



ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA COBERTURA

VEGETAL EN LOS CAUDALES DE ESCORRENTÍA DE LA CUENCA DEL ARROYO

GUAYEPO

ANGELA MARÍA MORENO PÁJARO

ALDHAIR OSORIO GASTELBONDO

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

2021



**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA COBERTURA
VEGETAL EN LOS CAUDALES DE ESCORRENTÍA DE LA
CUENCA DEL ARROYO GUAYEPO**



**TRABAJO DE GRADO
PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:
HIDRÁULICA Y MANEJO AMBIENTAL COSTERO (GIHMAC)**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y DRENAJE URBANO EN ZONA
COSTERA**

**INVESTIGADORES:
ANGELA MARÍA MORENO PÁJARO
ALDHAIR OSORIO GASTELBONDO**

**DIRECTOR(A):
DALIA ASTRID MORENO EGEL**

**ASESOR (A):
KELLY JOHANA BABILONIA FRANCO**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

2021

Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía de la cuenca del arroyo Guayepo



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

ACEPTACIÓN



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por brindarme la fortaleza para intentarlo cada día, a nuestra directora de trabajo de grado, Dalia Moreno Egel y a nuestra asesora Kelly Babilonia Franco por aportar su conocimiento y dedicación siempre. A mi familia por su amor y apoyo incondicional. A mi compañero de trabajo de grado por su comprensión y paciencia.

–Angela Moreno

Primeramente, a Dios, por darme la oportunidad de cumplir un sueño más en mi vida. A mi familia, mi padre Edwin Osorio y mi madre Ledys Gastelbondo, por su amor, comprensión y apoyo absoluto. A los docentes y compañeros de estudio, que aportaron su granito de arena para mi formación como profesional y en especial, a nuestra directora de trabajo de grado Dalia Moreno, por su dedicación y compromiso desde el primer día. A nuestra asesora de trabajo de grado, Kelly Babilonia, por su ayuda imprescindible. A mi compañera y amiga de carrera y trabajo de grado, por ser un pilar fundamental en mi formación profesional.

–Aldhair Osorio



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO DE REFERENCIA.....	4
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	4
2.2. ANTECEDENTES	8
2.3. MARCO TEÓRICO.....	9
2.3.1. <i>Ciclo hidrológico</i>	9
2.3.2. <i>Precipitación</i>	10
2.3.2.1. Curva intensidad-duración-frecuencia	11
2.3.2.2. Método del bloque alterno	12
2.3.3. <i>Cuenca u hoya hidrográfica</i>	12
2.3.3.1. Área de drenaje.....	13
2.3.3.2. Forma de la hoya	13
2.3.3.3. Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad Kc	13
2.3.3.4. Factor de forma Kf	13
2.3.3.5. Densidad de drenaje.....	14
2.3.3.6. Sinuosidad de una corriente de agua.....	14
2.3.3.7. Pendiente de la cuenca.....	14
2.3.4. <i>Infiltración</i>	15
2.3.5. <i>Escorrentía</i>	15
2.3.6. <i>Tiempo de concentración</i>	15
2.3.7. <i>Método racional</i>	17
2.3.8. <i>Método del número de curva del SCS</i>	19
2.3.9. <i>Hidrograma unitario</i>	20
2.3.10. <i>Cobertura vegetal</i>	21
2.3.11. <i>Fotointerpretación</i>	21
2.3.12. <i>Geoportales</i>	21
2.3.12.1. Portal del IGAC	22
2.3.12.2. Portal del USGS.....	22
2.3.12.3. Portal SIAC	22
2.3.13. <i>Software HEC-HMS</i>	22
3. OBJETIVOS.....	24



3.1.	OBJETIVO GENERAL	24
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
4.	ALCANCE	25
4.1.	DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	25
4.2.	DELIMITACIÓN TEMPORAL	25
4.3.	DELIMITACIÓN CONCEPTUAL	25
4.4.	RESULTADOS Y PRODUCTOS A ENTREGAR	26
4.5.	PRODUCTOS COMPLEMENTARIOS Y EXCEPCIONES	26
5.	METODOLOGÍA	28
5.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO	28
5.1.1.	<i>Recopilación de datos topográficos</i>	<i>29</i>
5.1.2.	<i>Delimitación de la cuenca</i>	<i>29</i>
5.1.3.	<i>Cálculo de parámetros morfométricos</i>	<i>29</i>
5.1.4.	<i>Geomorfología de la cuenca</i>	<i>30</i>
5.2.	RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS HIDROLÓGICOS	30
5.2.1.	<i>Recopilación de registros de lluvias</i>	<i>30</i>
5.2.2.	<i>Cálculo de curvas IDF</i>	<i>31</i>
5.2.3.	<i>Determinación de los periodos de retorno</i>	<i>31</i>
5.2.4.	<i>Cálculo de hietograma de diseño</i>	<i>31</i>
5.3.	EVALUACIÓN DE COBERTURA VEGETAL	31
5.3.1.	<i>Evaluación de la cobertura vegetal en los años 2000 y 2010</i>	<i>31</i>
5.3.2.	<i>Evaluación de cobertura vegetal en el año 2019</i>	<i>32</i>
5.3.3.	<i>Coficiente de escorrentía y número de curva</i>	<i>32</i>
5.4.	CÁLCULO DE ESCORRENTÍA	33
5.4.1.	<i>Cálculo de escorrentía con el Método Racional</i>	<i>33</i>
5.4.2.	<i>Cálculo de escorrentía por la modelación HEC-HMS</i>	<i>33</i>
5.5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	34
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
6.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	35
6.1.1.	<i>Parámetros morfométricos de la cuenca</i>	<i>39</i>
6.1.1.1.	<i>Índice de Gravelius o compacidad</i>	<i>39</i>
6.1.1.2.	<i>Factor de forma</i>	<i>40</i>
6.1.1.3.	<i>Densidad del drenaje</i>	<i>40</i>
6.1.1.4.	<i>Sinuosidad de la corriente</i>	<i>40</i>



