenca del Arroyo Grande, como lo son los aspectos hidráulicos, hidrológicos, geomorfológico, la cobertura vegetal y el uso del suelo, entre otros, con los que determinaron los puntos críticos donde se presentan conflictos en cuanto a la circulación del flujo en la parte baja de la cuenca, y se definieron soluciones para el control de las inundaciones en el sector de Mamonal.



2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el diagnóstico del estado actual de la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, mediante una evaluación hidrológica e hidráulica, que permita proponer posibles alternativas de solución desde la ingeniería civil, con el fin de mitigar el impacto de las inundaciones periódicas que se presentan en sectores de la Zona Industrial de Mamonal.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis con base a la información secundaria referente a las características generales de la cuenca en estudio y la influencia de la morfología en su escorrentía.
- Definir las características hidrológicas y capacidad hidráulica de los tramos más desfavorables del cauce y diagnosticar las diferentes estructuras hidráulicas presentes en las vías cercanas al arroyo y su posible impacto en las inundaciones.
- Plantear diferentes alternativas de solución, basándose en el estudio hidrológico-hidráulico realizado, para mitigar las inundaciones sobre el cauce del arroyo en la cuenca del Arroyo Grande en el sector de Mamonal.
- Escoger la alternativa de solución más adecuada desde el punto de vista hidráulico y de posibles impactos que permita mitigar y/o prevenir las inundaciones de la cuenca Arroyo Grande.



3 MARCO REFERENCIAL

3.1 ANTECEDENTES

En el año de 1981 la oficina de ejecución de proyectos (OPE) de las Naciones Unidas contrata con la firma Hidrotec Ltda., el estudio de drenajes pluviales de la ciudad de Cartagena para la realización del Plan Maestro de Drenajes Pluviales y Alcantarillado.

Por causa de las inundaciones presentadas anualmente en el periodo de lluvia en algunos sectores de la ciudad se han realizado diferentes estudios de las cuencas, ya que la información que se tiene sobre ellas no es suficiente, para prevenir posibles desastres.

En el año 2007 se realizó un nuevo Plan Maestro de Drenaje Pluvial para la ciudad de Cartagena en donde se reorganizó y se incluyó todo el territorio del Distrito, incluyendo los terrenos clasificados dentro del perímetro urbano, los de expansión Urbana y el suelo rural perteneciente a los ámbitos de la Zona Norte, ámbito de la Ciénaga de la Virgen, ámbito de la Bahía de Cartagena, Mar Caribe y el ámbito de la Bahía de Barbacoa-Canal del Dique (Alcaldía de Cartagena de Indias, 2010).

Para la realización del presente proyecto se hizo una investigación previa en antecedentes sobre el tema a tratar, esto con el fin de hacer un análisis crítico y recibir una orientación sobre la temática y técnicas implementadas con anterioridad en el estudio de las cuencas hidrográficas. A continuación se presentan algunos de ellos.

- ***Bases para el ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica que atraviesa la vía a Mamonal (García & Díaz, 1996)***

El complejo industrial de Mamonal es uno de los principales parques industriales de Colombia. Las cuencas hidrográficas drenan sus aguas hacia la bahía de Cartagena mediante



arroyos. Estos arroyos en épocas de lluvias causan estragos en las mismas empresas y en los barrios que conviven en el sector por los desbordamientos e inundaciones de los mismos.

En este estudio se realizó la selección de una de las tres cuencas de las zonas principales del complejo industrial de Mamonal y se hace un modelo desde el punto de vista hidrológico y de saneamiento ambiental, que evalúa el tránsito de las crecientes a través de las estructuras hidráulicas que a su paso encuentran los arroyos por considerarse estos, puntos de control en el proceso de avance de la creciente. Con base en estos análisis y el modelo propuesto, se crean alternativas para establecer las bases para el diseño de un plan de manejo y ordenamiento de la cuenca hidrográfica que atraviesa la vía Mamonal.

La cuenca que fue objeto de estudio fue la cuenca de los arroyos Policarpa, Cospique y Arroz Barato. Esta cuenca está ubicada cerca a la del Arroyo Grande y se diferencia en sus características en la utilización del suelo. Esta hoya tiene asentamientos urbanos e industriales mientras que la del Arroyo Grande no tiene asentamientos urbanos pronunciados además de tener áreas libres de manipulación humana. El estudio de la cuenca del arroyo Policarpa tuvo como objetivo general generar bases para la elaboración de un plan de ordenamiento, mientras que este trabajo investigativo busca mitigar o prevenir las inundaciones que se presentan en su entorno.

- *Estimation of urban structural flood damages: the case study of Palermo (Olivieri & Santoro, 2000)*

El objetivo de este trabajo ha sido los desarrollos de una relación de frecuencia-daños empíricos, obtenidos por medio de estudios locales detallados, para la mitigación de las inundaciones en áreas de drenaje fuertemente urbanizadas. Monumentos y otros elementos que tienen un significado cultural o artístico se han tenido especialmente en cuenta. El análisis se ha llevado a cabo para el área urbana de Palermo (Italia). Los daños se han calculado como un porcentaje del valor de la propiedad dañada, dependiendo de la profundidad del agua. El costo de reemplazo estructural ha sido utilizado para estimar el valor promedio de una



propiedad. La eficiencia técnica y económica de las diferentes medidas de mitigación de inundaciones se puede evaluar comparando las relaciones de frecuencia daños relacionados. Este estudio ofrece un panorama de posibilidades o factores a contemplar en la evaluación de alternativas de control de inundaciones y sirve como base en esta investigación, para tener un criterio más asertivo al momento de seleccionar la alternativa más apropiada.

- *Evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca hidrográfica del Arroyo Matute utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG), (Herrera, 2007)*

Este trabajo especifica un análisis de la cuenca del arroyo Matute, en el que se le describe detalladamente y plantea soluciones a los problemas sufridos, utilizando un Sistema de Información Geográfica.

Este proyecto sirvió como orientación para realizar la evaluación hidráulica e hidrológica de la cuenca del Arroyo Grande para mitigar las inundaciones que se presentan en su entorno, debido a que utiliza el software Arcgis como herramienta para identificar los conflictos del uso del suelo.

Se diferencia en que este proyecto sólo contempla la evaluación de posibles conflictos de uso del suelo y su incidencia en los planes de manejo ambiental de humedales, mientras que en la cuenca del Arroyo Grande sólo se encuentran asentamientos industriales y tiene como objetivo general la mitigación de las inundaciones.

3.2 ESTADO DEL ARTE

Para la ejecución del proyecto se necesitó una investigación previa, de revistas, artículos científicos y proyectos investigativos, con el fin de tener una guía relacionada con la temática y técnica para la mitigación de inundaciones en una cuenca hidrográfica. Dichos estudios realizados a nivel nacional e internacional fortalecerán y favorecerán dicha investigación,



puesto que muestran específicamente la metodología a utilizar. A continuación se presentan algunos de ellos.

- ***Un modelo basado en sistemas de información geográfica (GIS) para inundaciones urbanas (Chen, Hill & Urbano, 2009)***

La modelación de inundaciones en un entorno urbano es cada vez más relevante dada la magnitud del potencial de las pérdidas asociadas a este fenómeno. Resulta mucho más factible realizar planes preventivos que correctivos desde todo punto de vista para mitigar cualquier tipo de amenaza natural.

Este trabajo especifica un análisis del campus universitario de la Universidad de Memphis, Tennessee, en el que se desarrolla y prueba un modelo urbano de inundaciones en GIS. El modelo consta de dos componentes: un modelo de escorrentía de tormenta y un modelo de inundación.

En el modelo de inundación se reconoce la importancia de la topografía detallada y la información asociada a la acumulación del flujo. Este modelo se caracteriza por ser adaptado a morfologías planas y es muy útil para los planificadores urbanos y la preparación en casos de emergencia debido a su rendimiento en la relación tiempo-eficiencia y sus bajos requerimientos de equipos.

Este artículo funcionó como guía a este trabajo investigativo debido a que se realiza un análisis de riesgos por inundaciones utilizando un software que maneja un sistema de información geográfica GIS, que permite identificar los puntos de conflicto de un área seleccionada. Se diferencian del objeto de estudio en aspectos como la ubicación geográfica y el uso del suelo del sitio de estudio. En este estudio el uso del suelo es institucional debido a que es el campus de la Universidad de Memphis, mientras que en la cuenca del arroyo Grande sólo hay intervenciones de tipo industrial y zonas con poca intervención humana.



- ***Diagnóstico de la situación ambiental de la cuenca hidrográfica del arroyo San Jacinto en el municipio de San Jacinto, Departamento de Bolívar (Tapia & Torres, 2008)***

En este trabajo se presenta una valoración de la Cuenca del arroyo San Jacinto en el municipio de San Jacinto (Bolívar). El estudio se inicia bajo la necesidad de conocer mejor las características hidrológicas y que tanta contaminación presenta este arroyo. La cuenca de arroyo San Jacinto comprende en su totalidad el área urbana del municipio, por esta razón su principal problema es el vertimiento de aguas residuales y residuos sólidos, consecuencia de la falta de un sistema de alcantarillado y de una ineficiente recolección de basuras. Otros problemas de la cuenca son la sedimentación, la erosión del arroyo y de sus áreas contiguas.

Este proyecto sirvió como orientación para realizar la evaluación hidráulica e hidrológica de la cuenca del Arroyo Grande para mitigar las inundaciones que se presentan en su entorno debido a que se realiza un diagnóstico completo de una cuenca hidrográfica, siendo este aspecto importante para poder comparar y analizar similitudes en el comportamiento físico de la cuenca hidrográfica del arroyo ante fuertes precipitaciones.

Este proyecto se diferencia de esta investigación debido a que la cuenca cubre en totalidad el casco urbano del municipio, mientras que en la cuenca del arroyo Grande se presentan asentamientos industriales y zonas libres de manipulación antrópica, teniendo un comportamiento y una caracterización totalmente diferente.

- ***Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency (Schubert & Sanders, 2012)***

En este estudio se comparan cuatro métodos para modelar flujo inestable, multi-dimensional a través de las zonas urbanas: la resistencia a la construcción (BR), la construcción de bloques (BB), la construcción de hoyos (BH) y la construcción de la porosidad (BP). Cada método se aplica a la Baldwin Hills, CA urbana para escenarios de rotura de presas, que ofrece excelentes datos de parametrización del modelo, validación y evaluación global de



rendimiento que incluye observaciones de extensión de la inundación, el flujo de corriente, y buscar en camino. Los resultados muestran que los cuatro métodos son capaces de predecir con precisión la extensión de la inundación y el flujo de la corriente utilizando mallas no estructuradas únicas, adaptadas para aprovechar las fortalezas de cada enfoque.

- *Evaluación del uso del suelo contemplado en los planes de ordenamiento territorial y su incidencia en los planes de manejo ambiental de humedales. Caso de estudio: Ciénaga de Buenavista, ciénaga cerro de San Antonio, Caño Schiller y ciénaga de Zapayán en el departamento de Magdalena – Colombia (Beltrán & Manchego, 2012)*

Este proyecto tuvo como objetivo identificar conflictos entre el uso actual, el uso reglamentado por los POTs, y la capacidad de uso del suelo de los Municipios ubicados en los humedales Ciénaga de Buenavista, Ciénaga Cerro de San Antonio, Caño Schiller y Ciénaga Zapayán en el departamento del Magdalena, con el fin de plantear soluciones para su ordenamiento y conservación, usando como herramientas los Sistemas de Información Geográfica GIS.

Este proyecto sirve como orientación para realizar la evaluación hidráulica e hidrológica de la cuenca del Arroyo Grande para mitigar las inundaciones que se presentan en su entorno debido a que utiliza el software Arcgis como herramienta para identificar los conflictos del uso del suelo.

Se diferencia en que en la cuenca del Arroyo Grande sólo se encuentran asentamientos industriales y tiene como objetivo general la mitigación de las inundaciones, mientras que este proyecto sólo contempla la evaluación de posibles conflictos de uso del suelo y su incidencia en los planes de manejo ambiental de humedales.



- *Revisión técnica de la hidrología e hidráulica del Arroyo Grande de la Refinería de Cartagena (HIDROCONSULTORES, 2011)*

En ésta investigación se realizó una revisión hidrológica de la cuenca del Arroyo Grande, con el fin de determinar las medidas de mitigación, corrección y disminución del riesgo de inundación en los predios de Reficar y Ecopetrol. En el análisis hidráulico, se determinaron las características morfométricas de la cuenca del Arroyo Grande, mientras que en la parte hidrológica utilizaron la información secundaria de la estación del Aeropuerto Rafael Nuñez, a partir de ésta información, se determinaron los tiempos de concentración, se realizó un análisis de probabilidad de excedencia, se calcularon los caudales de escorrentía y se determinó el hidrograma de caudal para cada periodo de retorno y probabilidad de excedencia. Posterior a esto se evaluaron seis diferentes escenarios, mediante el modelo HEC-RAS, variando las secciones de las estructuras de control situadas a lo largo del tramo del Arroyo en el sector de Reficar y sin modificar las estructuras finales sobre la vía Mamonal, pero construyendo diques de protección a lo largo de los márgenes en la zona de la Refinería.

Finalmente en el estudio se plantea como solución para mitigar las inundaciones en el arroyo, “hacer una sección transversal trapezoidal de 17m de base con taludes 2:1 (H:V), remplazar el box culvert existente sobre la vía Mamonal por un puente de luz libre de 17 m, y profundizar el fondo del arroyo mejorando las pendientes, iniciando la ampliación desde el punto donde termina la rectificación del Arroyo Grande propuesta por CBI, hasta la bahía de Cartagena. Si esta solución no es factible de construcción inmediata, se recomienda la construcción de una serie de diques de protección sobre los márgenes del Arroyo en la zona de la Refinería.”

Este trabajo sirvió como antecedente y modelo de orientación, para realizar la evaluación hidráulica e hidrológica de la cuenca del Arroyo Grande y mitigar las inundaciones que se presentan en su entorno, puesto que plantea de manera clara la metodología a seguir para el transcurso del proyecto de investigación. Es de resaltar que en el proyecto de investigación que se plantea, se trabajará con la información de varias estaciones meteorológicas, se analizará el proceso de deterioro de la zona en cuanto a intervención humana, los usos del



suelo, geología, geomorfología, cobertura vegetal de la cuenca y sus drenajes; y se plantearán nuevas alternativas de solución que garanticen una adecuada mitigación de las inundaciones en la zona.

- ***Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca hidrográfica del arroyo "Casimiro" para mitigar o prevenir las inundaciones que se presentan en su entorno (Martínez & Olivo, 2012)***

En este trabajo de grado, se buscó mediante el estudio hidrológico e hidráulico de la cuenca del Arroyo Casimiro plantear alternativas de solución con el fin de mitigar o prevenir los fenómenos de inundación que se presentan en la cuenca y analizar el deterioro de la cuenca, con el fin de apoyar propuestas de ordenamiento de la misma. El análisis de la lluvia de la zona de estudio fue realizado teniendo en cuenta 7 estaciones cercanas a la cuenca hidrográfica del arroyo Casimiro, Estación del aeropuerto Rafael Núñez, Estación de la Escuela Naval (CIOH), Estación de Bayunca, Estación de Arjona, Estación de Santa Ana, Estación de Cañaveral y Estación de Sincerín. Se construyeron mapas de isoyetas para precipitaciones máximas anuales en toda la zona de Cartagena y las zonas aledañas a la cuenca. Los datos de las precipitaciones medias en la cuenca se ajustaron a las funciones de probabilidad de Gumbel y logarítmica y se generaron las curvas de Intensidad Duración Frecuencia. Se determinó a partir del análisis de la hidrología y la hidráulica de la cuenca que es necesario realizar la ampliación de los cauces o utilizar estructuras que permitan controlar los caudales aguas arriba debido a que la capacidad hidráulica que tienen las secciones son insuficientes para transportar el respectivo caudal. Se plantearon dos alternativas para evitar o prevenir las inundaciones: la primera alternativa consistió en la ampliación de las secciones en todo el recorrido final del arroyo y la segunda en la construcción de embalses.

Este proyecto sirvió como orientación para realizar la evaluación hidráulica e hidrológica de la cuenca del Arroyo Grande para mitigar las inundaciones que se presentan en su entorno, debido a que el arroyo "Casimiro" hace parte de la cuenca estudiada; y la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto es similar.



- *Diseño conceptual de un embalse de retención (humedal artificial) como alternativa de mitigación a las inundaciones en el municipio de Turbaco (Arrieta & Morales, 2012)*

El objetivo de este trabajo de grado, fue realizar el análisis hidráulico de un pequeño embalse de retención (humedal artificial), como alternativa de solución para el problema de las inundaciones frecuentes en el municipio de Turbaco. Al igual que en el estudio anterior se utilizó información de las estaciones pluviométricas del IDEAM, del Aeropuerto Rafael Núñez, Escuela Naval Almirante Padilla, Bayunca, Santa Ana, Arjona y Sincerín, realizando la interpolación a través del software de sistemas de información geográfica ARCGIS. El embalse de retención diseñado logra amortiguar gran parte del caudal, regulando un caudal de $13.2\text{m}^3/\text{s}$ a $2.02\text{ m}^3/\text{s}$, reduciendo las velocidades del flujo aguas abajo y logrando menores secciones de los canales aguas abajo y la sostenibilidad de los canales existentes en el municipio de Turbaco.

Este proyecto sirve como orientación para realizar la evaluación hidráulica e hidrológica de la cuenca del Arroyo Grande para mitigar las inundaciones que se presentan en su entorno, debido a que la construcción de un embalse es una de las posibles alternativas de solución para mitigar las inundaciones que se vienen presentando en la cuenca.

Este proyecto se diferencia de esta investigación debido a que la cuenca cubre en totalidad el casco urbano del municipio, mientras que en la cuenca del Arroyo Grande se presentan asentamientos industriales y zonas libres de manipulación antrópica, teniendo un comportamiento y una caracterización totalmente diferente.



3.3 MARCO TEORICO

A continuación, se muestran las teorías y términos referentes a la aplicación de análisis hidrológico e hidráulico que se utilizaron para la elaboración de esta investigación.

3.3.1 Hidrometeorología

A continuación, se muestran los conceptos investigados y aplicados para realizar un correcto análisis hidrometeorológico.

3.3.1.1 Método de los Polígonos de Thiessen.

Consiste en atribuir un factor de peso a los totales de precipitación en cada aparato, proporcionales al área de influencia de cada una. Sin embargo no considera influencias orográficas. Las áreas de influencia se determinan en mapas de la hoya que contengan la localización de las estaciones, uniendo dichos puntos de localización con líneas rectas, y enseguida trazando las mediatrices de estas rectas formando polígonos. Los lados de los polígonos son los límites de las áreas de influencia de cada estación. (Monsalve, 1999)

$$Pm = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

P_i : Precipitación en la estación

A_i : Área de influencia correspondiente a cada estación, resultante del método de Polígono de Thiessen.

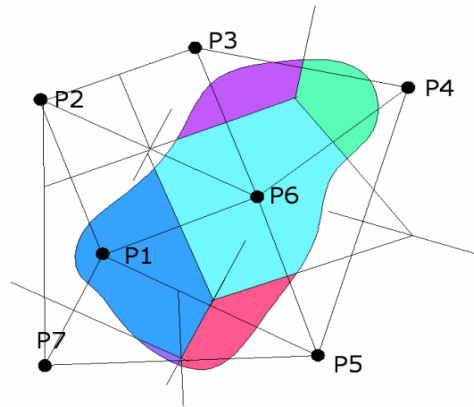


Figura 2. Método de los Polígonos de Thiessens. Fuente (Bateman, 2007)

3.3.1.2 Ajuste de datos

A continuación se presentan dos tipos de ajuste de datos, para la generación de las curvas IDF y un análisis completo.

3.3.1.2.1 Ajuste por función de probabilidad Gumbel.

Para el análisis de valores de datos hidrológicos aleatorios, un tipo de función de probabilidad para el ajuste de los mismos es la función de probabilidad de Gumbel. La ley de distribución de Gumbel establece que la probabilidad P de que un evento tenga una magnitud menor igual que un cierto valor x_i , es:

$$P(x \leq x_i) = e^{-e^{-y_i}} \quad (2)$$

e : es la base de los logaritmos neperianos

y_i : es la variable reducida, tal que

$$y_i = a(x_i - x_f) \quad (3)$$

$$a = \frac{s_n}{s} \quad (4)$$

$$x_f = \bar{X} - S \frac{y_n}{s_n} \quad (5)$$

\bar{X} : es el promedio de los datos de la muestra

S: es la desviación estándar de los datos de la muestra

X_i : son los datos de la muestra, desde i igual a 1 hasta n

\bar{X} y S dependen del número de años de registros de la muestra (n), y son respectivamente la media y la desviación estándar de la variable reducida.

3.3.1.2.2 *Ajuste logarítmico*

Para el ajuste logarítmico de los datos de precipitación se calcularon los periodos de retorno en años para cada una de las precipitaciones máximas en 24 horas, Se grafica el periodo de retorno contra la precipitación máxima en 24 horas y se ajusta a la distribución de probabilidad logarítmica.

$$T_r = \frac{1}{1 - P(x \leq x_i)} \quad (6)$$

$$y = a \ln(x) + b \quad (7)$$

Donde:

y: es la precipitación en mm

x: es el periodo de retorno en años.

Sin embargo, se hace necesario estimar la intensidad de lluvia para duraciones distintas a 24 horas aplicando la ecuación de porcentaje de precipitación definida para las precipitaciones de la Estación Aeropuerto Rafael Núñez (Bolivar & Ghang, 1997):

$$\%P = -0,0076t^4 + 0,0902t^3 - 0,4236t^2 + 0,897t + 0,0026 \quad (8)$$

Dónde:

%P: representa el porcentaje de la precipitación máxima que caerá en lluvias de menor duración.

t: expresa la duración de la lluvia en horas.



3.3.1.2.3 Curvas IDF Mediante análisis de Frecuencia

Cuando se tiene información suficiente se puede realizar un análisis de frecuencia para cada duración utilizando una función de probabilidad de valor extremo semejante a las de tipo I o Gumbel. Para cada una de las duraciones seleccionadas se extraen las lluvias máximas anuales de los registros históricos de lluvias y se le aplica un análisis de frecuencia a la información anual. Posteriormente se estiman con las funciones encontradas el valor de la precipitación o intensidad de la precipitación para el período de retorno que se requiera. Con esta información se construyeron las gráficas IDF.

Aparicio en 2001 dedujo, coeficientes para utilizarse en una ecuación de la forma:

$$i = \frac{kT^m}{(d+c)^n} \quad (9)$$

Donde k , m , n y c son constantes adimensionales que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple; T : Período de retorno en años; d : Duración en minutos; i : Intensidad en mm/h.

Si se aplica logaritmo la ecuación (9)

$$\log i = \log k + m \log t - n \log (d + c) \quad (10)$$

O bien:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (11)$$

Donde $y = \log i$, $a_0 = \log k$, $a_1 = m$, $x_1 = \log t$, $a_2 = -n$, $x_2 = \log(d + c)$

La ecuación (11) es de la familia de las líneas rectas de pendientes a_2 , ordenada al origen a_0 y espaciamento a_2 .



Si los datos registrados de i , d y T se dibujan en papel logarítmico, usualmente se agrupan en torno a líneas rectas. A veces las curvas resultan ligeramente curvas, lo que se puede corregir agregando a las duraciones un valor constante c , o bien, en algunos casos, cuando la pendiente de las líneas varía mucho, dividiendo la línea para cada período de retorno en dos rectas. Si los datos se agrupan lo suficiente en torno a líneas rectas, el valor de c puede tomarse como cero.

Al hacer un ajuste de correlación lineal múltiple de una serie de tres tipos de datos, se obtiene un sistema de ecuaciones como el siguiente:

$$\sum y = N a_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \quad (12)$$

$$\sum(x_1 y) = a_0 \sum x_1 + a_1 \sum(x_1^2) + a_2 \sum(x_1 x_2) \quad (13)$$

$$\sum y = a_0 \sum x_2 + a_1 \sum(x_1 x_2) + a_2 \sum(x_2^2) \quad (14)$$

Donde N es el número de datos y las incógnitas son a_0 , a_1 y a_2 ; x_1 es el logaritmo del período de retorno, x_2 es la duración (con el valor de c agregado de ser necesario) y y es la intensidad, obtenidos de un registro de precipitación. El período de retorno se obtiene de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{(n+1)}{m} \quad (15)$$

Donde m = número de orden en una lista de mayor a menor de los datos y n = número de datos. (El inverso del período es la frecuencia).

Una vez calculados los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 es posible evaluar los parámetros k , m y n de la ecuación (19) y con ella, dibujar las curvas IDF.



3.3.1.3 Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía es la relación entre la parte de la precipitación que circula superficialmente y la precipitación total, entendiendo que la parte superficial es menor que la precipitación total al descontar la evaporación, evapotranspiración, almacenamiento, etc. Como puede comprenderse, el proceso de escorrentía es complejo y en la práctica deben introducirse simplificaciones (EYPO Ingeniería, 2010)

$$C = \frac{E_s}{P} \quad (16)$$

El coeficiente de escorrentía depende de numerosos factores: del tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), de su cantidad, de intensidad y distribución en el tiempo; de la humedad inicial del suelo; del tipo del terreno (granulometría, textura, estructura, materia orgánica, grado de compactación, pendiente, microrrelieve, rugosidad), del tipo de cobertura vegetal existente; de la intercepción que provoque; del lapso de tiempo que consideremos (minutos, duración del aguacero, horas, días, meses, un año), etc. El coeficiente de escorrentía puede tomar valores entre cero y uno (Azagra, 2006).

$$0 \leq C \leq 1 \quad (17)$$

3.3.1.4 Tiempo de concentración

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida. (Ibañez Asensio, Moreno Ramon, & Gisbert Blanquer)

$$t_c = \frac{1}{60} \sum \frac{L}{v} \quad (18)$$

Dónde:

t_c = tiempo de concentración (min)

L = longitud de la trayectoria de flujo (pies)

V = velocidad promedio para diferentes superficies (pies por segundo)

3.3.1.5 Periodo de retorno

En hidrología, los períodos de retorno varían típicamente de 10 a 100 años, y en lugares donde la Precipitación Máxima Probable no ha sido definida, hasta 10,000 años. La selección de período de retorno depende de varios factores, entre los cuales se incluyen el tamaño de la cuenca, la importancia de la estructura, y el grado de seguridad deseado.

3.3.1.6 Caudales máximos

Las expresiones del cálculo de caudales máximos dependen, principalmente, de la intensidad de las precipitaciones pluviales. La intensidad, frecuencia y duración de las lluvias es información que debe ser precisa para la exactitud de los valores de caudal máximo calculados teóricamente. Uno de los métodos usados habitualmente para el cálculo del caudal máximo, que se denomina "caudal máximo teórico" (Q_T) es el Método Racional. (Tecnología Carreteras MOPU, 1987)

3.3.3.6.1 Método Racional Clásico.

Este método, que la literatura inglesa atribuye a Lloyd-George en 1906, si bien los principios del mismo fueron establecidos por Mulvaney en 1850, permite determinar el caudal máximo que escurrirá por una determinada sección, bajo el supuesto que éste acontecerá para una lluvia de intensidad máxima constante y uniforme en la cuenca correspondiente a una duración D igual al tiempo de concentración de la sección. (Schmidth, 1986)

$$Q_T = C * I * A \quad (19)$$



Q_T = Caudal o descarga, en m^3/s

C = Coeficiente medio de escorrentía de la cuenca, adimensional.

A = Área de la cuenca, en hectáreas (ha)

I = Intensidad en mm/hora; es la máxima precipitación media correspondiente al periodo de retorno e intervalo de tiempo más desfavorable (tiempo de concentración).

3.3.2 Características morfométricas de una cuenca.

El comportamiento de los ríos y arroyos refleja la interacción entre las precipitaciones y las características geomorfológicas de la cuenca. Una cuenca con mayor grado de permeabilidad producirá unos caudales picos menores que una cuenca en igualdad de condiciones pero con menor grado de permeabilidad, condiciones similares se presentan para una cuenca con mayor cobertura vegetal que una cuenca desforestada.

Las características morfométricas de una cuenca dependen de la forma, del relieve, de la red de drenaje, del tipo de suelo, de la cobertura vegetal, y de las características geológicas de la zona.

3.3.2.1 Área de Drenaje (A).

Es el área en planta de una cuenca contenida entre sus divisorias topográficas (proyección horizontal). Es la magnitud más importante que define la cuenca. Delimita el volumen total de agua que a cuenca recibe en cada precipitación.

3.3.2.2 Forma de la Hoya o Cuenca.

Es la configuración geométrica tal como está proyectada en el plano horizontal. La forma de la hoya incide en el tiempo de respuesta de la cuenca, es decir, al tiempo de recorrido del agua a través de la red de drenaje, y, por consiguiente a la forma del hidrograma resultante de una precipitación dada y está relacionada con el tiempo de concentración. Para determinar a forma

en una cuenca se utilizan varios índices asociados a la relación área-perímetro, siendo los más comunes el índice o coeficiente de compacidad y el factor de forma.

3.3.2.3 Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad. (K_c).

Se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo que tiene la misma área que la cuenca.

$$K_c = 0,28 P/A^{1/2} \quad (20)$$

P= Perímetro de la cuenca en km

A= Área de drenaje de la cuenca en km².

Una cuenca que tiene una forma circular tendrá el mínimo valor del coeficiente de compacidad y será muy próximo a uno, mientras que una cuenca irregular tendrá un mayor índice de compacidad. En la medida en que la cuenca tienda a ser más circular tendrá mayor tendencia a presentar mayores crecientes.

3.3.2.4 Factor de Forma (K_f)

Se define como la relación entre el ancho medio de la cuenca y su longitud axial. La longitud axial se considera sobre el curso de agua de mayor longitud, desde la divisoria de agua hasta la desembocadura. El ancho medio se calcula dividiendo el área por la longitud axial de la cuenca.

$$K_f = B/L \quad (21)$$

$$B = A/L \quad (22)$$

$$K_f = A/L^2 \quad (23)$$



Dónde:

B es el ancho medio en km, L es la longitud axial de la cuenca en km, y A es el área de drenaje en Km².

Una cuenca con un factor de forma bajo es una cuenca alargada y tiene menos posibilidades de eventos de crecientes que otra cuenca del mismo tamaño con un factor de forma mayor.

3.3.2.5 Orden de las Corrientes de Agua.

El orden de una corriente es el reflejo del grado de ramificación o bifurcación que presenta una cuenca u hoya, y se define como:

- Corrientes de primer orden: Son aquellos pequeños canales que no tienen tributarios.
- Corrientes de segundo orden: Se forma cuando se unen dos corrientes de primer orden.
- Corrientes de tercer orden: Se forma cuando se unen dos corrientes de segundo orden.
- Corrientes de orden n. Se forman cuando se unen dos corrientes de orden n-1.

3.3.2.6 Densidad de Drenaje.

Se define como la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y su área total.

$$Dd = L/A \quad (24)$$

Dónde:

L= Longitud total de las corrientes de agua en km, A= Área total de la cuenca en km².

Como referencia se tienen valores de 0.5 km/km², para cuencas con pobre drenaje hasta valores alrededor de 3.5 km/km², para cuencas bien drenadas. Este indicador es cuestionado porque depende del tamaño de la escala en la que se realicen los planos.