6.1.2.	<i>Tiempo de concentración</i>	41
6.1.2.1.	Tiempo de concentración por Kirpich (1940)	41
6.1.2.2.	Tiempo de concentración por California Culverts Practice (1942)	42
6.1.2.3.	Tiempo de concentración por Bransby – Williams	42
6.1.2.4.	Tiempo de concentración promedio	42
6.1.3.	<i>Geomorfología de la cuenca</i>	43
6.1.3.1.	Perfil BL-49 (Suelos Typic Ustropepts)	44
6.1.3.2.	Perfil BL-152 (Suelos Fluventic Ustropepts)	44
6.1.3.3.	Perfil PZ-3 (Suelos Sodic Haplusterts)	45
6.1.3.4.	Definición del grupo hidrológico	45
6.1.3.5.	Determinación de la permeabilidad del suelo	46
6.2.	RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS HIDROLÓGICOS	46
6.2.1.	<i>Registro de precipitaciones</i>	47
6.2.2.	<i>Distribución de probabilidad de Gumbel</i>	48
6.2.3.	<i>Cálculo de precipitaciones</i>	49
6.2.4.	<i>Obtención de los coeficientes k, m y n</i>	51
6.2.5.	<i>Determinación de periodos de retorno para el análisis</i>	54
6.2.6.	<i>Cálculo del hietograma por el método del bloque alterno</i>	55
6.3.	ANÁLISIS DE LA COBERTURA VEGETAL	57
6.3.1.	<i>Análisis por años</i>	57
6.3.1.1.	Año 2000	57
6.3.1.2.	Año 2010	59
6.3.1.3.	Año 2019	61
6.3.1.4.	Análisis para todos los años	63
6.3.2.	<i>Análisis por subcuencas</i>	65
6.3.3.	<i>Cálculo del coeficiente de escorrentía</i>	69
6.3.4.	<i>Cálculo del número de curva</i>	70
6.4.	CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA	73
6.4.1.	<i>Cálculo de la escorrentía con el método racional</i>	74
6.4.1.1.	Cálculo de caudales para las microcuencas 1 a 6	74
6.4.1.2.	Escorrentía total para el año 2000 y periodo de retorno de 25 años	83
6.4.1.3.	Comparación de caudales	85
6.4.2.	<i>Modelación con HEC-HMS</i>	87
6.4.3.	<i>Comparación de caudales por los dos métodos</i>	97
7.	CONCLUSIONES	98
8.	RECOMENDACIONES	101

Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía de la cuenca del arroyo Guayepo



9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS102

10. ANEXO.....107

ANEXO A107



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CICLO HIDROLÓGICO	10
FIGURA 2. CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF).	11
FIGURA 3. NUMERO DE CURVA	20
FIGURA 4. HIDROGRAMA TRIANGULAR SINTÉTICO DEL SCS	21
FIGURA 5. ESQUEMA DE METODOLOGÍA	28
FIGURA 6. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA DEL ARROYO GUAYEPO Y SU CAUCE PRINCIPAL	35
FIGURA 7. SUBCUENCAS DEL ARROYO GUAYEPO Y DRENAJES	36
FIGURA 8. ÁREA DE LA CUENCA DEL ARROYO GUAYEPO CONSIDERA PARA ANÁLISIS DE COBERTURA VEGETAL Y ESCORRENTÍA.....	37
FIGURA 9. SUBCUENCAS DE ANÁLISIS DEL ÁREA DE ESTUDIO CONSIDERADAS PARA EL ANÁLISIS	38
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN DE MICROCUENCAS Y SUS RESPECTIVOS DRENAJES PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO RACIONAL SOBRE UNA IMAGEN DE GOOGLE EARTH.....	38
FIGURA 11. DELIMITACIÓN DE LAS MICROCUENCAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO RACIONAL EN EL SOFTWARE AUTOCAD	39
FIGURA 12. MAPA DE PERFILES DE SUELOS EN LA CUENCA DE ESTUDIO, A PARTIR DEL GEOPROCESAMIENTO DE LOS MAPAS DEL IGAC	43
FIGURA 13. CURVA DE REGRESIÓN POTENCIAL DE INTENSIDADES PARA T=2AÑOS.....	52
FIGURA 14. REGRESIÓN POTENCIAL PARA HALLAR K Y M.....	53
FIGURA 15. CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA DE LA ESTACIÓN BAYUNCA PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO	54
FIGURA 16. HIETOGRAMA DE DISEÑO PARA PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS	56
FIGURA 17. MAPA DE COBERTURA VEGETAL EN EL AÑO 2000.....	58
FIGURA 18. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE COBERTURAS PARA EL AÑO 2000	59
FIGURA 19. MAPA DE COBERTURA VEGETAL AÑO 2010.....	60
FIGURA 20. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE COBERTURAS PARA EL AÑO 2010	61
FIGURA 21. MAPA DE COBERTURA VEGETAL AÑO 2019.....	62
FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE COBERTURAS PARA EL AÑO 2019	63
FIGURA 23. VARIACIÓN DE LAS COBERTURAS VEGETALES EN KM2 EN LOS AÑOS 2000, 2010 Y 2019.	64
FIGURA 24. VARIACIÓN DE LA COBERTURA DE PASTOS EN CADA UNA DE LAS SUBCUENCAS EN HA EN LOS AÑOS 2000, 2010 Y 2019.....	66
FIGURA 25. VARIACIÓN DE LA COBERTURA DE BOSQUES EN CADA UNA DE LAS SUBCUENCAS EN HA EN LOS AÑOS 2000, 2010 Y 2019	67
FIGURA 26. VARIACIÓN DE LA COBERTURA DE ZONA URBANA EN CADA UNA DE LAS SUBCUENCAS EN HA EN LOS AÑOS 2000, 2010 Y 2019	68



FIGURA 27. VARIACIÓN DE LA COBERTURA DE SUELO DESNUDO EN CADA UNA DE LAS SUBCUENCAS EN HA EN LOS AÑOS 2000, 2010 Y 2019.68

FIGURA 28. PUNTOS DE DESCARGAS DE LAS MICROCUENCAS 1 A 6 EN AUTOCAD76

FIGURA 29. HIDROGRAMA TRIANGULAR DE LA MICROCUENCA 177

FIGURA 30. HIDROGRAMA TRIANGULAR DE LA MICROCUENCA 277

FIGURA 31. HIDROGRAMA RESULTANTE DE LAS MICROCUENCAS 1 Y 2 Y RESULTANTE.....78

FIGURA 32. HIDROGRAMAS DE LAS MICROCUENCAS 1,2 Y 4 Y RESULTANTE.79

FIGURA 33. HIDROGRAMA DE LAS MICROCUENCAS 1 A 480

FIGURA 34. HIDROGRAMAS DE LAS MICROCUENCAS 1 A 5.....81

FIGURA 35. HIDROGRAMAS DE MICROCUENCAS 1 A 6.82

FIGURA 36. HIDROGRAMA TOTAL AÑO 2000 Y T=25 AÑOS84

FIGURA 37. MODELO DE LA CUENCA EN HEC-HMS.....88

FIGURA 38. PARÁMETROS DE ENTRADA (ÁREAS DE LAS SUBCUENCAS Y NÚMEROS DE CURVA).88

FIGURA 39. PARÁMETROS DE ENTRADA PARA EL MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN (HIDROGRAMA UNITARIO DEL SCS.89

FIGURA 40. FOTOGRAFÍAS DEL CAUCE PRINCIPAL DE ARROYO GUAYEPO.90

FIGURA 41. PARÁMETROS DE ENTRADA PARA EL MÉTODO DE TRANSITO DE CRECIENTES91

FIGURA 42. PESTAÑA DEL COMPONENTE TIME-SERIES DATA EN HEC-HMS91

FIGURA 43. PESTAÑA DE COMPONENTE TIME-SERIES DATA DE LA FECHA Y HORA DEL INICIO Y FIN DEL HIETOGRAMA DE DISEÑO.....92

FIGURA 44. PESTAÑA DE LA TABLA PARA INGRESAR HIETOGRAMA EN HEC-HMS92

FIGURA 45. HIETOGRAMA GRAFICADO EN HEC-HMS DE LOS DATOS DE ENTRADA AL MODELO93

FIGURA 46. PESTAÑA DEL METEOROLOGIC MODELS Y ASIGNACIÓN DE HIETOGRAMA A CADA SUBCUENCA EN HEC-HMS.....93

FIGURA 47. RESUMEN DE LA MODELACIÓN EN HEC-HMS PARA EL AÑO 2000, T=25 AÑOS Y CONDICIÓN AMC I.....94

FIGURA 48. HIDROGRAMA UNITARIO DEL SCS EN HEC-HMS PARA EL AÑO 2000, T=25 AÑOS Y AMC I94



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA	18
TABLA 2. COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PARA ZONAS RURALES, PROPUESTO POR EL MANUAL DE OBRAS PÚBLICAS DE VENEZUELA.....	19
TABLA 3. PARÁMETROS PRINCIPALES DE LA CUENCA.....	36
TABLA 4. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS CALCULADOS DE LAS SUBCUENCAS A, B, C, D, E Y H.....	40
TABLA 5. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN Y DE RETARDO PARA LAS SUBCUENCAS A, B, C, D, E Y H.	43
TABLA 6. UNIDADES CARTOGRÁFICAS, LITOLÓGÍA Y PERFILES DE SUELOS	44
TABLA 7. GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SUELO SEGÚN TEXTURA.....	45
TABLA 8. DEFINICIÓN DE PERMEABILIDAD DEL SUELO.....	46
TABLA 9. REGISTRO ANUAL DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS.....	47
TABLA 10. PRECIPITACIONES MÁXIMAS PROBABLES POR PERIODO DE RETORNO Y CORREGIDAS POR INTERVALO FIJO	49
TABLA 11. COEFICIENTES PARA LAS RELACIONES A LA LLUVIA DE 24 HORAS	50
TABLA 12. PRODUCTO DE PRECIPITACIÓN Y COEFICIENTE DE DURACIÓN	50
TABLA 13. CÁLCULO DE INTENSIDAD DE LLUVIA PARA CADA PERIODO DE RETORNO.....	51
TABLA 14. RESUMEN DE LOS COEFICIENTES HALLADOS EN LA REGRESIÓN APLICADA PARA CADA PERIODO DE RETORNO	52
TABLA 15. PERIODOS DE RETORNO SEGÚN CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE DRENAJE	54
TABLA 16. CÁLCULO DE HIETOGRAMA POR EL MÉTODO DEL BLOQUE ALTERNO PARA PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS.....	55
TABLA 17. VARIACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN EL ÁREA TOTAL DE LA CUENCA RESPECTO AL 2000.....	64
TABLA 18. VARIACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN EL ÁREA TOTAL DE LA CUENCA EN LOS AÑOS 2000, 2010 Y 2019.	65
TABLA 19. PORCENTAJES DE COBERTURA VEGETAL POR SUBCUENCAS CON RESPECTO LOS PORCENTAJES DE COBERTURA TOTAL DADO EN AÑOS.....	66
TABLA 20. NÚMEROS DE CURVA DE ESCORRENTÍA PARA USOS DEL SUELO AGRÍCOLA, SUBURBANO Y URBANO. PARA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE II	70
TABLA 21. NÚMEROS DE CURVAS MÉTODO SCS	71
TABLA 22. NUMERO DE CURVA DE LAS SUBCUENCAS A, B, C, D, E Y F PARA CADA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE PARA EL AÑO 2000.	73
TABLA 23. NUMERO DE CURVA DE LAS SUBCUENCAS A, B, C, D, E Y F PARA CADA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE PARA EL AÑO 2010.	73
TABLA 24. NUMERO DE CURVA DE LAS SUBCUENCAS A, B, C, D, E Y F PARA CADA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE PARA EL AÑO 2019.	73
TABLA 25. PRINCIPALES DATOS POR MICROCUENCA ANALIZADA.....	74

Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía de la cuenca del arroyo Guayepo



TABLA 26. CÁLCULO DE INTENSIDADES Y COEFICIENTE DE REDUCCIÓN PARA LAS MICROCUENCAS 1-6.	75
TABLA 27. CÁLCULO DE CAUDALES PICO Y TIEMPOS DEL HIDROGRAMA TRIANGULAR.....	75
TABLA 28. RESUMEN DE CÁLCULO DE ESCORRENTÍA	85
TABLA 29. PORCENTAJES DE VARIACIÓN DE CAUDALES	86
TABLA 30. RELACIÓN R PARA CADA PERIODO DE RETORNO PARA CAUDALES CALCULADOS CON EL MÉTODO RACIONAL	86
TABLA 31. CAUDALES DE ESCORRENTÍA MÁXIMOS PARA CADA UNO DE LOS AÑOS, PERIODO DE RETORNO Y CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE.	95
TABLA 32. <i>PORCENTAJE DE VARIACIÓN PARA CADA PERIODO DE RETORNO Y CADA PERIODO DE AÑOS.</i>	96
TABLA 33. RELACIÓN R PARA CADA PERIODO DE RETORNO PARA CAUDALES CALCULADOS CON EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA.....	97
TABLA 34. VARIACIÓN DE LOS CAUDALES DE ESCORRENTÍA OBTENIDOS POR EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA CON RESPECTO AL MÉTODO RACIONAL.	97



RESUMEN

El presente estudio realizó un análisis multitemporal de la cobertura vegetal presente en la cuenca del arroyo Guayepo entre los años 2000, 2010 y 2019 para determinar su incidencia en la generación de caudales de escorrentía. La metodología de enfoque cuantitativo, partió de la caracterización general de la cuenca de estudio, definiendo sus límites y características geomorfológicas. Se recopiló y procesó información hidrológica entre los años 1974 a 2019, determinando las curvas IDF y las lluvias de diseño para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, necesarias para la estimación de la escorrentía. Posteriormente, se evaluó la cobertura vegetal entre los años 2000 y 2010 utilizando la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia y para 2019 se utilizaron imágenes de Google Earth y SAS PLANET. Definidas la cobertura vegetal, las precipitaciones y los parámetros geomorfológicos, se calcularon los caudales de escorrentía mediante el Método Racional y el Método del Número de Curva empleando el software HEC-HMS.

Los resultados encontrados indican que entre los años 2000 y 2019 la cobertura vegetal sufrió una disminución de 2.08% con respecto al área total de la cuenca de estudio, produciendo un aumento en el caudal de escorrentía de 8.25% y 3.67% calculados con el método racional y el número de curva respectivamente, para un periodo de retorno de 100 años. También se estableció una relación entre el porcentaje de variación de los caudales de escorrentía y el de la cobertura vegetal (R), obteniendo como resultado 3.96 para el método racional y 1.76 para el número de curva para un periodo de retorno de 100 años, demostrando claramente la incidencia de la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía.

Aunque la disminución de la cobertura vegetal es pequeña la reducción del área de bosques es más del 75% de su extensión con respecto al año 2000, perdiendo más 268.26 ha en los últimos 19 años. Ante esto, cobra importancia la planificación adecuada de las cuencas hidrográficas para la conservación de los recursos naturales como un factor importante en el desarrollo sostenible de una población o entorno.