3.3.2.7 Extensión media de la escorrentía superficial

Se define como la distancia media que el agua lluvia tendría que recorrer en la cuenca para alcanzar el cauce. Para su estimación la cuenca se ha idealizado de forma rectangular con una longitud L , igual a la longitud de todos los cursos de agua de la cuenca expresada en km, y un ancho igual a 4 veces la longitud media recorrida por la escorrentía superficial.

$$I = \frac{A}{4L} \quad (25)$$

Donde I es la longitud media en km; A es el área de drenaje de la cuenca en km^2 , L es la longitud total de los cursos de agua de cuenca hidrográfica, en km.

3.3.2.8 Sinuosidad de una corriente de agua

Es la relación entre la longitud del cauce de una corriente y la longitud de su valle.

$$S = L/L_T \quad (26)$$

Un valor de sinuosidad menor o igual a 1.25 indica una baja sinuosidad, y se define como una corriente con un alineamiento recto.

3.3.2.9 Pendiente de la cuenca

La pendiente de la cuenca responde en gran medida por la velocidad con la que se mueve la escorrentía superficial y define el tiempo de concentración de la cuenca.

Método de las curvas de nivel: La pendiente media pondera de la cuenca con base en las curvas de nivel se calcula de la siguiente manera. Sea:

$$s_i = \frac{D}{d_i} \quad ; \quad d_i = \frac{a_i}{l_i} \quad ; \quad s_i = \frac{Dl_i}{a_i}$$

$$S = \frac{\sum s_i a_i}{\sum a_i} = \frac{\sum \frac{Dl_i}{a_i} a_i}{\sum a_i} = \frac{\sum Dl_i}{\sum a_i} = \frac{D \sum l_i}{\sum a_i} = \frac{DL_T}{A} \quad ;$$

(27)

l_i = Longitud de la curva de nivel i , en metros.

d_i = Ancho promedio de la banda entre dos curvas de nivel, en metros.

S_i = Pendiente media de la banda d_i .

a_i = Área de drenaje correspondiente a la banda d_i , en m^2 .

D = Diferencia de cotas entre curvas de nivel i , en metros.

S = Pendiente promedio de toda la cuenca.

A = Área total de la cuenca, en m^2 .

L_T = Longitud total de todas las curvas de nivel en la cuenca, en metros.

En la expresión anterior se muestra que la pendiente media ponderada de la cuenca depende de la longitud total de las curvas de nivel, de la diferencia entre curvas de nivel y del área de la cuenca.

3.3.2.10 Curva hipsométrica

Es una representación gráfica del relieve de una cuenca. Se representa el porcentaje de área que existe en la cuenca por encima de un valor de cota determinado. En el eje de la abscisas se grafica el área acumulado y el eje de las ordenadas se grafica la cota de cada curva o punto analizado.

Las curvas hipsométricas sirven para definir características fisiográficas de las cuencas hidrográficas. Cuencas hidrográficas con valles extensos y cumbres escarpadas tienden a tener una curva hipsométrica con concavidad hacia arriba y cuencas con valles profundos sabanas planas tienden a tener curvas hipsométricas cóncavas hacia abajo.

3.3.2.11 *Altura media de la cuenca.*

La altura media de la cuenca se define como:

$$hm = \frac{\sum(c_i - a_i)}{A} \quad (28)$$

c_i : cota media del área i , en metros

a_i : área i entre curvas de nivel, en m^2

La altura media es determinante de la temperatura y la precipitación

3.3.2.12 *Pendiente de la corriente principal.*

Es el indicador del grado de respuesta hidrológica de una cuenca a una tormenta. No se debe confundirlo con la pendiente de la cuenca. Dado que la pendiente varía a lo largo del cauce, se han planteado varios criterios para calcular la pendiente de la corriente principal de una cuenca, entre los que se tienen los siguientes:

a) Pendiente media.

Es la diferencia total de altura entre la divisoria de agua de la cuenca y la salida de la corriente, dividida por la longitud del eje del río o corriente.

$$s_1 = \frac{h_1 - h_0}{L_1 - L_0} \quad (29)$$

h_1 = Altura en el nacimiento del cauce, en metros.

h_0 = Altura en la salida del cauce, en metros.

L_1 = longitud del cauce hasta la altura h_1 , en metros.

L_0 = Longitud del cauce en el punto de altura h_0 , en metros.



b) Pendiente media ponderada.

En una gráfica de longitud en las abscisas contra altura en las ordenadas, la pendiente media ponderada está dada por aquella línea inclinada partiendo del punto de salida del cauce, que tiene la misma área bajo la línea que el área bajo la curva de longitud-vs-altura.

$$s_1 = \frac{h_2 - h_0}{L_2 - L_0} \quad (30)$$

c) Pendiente equivalente constante

Es la pendiente que produce el mismo tiempo de viaje que tiene el flujo sobre el cauce principal de la cuenca.

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{s_i^{1/2}} \right)} \right]^2 \quad (31)$$

l_i = Longitud del tramo entre curvas de nivel.

s_i = Pendiente del cauce entre curvas de nivel.

3.3.2.13 *Coefficiente de escorrentía*

Representa la porción de la precipitación que se convierte en caudal, es decir, la relación entre el volumen de Escorrentía superficial y el de precipitación total sobre un área determinada. El Coeficiente de Escorrentía no es un factor constante, pues varía de acuerdo a la magnitud de la lluvia y particularmente con las condiciones fisiográficas de la Cuenca Hidrográfica (Cobertura vegetal, pendientes, tipo de suelo), por lo que su determinación es aproximada (Visión Mundial Canadá, 2004).



3.3.2.14 *Periodo de retorno*

El tiempo de retorno o periodo de retorno, es el periodo promedio en que el valor del caudal pico de una creciente es igualado o superado una vez cada Tiempo (T). Este periodo es encontrado a partir de la información relacionada con el uso del suelo y la importancia de la zona en la que se encuentre la cuenca hidrográfica (Aparicio, 1992).

3.3.2.15 *Estimación de la intensidad de lluvia*

El valor de la intensidad de lluvia se obtiene a partir de las curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), las cuales se construyen por medio de puntos representativos de la intensidad media de precipitación para diferentes duraciones, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno.

Mediante las curvas IDF es posible estimar la intensidad de tormentas intensas de distintas duraciones y para diferentes periodos de retorno. La metodología tradicional usada para el cálculo de las curvas IDF consiste básicamente en realizar un análisis de frecuencia a cada una de las series de valores máximos de precipitación obtenidas para cada duración (Ruiz, 2001).

3.3.2.16 *Estimación de los tiempos de concentración*

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida. La ecuación para calcular el tiempo de concentración sigue los parámetros del método de la velocidad. (Ibañez, Moreno, & Gisbert, 2005).

3.3.2.17 *Método de la velocidad*

El método de la velocidad propuesto en el Plan Maestro de Drenajes Pluviales de Cartagena, establece que la velocidad de concentración es proporcional a la raíz cuadrada de la pendiente media de la cuenca o subcuenca.

$$V_c = K\sqrt{S} \quad (32)$$

Donde, S es la pendiente de la cuenca (m/m) y K es la constante regional adimensional.

Luego, el tiempo de concentración (Tc) se calcula como:

$$T_c = \frac{L_c}{V_c} \quad (33)$$

Dónde:

Tc: tiempo de concentración (min)

Lc: longitud del cauce principal de la cuenca en metros

Vc: velocidad de concentración m/min

3.3.2.18 *Método racional*

El método racional expresa que la descarga es igual a un porcentaje de la precipitación multiplicado por el área de la cuenca. La duración mínima de las lluvias seleccionadas deberá ser el tiempo de concentración en minuto, por tanto, puede escribirse como (HIDROCONSULTORES LTDA, 2011):

$$Q = \frac{CIA R}{360} \quad (34)$$

Dónde:

Q= caudal en litros por segundo

C= coeficiente de escorrentía

I= intensidad de la precipitación en litros por segundos por hectáreas



A= área de la cuenca en hectáreas

R= coeficiente de reducción por el tamaño del área.

Donde R se calcula a partir de la ecuación

$$R = 1 - 0.0054\sqrt[4]{A} \quad (35)$$

Según Carciente, (Carciente, 1980) la fórmula racional está basada en ciertas hipótesis:

- El escurrimiento resultante de cualquier intensidad de lluvia es un máximo cuando esa intensidad de lluvia dura, al menos, tanto como el tiempo de concentración.
- El escurrimiento resultante de una intensidad de lluvia, con duración igual o mayor que el tiempo de concentración, es una fracción de la precipitación.
- La frecuencia de la máxima descarga es la misma que la de la intensidad de lluvia para el tiempo de concentración dado.
- La relación entre máxima descarga y tamaño del área de drenaje es la misma que la relación entre duración e intensidad de precipitación.
- El coeficiente de escorrentía es el mismo para lluvias de diversas frecuencias.
- El coeficiente de escorrentía es el mismo para todas las lluvias en una cuenca dada.

Con valores correctos de precipitación pluvial y para un coeficiente de escurrimiento dado, la formula racional siempre sobrestima el escurrimiento, con errores apreciables al aumentar el tamaño de la cuenca. Por consiguiente, esta fórmula solo es confiable en cuencas pequeñas, generalmente de menos de 500 hectáreas. (Carciente, 1980).

3.3.3 Flujo uniforme.

Se considera que el flujo uniforme tiene características principales como, la profundidad, el área mojada, velocidad y el caudal en cada sección del canal son constantes, y la línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos, es decir, sus pendientes son todas iguales.



Para los cálculos hidráulicos la velocidad media de un flujo uniforme turbulento en canales abiertos por lo general se expresa aproximadamente por la llamada ecuación de flujo uniforme. La mayor parte de las ecuaciones prácticas de flujo uniforme pueden expresarse de la siguiente manera:

$$V = CR^x S^y \quad (36)$$

V: velocidad (m/s)

R: radio hidráulico (m)

S: Pendiente (m/m)

C: es un factor de resistencia al flujo.

- **Ecuación de Chézy:** la ecuación de Chézy se expresa de la siguiente forma:

$$V = C(RS)^{1/2} \quad (37)$$

- **Ecuación de Manning:** el ingeniero irlandés presentó la ecuación de la forma:

$$V = \frac{(R^{2/3} S^{1/2})}{n} \quad (38)$$

3.3.3.1 Flujo gradualmente variado.

El flujo gradualmente variado es el flujo permanente cuya profundidad varía de manera gradual a lo largo de la profundidad del canal. Esta definición establece dos condiciones; primero, el flujo es permanente, es decir, las características hidráulicas permanecen constantes para el intervalo de tiempo bajo consideración, y segundo, las líneas de corrientes son paralelas, es decir, prevalece la distribución hidrostática de presiones sobre la sección del canal.

El flujo gradualmente variado puede ser descrito mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 + d(V^2/2g)/dy} \quad (39)$$



La teoría del flujo gradualmente variado gira entorno a las siguientes suposiciones básicas:

- La pérdida de altura en una sección es la misma que para un flujo uniforme que tiene la velocidad y el radio hidráulico de la misma sección.
- La pendiente del canal es baja
- El canal es primático
- La distribución de la velocidad en la sección del canal es fija
- La conductividad y el factor de sección son funciones exponenciales de la profundidad de flujo
- El coeficiente de rugosidad es independiente de la profundidad del flujo y constante a través de los tramos del canal bajo consideración.

3.3.4 Hidrograma adimensional SCS

El hidrograma adimensional SCS es un hidrograma sintético en el cual el caudal se expresa por la relación del caudal q con respecto del caudal pico q_p y el tiempo por la relación del tiempo t con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario, T_p . Dado el caudal pico y el tiempo de recarga para la duración de exceso de precipitación, el hidrograma unitario puede estimarse a partir del diagrama sintético adimensional para la cuenca dada. Para la figura 3a) muestra uno de estos hidrogramas adimensionales, preparado utilizando los hidrogramas unitarios para una variedad de cuencas. Los valores de q_p y T_p pueden estimarse utilizando un modelo simplificado de un hidrograma unitario triangular tal como se muestra en la figura 3b), en donde el tiempo está dado en horas y el caudal en $m^3/s \cdot cm$ (Soil Conservation Service, 1972).

Con base en la revisión de un gran número de hidrogramas unitarios, el Soil Conservation Service sugiere que el tiempo de recesión puede aproximarse como $1.67 T_p$. Como el área bajo el hidrograma unitario debería ser igual a una escorrentía directa de 1cm, puede demostrarse que:

$$q_p = \frac{CA}{T_p} \quad (40)$$

Donde $C = 2.08$ y A es el área de drenaje en kilómetros cuadrados.

Adicionalmente, un estudio de los hidrogramas unitarios de muchas cuencas rurales grandes y pequeñas indica que el tiempo de retardo $T_p = 0.6T_c$, donde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca. Como se muestra en la Figura 3; de igual forma el tiempo de ocurrencia del pico T_p , puede expresarse en términos del tiempo de retardo t_p y de la duración de la lluvia efectiva t_r (Arrieta, 2012).

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (41)$$

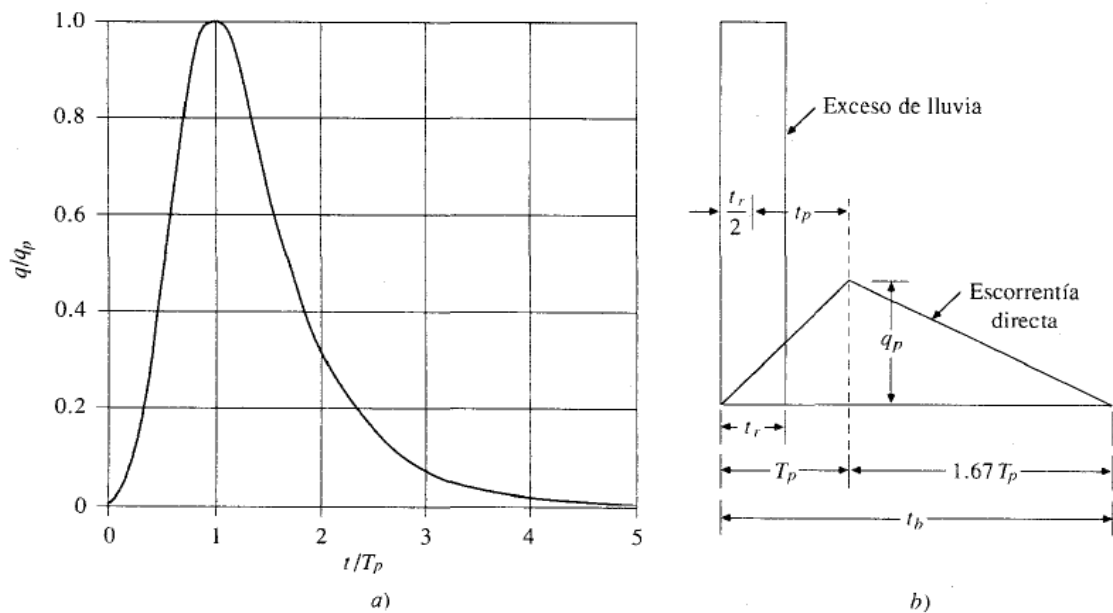


Figura 3. Hidrogramas unitarios sintéticos del Soil Conservation Service a) Hidrograma adimensional y b) hidrograma unitario triangular. (Chow, Hidrología Aplicada, 1994)

3.3.4.1 Embalses

Para realizar el análisis del efecto amortiguador que produce un embalse cuando transita a través de él una creciente se estudia un embalse cuya estructura de salida es un vertedero rectangular.

En la Figura 4a y Figura 4b se representan los caudales de entrada (Q_E) y salida (Q_S) en el embalse para los instantes de tiempo t y $t+\Delta t$, donde el embalse tiene un área superficial constante y nivelada de magnitud A . La Figura 4c, se muestra el esquema de un hidrograma de creciente y en la Figura 4d, una vista frontal de un vertedero rectangular.

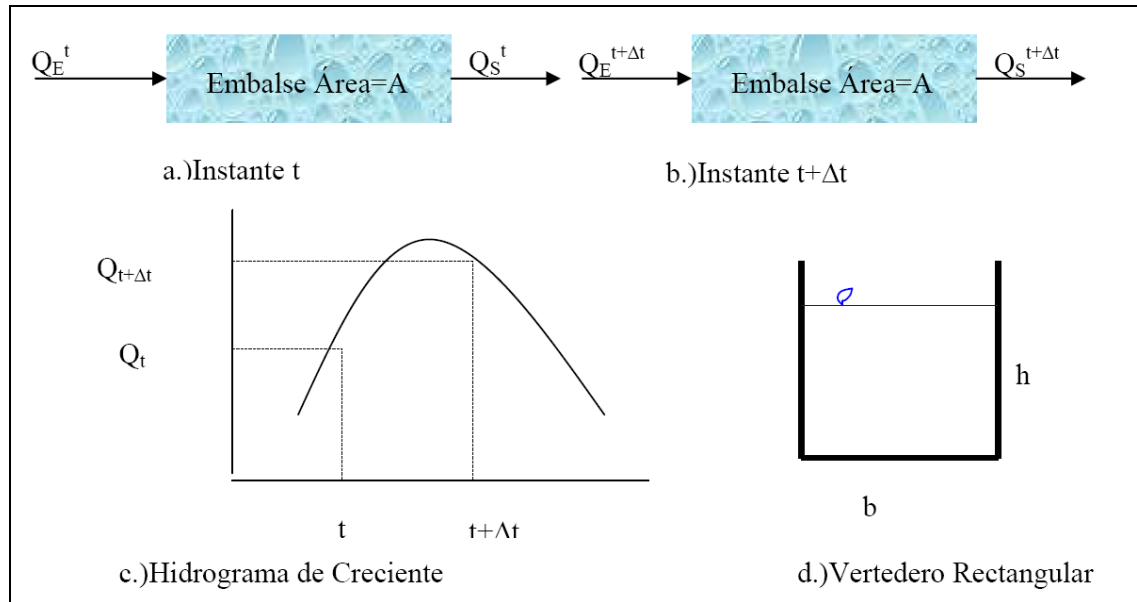


Figura 4. Componentes Esquemáticos del Sistema. (Martinez Lavalle & Olivo Bustillo, 2012)

La ecuación (42), representa el volumen que ingresa al embalse en un intervalo de tiempo Δt y la ecuación (42), el volumen que sale del embalse en el mismo intervalo de tiempo Δt .

$$V_E = \frac{Q_E^t + Q_E^{t+\Delta t}}{2} \Delta t \quad (42)$$

$$V_S = \frac{Q_S^t + Q_S^{t+\Delta t}}{2} \Delta t \quad (43)$$

Aplicando la ecuación de continuidad se obtiene la ecuación (44) donde A , representa el área superficial del embalse y Δh la altura que sube o baja el embalse en el intervalo de tiempo Δt .

$$A \Delta h \frac{2}{\Delta t} = Q_E^t + Q_E^{t+\Delta t} - Q_S^t - Q_S^{t+\Delta t} \quad (44)$$



La ecuación (45) expresa el flujo a superficie libre sobre un vertedero rectangular que puede ser de pared delgada o pared gruesa, C es el coeficiente del vertedero, b el ancho de la cresta y h la carga sobre la cresta del vertedero.

$$Q = Cbh^{3/2} \tag{45}$$

La ecuación (46) muestra el caudal de salida en el tiempo t y $t+\Delta t$ para alturas sobre la cresta del vertedero de h , y, $h+\Delta h$ respectivamente.

$$Q_s^t = Cbh^{3/2} \quad \text{y} \quad Q_s^{t+\Delta t} = Cb(h+\Delta h)^{3/2} \tag{46}$$

Aplicando el binomio de Newton en la ecuación (46) y truncándolo del segundo término en adelante se obtienen las ecuaciones (47) y (48).

$$Cb(h+\Delta h)^{3/2} = Cb(h^{3/2} + \frac{3}{2}h^{1/2}\Delta h + \dots \Delta h^n) \approx Cb(h^{3/2} + \frac{3}{2}h^{1/2}\Delta h) \tag{47}$$

$$Q_s^t + Q_s^{t+\Delta t} = 2Cbh^{3/2} + \frac{3}{2}Cbh^{1/2}\Delta h \tag{48}$$

Sustituyendo la ecuación (48) en la ecuación (44) se llega a la ecuación (49), que expresa la magnitud del incremento de altura en el embalse en un intervalo de tiempo Δt .

$$Cb(h+\Delta h)^{3/2} = Cb(h^{3/2} + \frac{3}{2}h^{1/2}\Delta h + \dots \Delta h^n) \approx Cb(h^{3/2} + \frac{3}{2}h^{1/2}\Delta h) \tag{49}$$

$$Q_s^t + Q_s^{t+\Delta t} = 2Cbh^{3/2} + \frac{3}{2}Cbh^{1/2}\Delta h \tag{50}$$

$$\Delta h = \frac{Q_s^t + Q_s^{t+\Delta t} - 2Cbh^{3/2}}{\frac{3}{2}Cbh^{1/2} + 2\frac{A}{\Delta T}} \tag{51}$$

Finalmente la ecuación (50) se normaliza expresando los caudales por unidad de ancho y del coeficiente C del vertedero, ver ecuación (51). Expresando los caudales en m^3/s , el ancho b de

la cresta del vertedero en metros, la altura h de la lámina vertida en metros, el coeficiente C del vertedero en $m^{1/2}/s$, el área del embalse en hectáreas y el tiempo en horas se llega a la ecuación diez.

$$\Delta h = \frac{\frac{Q_E^t + Q_E^{t+\Delta t}}{bC} - 2h^{3/2}}{\frac{3}{2}h^{1/2} + 2\frac{A}{bC\Delta t}} \quad \Delta h = \frac{\frac{Q_E^t + Q_E^{t+\Delta t}}{bC} - 2h^{3/2}}{\frac{3}{2}h^{1/2} + \frac{200}{36}\frac{A}{bC\Delta t}} \quad (52)$$

Para evaluar la metodología propuesta se tomará como hidrograma de entrada el hidrograma unitario triangular del Soil Conservation Service, que se muestra en la Figura 5.

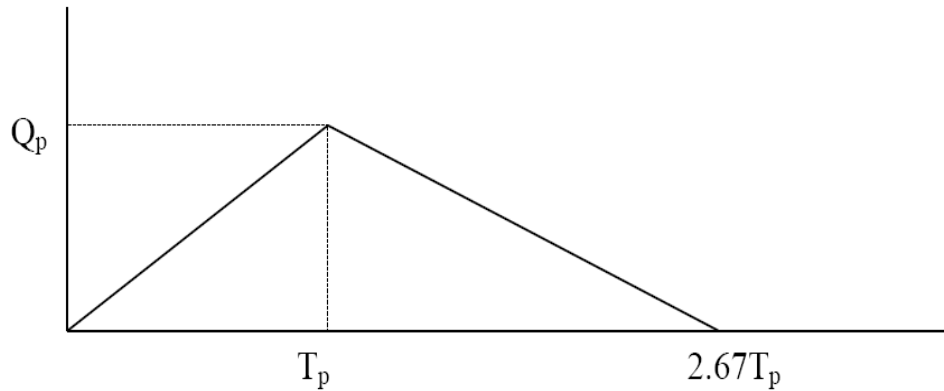


Figura 5. Hidrograma Unitario Triangular SCS (Chow, 1993)

Igualando el volumen de escorrentía directa del hidrograma unitario triangular con el exceso de lluvia P , precipitado sobre una cuenca de área A_c , se obtiene el caudal pico Q_p , dado por la ecuación (52).

$$Q_p = \frac{2}{2.67} \frac{A_c P}{T_p} \quad (53)$$

Expresando El área de la cuenca en hectáreas, la precipitación en mm, y el tiempo al pico (T_p) en horas, se obtiene la ecuación (53).

$$Q_p = \frac{1}{180 * 2.67} \frac{A_c P}{T_p} \quad (54)$$

Siguiendo el procedimiento de la ecuación (51), se normaliza la ecuación (52), dando como resultado la ecuación (54).

$$\frac{Q_p}{bC} = \frac{1}{180 * 2.67 T_p} \frac{A_c P}{bC} = q_u = 1 \quad (55)$$

Al caudal pico normalizado q_u , le asignamos el valor de 1 (100%)

$$\Delta h = \frac{q_u^t + q_u^{t+\Delta t} - 2h^{3/2}}{\frac{3}{2}h^{1/2} + \frac{200}{36} \frac{A}{bC\Delta t}} \quad (56)$$

$$\Delta h = \frac{q_u^t + q_u^{t+\Delta t} - 2h^{3/2}}{\frac{3}{2}h^{1/2} + \frac{200}{36} \kappa} \quad \text{donde } \kappa = \frac{A}{bC\Delta t} \quad (57)$$

Finalmente en la ecuación (56) se ha definido el parámetro k , el cual es función del área del embalse, del ancho del vertedero, del coeficiente C del vertedero y del intervalo de tiempo de simulación, y es quien define el grado de amortiguación del hidrograma de salida. Esta expresión es la que se utiliza para calcular la variación de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero y su caudal correspondiente.

3.3.5 Fotointerpretación

Para el estudio de los drenajes pluviales de una zona es fundamental el análisis de fotografías aéreas y terrestres, debido a que las fotografías registran una información macroscópica que en algunas ocasiones no se aprecian con las visitas de campo. Existen procesos geomorfológicos que quedan registrados en las fotografías aéreas, como por ejemplo los cortes de los meandros y las migraciones del lecho de un río. La forma como la reflexión de la luz se registra en una fotografía da muestra del tipo de suelo existente y de la vegetación que



lo cubre. Al analizar fotografías de diferentes épocas se pueden reconstruir así sea cualitativamente algunos eventos hidrológicos extremos ocurridos en la cuenca.



3.4 MARCO LEGAL

La gestión del recurso hídrico y el concepto de ordenación de cuencas hidrográficas, tienen sus orígenes con la expedición del Decreto 1381 de 1940 (por el entonces Ministerio de Economía Nacional), en el cual se determina los primeros lineamientos explícitos de política para el manejo del agua, sin embargo, es hasta la expedición del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto - Ley 2811 de 1974) que se da inicio a la planificación ambiental del territorio.

El mencionado Código, establece principios, normas generales y regulaciones para la planificación y manejo de los recursos suelo, aire, fauna, flora y el agua, entre otros, en el territorio colombiano. Este instrumento marca el inicio de las directrices que de manera específica orientan la administración del recurso hídrico en el país, define como un "área de manejo especial", la cuenca hidrográfica y establece en el artículo 316 que "Se entiende por ordenación de una cuenca la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna, y por manejo de la cuenca, la ejecución de obras y tratamientos".

En el mismo sentido, respecto a la actividad administrativa relacionada con los recursos naturales renovables, el artículo 45 del mencionado Código, establece que el manejo de los recursos naturales renovables se ajustará entre otras, a las siguientes reglas:

- d) Los planes y programas sobre protección ambiental y manejo de los recursos naturales renovables deberán estar integrados en los planes y programas generales de desarrollo económico y social, de modo que se dé a los problemas correspondientes un enfoque común y se busquen soluciones conjuntas sujetas a un régimen de prioridades en la aplicación de políticas de manejo ecológico y de utilización de dos o más recursos en competencia o de la competencia entre diversos usos de un mismo recurso.
- e). Se zonificará el país y se delimitarán áreas de manejo especial que aseguren el desarrollo de la política ambiental y de recursos naturales. Igualmente, se dará prioridad a la ejecución de programas en zonas que tengan graves problemas ambientales y de manejo de los recursos.



g). Se asegurará mediante la planeación en todos los niveles la compatibilidad entre la necesidad de lograr el desarrollo económico del país y la aplicación de la política ambiental y de los recursos naturales; con la expedición de la Ley 99 de 1993, se crea el Ministerio de Ambiente como organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables y se establecen lineamientos para fortalecer el Sistema Nacional Ambiental y fijar las pautas generales para el ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas y demás áreas de manejo especial, al igual que establece la competencia a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible en la ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas ubicadas en el área de su jurisdicción.

La Ley 165 de 1994, por medio de la cual se aprueba el "Convenio sobre la Diversidad Biológica", establece en el artículo 6º, que las Partes Contratantes, con arreglo a sus condiciones y capacidades particulares: “a) Elaborará estrategias, planes o programas nacionales para la conservación y la utilización sostenible de la diversidad biológica o adaptará para ese fin las estrategias, planes o programas existentes, que habrán de reflejar, entre otras cosas, las medidas establecidas en el presente Convenio que sean pertinentes para la Parte Contratante interesada; y b) Integrará, en la medida de lo posible y según proceda, la conservación y la utilización sostenible de la diversidad biológica en los planes, programas y políticas sectoriales o intersectoriales.” (Ministerio de Ambiente 2013).

En 2010, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS), expidió la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico – PNGIRH, la cual define la cuenca hidrográfica como unidad espacial de análisis y de gestión, en donde el agua interactúa con los demás recursos naturales renovables, elementos ambientales y/o ecosistemas estratégicos que la integran, así como los elementos antrópicos que influyen positiva o negativamente en la misma y los actores clave para al GIRH (autoridades ambientales, usuarios, entes territoriales y demás entidades tanto públicas como privadas que actúan en la cuenca).



Lo anterior implica que la cuenca como unidad de análisis y Gestión Integral del Recurso Hídrico, deberá considerar en su ordenación y manejo, las medidas de acción necesarias para planificar el uso sostenible de la misma y de los recursos naturales renovables, ecosistemas y elementos ambientales presentes en ella (medidas de ordenamiento del recurso hídrico, manejo de paramos, de humedales y otros ecosistemas de importancia estratégica, de ordenación forestal, de manejo de reservas forestales, entre otras).

La Ley 1450 de 2011, mediante la cual se expidió el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014, estableció en el parágrafo del artículo 215 que: "...en el marco de sus competencias, corresponde a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de las Cuencas Hidrográficas conforme a los criterios establecidos por el Gobierno Nacional en cabeza del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial o quien haga sus veces".

En el mismo sentido, la Ley 1450 establece en su artículo 212 que corresponde al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en su condición de ente rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables del país y coordinador del Sistema Nacional Ambiental (SINA), integrar y presidir las Comisiones Conjuntas de que trata el Parágrafo tercero del artículo 33 de la Ley 99 de 1993.

Por otra parte, la Ley 1523 de 2012 mediante la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, estableció en su artículo 31 que: "Las corporaciones autónomas regionales o de desarrollo sostenible, que para efecto de la presente ley se denominarán las corporaciones autónomas regionales, como integrantes del sistema nacional de gestión del riesgo, además de las funciones establecidas por la Ley 99 de 1993 y la Ley 388 de 1997 o las leyes que las modifiquen, apoyarán a las entidades territoriales de su jurisdicción ambiental en todos los estudios necesarios para el conocimiento y la reducción del riesgo y los integrarán a los planes de ordenamiento de cuencas, de gestión ambiental, de ordenamiento territorial y de desarrollo".



De conformidad con el contexto anterior, se expidió el Decreto 1640 de 2012, “Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones”. Esta reglamentación establece la nueva estructura de planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas del país, permitiendo una mayor claridad en el nivel de gestión de las mismas, por parte de las autoridades ambientales competentes y las diferentes entidades y actores responsables de su formulación e implementación. Adicionalmente se expidió la resolución 509 del 2013 “Por la cual se definen los lineamientos para la conformación de los Consejos de Cuenca y su participación en las fases del Plan de Ordenación de la Cuenca y se dictan otras disposiciones”.



4 METODOLOGÍA

El proyecto de investigación fue de tipo evaluativo, pues tuvo por objeto establecer juicios sobre la intervención de la cuenca del Arroyo Grande y la interrelación de componentes que hacen parte de ella, a partir de métodos científicos, que permitan crear soluciones factibles que ayuden a minimizar las inundaciones en su entorno.