ABSTRACT

This study conducted a multitemporal analysis of the vegetation cover present in the Guayepo stream basin between the years 2000, 2010 and 2019 to determine its impact on the generation of runoff flows. The quantitative approach methodology was based on the general characterization of the study basin, defining its limits and geomorphological characteristics. Hydrological information was collected and processed from 1974 to 2019, determining the IDF curves and design rainfall for return periods of 25, 50 and 100 years, necessary for runoff estimation. Subsequently, vegetation cover was evaluated between 2000 and 2010 using the CORINE Land Cover methodology adapted for Colombia and for 2019 using Google Earth and SAS PLANET images. Once vegetation cover, precipitation and geomorphological parameters were defined, runoff flows were calculated using the Rational Method and the Curve Number Method using HEC-HMS software.

The results found indicate that between the years 2000 and 2019 the vegetation cover suffered a decrease of 2.08% with respect to the total area of the study watershed, producing an increase in runoff flow of 8.25% and 3.67% calculated with the Rational Method and Curve Number Method respectively, for a return period of 100 years. A relationship was also established between the percentage of variation of runoff flow and that of vegetation cover (R), obtaining as a result 3.96 for the rational method and 1.76 for the curve number for a return period of 100 years, clearly demonstrating the incidence of vegetation cover on runoff flow.

Although the decrease in vegetation cover is small, the reduction of the forest area is more than 75% of its extension with respect to the year 2000, losing more than 268.26 ha in the last 19 years. In view of this, proper planning of watersheds for the conservation of natural resources becomes important as an important factor in the sustainable development of a population or environment.



1. INTRODUCCIÓN

El estudio y comprensión de los procesos naturales ocurrientes en una cuenca hidrográfica son a menudo, desafíos para la ciencia e ingeniería que tienen como obstáculo la falta de datos, debido al costo elevado de mantenimiento de equipos a lo largo del tiempo (Mendonça dos Santos et al., 2020).

La escorrentía superficial o precipitación efectiva es el proceso hidrológico que tiene origen en la precipitación que no es interceptada por la superficie terrestre, ni se infiltra en el suelo, escurriendo hacia la salida de una cuenca (Chow et al., 1994a). La escorrentía superficial y su variabilidad dependen además del volumen o intensidad de precipitación, de diversos factores como el área de la cuenca, la cobertura vegetal, el tipo de suelo, las pendientes del terreno y las condiciones del suelo etc. (Aparicio Mijares, 1989); (Zuecco et al., 2018). Adicionalmente, inciden el cambio climático y la actividad humana (Huntington, 2006), el que se proyecta que el cambio climático tendrá un impacto sustancial en el ciclo hidrológico, especialmente en las precipitaciones y por consiguiente la escorrentía (Chen et al., 2020).

El impacto de la variación de la cobertura vegetal en los procesos hidrológicos se ve reflejado en las relaciones lluvia-escorrentía y la dinámica del escurrimiento (Genxu et al., 2012). Además de la escorrentía, los cambios en la cubierta vegetal afectan procesos hidrológicos como la evapotranspiración, la infiltración y la humedad del suelo en la cuenca (X. Zhang et al., 2012).

Históricamente se han aplicado distintos modelos para estimar la escorrentía, la precisión de cada modelo depende de la disponibilidad de información de campo para soportar o contrastar el método, así como de los valores de los parámetros a estimar (Mendonça dos Santos et al., 2020). El software HEC-HMS fue creado para enrutar un hidrograma de escorrentía a través de una red de corrientes y estimar la descarga de la cuenca a lo largo del tiempo. El método de abstracciones o perdidas más utilizado es el SCS número de curva, el cual se encuentra integrado en el software HEC-HMS (Castro & Maidment, 2020).

En el ámbito local se han realizado estudios referentes al manejo de cuencas hidrográficas y las variables que inciden en ella como es el caso de la investigación realizada por Diaz & Dávila (2020) quienes estimaron la influencia de la infiltración en los coeficientes de escorrentía para la cuenca del arroyo Guayepo, pero dentro del alcance de su estudio no se incluyó la influencia de la cobertura vegetal ni su variación temporal. El estudio de Yabrudy & Sotomayor (2020) en el que



se realizó una análisis multitemporal de los coeficientes de escorrentía en el periodo de los años 2005-2019 en la microcuenca del canal Ricaurte mediante la foto interpretación de imágenes de Google Earth. La investigación de Del Castillo & Ortiz en 2013 en la cuenca del arroyo Policarpa determinando las áreas de cobertura vegetal con imágenes de satélite, establecieron que el incremento desmedido de zonas impermeables a causa del crecimiento urbanístico e industrial puede llegar a incrementar los volúmenes de inundaciones.

El área de la cuenca del arroyo Guayepo se encuentra catalogada en el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Cartagena (*POT*, 2001), como suelo de expansión y suelo suburbano, este último permite el desarrollo con restricciones de uso, de intensidad y de densidad. En el suelo suburbano de la Zona Norte, se tienen distintos usos como turístico, residencial y de vivienda temporal. Se contempla la construcción de nuevas vías, ciclo rutas y ampliación en la cobertura de servicios públicos. En general la vegetación natural de la Zona Norte se encuentra totalmente alterada, debido a diferentes usos como leña y carbón, ganadería, cultivos de diversa índole, sumado a esto el desarrollo urbanístico y de infraestructura. En la actualidad, la zona ha tenido un crecimiento exponencial en las construcciones para uso turístico (La República, 2019), para uso educativo (El Universal, 2020) y recreativo (El tiempo, 2018) lo que ha generado que sus áreas de cobertura vegetal hayan disminuido aún más.

Dado lo anterior, con este estudio se pretende realizar un análisis multitemporal de la cobertura vegetal mediante análisis de imágenes de satélites y mapas de cobertura vegetales, evaluar su variación para los años 2000, 2010 y 2019, estimar los caudales de escorrentía mediante el método racional y el software HEC-HMS y confrontar los resultados para determinar la incidencia del cambio de cubierta vegetal en la generación de caudales de escorrentía, de la cuenca del arroyo Guayepo, para responder la siguiente pregunta de investigación:

¿Influye la variación de las áreas de cobertura vegetal en la generación de caudales de escorrentía en una cuenca hidrográfica en un clima tropical seco? ¿En qué porcentaje varían los caudales de escorrentía en la cuenca del arroyo Guayepo cuando varía el área de cobertura vegetal a través de los años?

Actualmente, se cuenta con pocos estudios locales relacionados directamente con el tema, lo que genera incertidumbre y se tiene poca certeza al estimar lo que pueda pasar ante eventos de



lluvia. Dado esto, se vuelve mucho más preocupante el poco conocimiento mediante estudios, de la influencia de la cobertura vegetal sobre la escorrentía en nuestro sistema de cuencas hidrográficas y su posible comportamiento hidráulico dada la variación de las áreas cubiertas por vegetación. Además, los caudales de escorrentía de las distintas cuencas de la ciudad se estiman para distintas condiciones de cobertura vegetal y se realizan obras hidráulicas basados en dichos caudales, por lo que, si se sigue variando indiscriminadamente la cobertura vegetal, las estructuras antes diseñadas pueden estar en un riesgo de falla o excedencia de su capacidad hidráulica ante una creciente súbita con posibles riesgos de inundación en cauces cercanos a poblaciones.