Para alcanzar los objetivos propuestos en la presente investigación se planteó la siguiente metodología:

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se limitó al estudio en los sectores correspondientes a la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, que se encuentra ubicada en el departamento de Bolívar, Colombia, entre las coordenadas 10°19'18.49" de latitud Norte y 75°30'32.72" de longitud Oeste y 10°16'32.30" de latitud Norte y 75°26'13.19" de longitud Oeste y desemboca en la Bahía de Cartagena a 10°19'18.89" longitud Norte y 75°30'39.23" de latitud Oeste. La cuenca cubre las zonas de Turbana, el sector de Mamonal, atravesando la refinería de Ecopetrol, también cubre áreas de haciendas circundantes tales como, hacienda Chalandia, granja el Nido, hacienda Pinalabios, hacienda Monserrate y hacienda San Pablito.

4.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La hidrometeorología fue realizada teniendo como base información secundaria suministrada por distintas fuentes confiables, suficientes para llevar a cabo dicho estudio. Por lo anterior, se dispuso de la siguiente información:

- Fotografías satelitales proporcionadas por el software Google Earth.
- Estudios topográficos y altimétricos de la zona, suministrada por la corporación CARDIQUE y las empresas ECOPETROL e HIDROCONSULTORES LTDA.



- Precipitaciones máximas para duración de 24 horas. Esta información fue suministrada por HIDROCONSULTORES LTDA., empresa que compró los registros de precipitaciones al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- Registros históricos de precipitaciones y variación climatológica. Estación Meteorológica Aeropuerto Rafael Núñez.
- Caracterización del uso del suelo, obtenida del Plan de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Cartagena (POT).
- Información encontrada en las diferentes fuentes de información tales como Libros y páginas web, referenciadas al final del proyecto.

4.2.1 Análisis de la Información

Luego de ser obtenida la información secundaria, se dio inicio a la segunda etapa de la investigación, la cual consistió en un análisis técnico de la situación actual de la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, empezando por una delimitación del área de trabajo, teniendo en cuenta el orden de las corrientes presentes en la cuenca y de la utilización del software Global Mapper; seguido de una fotointerpretación, esta última con el fin de encontrar evidencias acerca de cómo el paso de los años y la intervención humana han hecho evolucionar la cuenca.

4.2.1.1 Delimitación de la cuenca.

Inicialmente, para realizar la presente investigación se hizo necesaria la delimitación de la zona de estudio, la cual corresponde al área abarcada por la cuenca hidrográfica generada por la vertiente del Arroyo Grande. Para esto, se tuvo en cuenta las fotografías aéreas de la zona, obtenidas del software Google Earth, para luego con la utilización del programa Global Mapper delimitar la cuenca teniendo en cuenta el orden de las corrientes.

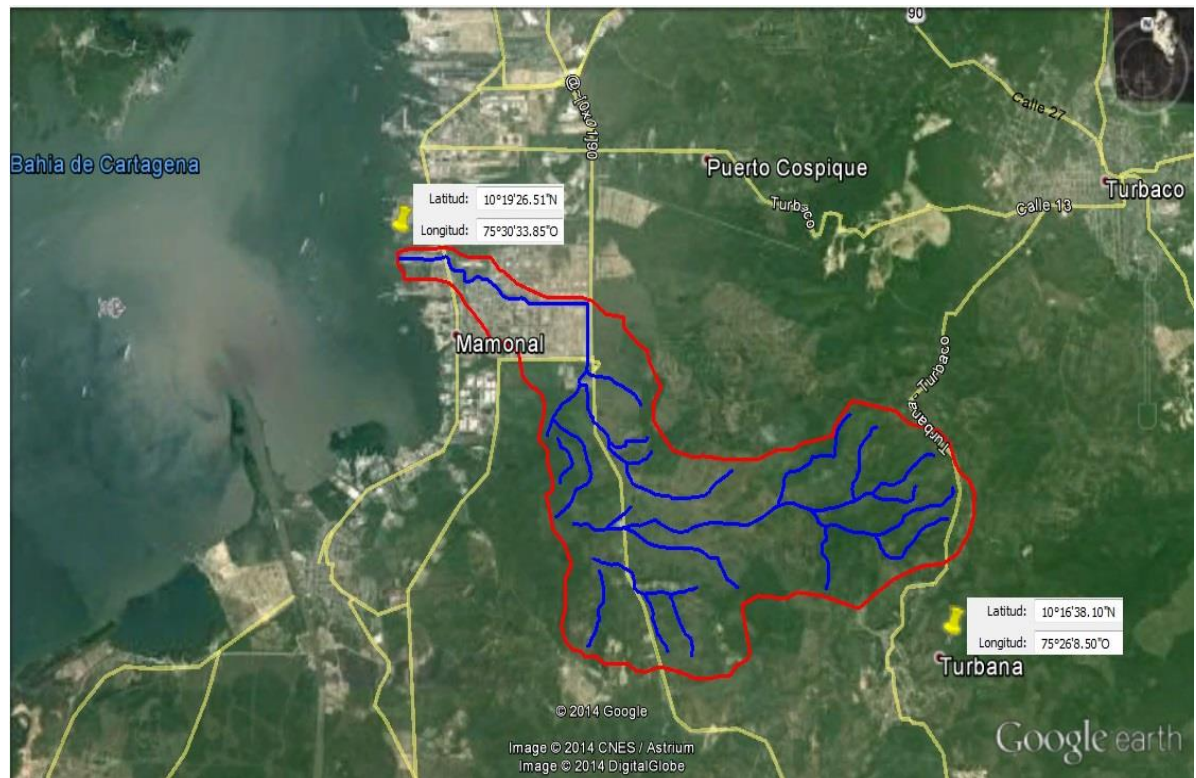


Figura 6. Delimitación de la Cuenca del Arroyo grande. Fuente Google Earth 2014

4.2.1.2 Fotointerpretación

Con el fin de realizar un análisis comparativo de las variaciones de vegetación, urbanización e industrialización, a través del tiempo, se realizó una fotointerpretación de la zona donde está ubicada la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande. Se dispuso de fotografías aéreas históricas de los años 2007, 2011 y 2013 extraídas del software Google Earth.

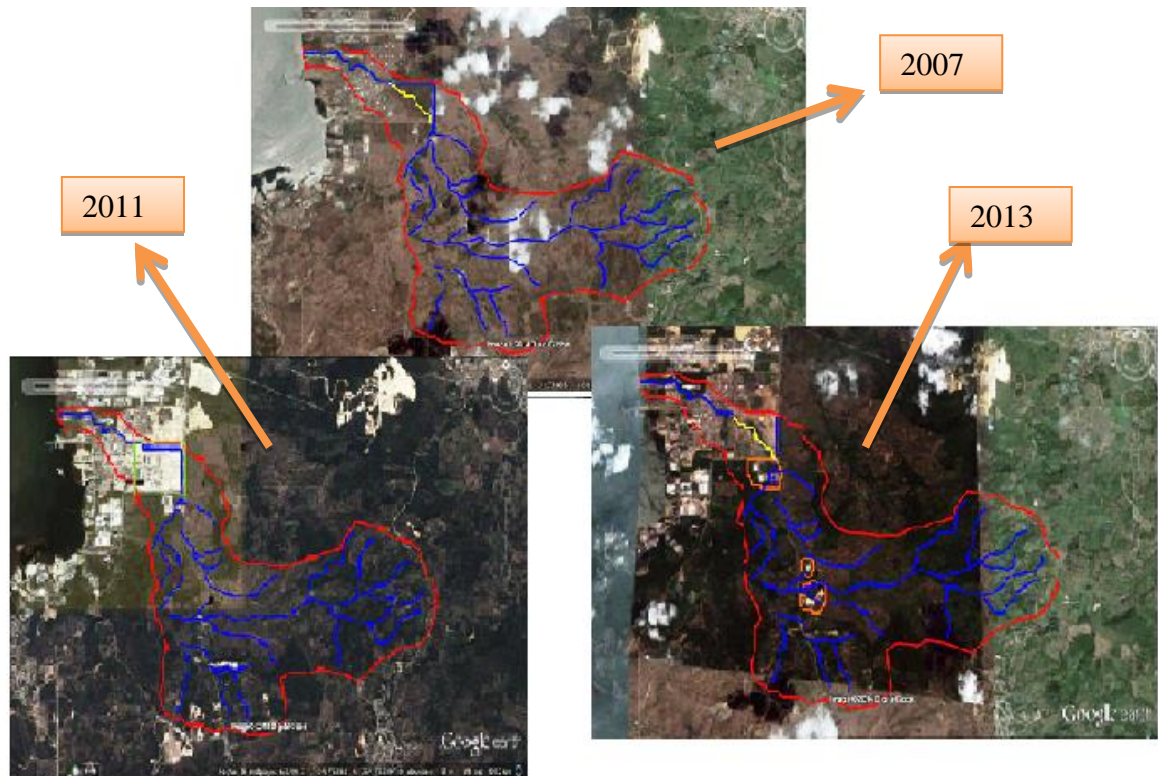


Figura 7. Fotointerpretación años 2007, 2011 y 2013 en la Cuenca del Arroyo grande.

4.3 HIDROMETEREOLOGÍA

Con el objetivo de estimar las precipitaciones que se presentan en la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, se realizó el siguiente procedimiento:

4.3.1 Estaciones seleccionadas.

La empresa HIDROCONSULTORES LTDA., nos proporcionó las coordenadas y datos de las precipitaciones en 24 horas, desde el año 1974 hasta el 2005, presentadas en 7 estaciones más cercanas que rodean a la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, luego estos datos fueron ubicados geográficamente junto con la Cuenca de Arroyo Grande en el software AutoCAD 2013.



Las estaciones tenidas en cuenta para realizar los polígonos de Thiessen se presentan en la Tabla 1, con su respectiva ubicación geográfica con el sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator).

Tabla 1: Ubicación geográfica de las estaciones.

Estación	Municipio	Coordenadas		Altura (m.s.n.m.)
		X	Y	
Apto Rafael Núñez	Cartagena	443454,86	1155214,44	2
Sincerín	Arjona	469157,13	1122331,18	10
Arjona	Arjona	462412,08	1132249,04	60
Santa Ana	Cartagena	440286,54	1130734,91	1
Escuela Naval	Cartagena	441819,54	1147619,39	1
Cañaveral	Turbaco	463513,53	1149657,6	75
Bayunca	Bayunca	456234,84	1164408,59	75

Fuente: IDEAM, 2007

4.3.1.1 Creación de los Polígonos de Thiessen.

Teniendo en cuenta los registros anuales de precipitaciones máximas en 24 horas (desde 1974 hasta 2005) suministrada por el IDEAM, y la ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, se utilizó el programa AutoCAD para obtener los polígonos de Thiessen, posteriormente se determinaron las áreas de influencia de cada estación sobre la Cuenca de la siguiente forma:

Primero insertamos en AutoCAD las coordenadas UTM de las estaciones para trazar los segmentos entre estación y estación, luego de trazarlos dibujamos sus mediatrices sobre cada uno de ellos y vemos como se forman los polígonos sobre la cuenca con la intersección de estas y los segmentos trazados entre estación y estación como lo muestra la Figura 8.

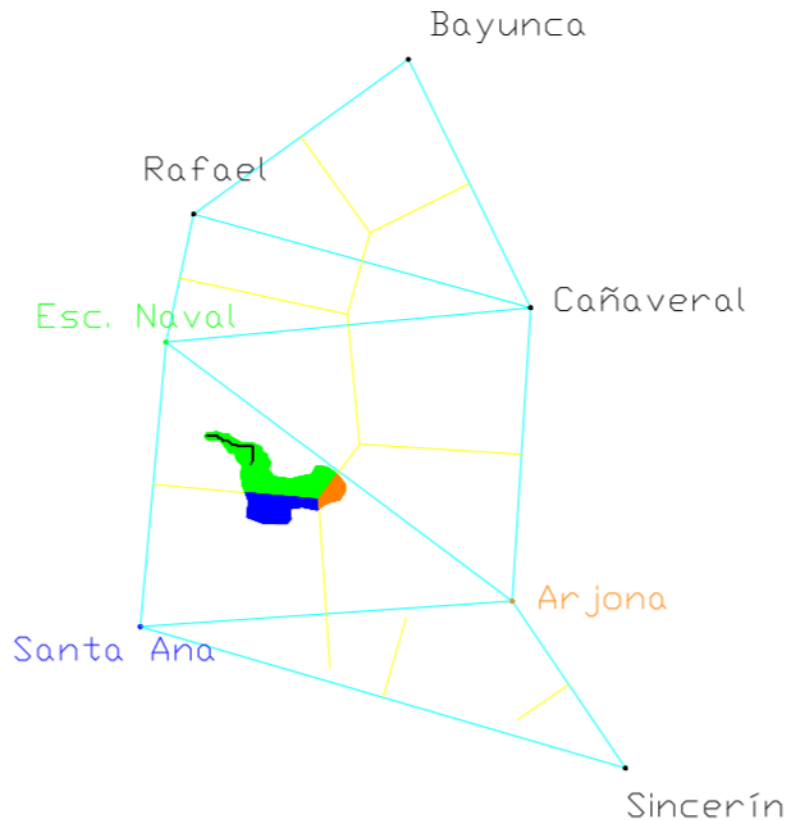


Figura 8. Polígonos de Thiessen para la cuenca del Arroyo Grande.

4.3.1.2 Precipitación máxima de la cuenca.

Luego de tener las áreas correspondientes a los polígonos de Thiessen y sus precipitaciones máximas anuales correspondientes a su estación de influencia, aledañas a la cuenca del Arroyo Grande, se procede a determinar las precipitaciones máximas anuales en ella. Para esto fue empleado el Método de los polígonos de Thiessen (Monsalve, 1999), que está descrito en la sección 3.3.1.1, es decir, para cada año se tomó la precipitación máxima de cada estación sobre la cuenca del Arroyo Grande correspondiente por cada polígono de Thiessen y se procedió a promediar el valor de las precipitaciones que representaba la influencia de cada estación sobre la cuenca, multiplicando este valor de precipitación con la porción de área de la cuenca de su respectivo polígono, para luego sumar todas estas multiplicaciones y dividir las entre el área total de la cuenca, obteniendo de este modo la precipitación máxima en la cuenca.

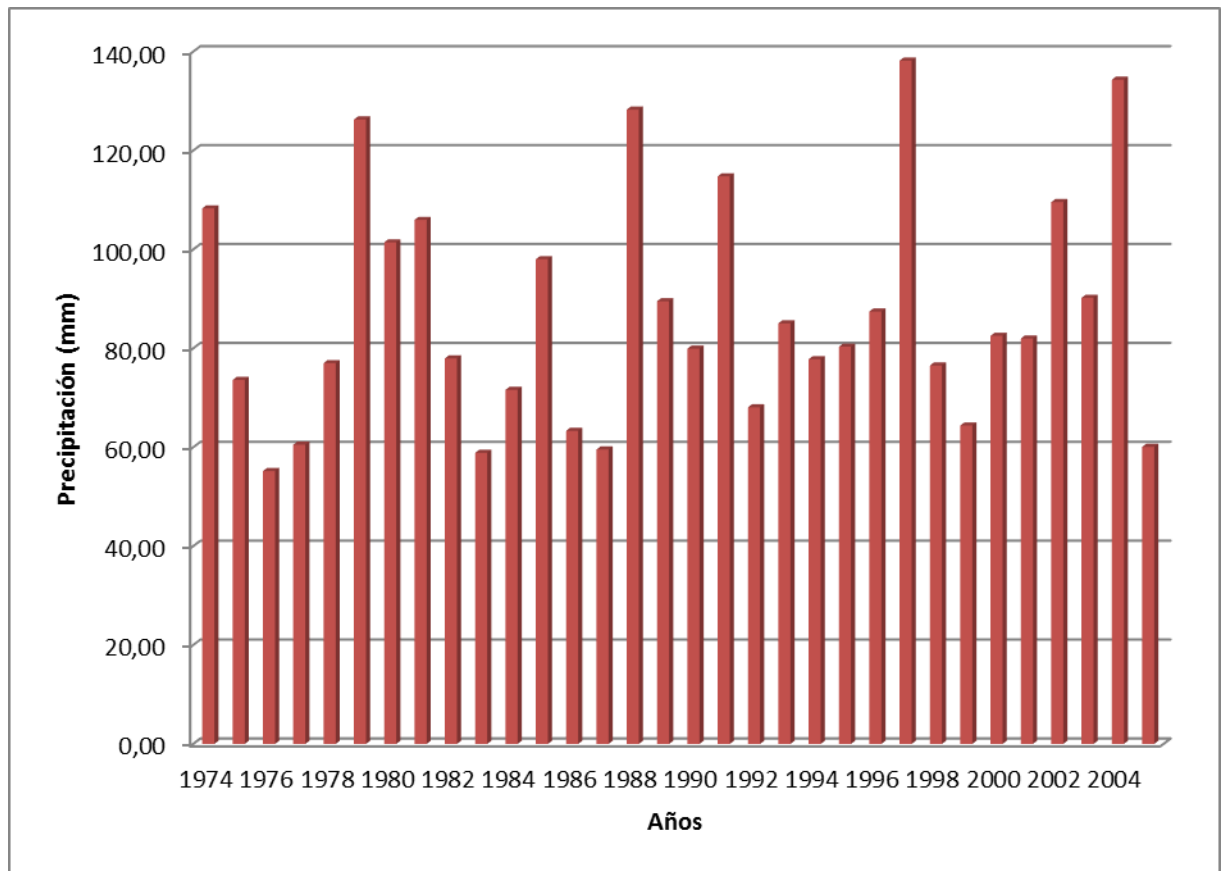


Figura 9. Precipitaciones máximas anuales en 24 horas sobre la cuenca del Arroyo Grande

4.3.1.3 Ajuste de los datos de las precipitaciones máximas.

En esta actividad se presentan los ajustes de los datos de las precipitaciones medias en la cuenca del Arroyo Grande, determinadas a través de la interpolación entre las estaciones seleccionadas dentro del proyecto, a las funciones de probabilidad de Gumbel y logarítmica, utilizando las metodologías descritas en el marco teórico, sección 3.3.1.2.

En la aplicación del ajuste de Gumbel fue necesaria la construcción de una tabla en la que se muestra de manera descendente los valores de las precipitaciones máximas y los valores de la variable reducida de acuerdo a la ecuación 58.

$$y_i = a(x_i - x_f) \tag{58}$$



Posteriormente se construyó una gráfica que relaciona estos dos parámetros, con el fin de determinar el coeficiente de correlación lineal (R^2).

En la aplicación del método de ajuste Logarítmico, se calculó el periodo de retorno (Tr) en relación a la probabilidad de no ocurrencia de cada una de las precipitaciones máximas, tal como establece la ecuación 59.

$$Tr = 1 - P(x \leq x_i) \quad (59)$$

Análogamente se construyó una gráfica que relaciona las precipitaciones máximas versus periodo de retorno; y su respectivo coeficiente de correlación (R^2).

Se llegó a la conclusión de que el método cuyo coeficiente de correlación se acercó más a uno (1), fuera el método escogido para los posteriores cálculos; para nuestra investigación fue utilizado el Método de Gumbel, luego se empleó la ecuación (8) para calcular el porcentaje de las precipitaciones máximas que caerán en duraciones de 15, 30, 45, 60, 120 y 180 minutos, para periodos de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, y así se definieron las intensidades de lluvias que se presentan para diferentes duraciones y periodos de retorno. Finalmente, se construyó una gráfica de Intensidad vs. Duración utilizando el ajuste por el Método de Gumbel.

4.3.1.4 Calibración de la ecuación que relaciona la Intensidad – Duración – Frecuencia.

Con el ajuste de datos realizado anteriormente, se procede a realizar la calibración de la ecuación 9, en donde se aplica el método descrito en la sección 3.3.1.2.3 para determinar los parámetros a_0 , a_1 y a_2 , posteriormente se calculan las constantes adimensionales K , m , n y c , una vez halladas se puede determinar la Intensidad de lluvia a partir de la ecuación 60, luego se procede a construir las curvas de Intensidad Duración Frecuencia para periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años con la cual se determinan los caudales máximos de escorrentía y se realiza el estudio hidrológico de la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande.

$$i = \frac{356,9047^{0,15514}}{(t+d)^{0,52549}} \quad (60)$$

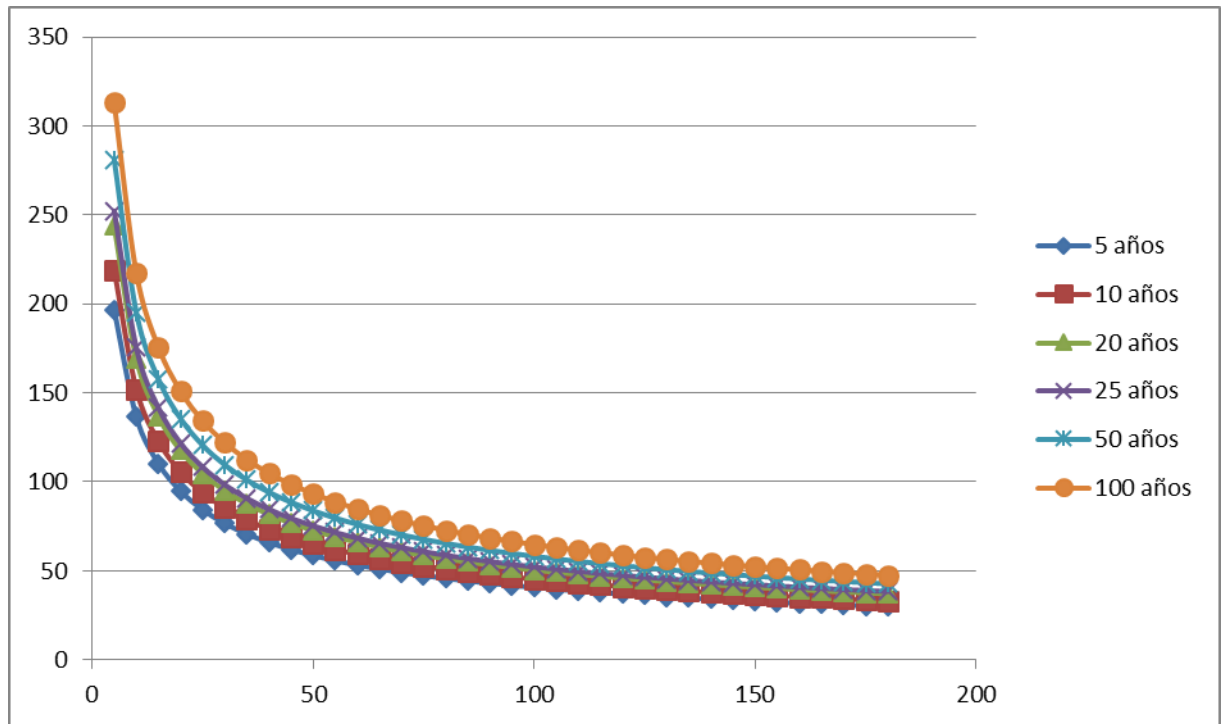


Figura 10. Curvas IDF con la ecuación calibrada.

4.4 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Para el análisis hidrológico se tuvo en cuenta los siguientes puntos:

4.4.1.1 Determinación de las características morfométricas de la cuenca.

Con la delimitación del área de estudio, se procedió a la caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, empleando todos los parámetros descritos en el marco teórico sección 3.3.2 que permitan definir la cuenca y estimar los caudales que se generan en ella. Esto con el objetivo de conocer el comportamiento de la misma y comprender su susceptibilidad a las inundaciones.

Para tener mayor precisión al momento de estimar los caudales aportados por la cuenca del Arroyo Grande, para el desarrollo de la presente investigación, la cuenca fue dividida en 8 subcuencas (Figura 11).

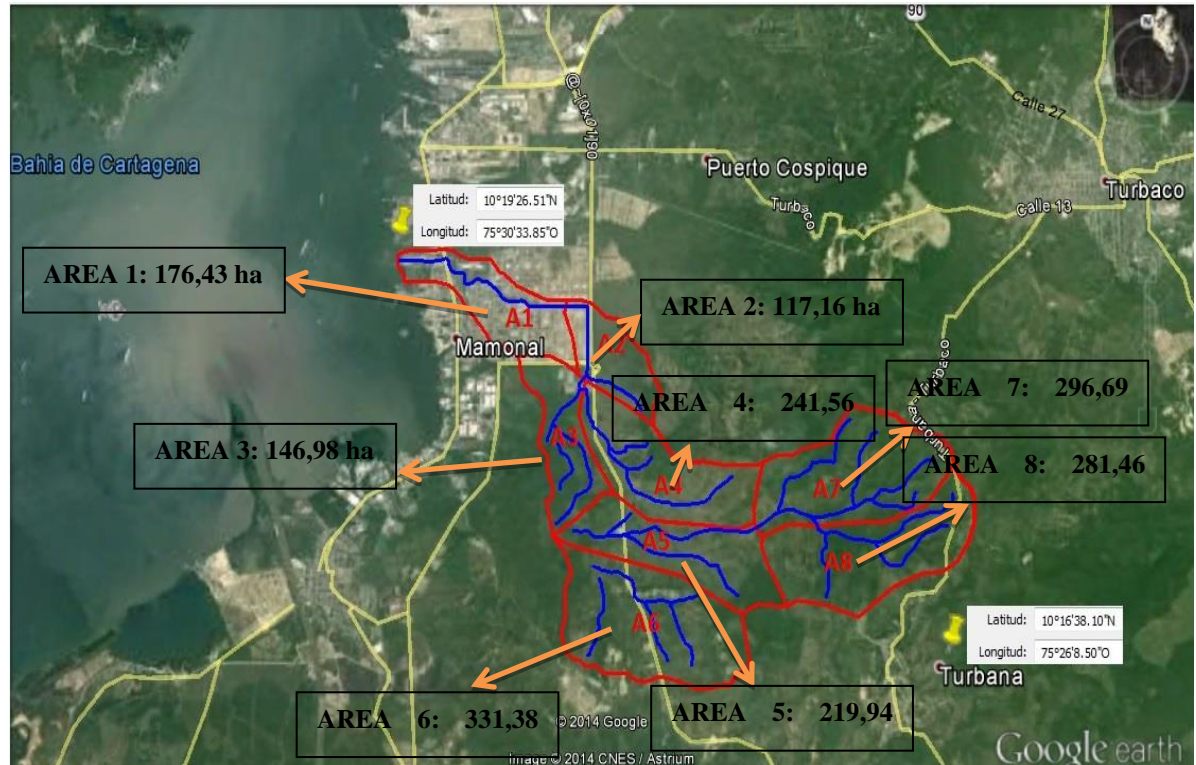


Figura 11. División de la cuenca en subcuencas.

En la determinación de estas características fue necesario conocer las longitudes de los cauces, áreas de subcuencas y pendientes; dicha información fue obtenida usando ciertas funciones del programa informático AutoCad.

4.4.1.2 Estimación de coeficientes de escorrentía.

La estimación de los coeficientes de escorrentía fue realizada teniendo en cuenta las características morfológicas y de uso del terreno, para esto se empleó la información obtenida del Plan de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Cartagena (POT), correspondiente al uso del suelo.



Para la determinación de los coeficientes de escorrentía adecuados, se tuvo en cuenta las recomendaciones que hace el Plan Maestro de Drenajes Pluviales de la Ciudad de Cartagena en 1981 y el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, para los coeficientes de escorrentía (ver Tabla 2 y Tabla 3).

Tabla 2. Valores del coeficiente de escorrentía según Plan Maestro de Drenajes de Cartagena.

ZONIFICACION	VALORES DE "C"
Densidad residencial alta	0.58
Densidad residencial media	0.54
Densidad residencial baja	0.44
Comercial	0.63
Industrial	0.59

Fuente: Plan Maestro de Drenajes de Cartagena.

Tabla 3. Valores del coeficiente de escorrentía según tipo de terreno.

Tipo de superficie	Valores de "C"
Cubiertas	0.75-0.95
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0.70-0.95
Vías adoquinadas	0.70-0.85
Zonas comerciales o industriales	0.60-0.95
Residencial, con casas contiguas, predominio de zonas duras	0.75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas duras entre otros	0.60-0.75
Residencial unifamiliar con casas contiguas y predominio de jardines	0.40-0.60
Residencial, con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separadas	0.45
Residencial, con predominio de zonas verdes y parques – cementerios	0.30
Laderas con vegetación	0.30
Laderas sin vegetación	0.60
Parques recreacionales	0.20-0.35

Fuente: Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000.

Entonces, según lo establecido por el RAS y el POT, el coeficiente de escorrentía se escogió teniendo en cuenta la permeabilidad de la zona, el tipo de superficie, la pendiente del terreno y el uso del suelo. Este coeficiente varía entre subcuencas, tal como se muestra en la Tabla 4.



Tabla 4: Coeficientes de Escorrentía

Subcuencas	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
C	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Las subcuencas A1 y A2 hacen parte de una zona industrializada, por esto se tomó un valor de 0,6. Mientras que las subcuencas A3, A4, A5, A6, A7 y A8 se les asignó un coeficiente de escorrentía de 0,3 debido a que están ubicadas en una zona de laderas con vegetación.

4.4.1.3 Estimación del tiempo de concentración.

Para la estimación del tiempo de concentración, fueron empleadas algunas de las características morfométricas determinadas anteriormente. Se utilizó el Método de la Velocidad, descrito en la sección 3.3.2.17, la ecuación $T_c = L_c/V_c$, se interpretó como sigue: L_c corresponde a la medida en metros del cauce principal de cada una de las 9 subcuencas en la que fue dividida el área de estudio, para ello se utilizó la herramienta de medición del programa Google Earth.

Respecto a la velocidad de concentración (V_c), que sigue la ecuación $V_c = K\sqrt{S}$, el valor de K se determina por el Plan Maestro de Drenajes Pluviales de Cartagena en 1981 y equivale a 4,47. La pendiente (S) se calculó como la relación entre las diferencias de alturas (máximas y mínimas) y la longitud del cauce principal de la subcuenca correspondiente.

4.4.1.4 Determinación del periodo de retorno.

El periodo de retorno se determinó teniendo en cuenta la importancia de la zona así como la utilización del suelo. Para esto será tenido en cuenta los valores para periodo de retorno establecidos por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Resolución No. 1096 de 17 de Noviembre, RAS, 2000), ver Tabla 5.



Tabla 5. Valores del periodo de retorno según tipo de terreno.

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

Fuente: Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000.

El periodo de retorno correspondiente a esta investigación fue de 50 años, debido a las características morfométricas de la cuenca y con el fin de extender la frecuencia de diseño máximo.

4.4.1.5 Estimación de los caudales máximos.

Para la estimación de los caudales máximos generados en la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, se utilizó el software gratuito HEC-HMS en el cual se introdujeron las características morfométricas, los Tiempos de Concentración (T_c) de cada subcuenca y posteriormente los valores del hietograma, para la realización de este se ejecuta el cálculo de la precipitación presentada durante 3 horas (Donde ocurre el 70% del P_{24}) para determinar el Hietograma característico de la Cuenca; El programa se ajustó para que utilizara el método de Hidrogramas SCS para el cálculo de los caudales máximos presentados en cada una de las subcuencas, y adicionalmente arroja el Caudal máximo de desembocadura en este caso en la Bahía de Cartagena.

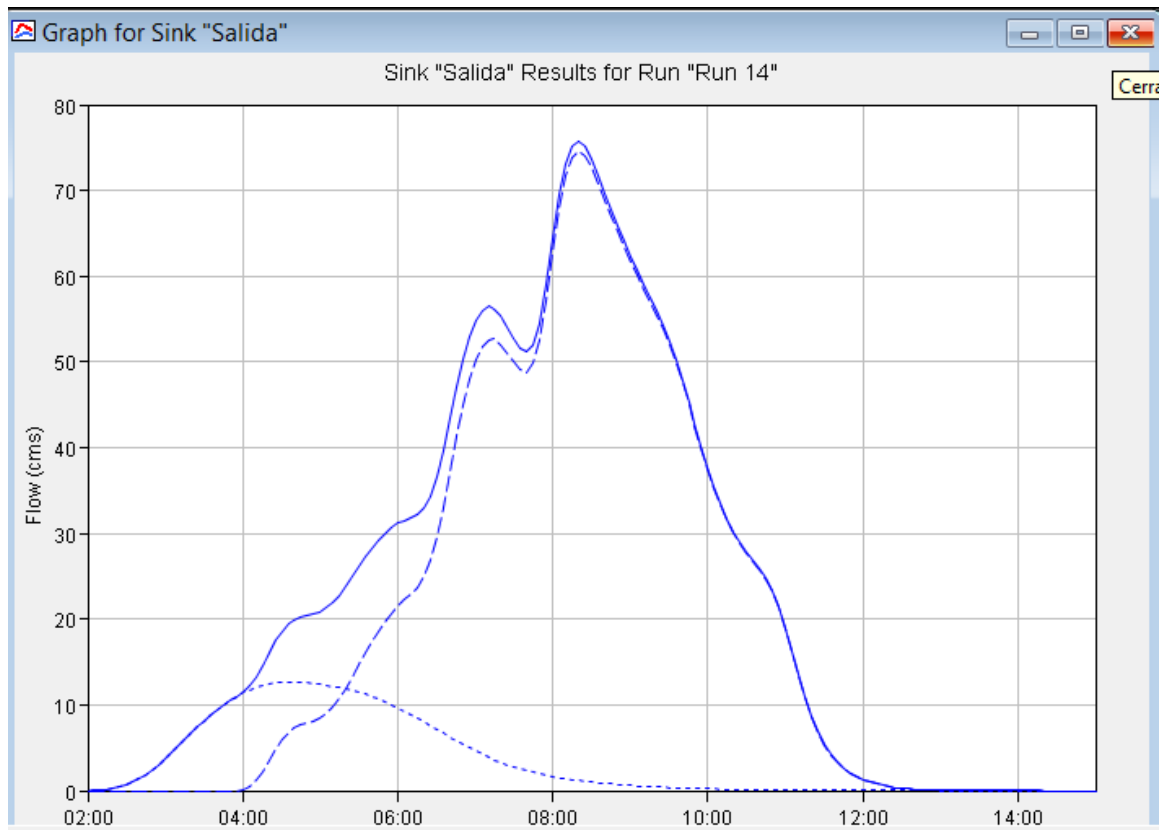


Figura 12. Hidrograma resultante, muestra los Caudales máximos presentados en la cuenca.

Fuente HEC-HMS, simulación de 2015



4.5 ANÁLISIS HIDRÁULICO

Para el análisis hidráulico se tuvo en cuenta los siguientes puntos

4.5.1 Recolección de la información

Para realizar el análisis hidráulico en la zona, se consideró la información secundaria útil para determinar todos los parámetros hidráulicos de los cauces presentes en la cuenca hidrográfica. Esta información se obtuvo de anteriores estudios realizados en el mismo sector de Mamonal por la empresa HIDROCONSULTORES LTDA.

4.5.2 Análisis de la información

Para llevar a cabo las actividades y basándose en la información obtenida de estudios realizados por HIDROCONSULTORES LTDA., se determinaron los parámetros hidráulicos designados a continuación, con el fin de obtener las capacidades hidráulicas de los cauces en la cuenca del Arroyo Grande:

- Coeficiente de rugosidad de Manning.

Este parámetro se obtuvo de acuerdo a las características del terreno; para esto, se tuvo en cuenta los criterios de selección del coeficiente de rugosidad para distintos tipos de terrenos (Chow, Hidráulica de Canales Abiertos). En la Figura se muestran las tablas que resumen los criterios para determinar la rugosidad apropiada dependiendo de las características del terreno.



Tipo de canal y descripción			Mínimo	Normal	Máximo	Tipo de canal y descripción			Mínimo	Normal	Máximo
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos A-1. Metal <i>a. Latón, liso</i> 0.009 0.010 0.013 <i>b. Acero</i> 1. Estructurado y soldado 0.010 0.012 0.014 2. Riveteado y en espiral 0.013 0.016 0.017 <i>c. Hierro fundido</i> 1. Recubierto 0.010 0.013 0.014 2. No recubierto 0.011 0.014 0.016 <i>d. Hierro forjado</i> 1. Negro 0.012 0.014 0.015 2. Galvanizado 0.013 0.016 0.017 <i>e. Metal corrugado</i> 1. Subdrenaje 0.017 0.019 0.021 2. Drenaje de aguas lluvias 0.021 0.024 0.030 A-2. No metal <i>a. Lucita</i> 0.008 0.009 0.010 <i>b. Vidrio</i> 0.009 0.010 0.013 <i>c. Cemento</i> 1. Superficie pulida 0.010 0.011 0.013 2. Mortero 0.011 0.013 0.015 <i>d. Concreto</i> 1. Alcantarilla, recta y libre de basuras 0.010 0.011 0.013 2. Alcantarilla con curvas, conexiones y algo de basuras 0.011 0.013 0.014 3. Bien terminado 0.011 0.012 0.014 4. Alcantarillado de aguas residuales, con pozos de inspección, entradas, etc., recto 0.013 0.015 0.017 5. Sin pulir, formaleta o encofrado metálico 0.012 0.013 0.014 6. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera lisa 0.012 0.014 0.016 7. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera rugosa 0.015 0.017 0.020 <i>e. Madera</i> 1. Machihembrada 0.010 0.012 0.014 2. Laminada, tratada 0.015 0.017 0.020 <i>f. Arcilla</i> 1. Canaleta común de baldosas 0.011 0.013 0.017 2. Alcantarilla vitrificada 0.011 0.014 0.017 3. Alcantarilla vitrificada con pozos de inspección, entradas, etc. 0.013 0.015 0.017 4. Subdrenaje vitrificado con juntas abiertas 0.014 0.016 0.018 <i>g. Mampostería en ladrillo</i> 1. Barnizada o lacada 0.011 0.013 0.015 2. Revestida con mortero de cemento 0.012 0.015 0.017 <i>h. Alcantarillados sanitarios recubiertos con limos y bubas de aguas residuales, con curvas y conexiones</i> 0.012 0.013 0.016 <i>i. Alcantarillado con banca pavimentada, fondo liso</i> 0.016 0.019 0.020 <i>j. Mampostería de piedra, cementada</i> 0.018 0.025 0.030						B. Canales revestidos o desarmables B-1. Metal <i>a. Superficie lisa de acero</i> 1. Sin pintar 0.011 0.012 0.014 2. Pintada 0.012 0.013 0.017 <i>b. Corrugado</i> 0.021 0.025 0.030 B-2. No metal <i>a. Cemento</i> 1. Superficie pulida 0.010 0.011 0.013 2. Mortero 0.011 0.013 0.015 <i>b. Madera</i> 1. Cepillada, sin tratar 0.010 0.012 0.014 2. Cepillada, creosotada 0.011 0.012 0.015 3. Sin cepillar 0.011 0.013 0.015 4. Láminas con listones 0.012 0.015 0.018 5. Forrada con papel impermeabilizante 0.010 0.014 0.017 <i>c. Concreto</i> 1. Terminado con lana metálica (palustre) 0.011 0.013 0.015 2. Terminado con lana de madera 0.013 0.015 0.016 3. Pulido, con gravas en el fondo 0.015 0.017 0.020 4. Sin pulir 0.014 0.017 0.020 5. Lanzado, sección buena 0.016 0.019 0.023 6. Lanzado, sección ondulada 0.018 0.022 0.025 7. Sobre roca bien excavada 0.017 0.020 8. Sobre roca irregularmente excavada 0.022 0.027 <i>d. Fondo de concreto terminado con lana de madera y con lados de</i> 1. Piedra labrada, en mortero 0.015 0.017 0.020 2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero 0.017 0.020 0.024 3. Mampostería de piedra cementada, recubierta 0.016 0.020 0.024 4. Mampostería de piedra cementada 0.020 0.025 0.030 5. Piedra suelta o rírap 0.020 0.030 0.035 <i>e. Fondo de gravas con lados de</i> 1. Concreto encofrado 0.017 0.020 0.025 2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero 0.020 0.023 0.026 3. Piedra suelta o rírap 0.023 0.033 0.036 <i>f. Ladrillo</i> 1. Barnizado o lacado 0.011 0.013 0.015 2. En mortero de cemento 0.012 0.015 0.018 <i>g. Mampostería</i> 1. Piedra partida cementada 0.017 0.025 0.030 2. Piedra suelta 0.023 0.032 0.035 <i>h. Bloques de piedra labrados</i> 0.013 0.015 0.017 <i>i. Asfalto</i> 1. Liso 0.013 0.013 2. Rugoso 0.016 0.016 <i>j. Revestimiento vegetal</i> 0.030 0.500					
C. Excavado o dragado a. En tierra, recto y uniforme 1. Limpio, recientemente terminado 0.016 0.018 0.020 2. Limpio, después de exposición a la intemperie 0.018 0.022 0.025 3. Con gravas, sección uniforme, limpio 0.022 0.025 0.030 4. Con pastos cortos, algunas malezas 0.022 0.027 0.033 b. En tierra, serpenteante y lento 1. Sin vegetación 0.023 0.025 0.030 2. Pastos, algunas malezas 0.025 0.030 0.033 3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos 0.030 0.035 0.040 4. Fondo en tierra con lados en piedra 0.028 0.030 0.035 5. Fondo pedregoso y bancas con malezas 0.025 0.035 0.040 6. Fondo en cantos rodados y lados limpios 0.030 0.040 0.050 c. Excavado con pala o dragado 1. Sin vegetación 0.025 0.028 0.033 2. Matorrales ligeros en las bancas 0.035 0.050 0.060 d. Cortes en roca 1. Lisos y uniformes 0.025 0.035 0.040 2. Afilados e irregulares 0.035 0.040 0.050 e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar 1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo 0.050 0.080 0.120 2. Fondo limpio, matorrales en los lados 0.040 0.050 0.080 3. Igual, nivel máximo de flujo 0.045 0.070 0.110 4. Matorrales densos, nivel alto 0.080 0.100 0.140 D. Corrientes naturales D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies) <i>a. Corrientes en planicies</i> 1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos 0.025 0.030 0.033 2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas 0.030 0.035 0.040 3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancas de arena 0.033 0.040 0.045 4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras 0.035 0.045 0.050 5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes 0.040 0.048 0.055 6. Igual al 4, pero con más piedras 0.045 0.050 0.060 7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos 0.050 0.070 0.080 8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos 0.075 0.100 0.150						b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos 1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas 0.030 0.040 0.050 2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes 0.040 0.050 0.070 D-2. Planicies de inundación <i>a. Pastizales, sin matorrales</i> 1. Pasto corto 0.025 0.030 0.035 2. Pasto alto 0.030 0.035 0.050 <i>b. Áreas cultivadas</i> 1. Sin cultivo 0.029 0.030 0.040 2. Cultivos en línea maduros 0.025 0.035 0.045 3. Campos de cultivo maduros 0.030 0.040 0.050 <i>c. Matorrales</i> 1. Matorrales dispersos, mucha maleza 0.035 0.050 0.070 2. Pocos matorrales y árboles, en invierno 0.035 0.050 0.060 3. Pocos matorrales y árboles, en verano 0.040 0.060 0.080 4. Matorrales medios a densos, en invierno 0.045 0.070 0.110 5. Matorrales medios a densos, en verano 0.070 0.100 0.160 <i>d. Árboles</i> 1. Saucos densos, rectos y en verano 0.110 0.150 0.200 2. Terreno limpio, con troncos sin raíces 0.030 0.040 0.050 3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de raíces 0.050 0.060 0.080 4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas 0.080 0.100 0.120 5. Igual al anterior, pero con nivel de crecimiento por encima de las ramas 0.100 0.120 0.160 D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de a es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva. <i>a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales</i> 0.025 0.060 <i>b. Sección irregular y rugosa</i> 0.035 0.100					

Figura 13. Coeficientes de rugosidad de Manning. (Chow, Hidráulica de Canales Abiertos)



- Pendiente longitudinal de los cauces.

Para determinar la pendiente longitudinal de los cauces presentes en la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, se tuvo en cuenta la topografía del terreno, esta indica las distancias y diferencias de nivel entre dos puntos de un cauce determinado.

Para el caso particular de esta investigación se tomó la cota más alta del cauce a estudiar, 12,7 m.s.n.m., la cota más baja, -3,24 m.s.n.m., y la longitud entre estos dos puntos, 4200m aproximadamente, se obtuvo una pendiente de 0,003794.

- Geometría de las secciones.

Este parámetro se obtuvo de acuerdo a las secciones suministradas por HIDROCONSULTORES LTDA., se dispuso de 85 secciones transversales a lo largo del cauce que fueron los puntos de control para este estudio. Luego, se especificaron las propiedades geométricas de las secciones que fueron halladas a partir de la topografía propia del cauce y de acuerdo a las ecuaciones estipuladas en la sección 3.3.5.1, para posteriormente aplicar la ecuación de Manning.

- Capacidad hidráulica de los cauces.

Después de definir los anteriores parámetros se procedió a determinar las capacidades hidráulicas de cada uno de los cauces presentes en la zona de estudio, esto se realizó teniendo en cuenta las ecuaciones para Flujo Uniforme descritas a continuación:

$$Q = \frac{1}{n} * A * S_o^{1/2} * R_h^{4/3} \text{ (Chow, Hidráulica de Canales Abiertos)} \quad (61)$$

Dónde: Q = caudal; n = coeficiente de rugosidad de Manning; So = pendiente longitudinal del cauce; Rh = radio hidráulico de la sección transversal.



- Capacidad hidráulica de las estructuras existentes.

Para la evaluación de la capacidad hidráulica de las estructuras se utilizó la ecuación de Manning, considerando que las estructuras trabajan a flujo libre. Es importante resaltar que la evaluación de la capacidad hidráulica se ha analizado considerando el tramo donde está ubicada la estructura en forma independiente, es decir, no se ha tenido en cuenta los controles hidráulicos ejercido por el tramo aguas arriba ni aguas abajo de cada estructura estudiada.

4.6 DETERMINACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS

Después de realizar los análisis meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos de la zona de estudio, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos, determinando de esta manera los lugares donde posiblemente se presentan conflictos, es decir, donde las secciones existentes en el arroyo no tienen la capacidad hidráulica suficiente para transportar los caudales que se generan en la cuenca.

4.7 DISEÑO DE EMBALSE

En el diseño del embalse se analizó las limitaciones de espacio en la zona donde se ubicó. Por este motivo, y basados en la topografía de la cuenca, se midió el área disponible para la construcción de dicho embalse. Luego, se obtuvieron las áreas de las curvas de nivel que describían la zona, con el fin de determinar si la ubicación era adecuada. Posteriormente, se construyó una tabla donde se especifica las cotas y áreas correspondientes, datos que a su vez fueron utilizados para calcular la capacidad de almacenamiento (volumen) del embalse. Las curvas características del embalse fueron calculadas de los datos anteriores.

Para el diseño del embalse se supuso un área de inundación y un ancho de vertedero estimado, y en base a estos parámetros, se calculó su volumen, talud y altura. El volumen resultó de la ecuación (58) explicado en la sección 3.3.4.1 de este documento, la cual relaciona la capacidad de almacenamiento con las áreas entre curvas de nivel consecutivas.



4.8 CREACIÓN DE ESCENARIOS

Esta fase corresponde a la creación de escenarios, estos fueron analizados teniendo en cuenta las evaluaciones realizadas en cada una de las anteriores actividades. Estos escenarios son descripciones hipotéticas del comportamiento de la cuenca hidrográfica a partir del cambio de las condiciones técnicas de su entorno. Para la realización de la presente actividad, también se utilizó un software de Sistemas de Información Geográfica (Arcgis).

4.9 ALTERNATIVA MÁS ADECUADA

Para la problemática del arroyo, de desbordamiento e inundaciones, se plantearon dos alternativas. En la alternativa 1 se planteó una sección trapezoidal con un mínimo de 6,5 m de base, 2,1 m de altura y el cambio del revestimiento del canal por un enrocado consolidado; que no es más que la colocación ordenada de rocas con un material que produce adherencia entre las rocas, como es el caso del hormigón; ocasionando con esto el cambio de rugosidad en las secciones y por ende la capacidad hidráulica de las mismas. Se realizó el cálculo de la sección transversal ideal que podría drenar el caudal hidrológico en un periodo de retorno igual a 50 años.

En la alternativa 2 se propuso la construcción de un embalse de amortización de caudal. La localización del embalse, se determinó de acuerdo a la disponibilidad de terrenos en la parte media de la cuenca, ver Figura 36 y las características del embalse dependieron del periodo de retorno y sus dimensiones.

La implementación de un embalse, reduce el caudal de las subcuencas aguas abajo del mismo, por esto, se determinaron los caudales de entrada y salida del embalse para las subcuencas A3, A4, A5, A6, A7 y A8 en diferentes tiempos, utilizando la metodología descrita en la sección 3.3.4.1. Seguidamente se encontró el porcentaje de regulación del embalse en relación del valor del caudal entrante y del caudal de salida, para finalmente graficar el hidrograma de estos caudales.

En la escogencia de la alternativa más adecuada, se tuvo en cuenta, además del control de las inundaciones, factores económicos, sociales y constructivos, teniendo como prioritario un criterio que conlleve a la implementación de soluciones de ingeniería para el control de inundaciones que estén siendo aplicadas a nivel mundial.

4.10 ELABORACIÓN DE INFORME.

Con el propósito de dar a conocer las soluciones obtenidas a partir del proyecto investigativo, así como para comprobar la veracidad de la información y confiabilidad de los procedimientos realizados, se hizo necesaria la realización de un informe que contenga toda la investigación desarrollada y permita la asequibilidad a los resultados obtenidos.

4.11 ESQUEMA GENERAL

La Figura 14 representa el Esquema general de la metodología, en donde se muestra el resumen de la metodología aplicada para la ejecución de nuestra investigación.

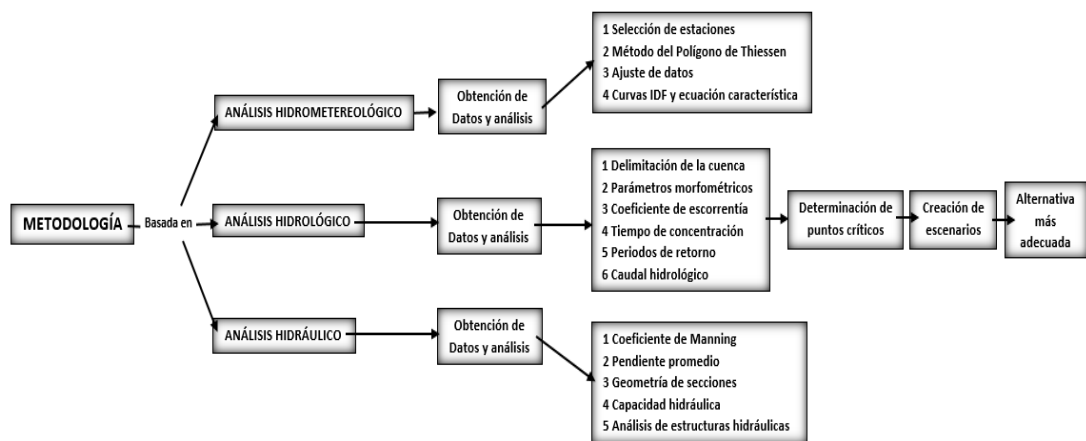


Figura 14: Esquema general de la metodología.

5 RESULTADOS

5.1 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

Con base a las fotografías aéreas sacadas de Google Earth, con la utilización del programa Global Mapper, y teniendo en cuenta el orden de las corrientes, se realizó la delimitación de la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande. Ver Figura 15.

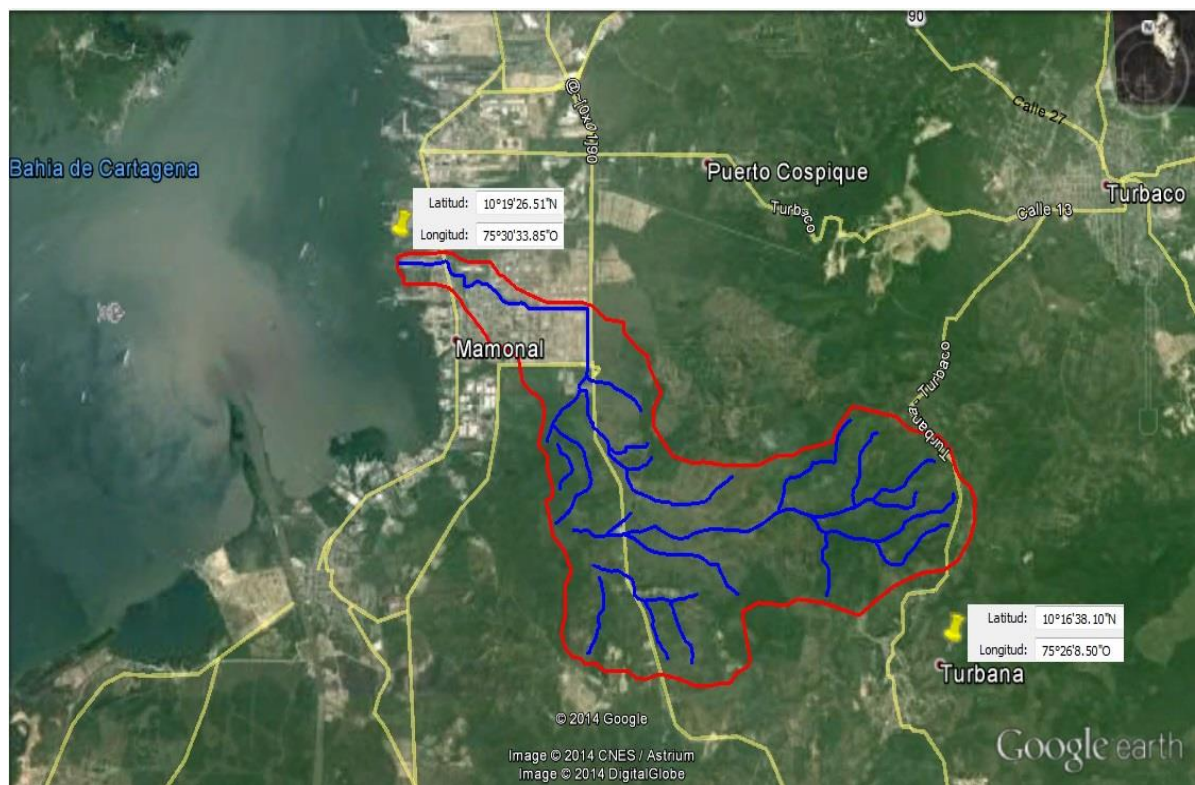


Figura 15: Delimitación de la cuenca del Arroyo Grande. Fuente: Google Earth. 2014

5.2 FOTOINTERPRETACIÓN

Para el análisis correcto de la cuenca y sus características, fue necesario utilizar todas las herramientas al alcance, una de ellas es la interpretación de fotografías aéreas, que con base a juicios lógicos con estas se definieron hipótesis como, posibles cambios en el uso del suelo, desviaciones de cauces y coeficientes de escorrentía.

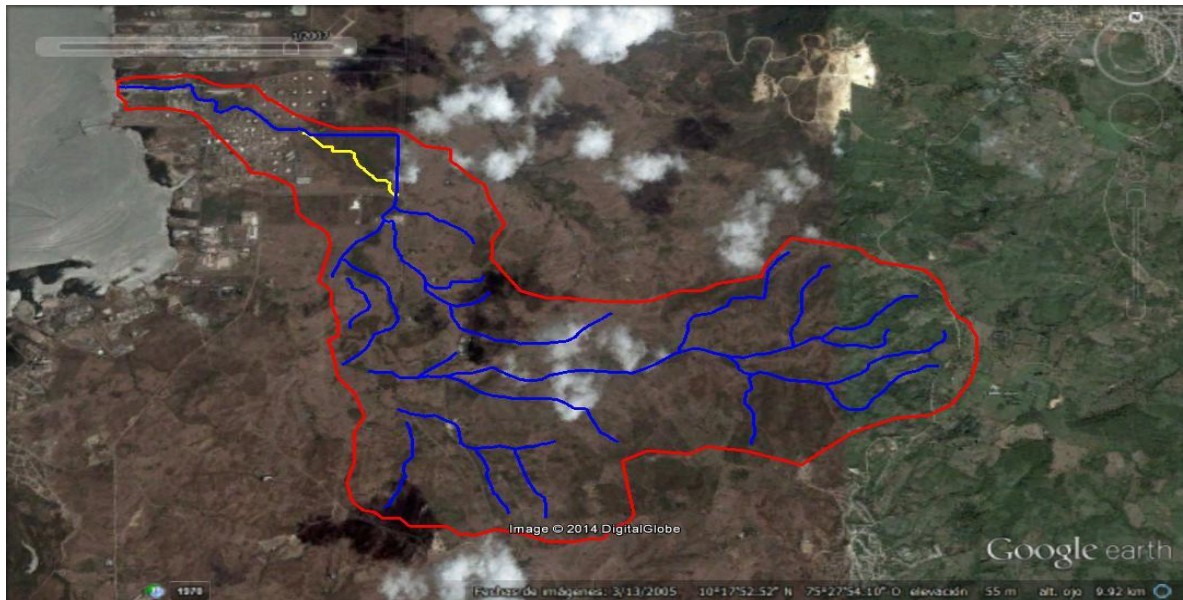


Figura 16: Fotografía aérea del 2007 de la cuenca del Arroyo Grande. Fuente: Google Earth.

Se puede denotar sobre varias zonas de la cuenca en la Figura 16 donde se encuentran vertientes que la alimentan, existen grandes áreas que no han sido sometidas por el hombre aún, algo que si se nota sobre la fotografía de la cuenca en el año 2011(en la Figura 17 círculos en naranja), situación que repercute en cambios en el coeficiente de escorrentía, haciendo más impermeable el suelo.

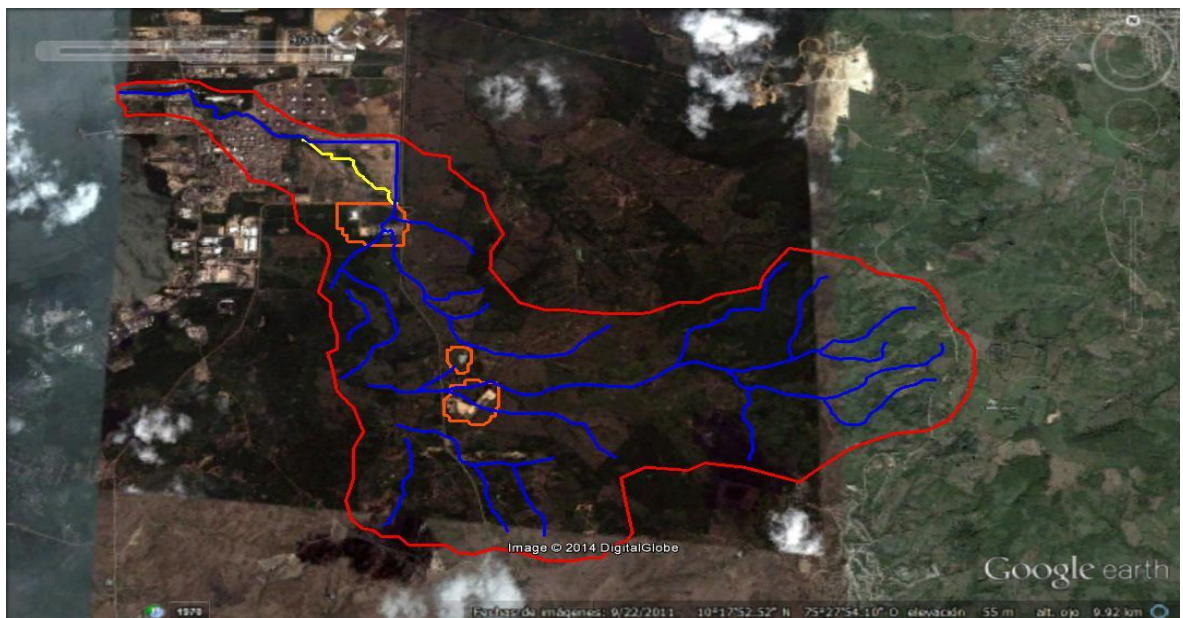


Figura 17: Fotografía aérea del 2011 de la cuenca del Arroyo Grande. Fuente: Google Earth.

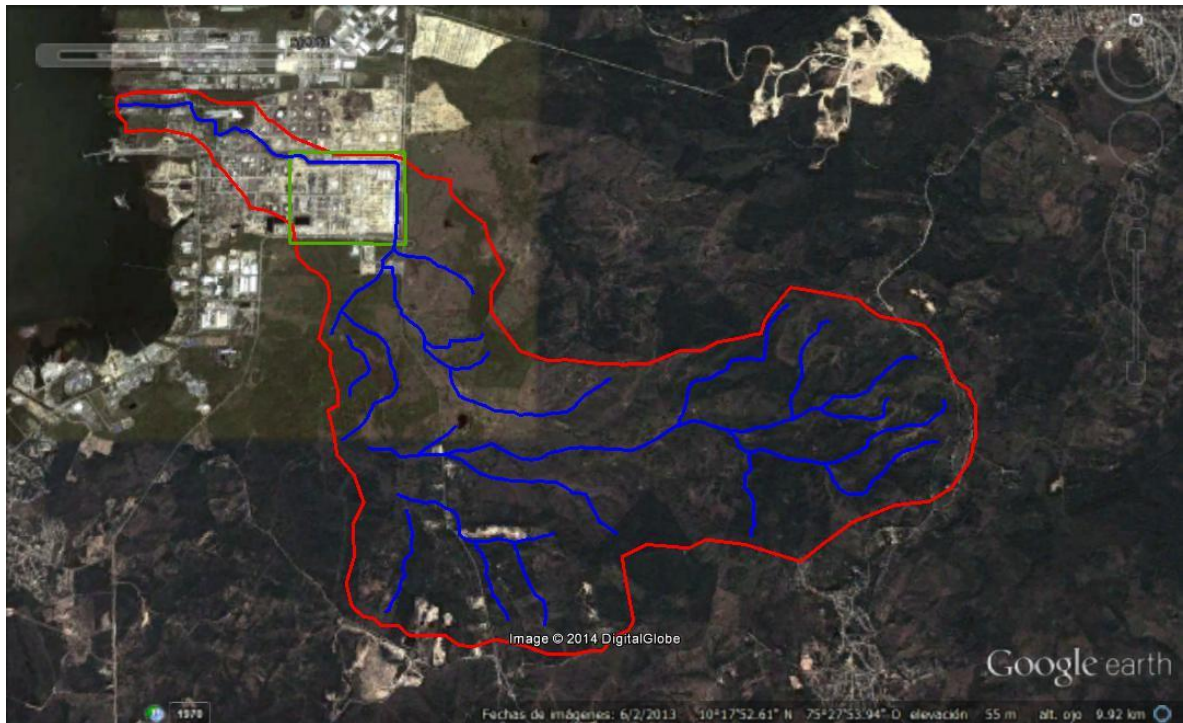


Figura 18: Fotografía aérea del 2013 de la cuenca del Arroyo Grande. Fuente: Google Earth.