Con este estudio se pretende incentivar la investigación dedicada al manejo de cuencas hidrográficas y las variables que en ella inciden. También se desea analizar los procesos antrópicos que se están realizando a día de hoy en las áreas cercanas a los cuerpos de agua y cómo afectan el funcionamiento de los mismos. Asimismo, mostrar una manera distinta de abordar el estudio de cuencas hidrográficas, exponiendo nuevas fuentes de datos, su procesamiento y aprovechamiento y, además, la gran importancia que tienen los sistemas de información geográfica en la ingeniería. Se aspira a que este estudio sea base para futuros estudios de campo que complementen y comprueben de manera directa, con medidas, lo que se expone en el presente documento.



2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. ESTADO DEL ARTE

En el ámbito internacional se han realizado diversas investigaciones donde relacionan la cobertura vegetal con la escorrentía.

Algunas investigaciones se enfocan en la infiltración, proceso que afecta directamente la generación de caudales de escorrentía en las cuencas hidrográficas. Investigaciones realizadas como la de Miyata *et al.*, (2019) determinaron la relación entre la capacidad de infiltración y la escorrentía superficial y determinaron que si es influyente en dicho proceso la cobertura vegetal. Concluyen en su estudio que la escorrentía superficial presentó un aumento significativo en zonas de suelo “desnudo” donde la cobertura vegetal ha disminuido y también la captación.

Otras investigaciones realizadas en China analizan los cambios de cobertura vegetal tanto espaciales como temporales y su influencia en la generación de escorrentía y sedimentos de cuencas hidrográficas. Dichos estudios se enfocaron en analizar los factores de la restauración de la cobertura vegetal que ha sufrido este país y como ha incidido en la escorrentía superficial. Investigaciones concluyeron que la escorrentía no se ha visto afectada de manera significativa mientras que los sedimentos si notaron una disminución considerable (G. Xu et al., 2018) y (Gao et al., 2019) determinaron en primera instancia que los caudales de escorrentía en el análisis temporal venían en aumento pero no de manera significativa pero luego, realizando un análisis con datos de mayor rango temporal, descubrieron que la reforestación si estaba disminuyendo la escorrentía superficial.

Dado que el país asiático, China, ha experimentado una reforestación considerable, otros autores han investigado sobre la influencia de la cobertura vegetal en la escorrentía, pero con el enfoque del mantenimiento de los caudales que generan las cuencas, dado que es importante para la planificación de los recursos hídricos. En ese sentido, autores como Liu et al., (2019) compararon las eficiencias de distintos pastizales típicos en la regulación de los caudales de escorrentía y transporte de sedimentos, es decir, buscaban mantener los caudales de escorrentía que alimentaban a un río y, además, controlar la erosión y transporte de sedimentos. Cuatro pastizales, incluidas dos especies de Gramineae (*Elymus dahuricus* y *Bromus inermis*) y dos especies de leguminosas (*Medicago sativa* y *Trifolium repens*). Al comparar los resultados se encontró que el pastizal de Gramineae puede ser considerados como una solución de manejo



adecuado para la sostenibilidad socio ecológica de las áreas semiáridas durante la restauración de la vegetación. El enfoque de este estudio nos demuestra la importancia de la cobertura vegetal respecto a la escorrentía.

Con el mismo enfoque del mantenimiento de la escorrentía, se estudió la relación entre el cambio de la cobertura vegetal y la escorrentía basado en RS y GIS, evaluando la regulación de los caudales de escorrentía para la planificación del uso sostenible de los recursos hídricos. Los resultados muestran que el índice de vegetación en el área de estudio asociado con la escorrentía es alto, y los tipos de vegetación asociados con la escorrentía son bajos. La conclusión general de este estudio es que, para la época, se necesitaba más información e investigación dado que entender la relación entre la cobertura vegetal y la escorrentía es complejo y necesita un fundamento teórico sólido. (Jianzhong & Fenqin, 2012)

En el estudio de cuencas hidrográficas actualmente se cuenta con facilidad de acceso a información multitemporal para análisis de variaciones, mediante herramientas SIG y de teledetección. Ejemplo de esto es el estudio realizado por González et al. (2016) donde analizaron la influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Catamayo, en Ecuador, tomando en cuenta un periodo temporal desde el 1986 al 1999. Su metodología se dividió en 3 fases, la primera consta del análisis de la escorrentía mediante registros de lluvia y caudales de salida, el análisis del cambio de la cobertura vegetal mediante imágenes satelitales y aplicación de métodos indirectos para el cálculo del coeficiente de escorrentía. Independientemente del cambio de cobertura vegetal, la precipitación tiene un peso del 70,1% y la vegetación de 29,9% en la generación de coeficientes de escorrentía mediante el método número de curva. El cambio de cobertura vegetal no influyó significativamente en el coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca superior del río Catamayo.

Algunas zonas de cobertura vegetal son afectadas por las distintas actividades humanas, como la minería, la ganadería, etc. Dado que dichas actividades en algunos lugares han aumentado, se realizan investigaciones para analizar la recuperación de dichas zonas y su efecto en la escorrentía ,ejemplo de esto fue el estudio realizado por Zhang *et al.* (2015), donde indago sobre los efectos de la vegetación en la erosión y escorrentía en tierras recuperadas en un vertedero de minas de carbón en China. La premisa del estudio fue que la reconstrucción de la vegetación es una forma efectiva de reducir el escurrimiento y la erosión y es una clave para restaurar los ecosistemas en



regiones ecológicamente sensibles. Su conclusión fue que las áreas en plataforma obtuvieron un mayor volumen de escorrentía que las parcelas en pendiente. También encontraron el tipo de cubierta vegetal que cumplía con la disminución de la escorrentía y erosión con mayor eficacia. Todos los eventos de lluvia generaron un escurrimiento total de 301.6 mm en las plataformas y 138.1 mm en las pendientes, contradiciendo la expectativa de que una mayor escorrentía acompaña a los gradientes más altos.

Xu *et al.* (2013) realizaron un importante estudio que muestra la respuesta de la escorrentía y la erosión del suelo a la eliminación de la cobertura vegetal y la labranza en áreas escarpadas. Este estudio tomó como base de justificación el constante cambio del uso de la tierra en áreas empinadas de la zona de las Tres Gargantas, en China y como metodología se realizó un experimento de simulación de lluvia en parcelas seleccionadas al azar con diferentes condiciones como cobertura vegetal existente, remoción de vegetación y recién azada. Los resultados de esta investigación indicaron que la remoción de vegetación y el arado tienen un impacto significativo en la generación de escorrentía, donde la proporción de escurrimiento subsuperficial disminuyó después de remover la cobertura vegetal, ya que la vegetación favorece a la infiltración y al quitarla, se aumenta la escorrentía superficial por la ausencia de la protección dada por la cobertura vegetal y la erosión también aumentó significativamente. La proporción de escorrentía subsuperficial en la escorrentía total disminuyó de 30.3% a 6.2% después de la eliminación de la vegetación. En las parcelas excavadas, la escorrentía subsuperficial comprendía el 29.1% de la escorrentía total bajo simulación de lluvia de baja intensidad y la proporción disminuyó rápidamente al aumentar la intensidad de la lluvia.

En el ámbito nacional se han realizado pocos estudios referentes a este tema. Como respuesta a la incertidumbre de conocer los caudales máximos en cuencas no instrumentadas como las pertenecientes a las de norte de Santander, se realizó un estudio para evaluar el modelo de hidrograma unitario SCS en la estimación de caudales de máximos en cuencas no instrumentadas de esta misma región. L.Vargas *et al.*, (2018) determinaron los caudales máximos para un periodo de retorno de 100 años de 19 cuencas con al menos 19 años de registros históricos de lluvias para las diferentes condiciones antecedentes de humedad. Los autores usaron distribuciones de probabilidad de valores máximos y aplicaron el hidrograma unitario SCS. Con datos hidrometeorológicos, usos del suelo y coberturas según la metodología CORINE Land Cover



adquiridos en el IDEAM y la cartografía base, estudio de suelos y zonificación de tierras del departamento Norte de Santander proporcionada por el IGAC se realizó la caracterización de las cuencas y con ayuda de ArcGIS determinaron los números de curva. Los resultados de la investigación arrojaron que el método del hidrograma unitario SCS sobre estima el caudal hasta 400% para condiciones antecedentes de suelo húmedo (AMC-III). Posteriormente se realizó un procedimiento de calibración por Prueba – error en que se evidencio que los números de curva deberían ser los estimados para condición antecedente seca (AMC-I) para disminuir la sobre estimación, contrario a la lógica común que establece que los mayores caudales se presentan en épocas de fuertes inviernos donde por obvias razones el suelo se encuentra húmedo.

Otro estudio nacional fue el desarrollado por Chantre (2017) donde se realizó un análisis comparativo para conocer la variación de las coberturas vegetales en la parte alta de la subcuenca del rio Palacé mediante la utilización de las imágenes Landsat entre los años 1989 y 2016. Con base en la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra – Corine Land Cover adaptada para Colombia se identificaron principalmente cinco coberturas entre las que se encontraba Herbazal Denso, Bosque, Turberas, Pastos y cultivos transitorios. Con ayuda de las diferentes bandas de las imágenes y la herramienta ArcGIS se identificó el porcentaje de cada una de las coberturas, evidenciando que debido a actividades antrópicas como la agrícola y pecuaria, la mayoría de las cubiertas naturales han sido remplazadas por pastizales y cultivos.

Bernal & Prado en el 2015 desarrollaron una investigación donde se analiza mediante fotografías aéreas de distintos años la influencia de la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía. Los resultados obtenidos de su proyecto fue que con pequeños cambios en la cobertura vegetal se generó un impacto sustancial en los de caudales de escorrentía corroborando así que este parámetro es fundamental para la planeación y prevención de los efectos causados por eventos extremos de lluvias. Encontraron que los caudales máximos instantáneos obtenidos para los diferentes periodos de retorno teniendo en cuenta la cobertura del año 1993 (a través del número de curva) son mayores a los generados al modelar con las características de la cobertura del año 2009, lo que indica que a pesar de que la cuenca tiene tendencia a las crecientes por su morfometría, para el año 2009 estos riesgos se han reducido debido a un incremento de la cobertura de bosques dentro de la cuenca, lo que muestra la importancia del estudio del tema.



2.2. ANTECEDENTES

En investigaciones recientes realizadas en el ámbito local, específicamente hablando de la cuenca del Arroyo el Guayepo, Díaz & Dávila (2020) estimaron la influencia de la infiltración en los coeficientes de escorrentía para dicha hoya hidrográfica. La infiltración está relacionada con el tipo de suelo y sus condiciones de humedad. Para la recolección de información primaria, tomaron mediciones de campo de infiltración en puntos estratégicos propuestos por ellos en los que tenían en cuenta que estuvieran cercanos a vías, fincas, instituciones o viviendas siendo estos los principales beneficiados de la investigación y, además, estos factores fueron fundamentales para permitir un apoyo, acompañamiento y suministro de insumos por parte de la población hacia el estudio. En dicho caso, el alcance de su investigación desde la toma de datos hasta el análisis de infiltración, no tuvo en cuenta la cobertura vegetal como factor influyente en la infiltración, que era el parámetro importante a medir en su estudio y el cómo podría afectar a la infiltración los eventos de lluvias, por lo que se necesita ahondar un poco más en la variable cobertura vegetal para tener una investigación más precisa sobre el estudio hidrológico de la cuenca. Además, en la ciudad y el país, se han realizado estimaciones hidrológicas sin tener en cuenta este aspecto, por lo que es importante comenzar a regionalizar nuestros parámetros hidrológicos.

Yabrudy & Sotomayor (2020) realizaron una investigación sobre la variación del coeficiente de escorrentía teniendo en cuenta solo la variación histórica de los diferentes usos del suelo en la microcuenca del canal Ricaurte en la ciudad de Cartagena. El coeficiente de escorrentía se estimó mediante la clasificación y fotointerpretación de imágenes satelitales por medio del software ArcGIS, para definir las áreas correspondientes a suelos sin vegetación, suelos con vegetación, pavimentos y cubiertas. Además, se calcularon los caudales picos mediante el uso del método racional para estimar su influencia en los años comprendidos entre 2005 y 2019. Se determinó que durante los años de estudio hubo un crecimiento sustancial en las superficies impermeables (cubiertas y pavimentos) y esto conllevó a una también significativa variación en la estimación del coeficiente de escorrentía dando un coeficiente de 0.698 en el año 2005 hasta el año 2019 en el cual el coeficiente fue de 0.799, arrojando como resultado un incremento total entre el año 2005 hasta el 2019 de 14.41%.

En 2013, Del Castillo & Ortiz desarrollaron una investigación en la cuenca hidrográfica del arroyo Policarpa, utilizando imágenes satelitales para la delimitación de la cuenca y subdivisión



para el correcto uso del método racional, aunque el estudio fue enfocado al control de inundaciones se utilizó la metodología completa en un estudio hidrológico como el cálculo de los parámetros morfométricos de la cuenca, análisis hidrometeorológico, estimación del coeficientes y caudales de escorrentía. Se determinó que debido al descontrolado desarrollo residencial e industrial que a su vez conlleva a la desaparición de la vegetación produce mayores efectos sobre la escorrentía, lo que sumado a mayores precipitaciones incrementa los volúmenes de la inundación. Además, se propuso una ampliación en las secciones mediante dragado y la implementación de un embalse para amortiguar los caudales de entrada.