Para el año 2007 y 2011 la superficie de la cuenca tenía un flujo principal definido (en la Figura 16 y 17 cauce en amarillo), cauce que posteriormente fue desviado por la empresa Ecopetrol (en la Figura 18 cauce en azul) para ampliación de la refinería, situación que repercute en cambios en el flujo principal de la cuenca. Para la fotografía de este mismo año se puede notar que ya la refinería ha ampliado su franquicia (en la Figura 18 cuadrado verde) denotando así lo que se denomina, cambios en el uso del suelo, afectando de manera drástica los coeficientes de escorrentía en la cuenca.

5.3 ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO

Un análisis hidrometeorológico que utiliza datos del clima pasado y presente es una herramienta útil para estudiar el comportamiento de las series de tiempo de los datos de precipitación y escorrentía de una cuenca.

5.3.1 Polígonos de Thiessen

Con base en los datos de precipitaciones máximas durante 24 horas para las estaciones pluviales seleccionadas (información obtenida por la empresa HIDROCONSULTORES) se logró obtener un mapa de polígonos de Thiessen con la ayuda del programa AutoCAD, por cada año que se registró en las estaciones, esto es, desde 1974 al 2005, que por razones geométricas es el mismo para todos los años.

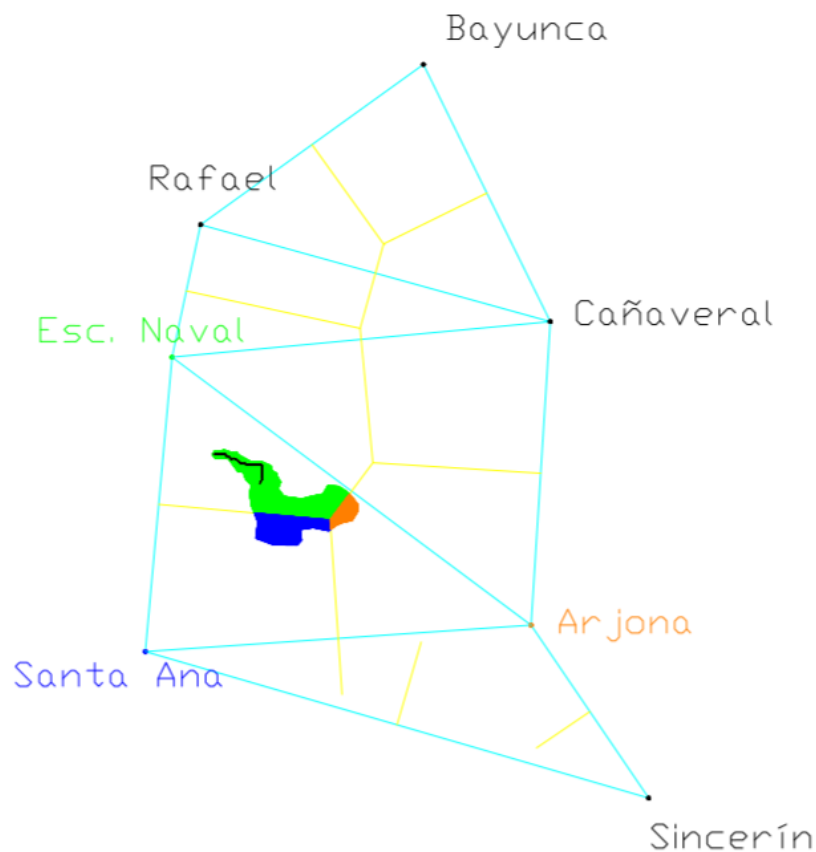


Figura 19: Mapa de polígonos de Thiessen.

Se puede observar en la Figura 19 que en el mapa de polígonos de Thiessen hay estaciones que no tienen influencia sobre la cuenca, debido a la distancia considerable que las separa de ella. De esta forma las áreas de influencia sobre la cuenca, son las generadas por los polígonos de Thiessen correspondientes a las estaciones de Escuela Naval, Santa Ana y Arjona.



Tabla 6. Valores de las áreas de influencia de las estaciones sobre la cuenca.

Estación	Área de influencia (has)
Apto Rafael Nuñez	0
Sincerín	0
Escuela Naval	1123,99
Santa Ana	524,75
Arjona	162,86
Bayunca	0
Cañaveral	0

5.3.2 Precipitación máxima

Después de obtener el mapa de polígonos de Thiessen desde el año 1974 hasta el año 2005, se encontró el valor final de las precipitaciones máximas en la superficie de la cuenca aplicando el Método de los polígonos descrito en la sección 3.3.1.1.

Para realizar esta actividad se midieron las áreas de cada zona de influencia generada por cada estación, enumerándose como A1, A2... An-1, An, dependiendo de la cantidad de áreas que corten la superficie de la cuenca. Este procedimiento fue aplicado para cada uno de los años de estudio.

Tabla 7: Cálculo de precipitaciones máximas. Método de los polígonos de Thiessen.

Estación	Apto Rafael Nuñez		Sincerín		Arjona		Santa Ana		Escuela Naval		Cañaveral		Bayunca		PRECIPITACION MEDIA (mm/año)
	Año	Precipitacion	Area	Precipitacion	Area	Precipitacion	Area	Precipitacion	Area	Precipitacion	Area	Precipitacion	Area	Precipitacion	
1974	126,40	0,00	71,00	0,00	123,00	162,86	138,00	524,75	92,30	1123,99	83,00	0,00	137,00	0,00	108,30
1975	101,60	0,00	104,90	0,00	117,00	162,86	100,00	524,75	55,00	1123,99	61,00	0,00	174,00	0,00	73,61
1976	54,40	0,00	66,00	0,00	98,00	162,86	68,00	524,75	43,00	1123,99	129,00	0,00	95,00	0,00	55,19
1977	60,50	0,00	80,30	0,00	45,00	162,86	66,47	524,75	60,00	1123,99	100,00	0,00	120,00	0,00	60,53
1978	68,60	0,00	70,00	0,00	70,00	162,86	85,00	524,75	74,27	1123,99	70,00	0,00	140,00	0,00	77,00
1979	120,70	0,00	113,80	0,00	80,00	162,86	166,00	524,75	114,45	1123,99	155,00	0,00	140,00	0,00	126,29
1980	135,90	0,00	82,30	0,00	80,20	162,86	138,00	524,75	87,43	1123,99	70,00	0,00	83,00	0,00	101,43
1981	124,40	0,00	85,00	0,00	66,50	162,86	131,00	524,75	100,00	1123,99	75,00	0,00	78,80	0,00	105,97
1982	98,00	0,00	43,00	0,00	125,00	162,86	83,00	524,75	68,80	1123,99	82,00	0,00	52,80	0,00	77,97
1983	63,40	0,00	88,40	0,00	46,00	162,86	60,00	524,75	60,20	1123,99	90,00	0,00	120,00	0,00	58,87
1984	102,70	0,00	70,70	0,00	20,00	162,86	90,00	524,75	70,50	1123,99	66,00	0,00	84,00	0,00	71,61
1985	164,50	0,00	85,20	0,00	90,00	162,86	80,00	524,75	107,60	1123,99	64,00	0,00	95,70	0,00	98,02
1986	64,90	0,00	95,40	0,00	67,90	162,86	120,00	524,75	36,20	1123,99	44,00	0,00	60,34	0,00	63,32
1987	171,30	0,00	39,50	0,00	77,70	162,86	90,00	524,75	42,70	1123,99	68,50	0,00	72,73	0,00	59,55
1988	115,00	0,00	20,80	0,00	106,80	162,86	156,00	524,75	118,43	1123,99	235,00	0,00	150,00	0,00	128,27
1989	201,80	0,00	97,94	0,00	57,80	162,86	105,00	524,75	86,90	1123,99	91,90	0,00	100,00	0,00	89,53
1990	77,80	0,00	71,00	0,00	109,80	162,86	64,00	524,75	83,04	1123,99	108,00	0,00	137,00	0,00	79,93
1991	32,50	0,00	85,00	0,00	46,30	162,86	106,00	524,75	128,80	1123,99	51,50	0,00	85,50	0,00	114,78
1992	161,50	0,00	80,00	0,00	133,50	162,86	130,00	524,75	29,70	1123,99	109,00	0,00	56,60	0,00	68,08
1993	133,40	0,00	36,00	0,00	66,00	162,86	90,00	524,75	85,50	1123,99	82,50	0,00	87,40	0,00	85,05
1994	54,80	0,00	75,80	0,00	72,10	162,86	50,00	524,75	91,60	1123,99	107,00	0,00	85,00	0,00	77,80
1995	76,30	0,00	71,40	0,00	83,30	162,86	63,00	524,75	88,00	1123,99	133,50	0,00	84,00	0,00	80,34
1996	99,40	0,00	71,40	0,00	151,30	162,86	120,00	524,75	63,00	1123,99	95,00	0,00	80,00	0,00	87,45
1997	99,60	0,00	32,90	0,00	53,00	162,86	150,00	524,75	145,00	1123,99	44,00	0,00	94,00	0,00	138,18
1998	85,60	0,00	70,74	0,00	75,10	162,86	79,00	524,75	75,60	1123,99	100,00	0,00	62,50	0,00	76,54
1999	108,50	0,00	109,50	0,00	86,90	162,86	9,00	524,75	87,00	1123,99	86,50	0,00	106,00	0,00	64,40
2000	116,20	0,00	60,20	0,00	72,00	162,86	72,00	524,75	89,00	1123,99	93,00	0,00	32,50	0,00	82,55
2001	75,90	0,00	95,40	0,00	84,20	162,86	83,00	524,75	81,20	1123,99	73,00	0,00	112,20	0,00	81,99
2002	71,70	0,00	82,16	0,00	84,50	162,86	110,00	524,75	113,00	1123,99	90,00	0,00	90,30	0,00	109,57
2003	161,80	0,00	80,90	0,00	97,00	162,86	98,00	524,75	85,60	1123,99	60,00	0,00	80,50	0,00	90,22
2004	148,00	0,00	3,00	0,00	81,60	162,86	100,00	524,75	158,00	1123,99	155,00	0,00	122,00	0,00	134,33
2005	72,30	0,00	73,00	0,00	88,40	162,86	120,00	524,75	28,00	1123,99	131,80	0,00	106,00	0,00	60,08

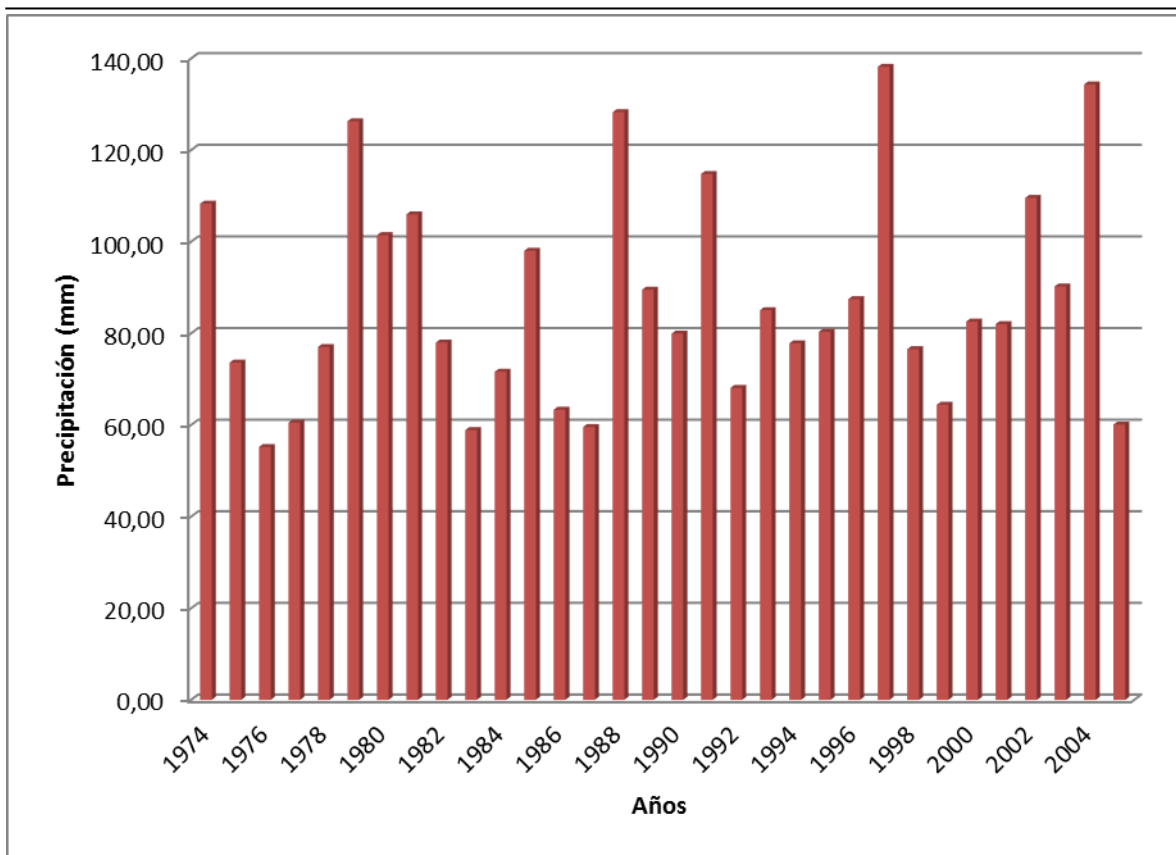


Figura 20: Precipitaciones Máximas de la cuenca Arroyo Grande

En la Tabla 7 se observa como varían las precipitaciones máximas en 24 horas para la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande; a partir de esta se puede apreciar que los máximos valores se dieron en promedio sobre toda la cuenca en los años 1997 y 2004 con 138,18 mm y 134,33 mm respectivamente, y los valores mínimos se presentaron en el año 1976 con 55,19 mm anuales (Ver Figura 20). Estos datos son empleados para realizar los respectivos ajustes por el Método de Gumbel y Método Logarítmico.

5.3.3 Ajuste de datos de precipitación máxima

Luego de determinar las precipitaciones máximas por el Método de los Polígonos de Thiessen, se realizó el ajuste de los datos por el Método de Gumbel y Ajuste Logarítmico.



Inicialmente se hizo el ajuste por el Método de Gumbel, descrito en el marco teórico en la sección 3.3.1.2.1 y como específica su procedimiento en la metodología en la sección 4.3.1.3, ver Tabla 8 y la Figura 21.

Tabla 8: Ajuste de datos de precipitación a partir del Método de Gumbel

Orden	Año	Prec max	xtr	xi-xtr	(xi-xtr) ²	yi	p(x<=xi)
1	1997	138,18	87,08	51,09	2610,53	3,026	95,26%
2	2004	134,33	87,08	47,25	2232,28	2,838	94,32%
3	1988	128,27	87,08	41,19	1696,22	2,543	92,44%
4	1979	126,29	87,08	39,20	1536,89	2,447	91,71%
5	1991	114,78	87,08	27,69	767,00	1,886	85,93%
6	2002	109,57	87,08	22,48	505,55	1,633	82,25%
7	1974	108,30	87,08	21,21	449,99	1,571	81,23%
8	1981	105,97	87,08	18,88	356,59	1,457	79,23%
9	1980	101,43	87,08	14,34	205,71	1,236	74,79%
10	1985	98,02	87,08	10,94	119,66	1,070	70,98%
11	2003	90,22	87,08	3,13	9,81	0,690	60,57%
12	1989	89,53	87,08	2,44	5,96	0,657	59,54%
13	1996	87,45	87,08	0,36	0,13	0,556	56,34%
14	1993	85,05	87,08	-2,03	4,14	0,439	52,48%
15	2000	82,55	87,08	-4,54	20,58	0,317	48,27%
16	2001	81,99	87,08	-5,09	25,94	0,290	47,31%
17	1995	80,34	87,08	-6,75	45,54	0,209	44,43%
18	1990	79,93	87,08	-7,15	51,15	0,190	43,72%
19	1982	77,97	87,08	-9,12	83,16	0,094	40,23%
20	1994	77,80	87,08	-9,29	86,26	0,086	39,93%
21	1978	77,00	87,08	-10,09	101,77	0,047	38,50%
22	1998	76,54	87,08	-10,54	111,19	0,024	37,69%
23	1975	73,61	87,08	-13,48	181,60	-0,118	32,44%
24	1984	71,61	87,08	-15,48	239,50	-0,216	28,92%
25	1992	68,08	87,08	-19,00	361,00	-0,387	22,92%
26	1999	64,40	87,08	-22,69	514,70	-0,567	17,16%
27	1986	63,32	87,08	-23,76	564,58	-0,619	15,61%
28	1977	60,53	87,08	-26,56	705,38	-0,755	11,90%
29	2005	60,08	87,08	-27,01	729,31	-0,777	11,36%
30	1987	59,55	87,08	-27,54	758,29	-0,803	10,73%
31	1983	58,87	87,08	-28,22	796,31	-0,836	9,95%
32	1976	55,19	87,08	-31,90	1017,52	-1,015	6,33%

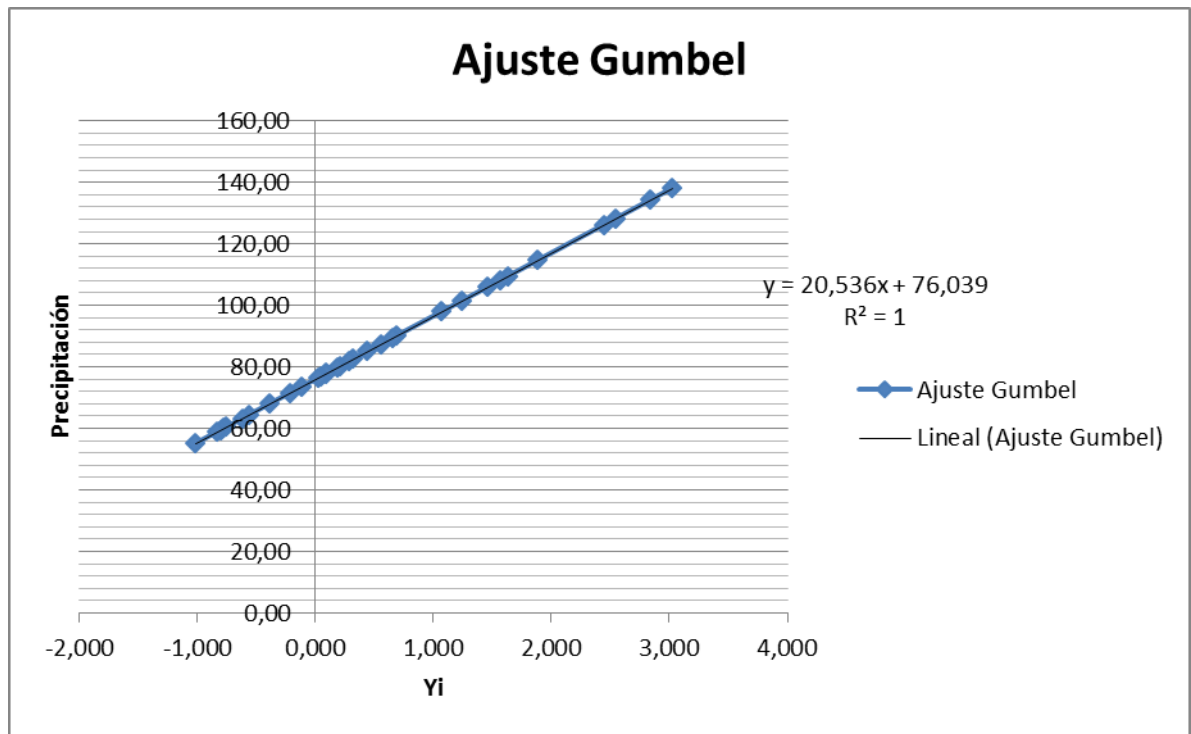


Figura 21: Ajuste de datos de precipitación a partir del Método de Gumbel.

Posteriormente se realizó el ajuste de datos de precipitación por el método de Ajuste Logarítmico, explicado en la sección 3.3.1.2.2. Ver Tabla 9 y Figura 22.



Tabla 9: Ajuste de datos de precipitación a partir del método de Ajuste Logarítmico

Orden	Año	Prec max	$p(x \leq x_i)$	Tr
1	1997	138,18	95,26%	21,114
2	2004	134,33	94,32%	17,595
3	1988	128,27	92,44%	13,228
4	1979	126,29	91,71%	12,058
5	1991	114,78	85,93%	7,108
6	2002	109,57	82,25%	5,634
7	1974	108,30	81,23%	5,328
8	1981	105,97	79,23%	4,814
9	1980	101,43	74,79%	3,967
10	1985	98,02	70,98%	3,445
11	2003	90,22	60,57%	2,536
12	1989	89,53	59,54%	2,471
13	1996	87,45	56,34%	2,290
14	1993	85,05	52,48%	2,104
15	2000	82,55	48,27%	1,933
16	2001	81,99	47,31%	1,898
17	1995	80,34	44,43%	1,800
18	1990	79,93	43,72%	1,777
19	1982	77,97	40,23%	1,673
20	1994	77,80	39,93%	1,665
21	1978	77,00	38,50%	1,626
22	1998	76,54	37,69%	1,605
23	1975	73,61	32,44%	1,480
24	1984	71,61	28,92%	1,407
25	1992	68,08	22,92%	1,297
26	1999	64,40	17,16%	1,207
27	1986	63,32	15,61%	1,185
28	1977	60,53	11,90%	1,135
29	2005	60,08	11,36%	1,128
30	1987	59,55	10,73%	1,120
31	1983	58,87	9,95%	1,110
32	1976	55,19	6,33%	1,068

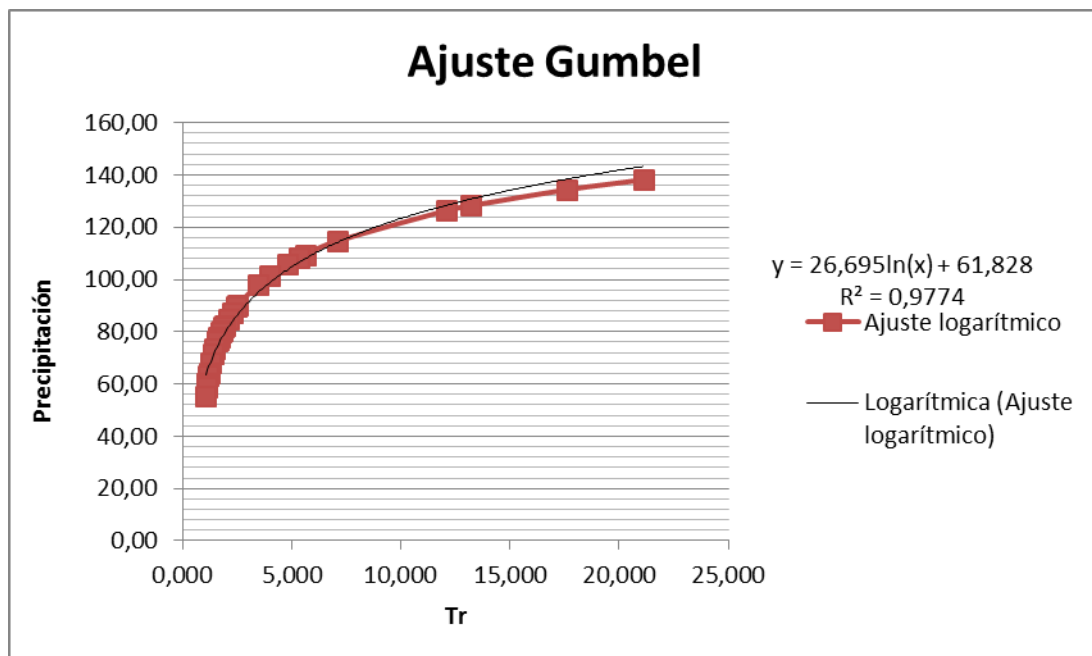


Figura 22: Ajuste de datos de precipitación a partir del método de Ajuste Logarítmico.



En las Figuras 21 y 22, se puede observar los coeficientes de correlación R^2 para cada método; en los cuales se evidencia que del ajuste realizado por el Método de Gumbel se obtuvo un resultado de exactamente 1, mientras que por el método del Ajuste Logarítmico el valor del coeficiente solo se acerca (0,9774), siendo esto un indicativo de que la correlación de los datos para el primero es mucho más precisa que para el segundo. Por esto, el Método de Gumbel es seleccionado para realizar los cálculos correspondientes al ajuste de parámetros de la ecuación de intensidad (ecuación 62).

$$y = a \ln(x) + b \tag{62}$$

Por consiguiente, para la construcción de las curvas IDF.

Tabla 10: Ajuste de precipitaciones por Gumbel

T(años)	P(x>xi)	Ajuste de Gumbel	
		yi	Pmáx ₂₄ (mm)
5	80,00%	1,5	106,8438193
10	90,00%	2,25	122,2461905
20	95,00%	2,97	137,0324669
25	96,00%	3,199	141,7353242
50	98,00%	3,902	156,1724802
100	99,00%	4,6	170,5069536

En la Tabla 10, se puede apreciar el cálculo realizado por el Método de Gumbel de los valores de precipitaciones máximas en una duración de 24 horas. Sin embargo, es necesario estimar la intensidad de lluvia para duraciones distintas a 24 horas; aplicando la ecuación 63.

$$\%P = -0,0076t^4 + 0,0902t^3 - 0,4236t^2 + 0,897t + 0,0026 \tag{63}$$



Teniendo en cuenta la Tabla 10, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 11: Precipitaciones máximas para duraciones de 1/4, 1/2, 3/4, 1, 2 y 3 horas

T	t(h)	0,25	t(h)	0,5	t(h)	0,75	t(h)	1	t(h)	2	t(h)	3
Años	%P	Prec (mm)	%P	Prec (mm)	%P	Prec (mm)	%P	Prec (mm)	%P	Prec (mm)	%P	Prec (mm)
5	21,84%	93,34	36,60%	78,20	47,62%	67,83	55,59%	59,39	68,60%	36,65	71,63%	25,51
10	21,84%	106,80	36,60%	89,47	47,62%	77,61	55,59%	67,96	68,60%	41,93	71,63%	29,19
20	21,84%	119,72	36,60%	100,30	47,62%	87,00	55,59%	76,18	68,60%	47,00	71,63%	32,72
25	21,84%	123,82	36,60%	103,74	47,62%	89,98	55,59%	78,79	68,60%	48,62	71,63%	33,84
50	21,84%	136,44	36,60%	114,30	47,62%	99,15	55,59%	86,82	68,60%	53,57	71,63%	37,29
100	21,84%	148,96	36,60%	124,80	47,62%	108,25	55,59%	94,78	68,60%	58,48	71,63%	40,71

De la Tabla 11 se puede observar las precipitaciones calculadas para lluvias con duración de ¼ hora, ½ hora, ¾ hora, 1 hora, 2 horas y 3 horas. El porcentaje de precipitación para una lluvia de 3 horas es de 71,63%, es decir, que en 3 horas ya ha caído gran parte de la precipitación máxima en 24 horas.

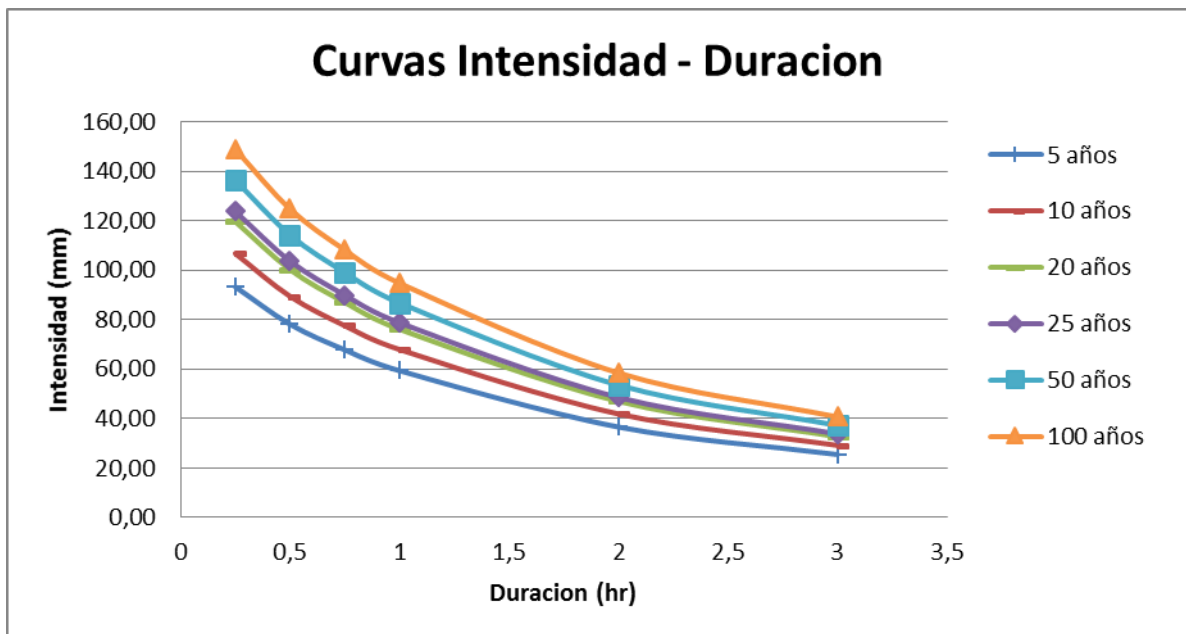


Figura 23: Curvas IDF (Método de Gumbel)



5.3.4 Calibración de la ecuación que relaciona la Intensidad – Duración – Frecuencia.

Para la elaboración de las Curvas IDF es necesaria la calibración de los parámetros, como se describe en la sección 3.3.1.2.3. Los datos empleados para la realización de las curvas IDF, fueron los ajustados por el método de Gumbel, En la Tabla 12 se muestra el ajuste inicial realizados a los parámetros a_0 , a_1 y a_2 .

Tabla 12: Ajuste para calibración de parámetros a_0 , a_1 y a_2

Ajuste de parametros a_0 , a_1 y a_2								
Orden	X1	X2	Y	X1*Y	X2*Y	X1^2	X2^2	X1*X2
1	0,6990	1,1761	1,9701	1,3770	2,3170	0,4886	1,3832	0,8221
2	1,0000	1,1761	2,0286	2,0286	2,3858	1,0000	1,3832	1,1761
3	1,3010	1,1761	2,0782	2,7037	2,4441	1,6927	1,3832	1,5301
4	1,3979	1,1761	2,0928	2,9256	2,4613	1,9542	1,3832	1,6441
5	1,6990	1,1761	2,1349	3,6272	2,5109	2,8865	1,3832	1,9981
6	2,0000	1,1761	2,1731	4,3461	2,5557	4,0000	1,3832	2,3522
7	0,6990	1,4771	1,8932	1,3233	2,7965	0,4886	2,1819	1,0325
8	1,0000	1,4771	1,9517	1,9517	2,8829	1,0000	2,1819	1,4771
9	1,3010	1,4771	2,0013	2,6037	2,9561	1,6927	2,1819	1,9218
10	1,3979	1,4771	2,0159	2,8182	2,9778	1,9542	2,1819	2,0649
11	1,6990	1,4771	2,0581	3,4966	3,0400	2,8865	2,1819	2,5096
12	2,0000	1,4771	2,0962	4,1924	3,0963	4,0000	2,1819	2,9542
13	0,6990	1,6532	1,8314	1,2801	3,0278	0,4886	2,7331	1,1555
14	1,0000	1,6532	1,8899	1,8899	3,1244	1,0000	2,7331	1,6532
15	1,3010	1,6532	1,9395	2,5234	3,2064	1,6927	2,7331	2,1509
16	1,3979	1,6532	1,9542	2,7318	3,2307	1,9542	2,7331	2,3111
17	1,6990	1,6532	1,9963	3,3916	3,3003	2,8865	2,7331	2,8088
18	2,0000	1,6532	2,0344	4,0689	3,3633	4,0000	2,7331	3,3064
19	0,6990	1,7782	1,7737	1,2398	3,1540	0,4886	3,1618	1,2429
20	1,0000	1,7782	1,8322	1,8322	3,2580	1,0000	3,1618	1,7782
21	1,3010	1,7782	1,8818	2,4483	3,3462	1,6927	3,1618	2,3134
22	1,3979	1,7782	1,8965	2,6512	3,3722	1,9542	3,1618	2,4857
23	1,6990	1,7782	1,9386	3,2936	3,4471	2,8865	3,1618	3,0210
24	2,0000	1,7782	1,9767	3,9535	3,5149	4,0000	3,1618	3,5563
25	0,6990	2,0792	1,5640	1,0932	3,2519	0,4886	4,3230	1,4533
26	1,0000	2,0792	1,6225	1,6225	3,3735	1,0000	4,3230	2,0792
27	1,3010	2,0792	1,6721	2,1755	3,4766	1,6927	4,3230	2,7051
28	1,3979	2,0792	1,6868	2,3580	3,5071	1,9542	4,3230	2,9066
29	1,6990	2,0792	1,7289	2,9373	3,5947	2,8865	4,3230	3,5325
30	2,0000	2,0792	1,7670	3,5341	3,6740	4,0000	4,3230	4,1584
31	0,6990	2,2553	1,4067	0,9833	3,1725	0,4886	5,0863	1,5764
32	1,0000	2,2553	1,4652	1,4652	3,3044	1,0000	5,0863	2,2553
33	1,3010	2,2553	1,5148	1,9708	3,4163	1,6927	5,0863	2,9342
34	1,3979	2,2553	1,5295	2,1381	3,4493	1,9542	5,0863	3,1527
35	1,6990	2,2553	1,5716	2,6701	3,5443	2,8865	5,0863	3,8316
36	2,0000	2,2553	1,6097	3,2194	3,6303	4,0000	5,0863	4,5105
Suma	48,5815	62,5142	66,5783	90,8660	113,1650	72,1318	113,2156	84,3619



De acuerdo a la Tabla 12, se obtienen el siguiente sistema de ecuaciones:

Tabla 13 Sistema de ecuaciones a₀, a₁ y a₂

a ₀	a ₁	a ₂	Coef
36	48,5815	62,5142	66,5783
48,5815	72,1318	84,3619	90,8660
62,5142	84,3619	113,2156	113,1650

El sistema anterior arrojó los siguientes resultados:

Tabla 14: Resultados del sistema de ecuaciones a₀, a₁ y a₂

a ₀	2,5526
a ₁	0,1551
a ₂	-0,5255

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones es posible calcular los parámetros *K*, *m*, *n* y *c* mostrados en la ecuación 64.

$$i = \frac{kT^m}{(d+c)^n} \quad (64)$$

Tabla 15: Parámetros calibrados.

c	0
n	0,5255
m	0,1551
K	356,9040

La ecuación que relaciona las variables intensidad, duración y frecuencia de cualquier precipitación en la cuenca del Arroyo Grande es la ecuación 60.

$$i = \frac{356,90T^{0,1551}}{(t+d)^{0,5255}} \quad (65)$$



A continuación se muestran las curvas IDF obtenidas del ajuste realizado:

Tabla 16: Valores de Intensidad calculados con la ecuación 59.

Duracion (min)	Periodo de Retorno (años)					
	5	10	20	25	50	100
	Intensidad (mm)					
5	196,6480	218,9743	243,8355	252,4249	281,0839	312,9967
10	136,6155	152,1261	169,3977	175,3649	195,2749	217,4454
15	110,3990	122,9331	136,8902	141,7124	157,8016	175,7176
20	94,9097	105,6852	117,6841	121,8297	135,6616	151,0639
25	84,4082	93,9915	104,6628	108,3496	120,6511	134,3492
30	76,6965	85,4042	95,1005	98,4506	109,6281	122,0747
35	70,7286	78,7588	87,7007	90,7900	101,0978	112,5759
40	65,9357	73,4217	81,7576	84,6377	94,2470	104,9473
45	61,9784	69,0151	76,8507	79,5579	88,5905	98,6486
50	58,6402	65,2979	72,7114	75,2728	83,8189	93,3352
55	55,7755	62,1080	69,1594	71,5956	79,7242	88,7757
60	53,2827	59,3321	66,0683	68,3957	76,1610	84,8079
65	51,0880	56,8882	63,3470	65,5785	73,0239	81,3147
70	49,1367	54,7154	60,9275	63,0737	70,2348	78,2089
75	47,3871	52,7672	58,7581	60,8279	67,7340	75,4242
80	45,8069	51,0076	56,7988	58,7996	65,4754	72,9091
85	44,3706	49,4082	55,0178	56,9559	63,4223	70,6230
90	43,0577	47,9463	53,3898	55,2705	61,5457	68,5332
95	41,8516	46,6032	51,8943	53,7223	59,8216	66,6135
100	40,7386	45,3638	50,5142	52,2936	58,2307	64,8419
105	39,7073	44,2155	49,2355	50,9699	56,7567	63,2006
110	38,7484	43,1477	48,0465	49,7390	55,3861	61,6743
115	37,8538	42,1515	46,9372	48,5906	54,1073	60,2504
120	37,0166	41,2193	45,8991	47,5159	52,9106	58,9178
125	36,2310	40,3444	44,9249	46,5075	51,7877	57,6674
130	35,4919	39,5214	44,0085	45,5588	50,7313	56,4910
135	34,7949	38,7454	43,1443	44,6641	49,7350	55,3817
140	34,1363	38,0119	42,3276	43,8186	48,7936	54,3334
145	33,5126	37,3174	41,5542	43,0180	47,9021	53,3406
150	32,9208	36,6585	40,8205	42,2584	47,0562	52,3988
155	32,3584	36,0322	40,1231	41,5365	46,2524	51,5036
160	31,8230	35,4361	39,4593	40,8493	45,4871	50,6515
165	31,3126	34,8677	38,8264	40,1941	44,7575	49,8390
170	30,8252	34,3249	38,2220	39,5684	44,0608	49,0633
175	30,3592	33,8060	37,6442	38,9703	43,3947	48,3216
180	29,9131	33,3093	37,0910	38,3976	42,7571	47,6115

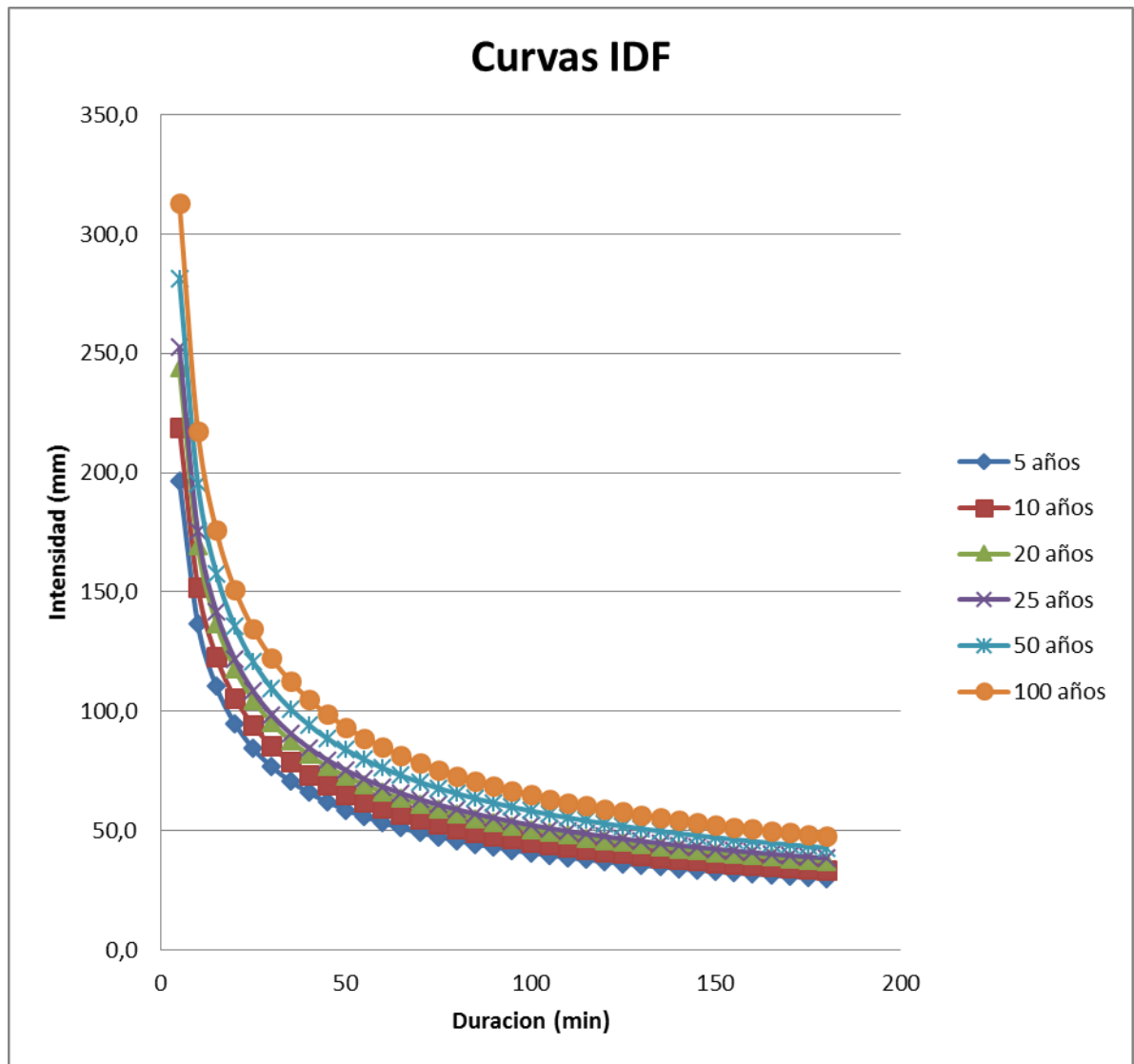


Figura 24: Curvas IDF (Ecuación calibrada)

Al realizar una comparación con los datos de intensidad obtenidos con la ecuación calibrada (ecuación 60) ver Tabla 16 y Figura 24, y los ajustes por el método de Gumbel, ver Tabla 10 y Figura 23, se encuentra una gran semejanza y una variación mínima en los datos, por lo tanto se puede confiar en los resultados obtenidos de la ecuación calibrada para el área específica de estudio.

5.4 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Dentro de los resultados hidrológicos tenemos puntos relevantes, por qué se tiene que dividir la cuenca en subcuencas, parámetros morfométricos de la cuenca, estimación de la intensidad de lluvia e hidrogramas.

5.4.1 Delimitación de subcuencas y drenajes.

Con el objetivo de obtener una mayor precisión al momento de estimar los caudales aportados por la cuenca del Arroyo Grande, en la presente investigación, fue dividida la cuenca en 8 subcuencas, La delimitación de las subcuencas, así como la definición de los drenajes de escorrentía fue realizada sobre los planos topográficos de estudios realizados en la zona suministrados por HIDROCONSULTORES LTDA.



Figura 25: Subdivisión de la cuenca en subcuencas.



5.4.2 Parámetros morfométricos de la Cuenca

Hecha la delimitación de la cuenca del Arroyo Grande, se determinaron los parámetros morfométricos de la cuenca.

Entre los parámetros morfométricas se puede mencionar:

- Área: la cuenca tiene un área aproximada de 1811,6 has.
- Longitud del cauce principal: La cuenca del Arroyo Grande posee una longitud de cauce aproximada de 13.38 Km.
- Alturas: la altura máxima de la cuenca es de 173 m.s.n.m. y una altura mínima es a nivel del mar (0 m.s.n.m.).
- Pendiente: la pendiente promedio de la cuenca es de 1.29%.
- Ancho y longitud: la cuenca tiene un ancho promedio de 2.07 Km y longitud axial es de 8.7 Km.
- Factor de forma: el factor de forma es de 0.24.

Para poder estimar los caudales que se presentan en la cuenca, se utilizó el programa HEC-HMS que calcula los por el método SCS, el cual arroja resultados confiables para áreas no mayores a 500 ha, por esta razón fue dividida la cuenca del Arroyo Grande en 8 subcuencas.

Los mismos parámetros fueron aplicados para cada una de las subcuencas, como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17: Parámetros morfométricos de las subcuencas.

Subcuencas	Areas (ha)	A(Km2)	P(km)	Lc(Km)	Lx(Km)	H max (m)	H min (m)	L(km)	Sm	B	Kf	Kc
A1	176,43	1,76	7,261	2,91	2,6	14	0	2,91	0,00481	0,606296582	0,23	1,53
A2	117,16	1,17	4,781	2,21	2,0	71	14	2,26	0,02579	0,530148705	0,27	1,24
A3	146,98	1,47	6,361	2,54	2,0	29	15	3,581	0,00551	0,578659914	0,29	1,47
A4	241,56	2,42	7,489	3,23	3,0	60	17	4,375	0,01331	0,747852221	0,25	1,35
A5	219,94	2,20	7,977	2,8	3,5	103	31	5,243	0,02571	0,785506221	0,23	1,51
A6	331,38	3,31	8,015	2,22	3,2	64	31	4,54	0,01486	1,492690423	0,47	1,23
A7	296,69	2,97	7,481	2,92	3,0	173	54	6,717	0,04075	1,01606464	0,34	1,22
A8	281,46	2,81	8,199	2,36	3,1	159	64	4,639	0,04025	1,192608363	0,38	1,37

De la Tabla 17, se puede observar que la subcuenca con mayor extensión es la número seis, con un área de aproximada de 331,4 ha, así que es perfectamente aplicable el Método



Racional. Se puede apreciar que la altura máxima es de 173 m.s.n.m. y la altura mínima que se encontró en la cuenca es a nivel del mar (0 m.s.n.m.) en la desembocadura.

5.4.3 Estimación de los Tiempos de Concentración (t_c)

Para la estimación del tiempo de concentración, se implementó del Método de la Velocidad, propuesto en el Plan Maestro de Drenajes Pluviales de Cartagena, para el cual, el coeficiente K para la ciudad de Cartagena es 4,47. Ver sección 3.3.2.17.

Los tiempos de concentración se muestran a continuación:

Tabla 18: Tiempos de concentración para las subcuencas

Subcuencas	Lc(m)	Sm	Vc (m/s)	Tc(min)	Tc redondeada	Tc(hr)
A1	2910	0,00481	0,3100	156,4288	156	2,61
A2	2210	0,02579	0,7179	51,3088	51	0,86
A3	2540	0,00551	0,3319	127,5639	128	2,13
A4	3230	0,01331	0,5158	104,3784	104	1,74
A5	2800	0,02571	0,7168	65,1047	65	1,09
A6	2220	0,01486	0,5450	67,8912	68	1,13
A7	2920	0,04075	0,9024	53,9314	54	0,90
A8	2360	0,04025	0,8968	43,8579	44	0,73

En la Tabla 18, se puede observar que la subcuenca con mayor tiempo de concentración, es la primera (A1) con 156 min., mientras que la subcuenca 8, presenta el menor tiempo de concentración con 44 min.

5.4.4 Estimación de la intensidad de la lluvia.

Para la estimación de la Intensidad de lluvia en la cuenca del Arroyo Grande, se empleó el método Curvas IDF, aplicando la expresión calibrada (ecuación (60)). En la Tabla 19 se muestran los resultados del análisis realizado.



Tabla 19: Intensidad de lluvia.

Subcuencas	Tc redondeada (min)	Periodo de retorno (años)					
		5	10	20	25	50	100
		Intensidad (mm)					
A1	156	32,2461	35,9134	39,9978	41,4091	46,1186	51,3636
A2	51	58,0275	64,6269	71,9768	74,5165	82,9911	92,4296
A3	128	35,7787	39,8478	44,3797	45,9456	51,1709	56,9905
A4	104	39,9036	44,4418	49,4962	51,2426	57,0704	63,5609
A5	65	51,0830	56,8926	63,3629	65,5987	73,0591	81,3681
A6	68	49,8860	55,5595	61,8782	64,0616	71,3472	79,4615
A7	54	56,3104	62,7146	69,8470	72,3115	80,5355	89,6947
A8	44	62,7086	69,8404	77,7832	80,5278	89,6861	99,8860

En la Tabla 19, se aprecian los distintos valores de intensidad para diferentes periodos de retorno. La estimación de la intensidad de lluvia alcanza su punto máximo cuando el tiempo de concentración es el menor, como indica la Subcuenca A8; lo cual nos indica una relación inversamente proporcional entre estos dos parámetros de estudio.

5.4.5 Estimación de los caudales máximos

La estimación de los caudales máximos se determinó a partir de la utilización del software gratuito HEC-HMS en el cual se realizó la simulación de la cuenca para lo cual se introdujeron las características morfométricas y los Tiempos de Retardo (Tp) de cada subcuenca, tal como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20: Datos ingresados al programa HEC-HMS.

Subcuencas	Area (Km2)	Tc (min)	Tp (min)
A1	1,76	156,43	93,86
A2	1,17	51,31	30,79
A3	1,46	127,56	76,54
A4	2,41	104,38	62,63
A5	2,19	65,10	39,06
A6	3,31	67,89	40,73
A7	2,96	53,93	32,36
A8	2,81	43,86	26,31

Posteriormente a partir de la ecuación calibrada (60), se realiza el cálculo de la precipitación presentada durante 3 horas (Donde ocurre el 70% del P_{24}) para determinar el Hietograma característico de la Cuenca. Ver Tabla 21 y Figura 26.

Tabla 21: Precipitación presentada durante 3 horas

Duración (min)	I (mm/hr)	P (mm)	ΔP (mm)
5	281,08	23,42	23,42
10	195,27	32,55	9,12
15	157,80	39,45	6,90
20	135,66	45,22	5,77
25	120,65	50,27	5,05
30	109,63	54,81	4,54
35	101,10	58,97	4,16
40	94,25	62,83	3,86
45	88,59	66,44	3,61
50	83,82	69,85	3,41
55	79,72	73,08	3,23
60	76,16	76,16	3,08
65	73,02	79,11	2,95
70	70,23	81,94	2,83
75	67,73	84,67	2,73
80	65,48	87,30	2,63
85	63,42	89,85	2,55
90	61,55	92,32	2,47
95	59,82	94,72	2,40
100	58,23	97,05	2,33
105	56,76	99,32	2,27
110	55,39	101,54	2,22
115	54,11	103,71	2,16
120	52,91	105,82	2,12
125	51,79	107,89	2,07
130	50,73	109,92	2,03
135	49,74	111,90	1,99
140	48,79	113,85	1,95
145	47,90	115,76	1,91
150	47,06	117,64	1,88
155	46,25	119,49	1,84
160	45,49	121,30	1,81
165	44,76	123,08	1,78
170	44,06	124,84	1,76
175	43,39	126,57	1,73
180	42,76	128,27	1,70

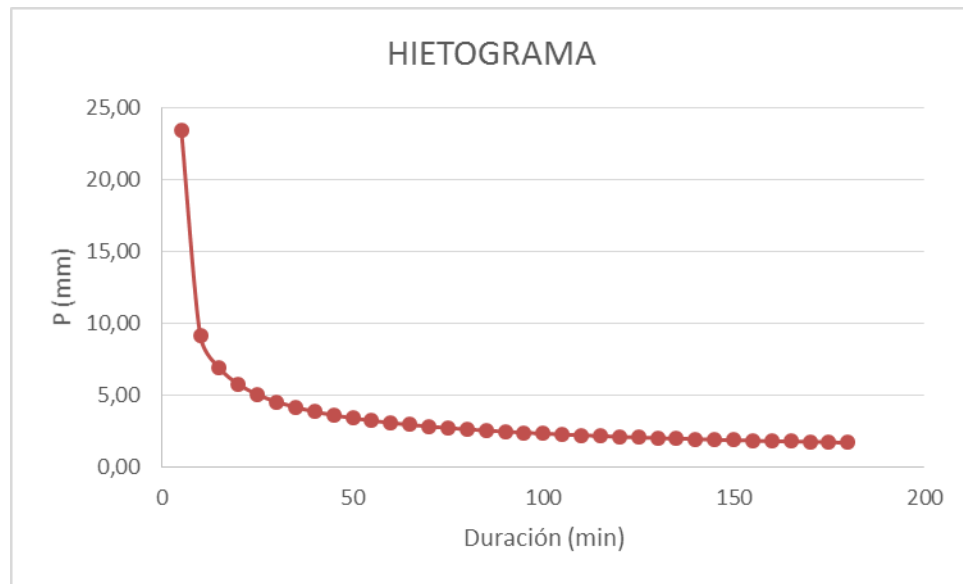


Figura 26: Subdivisión de la cuenca en subcuencas.

Luego, el programa fue ajustado para que utilizara el método de Hidrogramas SCS para el cálculo de los caudales máximos presentados en cada una de las subcuencas y el Caudal máximo resultante.

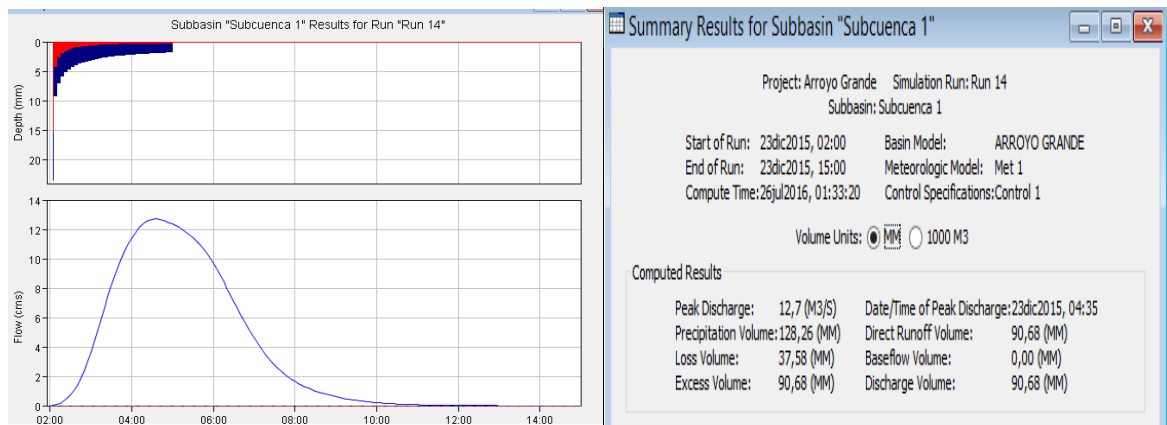


Figura 27: Hidrograma SCS y caudal máximo para la subcuenca 1. Fuente HEC-HMS

La Figura 27 muestra el Hidrograma resultante para la Subcuenca 1, en donde se puede observar un caudal pico (Q_p) de 12,7 m³/s.

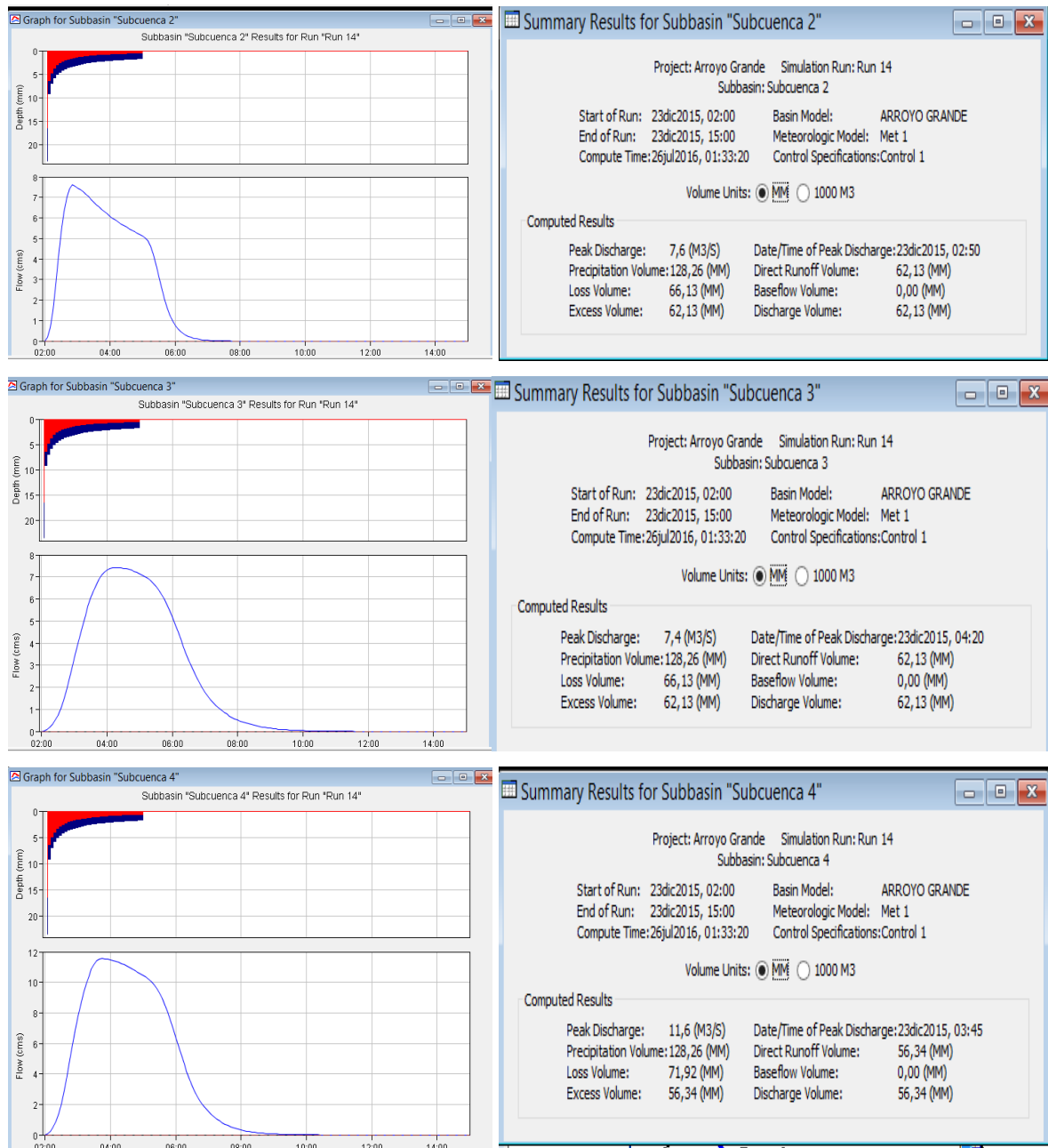


Figura 28: Hidrograma SCS y caudal máximo para las subcuencas 2, 3 y 4 respectivamente.

Fuente HEC_HMS 2016

La Figura 28 muestra los Hidrogramas resultante para las Subcuencas 2, 3 y 4 en donde se puede observar caudales pico (Q_p) de 7.6, 7.4 y 11.6 m³/s respectivamente.

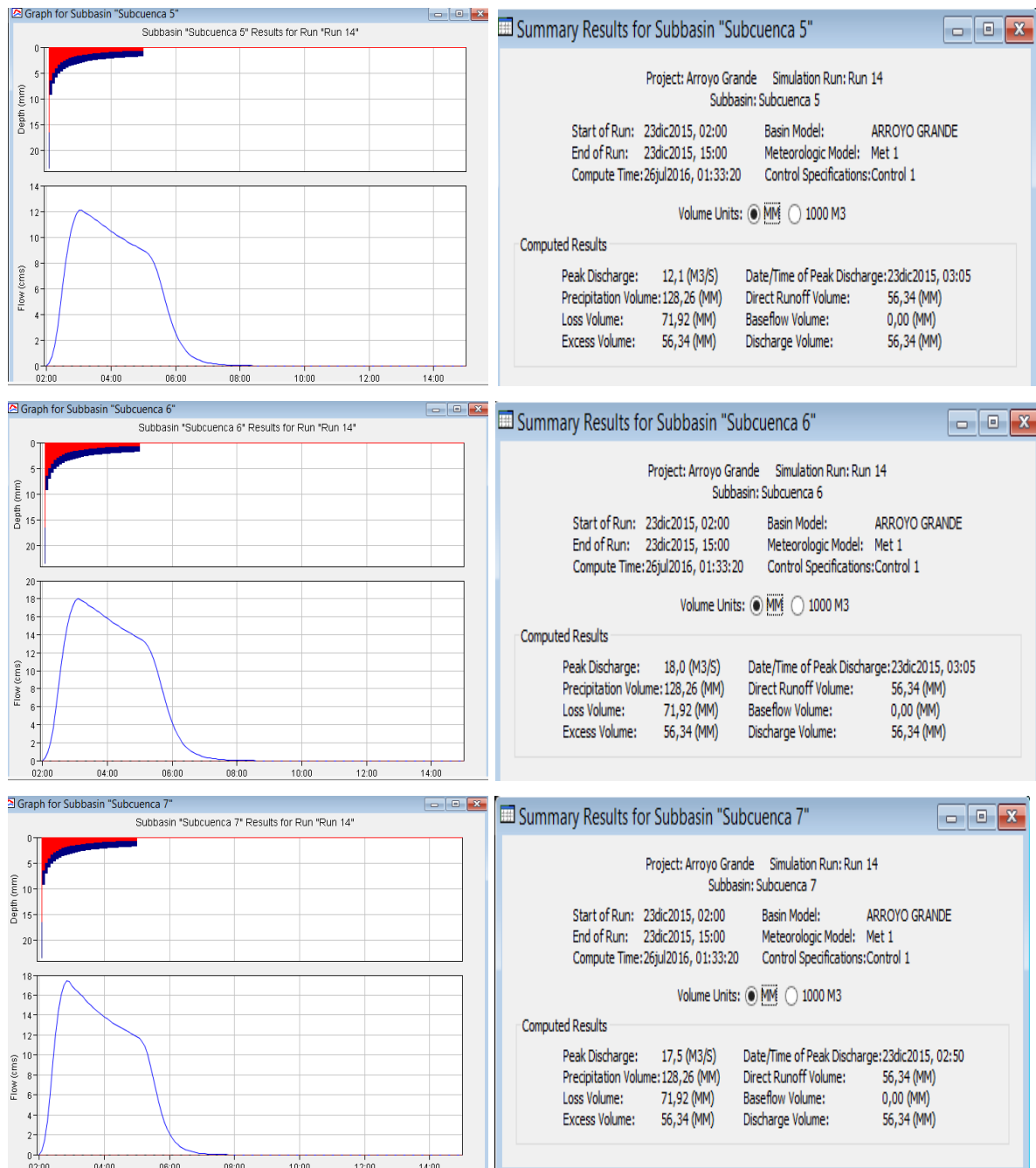


Figura 29: Hidrograma SCS y caudal máximo para las subcuencas 5, 6 y 7 respectivamente.