Patiño *et al.*, 2007, proponen una propuesta metodológica para evaluar el efecto de diferentes coberturas vegetales sobre el rendimiento hídrico en cuencas de pequeña extensión. Se aplican procedimientos estadísticos a la cuenca de la quebrada La Murciélago en Piedras Blancas, Antioquia. Las conclusiones muestran que existen diferencias significativas entre la cobertura de pino y las coberturas de ciprés y bosque natural, siendo la ultima la que posee una menor pendiente y por lo tanto un mayor efecto de regulación sobre el rendimiento hídrico.

2.3. MARCO TEÓRICO

2.3.1. Ciclo hidrológico

En la tierra, el agua se encuentra presente en un lugar llamado hidrosfera, este sitio se extiende quince kilómetros por encima de la atmosfera y un kilómetro por debajo de por debajo de la corteza terrestres. El ciclo hidrológico está constituido por una serie de laberintos de caminos en la hidrosfera. Como cualquier otro ciclo este no tiene ni principio ni fin, y sus procesos internos son simultáneos y continuos.(Chow et al., 1994b, p. 2).

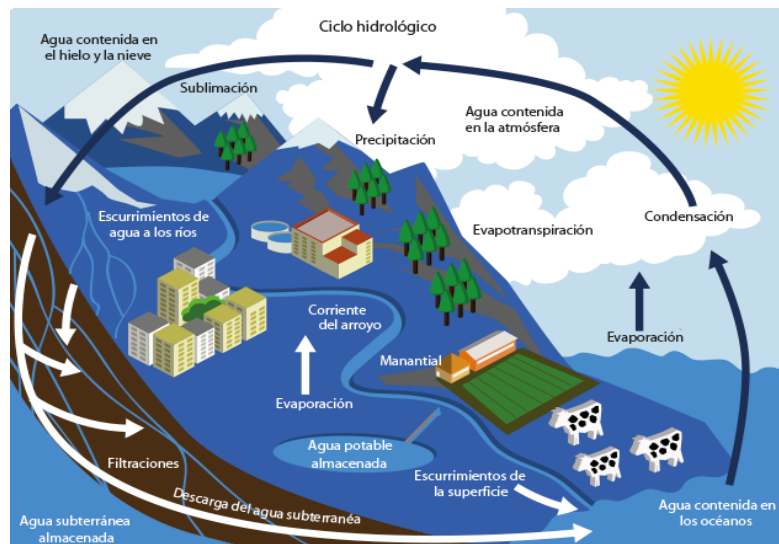


Figura 1. Ciclo hidrológico

Fuente: Sistema de información ambiental, <http://www.siac.gov.co/aguas>

El ciclo hidrológico como se puede ver en la figura 1, Consta de la evaporación del agua presente en la corteza terrestre o cerca de ella mediante radiación solar y el viento, el vapor de agua que es generado mediante proceso anterior se eleva y se transporta por la atmosfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia a la tierra en forma de precipitación. Durante el trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por plantas o construcciones, luego fluye hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada, parte de la infiltrada y de la que corre se evapora nuevamente. La precipitación que llega a las corrientes una parte es infiltrada y la otra llega a los océanos o a cuerpos de agua más pequeños como presas y lagos. El agua infiltrada un porcentaje es absorbido por las plantas y transpirado casi en su totalidad hacia la atmosfera, una segunda parte fluye bien sea de forma horizontal hacia cuerpos de agua, o de forma vertical hasta llegar a zonas más profundas del suelo (Percolación) para ser almacenada como agua subterránea y posteriormente aflorar en manantiales, ríos o el mar.(Aparicio Mijares, 1989, pp. 17–18)

2.3.2. Precipitación

La precipitación es el proceso mediante cual el agua contenida en la atmosfera entra en contacto con la superficie de forma líquida o sólida. La formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmosfera de manera que se enfríe y parte de su humedad se condense (Chow et al., 1994b). Este proceso se presenta como consecuencia de cambios de presión,

temperatura y movimientos de masas, ayudados por minúsculos núcleos de condensación y material sólido en suspensión. La precipitación se mide como la lámina de agua caída por unidad de superficie y la unidad comúnmente utilizada es el milímetro (mm). (Arrieta Pastrana, 2015, p. 35).

2.3.2.1. Curva intensidad-duración-frecuencia

La frecuencia de una lluvia se define como el número de veces que una precipitación es igualada o excedida en un determinado periodo de años, y la intensidad de la lluvia es la cantidad de precipitación caída en un determinado tiempo, la magnitud de un evento de lluvia es inversamente proporcional a frecuencia de ocurrencia también llamada periodo de retorno. La mayoría de las obras hidráulicas en ingeniería requiere de la relación de las anteriores variables, que generalmente son expresados mediante gráficos o funciones. Donde se representa los datos en curvas para cada uno de los periodos de retorno, ubicando en las abscisas las duraciones en minutos (min) y en las ordenas las intensidades en milímetros por hora (mm/hora).

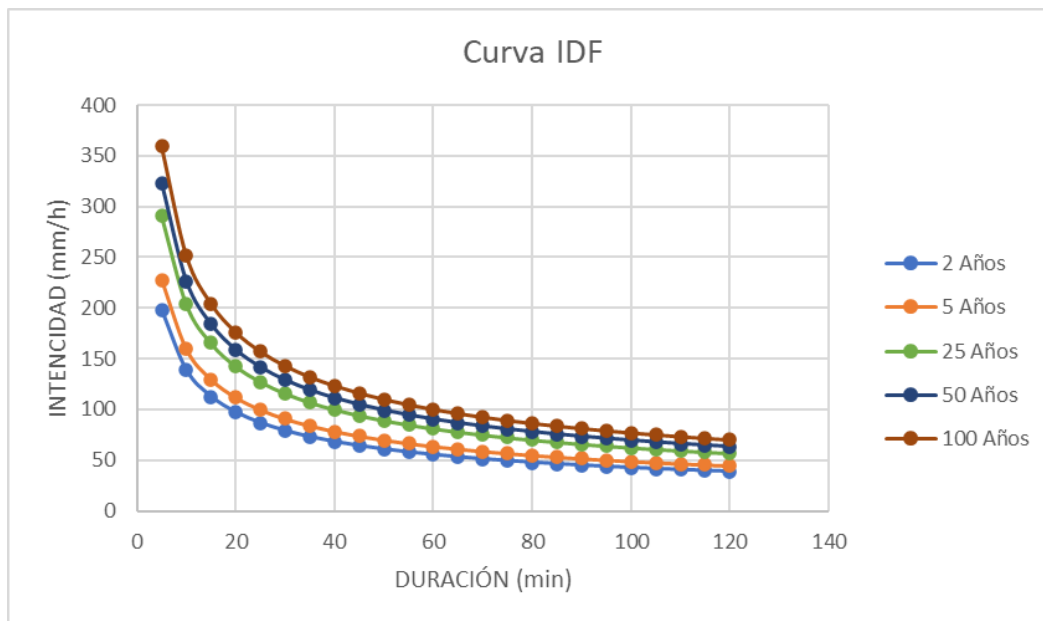


Figura 2. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

Fuente: Autores

Existen muchas formulaciones para determinar esta relación, en las que mediante constantes se representa las condiciones del área de estudio. Se presenta la ecuación expuesta por Olivares (2017)

$$I = \frac{K T^m}{t^n} \dots (1)$$

I = Intensidad, mm/hora.