Fuente HEC-HMS 2016

La Figura 29 muestra los Hidrogramas resultantes para las Subcuencas 5, 6 y 7 en donde se puede observar caudales pico (Q_p) de 12.1, 18 y 17.5 m³/s respectivamente y se presenta durante las dos primeras horas, una vez iniciada la precipitación.

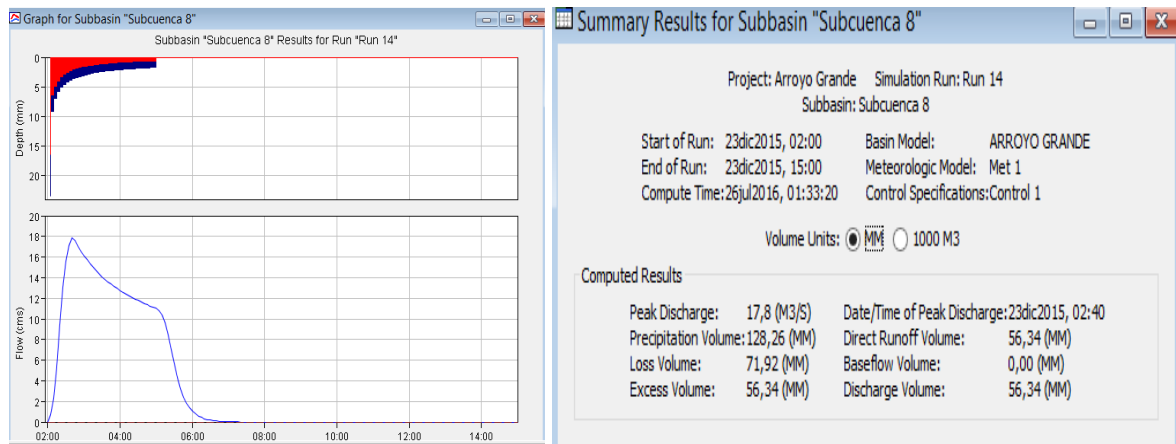


Figura 30: Hidrograma SCS y caudal máximo para la subcuenca 8. Fuente HEC-HMS 2016

La Figura 30 muestra el Hidrograma resultante para la Subcuenca 8, en donde se puede observar un caudal pico (Q_p) de 17.8 m³/s.

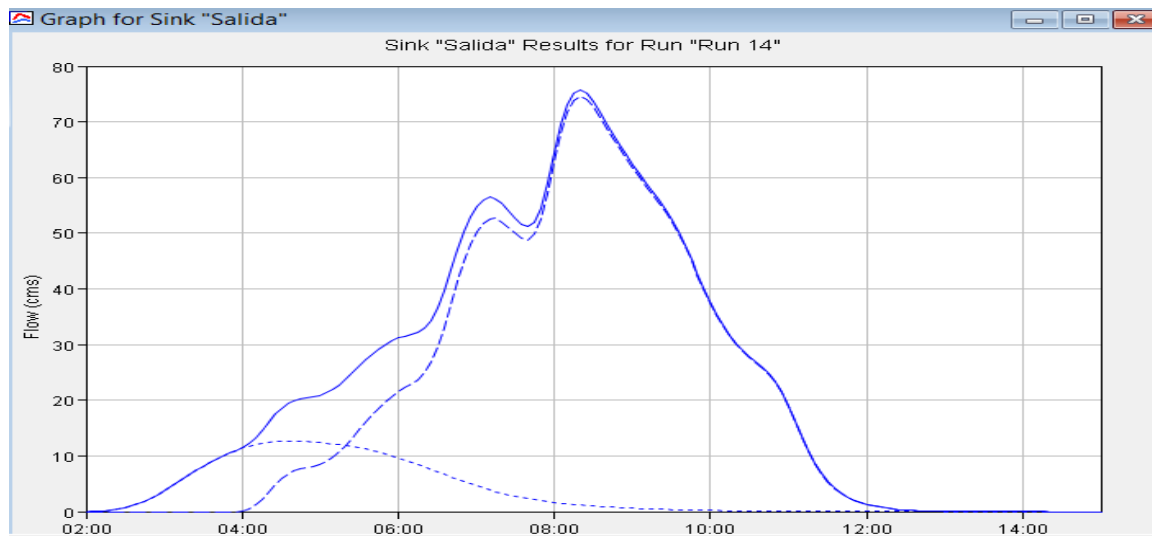


Figura 31: Hidrograma SCS Total para la Cuenca Hidrográfica de Arroyo Grande. Fuente HEC-HMS 2016

La Figura 31 muestra el Hidrograma Total para la Cuenca, en donde se puede observar para un periodo de retorno de 50 años, un caudal pico (Q_p) de 75.8 m³/s adicionalmente tiene una transición de tiempo al momento de presentar el caudal máximo de aproximadamente 120 minutos, esto se puede atribuir a el tiempo que demora en llegar la escorrentia hasta el punto de desembocadura de la cuenca.

5.5 ANÁLISIS HIDRÁULICO

Para la realización del análisis hidráulico en la cuenca, se tuvo en cuenta información secundaria correspondiente a la topografía de las secciones transversales, suministrada por HIDROCONSULTORES LTDA. Se sometieron a estudios 85 secciones, todas en la parte baja del arroyo, en predios de la empresa REFICAR.

5.5.1 Coeficiente de rugosidad Manning.

Para el correcto análisis hidráulico, se calculó la capacidad hidráulica a cada sección del canal con su coeficiente de rugosidad correspondiente (Coef. De Maning, Ver Figura 32), los cuales fueron obtenidos de la Figura con ayuda de fotografías del canal in situ y un análisis lógico del mismo.



Figura 32: Coeficiente de rugosidad de maning.

5.5.2 *Pendiente longitudinal de los cauces*

Para determinar la pendiente longitudinal de los cauces presentes en la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, se tuvo en cuenta la topografía del terreno tomando una sola pendiente uniforme en toda la extensión longitudinal del tramo de la Empresa REFICAR, haciendo la diferencia de alturas entre la cota más alta 12.7 y la más baja -3.24 en una longitud de 4200m, aproximadamente, resultando una pendiente media de 0.00379 en el tramo.

5.5.3 *Geometría de las secciones*

Para determinar la capacidad hidráulica del canal se hace necesario analizar la geometría de las secciones, la cual depende principalmente del área y su radio hidráulico. A continuación se presenta un esquema de las 4 primeras secciones hidráulicas (Ver Figura 33), para mostrar de donde sale la Tabla 22.

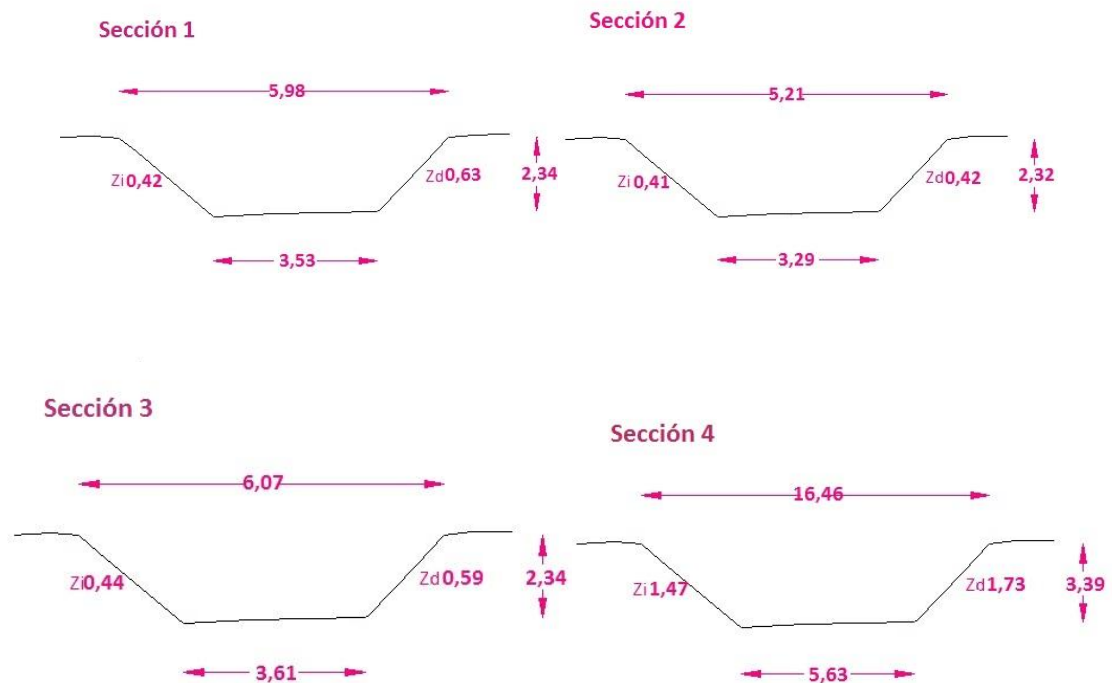


Figura 33: Geometría de las secciones 1, 2, 3 y 4.



5.5.4 Capacidad Hidráulica

Luego de analizar los parámetros hidráulicos de cada sección, se realizaron los cálculos de la capacidad hidráulica del canal, utilizando la ecuación de Manning. Los resultados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22: Capacidad hidráulica de las secciones

	Sección	Zi	Zd	B (m)	H (m)	Y (m)	T (m)	P (m)	A (m ²)	Rh (m)	s	n	Q (m ³ /s)
Enrocado	1	0,42	0,63	3,53	2,34	2,04	5,66	8,13	9,38	1,15	0,0038	0,026	24,43
	2	0,41	0,42	3,29	2,32	2,02	4,96	7,65	8,31	1,09	0,0038	0,026	20,81
	3	0,44	0,59	3,61	2,40	2,10	5,77	8,33	9,84	1,18	0,0038	0,026	26,07
Terreno Natural (Capa vegetal)	4	1,47	1,73	5,63	3,39	3,09	15,50	17,27	32,59	1,89	0,0038	0,035	87,59
	5	1,54	1,68	7,2	3,17	2,87	16,45	18,08	33,94	1,88	0,0038	0,035	90,86
	6	1,78	1,78	6,65	3,25	2,95	17,14	18,68	35,02	1,88	0,0038	0,035	93,73
	7	1,28	1,91	8,6	2,79	2,49	16,53	17,95	31,22	1,74	0,0038	0,035	79,44
	8	2,26	1,76	4,35	2,33	2,03	12,50	13,45	17,06	1,27	0,0038	0,035	35,17
	9	1,62	2,31	6,07	2,54	2,24	14,86	15,94	23,44	1,47	0,0038	0,035	53,36
	10	2,08	1,68	10,1	1,46	1,16	14,47	15,04	14,25	0,95	0,0038	0,035	24,18
	11	1,82	2,79	13,56	2,76	2,46	24,87	25,89	47,17	1,82	0,0038	0,035	123,83
Concreto	12	1,34	1,37	9,42	2,93	2,63	16,52	18,25	34,04	1,87	0,0038	0,015	211,85
	13	1,23	1,34	9,42	2,91	2,61	16,13	17,91	33,28	1,86	0,0038	0,015	206,49
	14	1,26	1,30	9,42	3,06	2,76	16,49	18,38	35,69	1,94	0,0038	0,015	228,06
	15	1,31	1,15	9,43	3,17	2,87	16,50	18,54	37,22	2,01	0,0038	0,015	243,19
	16	1,24	1,31	10,23	2,78	2,48	16,53	18,24	33,12	1,82	0,0038	0,015	202,39
	17	1,21	0,78	10,95	3,19	2,89	16,71	19,11	39,97	2,09	0,0038	0,015	268,41
	18	1,09	1,30	9,33	3,45	3,15	16,86	19,15	41,25	2,15	0,0038	0,015	282,53
Geomalla	19	1,50	1,91	9,44	3,15	2,85	19,14	20,69	40,72	1,97	0,0038	0,018	218,86
	20	1,96	2,05	9,39	3,59	3,29	22,57	24,12	52,57	2,18	0,0038	0,018	302,42
	21	1,98	1,96	9,71	3,66	3,36	22,94	24,55	54,77	2,23	0,0038	0,018	320,07
	22	1,73	1,81	9,51	3,83	3,53	22,00	23,86	55,62	2,33	0,0038	0,018	334,61
	23	1,09	1,39	9,54	3,60	3,30	17,71	20,04	44,96	2,24	0,0038	0,018	263,68
	24	1,56	1,09	9	3,24	2,94	16,79	18,76	37,91	2,02	0,0038	0,018	207,34
Excavado, dragado	25	0,43	0,85	12,38	4,28	3,98	17,49	21,84	59,44	2,72	0,0038	0,029	246,10
	26	1,76	2,69	7,94	4,21	3,91	25,32	27,00	64,95	2,41	0,0038	0,029	247,66
	27	1,36	4,18	0,71	4,51	4,21	23,99	25,46	51,92	2,04	0,0038	0,029	177,37
	28	1,46	2,33	16,38	4,51	4,21	32,30	34,39	102,36	2,98	0,0038	0,029	449,86
	29	0,82	2,97	19,3	6,50	6,20	42,81	45,88	192,53	4,20	0,0038	0,029	1063,95
	30	1,21	1,69	40,85	3,49	3,19	50,10	52,08	145,06	2,79	0,0038	0,029	609,91
	31	0,97	1,26	33,71	4,38	4,08	42,82	45,94	156,11	3,40	0,0038	0,029	749,50
	32	0,65	0,72	17,93	4,78	4,48	24,09	28,80	94,13	3,27	0,0038	0,029	440,26
	33	1,36	1,07	12,72	3,77	3,47	21,14	23,63	58,66	2,48	0,0038	0,029	228,48
	34	1,17	1,10	11,93	3,52	3,22	19,21	21,65	50,06	2,31	0,0038	0,029	185,97
	35	1,08	0,99	11,25	3,41	3,11	17,68	20,19	44,91	2,22	0,0038	0,029	162,54
	36	1,19	0,96	11,04	5,15	4,85	21,49	25,30	78,89	3,12	0,0038	0,029	357,65
	37	0,95	1,24	10,85	3,74	3,44	18,37	21,04	50,19	2,39	0,0038	0,029	190,34
Enrocado	38	1,17	1,43	9,7	3,58	3,28	18,22	20,46	45,79	2,24	0,0038	0,026	185,66
	39	1,03	1,24	9,04	2,89	2,59	14,89	16,86	31,00	1,84	0,0038	0,026	110,21
Terreno Natural (Capa vegetal)	40	1,21	1,56	8,27	4,75	4,45	20,58	23,45	64,11	2,73	0,0038	0,035	220,59
	41	1,03	1,43	6,77	3,64	3,34	14,99	17,36	36,29	2,09	0,0038	0,035	104,43
	42	1,48	1,59	7,2	3,35	3,05	16,55	18,36	36,21	1,97	0,0038	0,035	100,23



Enrocado	43	1,25	1,21	9,72	3,53	3,23	17,66	19,96	44,22	2,22	0,0038	0,026	178,07
	44	1,44	1,21	9,52	3,41	3,11	17,76	19,84	42,42	2,14	0,0038	0,026	166,76
	45	1,21	1,20	9,26	3,61	3,31	17,23	19,62	43,85	2,23	0,0038	0,026	177,54
	46	1,03	1,75	9,72	3,58	3,28	18,85	20,96	46,85	2,24	0,0038	0,026	189,74
	47	1,00	1,13	8,86	4,15	3,85	17,04	20,09	49,85	2,48	0,0038	0,026	216,45
Terreno Natural (Capa vegetal)	48	1,84	3,36	5,72	3,55	3,25	22,61	23,82	46,04	1,93	0,0038	0,035	125,73
	49	1,63	2,75	4,51	4,81	4,51	24,29	26,25	64,95	2,47	0,0038	0,035	209,08
	50	1,88	3,15	5,5	3,12	2,82	19,67	20,74	35,42	1,71	0,0038	0,035	89,06
	51	1,80	1,66	3,59	3,85	3,55	15,89	17,79	34,58	1,94	0,0038	0,035	94,76
	52	1,24	2,47	3,5	3,04	2,74	13,63	15,02	23,43	1,56	0,0038	0,035	55,47
	53	1,63	1,10	4,33	1,56	1,26	7,77	8,59	7,62	0,89	0,0038	0,035	12,38
	54	2,42	2,18	4,11	1,68	1,38	10,46	11,03	10,05	0,91	0,0038	0,035	16,63
	55	2,28	1,40	3,98	4,84	4,54	20,69	22,99	55,99	2,44	0,0038	0,035	178,36
	56	2,34	2,05	4,6	2,78	2,48	15,48	16,55	24,85	1,50	0,0038	0,035	57,33
	57	1,48	2,65	4,67	3,77	3,47	19,01	20,60	41,09	1,99	0,0038	0,035	114,56
	58	1,38	2,30	4,78	4,69	4,39	20,92	23,15	56,34	2,43	0,0038	0,035	179,41
	59	1,12	1,15	7,67	3,82	3,52	15,64	18,30	41,02	2,24	0,0038	0,035	123,65
	60	2,25	1,40	2,56	4,71	4,41	18,66	20,91	46,74	2,23	0,0038	0,035	140,61
	61	2,41	2,25	0,3	4,20	3,90	18,50	20,10	36,67	1,82	0,0038	0,035	96,33
	62	1,72	2,62	4,38	4,12	3,82	20,91	22,58	48,24	2,14	0,0038	0,035	140,79
	63	2,11	2,14	4,45	3,80	3,50	19,34	20,90	41,57	1,99	0,0038	0,035	115,71
	64	2,11	2,06	4,38	3,28	2,98	16,82	18,17	31,58	1,74	0,0038	0,035	80,35
	65	1,14	1,50	5,77	4,16	3,86	15,92	18,51	41,80	2,26	0,0038	0,035	126,60
	66	1,66	1,13	7,23	4,27	3,97	18,29	20,84	50,60	2,43	0,0038	0,035	160,86
	67	1,29	1,55	4,51	3,62	3,32	13,94	16,05	30,63	1,91	0,0038	0,035	82,97
	68	1,31	1,21	4,69	2,64	2,34	10,59	12,22	17,88	1,46	0,0038	0,035	40,54
	69	1,03	1,26	5,74	4,75	4,45	15,93	19,27	48,17	2,50	0,0038	0,035	156,17
	70	0,81	1,27	6,42	4,49	4,19	15,12	18,50	45,12	2,44	0,0038	0,035	143,91
	71	1,68	1,23	4,47	4,38	4,08	16,30	18,83	42,31	2,25	0,0038	0,035	127,74
	72	1,23	1,16	3,36	4,23	3,93	12,78	15,62	31,67	2,03	0,0038	0,035	89,28
	73	0,89	1,18	5,05	4,01	3,71	12,72	15,71	32,91	2,09	0,0038	0,035	94,82
	74	1,24	0,78	4,91	4,25	3,95	12,88	16,12	35,08	2,18	0,0038	0,035	103,68
	75	1,12	1,31	7,77	2,98	2,68	14,29	16,21	29,56	1,82	0,0038	0,035	77,64
	76	1,64	1,26	9,45	3,02	2,72	17,35	19,04	36,45	1,91	0,0038	0,035	98,88
	77	0,81	0,92	8,02	2,50	2,20	11,82	13,83	21,82	1,58	0,0038	0,035	52,05
	78	1,04	0,77	24,89	2,82	2,52	29,43	31,67	68,44	2,16	0,0038	0,035	201,33
	79	1,91	3,13	8,58	3,60	3,30	25,22	26,48	55,77	2,11	0,0038	0,035	161,26
	80	2,77	1,35	4,72	3,69	3,39	18,68	20,24	39,67	1,96	0,0038	0,035	109,32
	81	2,16	1,81	8,23	2,97	2,67	18,83	20,10	36,13	1,80	0,0038	0,035	94,00
	82	2,07	2,09	10,33	2,07	1,77	17,68	18,49	24,79	1,34	0,0038	0,035	53,04
83	1,78	2,12	10,95	1,68	1,38	16,34	17,00	18,83	1,11	0,0038	0,035	35,46	
84	4,23	2,60	5,66	1,71	1,41	15,25	15,65	14,69	0,94	0,0038	0,035	24,78	
85	2,18	1,94	6,35	3,40	3,10	19,10	20,52	39,39	1,92	0,0038	0,035	107,04	

5.5.5 Capacidad Hidráulica máxima de las Estructuras.

En el tramo del Arroyo Grande comprendido entre la vía Variante Mamonal Gambote hasta la Bahía de Cartagena, se encuentran tres estructura hidráulicas sobre el cauce del arroyo. La primera estructura es un box culvert que está ubicado entre la intersección vial de la

Variante Mamonal Gambote y el peaje de Corralito, la segunda estructura hidráulica es un box culvert que está ubicado en los predios internos de Reficar, y la tercera estructura hidráulica es un box culvert ubicado sobre la vía Mamonal.

En la Figura 34 se muestra una imagen con la localización de las estructuras hidráulicas existentes en el arroyo Grande, y en la Tabla 23 se muestra la capacidad hidráulica estimada en cada estructura del arroyo Grande.

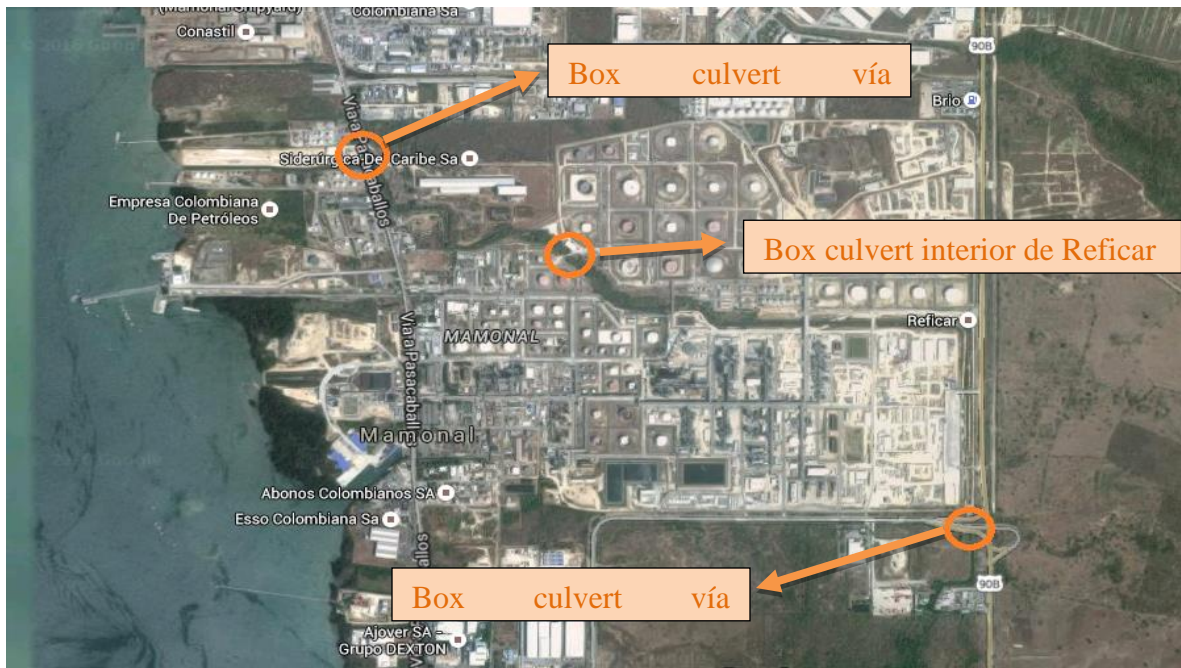


Figura 34: Localización de la Estructuras hidráulicas. Fuente Google Earth

Tabla 23: Capacidad hidráulica máxima de las Estructuras

Box Culvert	Celdas (No.)	Gradiente	B (m)	H (m)	Manning	Y (m)	Pm (m)	AH (m2)	RH (m)	V (m/s)	Q (m3/s)
Vía Corralito	3	0,003	5	3,2	0,017	2,72	10,44	13,60	1,30	3,84	156,79
Interno Reficar	3	0,001	5,4	5,4	0,017	4,59	14,58	24,79	1,70	2,65	197,02
Vía Mamonal	2	0,005	3,8	3	0,017	2,55	8,90	9,69	1,09	4,40	85,31
	3	0,005	2,8	2	0,017	1,70	6,20	4,76	0,77	3,49	49,80

Los resultados de la Tabla 23, han arrojado una capacidad hidráulica máxima para el box culvert de la vía Corralito, en un caudal del orden de 156.79 m³/s, para el box culvert



interno en los predios de Reficar, un caudal máximo del orden de $197.02 \text{ m}^3/\text{s}$, y para el box culvert de la vía Mamonal, un caudal máximo del orden de $135.11 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.6 DETERMINACION DE PUNTOS CRÍTICOS

Después de realizar los análisis meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos de la zona de estudio, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos, determinando de esta manera los lugares donde posiblemente se presentan conflictos, es decir, donde las secciones y/o estructuras hidráulicas existentes en el arroyo no tienen la capacidad hidráulica suficiente para transportar los caudales que se generan en la cuenca.

Para una precipitación con un período de retorno de 50 años en la cuenca del Arroyo Grande le corresponde una descarga máxima de $75.8 \text{ m}^3/\text{s}$, se analizaron las secciones en la Tabla 24, encontrando aquellos puntos en los que se presentan desbordamientos del cauce; para el caso de las estructuras hidráulicas presentadas a lo largo del arroyo se hace la misma comparación con el fin de determinar posibles obstaculaciones que generen represamiento y por ende desbordamiento del cauce.



Tabla 24: Comparación hidráulica e hidrológica (Puntos críticos).

Sección	Q Hidráulico (m3/s)	Q Hidrológico (m3/s)	Sección	Q Hidráulico (m3/s)	Q Hidrológico (m3/s)
1	24,43	75,8	43	178,07	75,8
2	20,81	75,8	44	166,76	75,8
3	26,07	75,8	45	177,54	75,8
4	87,59	75,8	46	189,74	75,8
5	90,86	75,8	47	216,45	75,8
6	93,73	75,8	48	125,73	75,8
7	79,44	75,8	49	209,08	75,8
8	35,17	75,8	50	89,06	75,8
9	53,36	75,8	51	94,76	75,8
10	24,18	75,8	52	55,47	75,8
11	123,83	75,8	53	12,38	75,8
12	211,85	75,8	54	16,63	75,8
13	206,49	75,8	55	178,36	75,8
14	228,06	75,8	56	57,33	75,8
15	243,19	75,8	57	114,56	75,8
16	202,39	75,8	58	179,41	75,8
17	268,41	75,8	59	123,65	75,8
18	282,53	75,8	60	140,61	75,8
19	218,86	75,8	61	96,33	75,8
20	302,42	75,8	62	140,79	75,8
21	320,07	75,8	63	115,71	75,8
22	334,61	75,8	64	80,35	75,8
23	263,68	75,8	65	126,60	75,8
24	207,34	75,8	66	160,86	75,8
25	246,10	75,8	67	82,97	75,8
26	247,66	75,8	68	40,54	75,8
27	177,37	75,8	69	156,17	75,8
28	449,86	75,8	70	143,91	75,8
29	1063,95	75,8	71	127,74	75,8
30	609,91	75,8	72	89,28	75,8
31	749,50	75,8	73	94,82	75,8
32	440,26	75,8	74	103,68	75,8
33	228,48	75,8	75	77,64	75,8
34	185,97	75,8	76	98,88	75,8
35	162,54	75,8	77	52,05	75,8
36	357,65	75,8	78	201,33	75,8
37	190,34	75,8	79	161,26	75,8
38	185,66	75,8	80	109,32	75,8
39	110,21	75,8	81	94,00	75,8
40	220,59	75,8	82	53,04	75,8
41	104,43	75,8	83	35,46	75,8
42	100,23	75,8	84	24,78	75,8
			85	107,04	75,8



En la Tabla 24, se evidencia que parte de las secciones transversales estudiadas no poseen la capacidad suficiente para transportar los caudales que genera la cuenca del Arroyo Grande (15 secciones resaltadas en rojo), un 18% del total de las secciones y la mayoría se encuentran sobre la parte alta y baja de la cuenca. Demostrando que es necesario darle una solución al problema de las inundaciones.

Tabla 25: Comparación hidráulica e hidrológica (Estructuras Hidráulicas).

Box Culvert	Q Hidráulico (m ³ /s)	Q Hidrológico (m ³ /s)
Vía Corralito	156,79	75,8
Interno Reficar	197,02	75,8
Vía Mamonal	135,11	75,8

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 25, no se genera ningún tipo de represamiento en las estructuras hidráulicas existentes a lo largo del cauce del Arroyo Grande, sin embargo se recomienda hacer dragados y/o limpiezas de ramas y árboles caídos aguas arriba de la cuenca periódicamente, esto con el objeto de minimizar los riesgos de represamientos en estas estructuras.

5.7 CREACIÓN DE ESCENARIOS

Para la creación de escenarios se plantearon las siguientes alternativas de solución a la problemática presentada:

5.7.1 Alternativa 1

En esta alternativa se plantea una sección trapezoidal para las secciones transversales que no cumplen la capacidad hidráulica, de base 6,5 m como mínimo y de altura 2,1 m, además del cambio de revestimiento del canal por un enrocado consolidado, esto con el fin de mantener en el canal un coeficiente de rugosidad uniforme aproximada de 0,017 y evitar la socavación y erosión de taludes. Por último garantizar en los taludes la relación 1:2 (V:H);

con todos estos datos se obtiene una capacidad hidráulica de 76.42 m³/s caudal mayor al caudal obtenido del análisis hidrológico 75.8 m³/s. En la Tabla 26 se muestra el cálculo de la capacidad hidráulica en la sección recomendada, en la cual se aplicó la ecuación de Manning para su diseño, ecuación (58), y sobre la Figura 35 como quedaría la sección.

Tabla 26: Sección recomendada

Zi	Zd	B (m)	H (m)	Y (m)	T (m)	P (m)	A (m ²)	Rh (m)	s	n	Q (m ³ /s)
2	2	6,5	2,1	1,8	13,7	14,55	18,18	1,25	0,0038	0,017	76,42

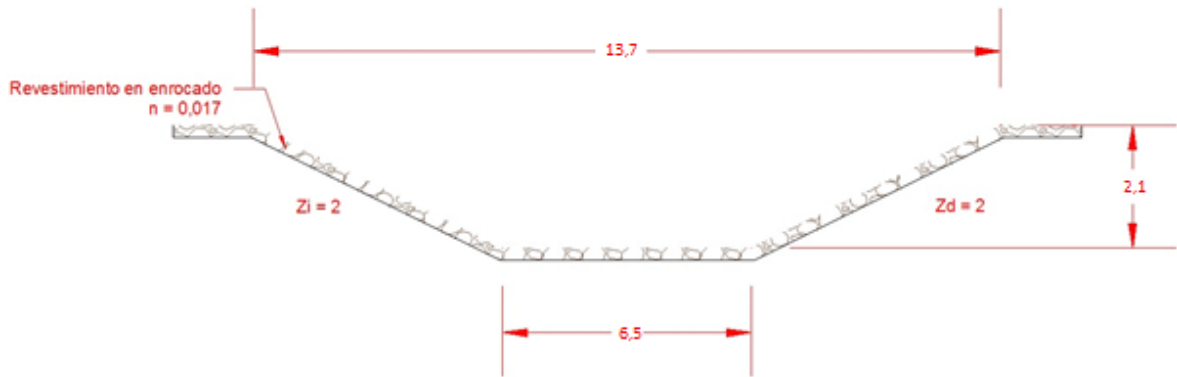


Figura 35: Sección recomendada.

La viabilidad de esta alternativa queda sujeta a factores económicos, disponibilidad de terrenos y permisos oficiales.

5.7.2 Alternativa 2

La alternativa 2 consta de la solución a los problemas de capacidad hidráulica del canal con la construcción de un embalse en las coordenadas 10°18'8.45" de latitud Norte y 75°29'10.68" de longitud Oeste, el cual retendría aproximadamente el 42,21% del caudal de entrada.

Como se muestra en la Figura 36 se propone un embalse con su respectiva localización y características.

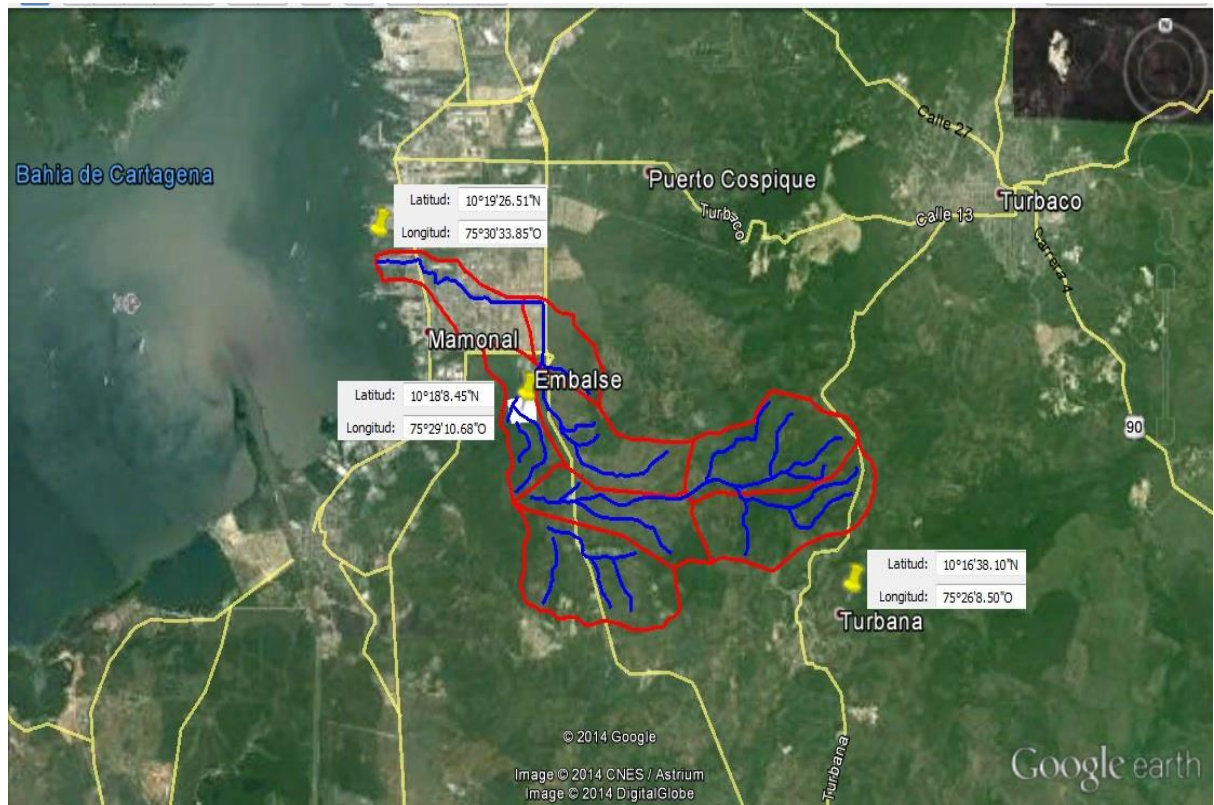


Figura 36: Ubicación de Embalse, Cuenca del Arroyo Grande.

Tabla 27: Características del embalse.

T (Años)	50
C	1,42
b (m)	4
A (Ha)	17

En la Tabla 27, se muestra el acumulado de caudales de entrada al embalse, correspondientes a los caudales de las subcuencas A3, A4, A5, A6, A7 y A8; a partir de estos datos de entrada se calculan la profundidad (h), la diferencia de altura de la lámina de agua (Δh) y el caudal de salida del embalse (Q_s).



Tabla 28: Caudales de entrada y salida de lembalse.

Tiempo (min)	Tiempo (hr)	Qe3	Qe4	Qe5	Qe6	Qe7	Qe8	QeAcum	h	Δh	Qs
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
55	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
65	1,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	1,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
90	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
95	1,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	1,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
105	1,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
110	1,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
115	1,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
120	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
125	2,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
130	2,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
135	2,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
140	2,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
145	2,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
150	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
155	2,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
160	2,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
165	2,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
170	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
175	2,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
180	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
185	3,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
190	3,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
195	3,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	3,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
205	3,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
210	3,50	0,18	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00
215	3,58	0,58	1,31	0,00	0,00	0,00	0,00	1,89	0,01	0,01	0,00
220	3,67	0,98	2,21	0,00	0,00	0,00	0,00	3,19	0,01	0,01	0,01



Tiempo (min)	Tiempo (hr)	Qe3	Qe4	Qe5	Qe6	Qe7	Qe8	QeAcum	h	Δh	Qs
225	3,75	1,38	3,11	0,00	0,00	0,00	0,00	4,49	0,03	0,02	0,03
230	3,83	1,78	4,01	0,00	0,00	0,00	0,00	5,79	0,05	0,02	0,06
235	3,92	2,18	4,91	0,00	0,00	0,00	0,00	7,10	0,07	0,03	0,10
240	4,00	2,58	5,81	0,00	0,00	0,00	0,00	8,40	0,10	0,03	0,17
245	4,08	2,98	6,71	0,00	0,00	0,00	0,00	9,70	0,13	0,04	0,26
250	4,17	3,38	7,62	0,00	0,00	0,00	0,00	11,00	0,16	0,04	0,38
255	4,25	3,78	8,52	0,00	0,00	0,00	0,00	12,30	0,21	0,04	0,53
260	4,33	4,18	9,42	0,00	0,00	0,00	0,00	13,60	0,25	0,05	0,71
265	4,42	4,59	10,32	0,00	0,00	0,00	0,00	14,90	0,30	0,05	0,93
270	4,50	4,99	11,22	0,00	0,00	0,00	0,00	16,20	0,35	0,06	1,19
275	4,58	5,39	10,72	0,00	0,00	0,00	0,00	16,10	0,41	0,05	1,48
280	4,67	5,79	10,18	0,00	0,00	0,00	0,00	15,97	0,46	0,05	1,79
285	4,75	6,13	9,64	0,00	0,00	0,00	0,00	15,77	0,52	0,05	2,10
290	4,83	5,89	9,10	0,00	0,00	0,00	0,00	14,99	0,57	0,05	2,42
295	4,92	5,65	8,56	0,00	0,00	0,00	0,00	14,21	0,61	0,04	2,73
300	5,00	5,41	8,02	0,00	0,00	0,00	0,00	13,43	0,66	0,04	3,03
305	5,08	5,17	7,48	0,00	0,00	0,00	0,00	12,65	0,70	0,04	3,32
310	5,17	4,93	6,94	0,00	0,00	0,00	0,00	11,87	0,74	0,03	3,59
315	5,25	4,69	6,40	0,00	0,00	0,00	0,00	11,09	0,77	0,03	3,84
320	5,33	4,45	5,86	0,00	0,00	0,00	0,00	10,31	0,80	0,03	4,07
325	5,42	4,21	5,32	0,00	0,00	0,00	0,00	9,53	0,83	0,02	4,29
330	5,50	3,97	4,78	0,00	0,00	0,00	0,00	8,75	0,85	0,02	4,48
335	5,58	3,73	4,25	0,00	0,00	0,00	0,00	7,98	0,88	0,03	4,66
340	5,67	3,49	3,71	1,58	2,22	0,00	0,00	10,99	0,90	0,04	4,86
345	5,75	3,25	3,17	3,26	4,58	0,00	0,00	14,25	0,94	0,05	5,15
350	5,83	3,01	2,63	4,94	6,93	0,00	0,00	17,51	0,98	0,06	5,55
355	5,92	2,77	2,09	6,62	9,29	0,00	0,00	20,77	1,04	0,07	6,04
360	6,00	2,53	1,55	8,30	11,65	0,00	0,00	24,04	1,11	0,08	6,65
365	6,08	2,29	1,01	9,98	14,01	0,00	0,00	27,30	1,19	0,09	7,37
370	6,17	2,05	0,47	11,67	16,37	0,00	0,00	30,56	1,28	0,10	8,21
375	6,25	1,81	0,00	12,97	18,73	0,00	0,00	33,51	1,38	0,10	9,18
380	6,33	1,57	0,00	11,96	18,15	0,00	0,00	31,68	1,48	0,09	10,19
385	6,42	1,33	0,00	10,96	16,73	0,00	0,00	29,03	1,57	0,08	11,13
390	6,50	1,09	0,00	9,95	15,32	0,00	0,00	26,37	1,64	0,07	11,97
395	6,58	0,85	0,00	8,95	13,91	0,00	0,00	23,71	1,71	0,06	12,71
400	6,67	0,61	0,00	7,94	12,50	0,00	0,00	21,05	1,77	0,06	13,35
405	6,75	0,37	0,00	6,93	11,08	2,76	3,58	24,73	1,83	0,07	14,01
410	6,83	0,13	0,00	5,93	9,67	5,76	7,48	28,97	1,90	0,08	14,82
415	6,92	0,00	0,00	4,92	8,26	8,77	11,37	33,32	1,98	0,10	15,81
420	7,00	0,00	0,00	3,91	6,85	11,77	15,27	37,80	2,08	0,11	17,00
425	7,08	0,00	0,00	2,91	5,43	14,78	19,16	42,28	2,19	0,12	18,38
430	7,17	0,00	0,00	1,90	4,02	17,78	19,08	42,78	2,31	0,11	19,88
435	7,25	0,00	0,00	0,89	2,61	18,68	16,75	38,93	2,41	0,09	21,31
440	7,33	0,00	0,00	0,00	1,20	16,88	14,41	32,49	2,50	0,07	22,49
445	7,42	0,00	0,00	0,00	0,00	15,08	12,08	27,16	2,57	0,05	23,38
450	7,50	0,00	0,00	0,00	0,00	13,28	9,75	23,03	2,62	0,03	24,03
455	7,58	0,00	0,00	0,00	0,00	11,48	7,42	18,90	2,65	0,02	24,47
460	7,67	0,00	0,00	0,00	0,00	9,68	5,08	14,77	2,66	0,00	24,70
465	7,75	0,00	0,00	0,00	0,00	7,88	2,75	10,63	2,67	-0,01	24,72
470	7,83	0,00	0,00	0,00	0,00	6,08	0,42	6,50	2,65	-0,02	24,54
475	7,92	0,00	0,00	0,00	0,00	4,29	0,00	4,29	2,63	-0,03	24,21
480	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,49	0,00	2,49	2,60	-0,04	23,80
485	8,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,00	0,69	2,56	-0,04	23,30
490	8,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,52	-0,04	22,77
495	8,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,48	-0,04	22,23
500	8,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,44	-0,04	21,72



Tiempo (min)	Tiempo (hr)	Qe3	Qe4	Qe5	Qe6	Qe7	Qe8	QeAcum	h	Δh	Qs
505	8,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,41	-0,04	21,21
510	8,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,37	-0,04	20,73
515	8,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,33	-0,04	20,25
520	8,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,30	-0,03	19,79
525	8,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,26	-0,03	19,35
530	8,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,23	-0,03	18,92
535	8,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,20	-0,03	18,50
540	9,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,17	-0,03	18,09
545	9,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,13	-0,03	17,70
550	9,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,10	-0,03	17,32
555	9,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,07	-0,03	16,94
560	9,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,04	-0,03	16,58
565	9,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	-0,03	16,23
570	9,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,99	-0,03	15,89
575	9,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,96	-0,03	15,56
580	9,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,93	-0,03	15,24
585	9,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,90	-0,03	14,92
590	9,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,88	-0,03	14,62
595	9,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,85	-0,03	14,32
600	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,83	-0,02	14,03
605	10,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,80	-0,02	13,75
610	10,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,78	-0,02	13,47
615	10,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,76	-0,02	13,21
620	10,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,73	-0,02	12,95
625	10,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,71	-0,02	12,70
630	10,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,69	-0,02	12,45
635	10,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	-0,02	12,21
640	10,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,64	-0,02	11,98
645	10,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,62	-0,02	11,75
650	10,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	-0,02	11,53
655	10,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,58	-0,02	11,31
660	11,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,56	-0,02	11,10
665	11,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,54	-0,02	10,89
670	11,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,52	-0,02	10,69
675	11,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,51	-0,02	10,49
680	11,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,49	-0,02	10,30
685	11,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,47	-0,02	10,12
690	11,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,45	-0,02	9,93
695	11,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,43	-0,02	9,76
700	11,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,42	-0,02	9,58
705	11,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40	-0,02	9,41
710	11,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,38	-0,02	9,25
715	11,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,37	-0,02	9,09
720	12,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,35	-0,02	8,93
725	12,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	-0,02	8,77
730	12,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,32	-0,02	8,62
735	12,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,31	-0,01	8,48
740	12,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,29	-0,01	8,33
745	12,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,28	-0,01	8,19
750	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,26	-0,01	8,05
755	12,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25	-0,01	7,92
760	12,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,23	-0,01	7,79
765	12,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,22	-0,01	7,66
770	12,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	-0,01	7,53
775	12,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,19	-0,01	7,41
780	13,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18	-0,01	7,29
785	13,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,17	-0,01	7,17
790	13,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,16	-0,01	7,06
795	13,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,14	-0,01	6,94
800	13,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	0,06	6,83

De la Tabla 28 se obtiene un caudal máximo de entrada (Q_e), igual al aporte de caudal hecho por las subcuencas anteriormente mencionadas; el caudal de salida (Q_s) y el cambio de altura de la lámina de agua (Δh).

Posteriormente se determinó el porcentaje de regulación del embalse, presentados en la Tabla 29.

Tabla 29: Caudales de entrada y salida del embalse.

Q_e Max (m ³ /s)	42,78
Q_s Max (m ³ /s)	24,72
Regulación (%)	57,79

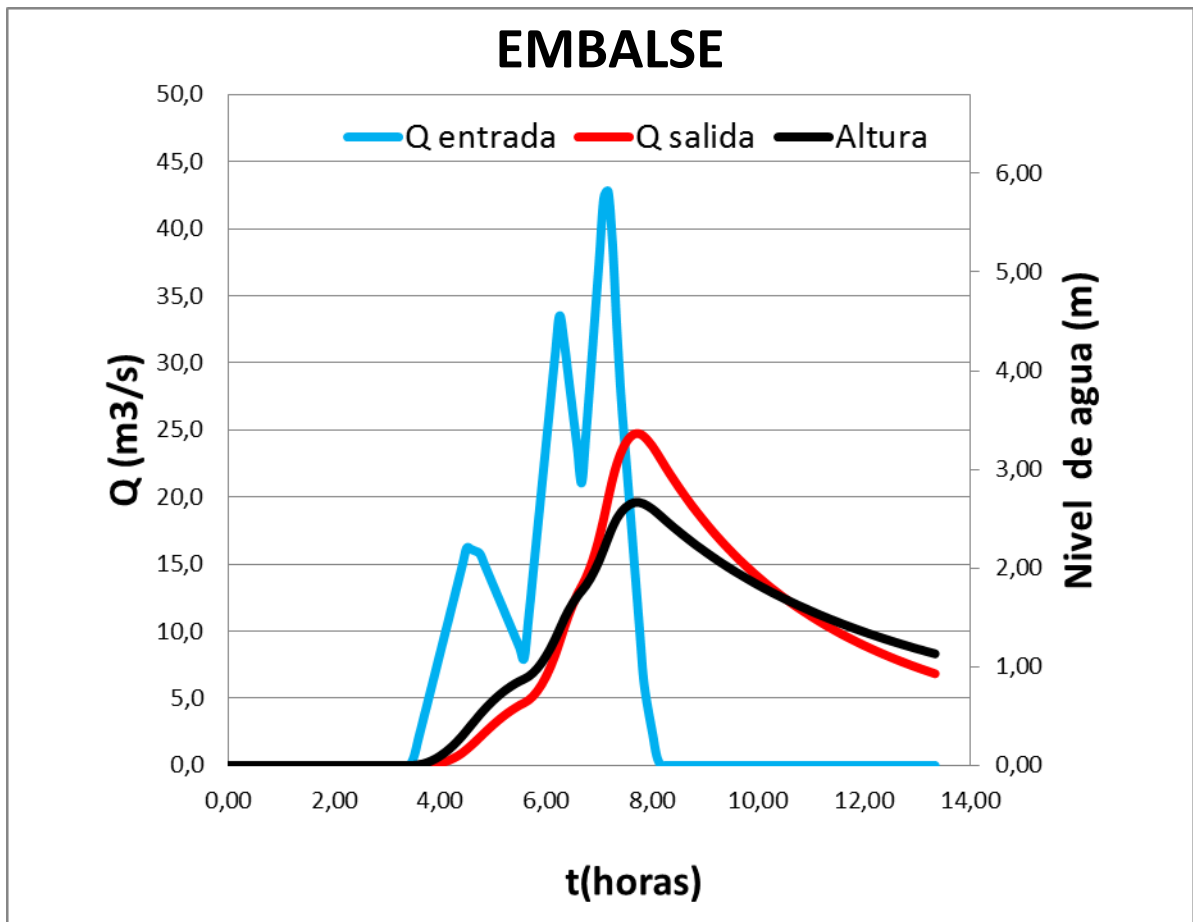


Figura 37: Hidrograma de entrada y salida, y profundidad del embalse. Cuenca del Arroyo Grande

En la Figura 37 se puede observar que la estructura del embalse, recibe un caudal máximo de $42,78 \text{ m}^3/\text{s}$ en un tiempo de aproximadamente 7,10 h; mientras que el caudal de salida después de la amortiguación es igual a $24,72 \text{ m}^3/\text{s}$ en un tiempo aproximado de 13,33 h y con una altura de embalse de 2,67 m.

Luego de realizar los cálculos de diseño, se llegó a un embalse con las siguientes características:

Tabla 30: Características del embalse.

Vol. Útil (m ³)	Vol. Muerto 20% (m ³)	Vol. Total (m ³)	h (m)	Talud	h Total (m)
459000	91800	550800	2,7	1:2	3,2

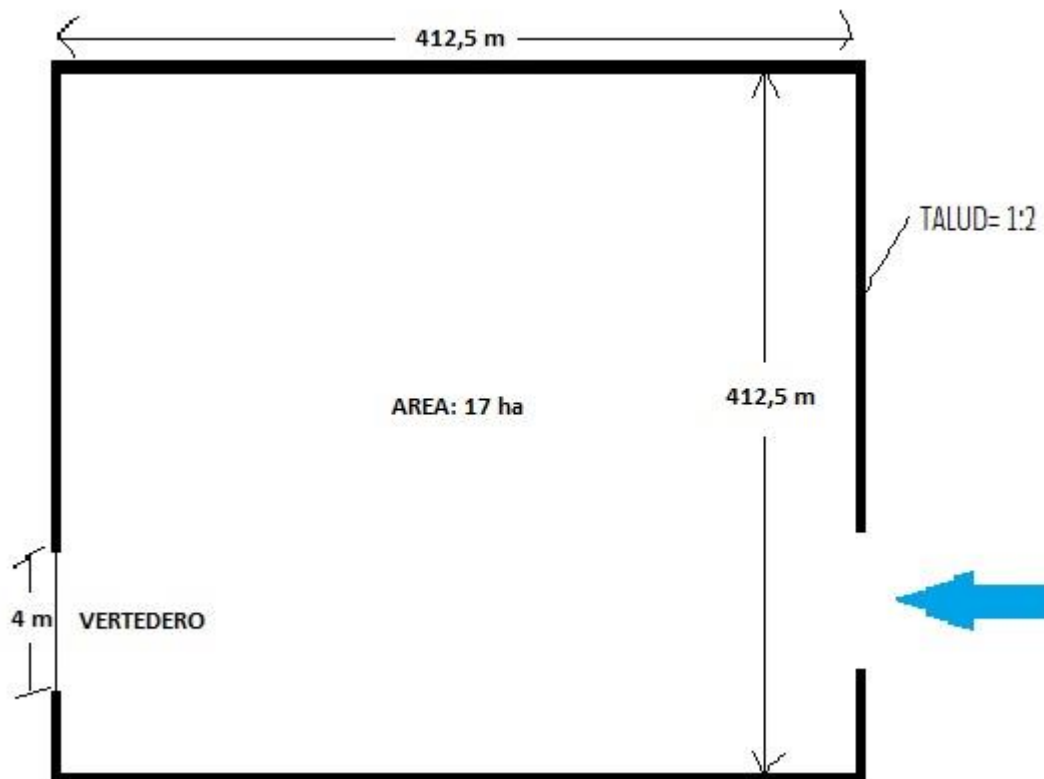


Figura 38: Esbozo de embalse, para amortiguación de caudal.

En la Figura 38, se muestra un esquema representativo del embalse propuesto.



5.7.3 Alternativa más adecuada.

Luego de realizar un análisis de las alternativas anteriormente planteadas, se llegó a la conclusión que las dos son factibles de ejecutar hidrológica e hidráulicamente, llevándonos con esto a realizar una evaluación de la zona de estudio, en donde influyen otros factores, como lo son el factor espacial y monetario.

En el caso de la alternativa 1, se propuso cambiar las secciones del canal que no garantizaban la capacidad hidráulica, a una sección que si lo haría, implementando en ella mejores dimensiones y un nuevo recubrimiento que garantice no solo dicha capacidad hidráulica, sino, también una estabilización de taludes a lo largo del canal.

Si se analiza la alternativa 1 en el entorno de organización del espacio, propone una utilización del terreno de las grandes industrias del sector relativamente bajo, caso contrario a la solución propuesta por la alternativa 2. Por otro lado al valorar la inversión que se requiere en obra civil, para garantizar la sección propuesta, contra el gasto en obra civil que genera la alternativa 2 es relativamente alto, un claro ejemplo sería la cantidad de volumen de excavación que se tendría que hacer para concebir el embalse.

Con todo lo anteriormente planteado definimos como nuestra alternativa solución a la alternativa 1, basándonos en lo más crucial que es la utilización del espacio y el gasto de ejecución de la solución, con esto, está más que dicho que la alternativa que menos utilización de espacio y menos gasto nos generaría sería indiscutiblemente la alternativa 1.



6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Con ayuda del programa Global Mappers y estudios topográficos y altimétricos de la zona se delimitó la cuenca y se determinaron las vertientes que la alimenta; a partir de esto se realizó un análisis para determinar las características morfológicas de la cuenca, arrojando las siguientes conclusiones: La cuenca del Arroyo Grande tiene un área aproximada de 1811 ha, con una pendiente media de 0.37% y una longitud del cauce principal de 13,4 km.

Al realizar la fotointerpretación de la Cuenca del Arroyo Grande mediante imágenes de Google Earth de los años 2007, 2011 y 2013, se evidenció una expansión de la intervención antrópica y/o industrial, generando un desvío en el cauce principal (Ver Figura 16), y a su vez se modificaron los coeficientes de escorrentía, agravando los problemas de inundación en la zona.

A partir de los datos de precipitación máxima anual de las 7 estaciones meteorológicas (Aeropuerto Rafael Núñez, Cañaveral, Santa Ana, Escuela Naval, Bayunca, Sincerín y Arjona), cercanas a la cuenca del Arroyo Grande, se efectuó un completo análisis hidrometeorológico, determinado por medio del método del polígono de Thiessen, aclarando que debido a la lejanía de las estaciones solo tuvieron influencia sobre la cuenca las estaciones de Escuela Naval, Santa Ana y Arjona, con las cuales se llegó a la conclusión que la precipitación máxima presentada en la cuenca se dio en el año 1997 con una magnitud aproximada de 138 mm/año, mientras que la mínima precipitación se llevó a cabo en 1976 con 55 mm/año aproximadamente.

Una vez determinados los ramales de la cuenca del Arroyo Grande, esta se dividió en 8 subcuencas, con el fin de aplicar el método de la Velocidad (solo es eficaz para áreas menores a 500 ha), a las cuales se le realizaron sus respectivas caracterizaciones morfológicas. Como resultado de este procedimiento se obtuvo la ecuación de intensidad



característica de la zona (Ver ecuación 60), con la que se calcularon los caudales máximos y los hidrogramas de cada subcuenca para cada periodo de retorno, obteniendo una escorrentía máxima de $75,8 \text{ m}^3/\text{s}$ para toda la cuenca.

Para la realización del análisis hidráulico, se tuvieron en cuenta 85 secciones diferentes del canal principal que atraviesa la Empresa Reficar, el cual pertenece al cauce principal de la Cuenca del Arroyo Grande y es el punto que presenta mayores conflictos de inundación en la zona. Con este análisis se determinó la capacidad hidráulica del canal, dejando evidencia de 15 secciones críticas o incapaces de transportar el caudal máximo probable generado en la cuenca (un 18% del total de las secciones). Por otra parte el análisis hidráulico realizado a las estructuras existentes a lo largo del cauce, el box culvert de la vía al peaje Corralito, el box culvert en el interior de la empresa REFICAR y el box culvert de la Vía a Mamonal evidencian capacidades hidráulicas máximas de $156.79 \text{ m}^3/\text{s}$, $197.02 \text{ m}^3/\text{s}$ y $135.11 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, lo que nos dice claramente que los box culvert tienen un funcionamiento hidráulico eficiente.

Hecho el análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del Arroyo Grande, se plantearon dos alternativas de solución para la mitigación de las inundaciones en la zona de estudio.

La alternativa 1, consiste en modificar las secciones en conflicto a una sección ideal propuesta por los investigadores la cual tiene las siguientes magnitudes: base (B) de 6,5 m, altura (h) de 2,1 m, taludes de proporción 1:2 (V:H), adicional a esto, esta sección debe contar con un recubrimiento en Enrocado Confinado, para mejorar el coeficiente de rugosidad de las secciones críticas y que sirva de estabilización de taludes.

La alternativa 2, plantea la construcción de un embalse con área de 17 ha con una profundidad de 4 m y con un vertedero para transición de 2 m. esto con el fin de hacer una retención del caudal de descarga de aproximadamente el 42,2% y dejando un caudal de salida de $24,7 \text{ m}^3/\text{s}$, generando así que las secciones existentes sean suficientes para transportar esta descarga hacia la Bahía.



Se llegó a la conclusión de la escogencia de la alternativa 1, porque viendo las pocas opciones de espacio que se tienen, en un lugar de donde se puede afirmar que la compra de predios de una vasta extensión de área (17 ha), refiriéndonos a lo que nos lleva la implementación de la alternativa 2, no es lo que podría estar a la mano, esto es económicamente hablando, ahora viendo la magnitud de las obras con las cuales se ejecutaría esta alternativa no se compara con la solución que plantea la alternativa 1 (alternativa solución).



6.2 RECOMENDACIONES

Como primera recomendación, se propone evaluar a profundidad la escogencia de las alternativas, haciendo un análisis de costo-beneficio, aplicando APU's como herramienta.

Se recomienda actualizar la base de datos de los registros de precipitación de las estaciones hasta el 2016, para tener al futuro un mejor análisis de la información y llegar a mejores conclusiones y/o soluciones.

Es indispensable ejecutar proyectos de formación constructiva a la población, para con esto darles a conocer como el uso del suelo cambia drásticamente al aporte de las inundaciones, ayudándolas a encontrar soluciones que mejoren la permeabilidad del suelo. De igual forma hacerle ver a las industrias del problema de la permeabilidad, para que efectúen correctivos.

Llegando a la conclusión que para aliviar las inundaciones, se hace necesario mejorar los coeficientes de escorrentía, entonces se pueden crear planes de reforestación sobre la parte alta y media de la cuenca por parte de los entes reguladores.

Lograr una mejor conciencia social para las industrias y la población de la cuenca hidrográfica del Arroyo Grande, evitando el problema de las basuras que ocasionan taponamientos, además de evaluar constantemente la limpieza del canal para mejorar su capacidad hidráulica.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alcaldia de Cartagena de Indias. (2010). *Plan Maestro de Drenaje Pluvial*.

Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*.

Arrieta Peña, U. E., & Morales Simanca, J. E. (2012). Diseño conceptual de un embalse de retención (humedal artificial) como alternativa de mitigación a las inundaciones en el municipio de Turbaco. *Trabajo de Grado*.

Arrieta, A. (2012). *Hidrología Práctica Para Ingenieros*. Cartagena.

Azagra, M. d. (2006). *Metodos de los coeficientes de escurrentçia*.

Bateman, A. (2007). Hidrología Básica y Aplicada. *Grupo de Investigación y Transporte de Sedimentos (GITS)*, UPC www.gits.ws.

Beltrán Mielles, A. E., & Manchego Muñoz, M. A. (2012). Evaluación del uso del suelo en los planes de ordenamiento territorial y su incidencia en los planes de manejo ambiental de humedales. *Trabajo de Grado*.

Bolívar, M., & Ghang, G. (1997). *Establecimiento de las relaciones entre las precipitaciones de 24 horas y las precipitaciones de diferente dirección Pt para la estación del aeropuerto Rafael Nuñez*. Cartagena.

Carciente, J. (1980). Carreteras- estudio y proyecto. Vega.

Carder. (2006). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Otúm.



Cardique. (2000-2009). *Plan de Ordenamiento Territorial, Cartagena de Indias Distrito Turístico y Cultural*.

Chen, J., Hill, A., & Urbano, L. (2009). A GIS-Based Model for Urban Flood Inundation.

Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW-HILL, Inc.

Chow, V. T. (s.f.). *Hidráulica de Canales Abiertos*.

Decreto No. 0977. Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias. (2001).

El Universal. (1 de Diciembre de 2010). Puente del caño Casimiro.

EYPO Ingeniería. (2010). *Hidrología y red pluviales*.

García Narváez, M. B., & Díaz Herazo, E. R. (1996). *Bases para el ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica que atraviesa la vía a Mamonal*. Cartagena.

HIDROCONSULTORES. (2011). *Revisión técnica de la hidrología e hidráulica del Arroyo Grande de la Refinería de Cartagena*. Cartagena.

Ibañez Asensio, S., Moreno Ramon, H., & Gisbert Blanquer, J. (s.f.). *Metodos para la determinacion del tiempo de concentracion (tc) de una cuenca hidrografica*.

Ibañez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2005). *Métodos para la determinacion del tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica*. Valencia.

Ingeniería, E. (2010). *Hidrología y red pluviales*.



Martinez Lavalle, J. J., & Olivo Bustillo, C. D. (2012). Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca hidrógrafa del arroyo "Casimiro" para mitigar o prevenir las inundaciones que se presentan en su entorno. *Trabajo de Grado*.

Meisel Roca, A., & Aguilera Díaz, M. (2004). La economía de Cartagena y los beneficios de la apertura.

Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR.

Resolución No. 1096 de 17 de Noviembre, RAS. (2000).

Ruiz, J. (2001). *La morfometría de cuencas como aplicación*. Barinas, Venezuela: UNELLEZ.

Schmidth. (1986). *Calculo de caudales maximos utilizando el metodo racional*.

Tapia, J. A., & Torres, A. (2008). Diagnóstico de la situación ambiental de la cuenca hidrográfica del arroyo San Jacinto en el Municipio de San Jacinto.

Tecnología Carreteras MOPU. (1987). *Calculo hidrometeorologico de caudales maximos en pequeñas cuencas naturales*.

Visión Mundial Canadá. (2004). *Manual de Manejo de Cuencas*. El Salvador.