T = Periodo de retorno, Años.

t = Duración, min.

K, m, n = Constantes.

2.3.2.2. Método del bloque alterno

El método del bloque alterno es uno de los más utilizados para la generación de hietograma mediante curvas de intensidad-duración-frecuencia, debido a su sencillez. El hietograma producido por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de duración igual sobre una duración total para un periodo de retorno dado. Su nombre se debe a que los incrementos o bloques del hietograma se reordenan en una secuencia temporal, ubicando la mayor intensidad en el centro de la duración requerida y colocando de manera descendiente alternadamente hacia la derecha y hacia la izquierda los demás bloques hasta completar su totalidad.

2.3.3. Cuenca u hoya hidrográfica

El área donde aguas subterráneas o superficiales vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales. Las líneas divisorias separan la superficie de terrestres cuyo drenaje fluye hacia un río, cuyos drenajes corren a otros cuerpos de agua. Las fronteras de las cuencas son las partes más altas que dividen la escorrentía entre dos o más cuencas. La lluvia distribuida en el espacio sobre el plano es la entrada, el caudal concentrado en dicho espacio es la salida. El flujo subsuperficial y la evaporación pueden considerarse como salidas, pero estos son muy pequeños comparadas con el caudal en un evento de lluvia. La estructura del sistema es el conjunto de caminos de flujo sobre el suelo o a través de él e incluye sistemas tributarios que eventualmente convergen para convertirse en caudal a la salida de una cuenca. (Chow et al., 1994b)

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. (Arrieta Pastrana, 2015)

2.3.3.1. Área de drenaje

Es el área en planta de una cuenca contenida entre sus divisorias topográficas (proyección horizontal).

2.3.3.2. Forma de la hoya

La forma de la hoya determina la respuesta del sistema a las precipitaciones y está relacionada con el tiempo de concentración.

2.3.3.3. 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.

$$K_c = 0.28 \frac{p}{A^{1/2}} \dots (2)$$

p = Perímetro de la cuenca en km

A = Área de drenaje de la cuenca en km^2 .

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.

2.3.3.4. 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.

$$K_f = \frac{B}{L}$$

$$B = \frac{A}{L}$$

$$K_f = \frac{A}{L^2} \dots (3)$$

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 m^2 .

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.

2.3.3.5. Densidad de drenaje

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

$$D_d = \frac{L}{A} \dots (4)$$

Donde A es el área total de drenaje en kilómetros cuadrados (Km^2) y L es la longitud total de los cursos de agua en Km . Aunque este parámetro depende de la escala en la que se encuentre la cuenca.

2.3.3.6. Sinuosidad de una corriente de agua

Es la relación que existe entre la longitud total de un curso de agua y la longitud de su valle. Si su esta relación es menor o igual a 1.25 se dice que el cauce tiene una tendencia a ser recto.

2.3.3.7. 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.

$$S = \frac{L}{L_T} \dots (5)$$

Pendiente media del cauce principal

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. (Arrieta Pastrana, 2015)

$$S_1 = \frac{h_1 - h_0}{L_1 - L_0} \dots (6)$$

h_1 = Altura en el nacimiento del cauce, en m.s.n.m.

h_0 = Altura en la salida del cauce, en m.s.n.m.

L_1 = Longitud del cauce hasta la altura h_1 , en km.

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



2.3.4. Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo (Chow et al., 1994a). La tasa de infiltración depende de muchos factores como son las condiciones de la superficie del suelo, la cubierta vegetal, las propiedades del suelo tales como la porosidad, la conductividad hidráulica y la humedad presente en el suelo. La tasa de infiltración se mide en centímetros por hora.

2.3.5. Escorrentía

La escorrentía es definida como el agua proveniente de la precipitación que transita sobre o bajo la superficie terrestre, llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. La escorrentía puede ser superficial, subsuperficial o subterránea, el tipo de escorrentía se determina mediante los diversos caminos que haya utilizado para llegar a la salida de la cuenca. La escorrentía superficial es el camino expedito para llegar a la desembocadura de la cuenca y a esta se le conoce como precipitación efectiva que constituye la escorrentía directa. (Aparicio Mijares, 1989).

2.3.6. Tiempo de concentración

Se puede definir como el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento un estado de flujo en equilibrio sin almacenamiento donde la cantidad de agua que entra a la cuenca por precipitación es igual a la cantidad que sale por escorrentía superficial. Depende de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y de la velocidad que adquiere, en promedio, dentro de la misma. Existen muchas formulaciones para el cálculo del tiempo de concentración a continuación se muestran las más utilizadas.

$$t_c = 0,0078 L^{0,77} S^{-0,385} \dots (7) \quad \text{Formula de Kirpich (1940)}$$

L: Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida en pies.

S: Pendiente promedio de la cuenca en pies/pies.

$$t_c = 1.8(1.1 - C) \frac{L^{0.5}}{S^{0.333}} \dots (8) \quad \text{Federal Aviation Administration (1970)}$$

C: Coeficiente de escorrentía del Método Racional.

L: Longitud del flujo superficial en pies.

S: Pendiente de la superficie en %.

$$t_c = 60 \left(11.9 \frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \dots (9) \text{ California Culverts Practice (1942)}$$

L: Longitud del curso de agua más largo, en millas.

H: Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, en pies.

$$t_c = \frac{41.025 (0.007i + C)L^{0.333}}{S^{0.333} i^{0.667}} \dots (10) \text{ Formula de Izzard (1946)}$$

i: Intensidad de la lluvia en pulgadas/hora.

c: Coeficiente de retardo.

L: Longitud de la trayectoria del flujo, en pies.

S: Pendiente de la trayectoria del flujo en pies/pies.

$$t_c = \frac{L_c}{V_c} \dots (11) \text{ metodo de la velocidad (1981)}$$

t_c : tiempo de concentración en segundos

L_c : longitud del cauce mayor en la cuenca en metros

V_c : velocidad de concentración en m/s

La velocidad de concentración se calcula como sigue (Aparicio Mijares, 1989):

$$V_c = K\sqrt{S} \dots (12)$$

S: pendiente en m/m

La constante K fue determinada en el plan maestro de drenajes pluviales de Cartagena (1981) con el valor de 4.47.

$$t_c = \frac{L}{1.5D} \sqrt[5]{\frac{M^2}{F}} \dots (13) \text{ Bransby – Williams}$$

L: Longitud del cauce en Km

D: diámetro del círculo del área equivalente a la superficie de la cuenca en Km

M: área de la cuenca en Km²

F: pendiente del cauce principal

2.3.7. Método racional

El método racional es posiblemente el modelo más antiguo de la relación lluvia-escorrimento. Su origen se remonta a 1851 o 1889 (Aparicio Mijares, 1989). La fórmula racional expresa que el caudal de una cuenca es igual a un porcentaje de la precipitación caída y supone que si sobre un área determinada cayese una precipitación de intensidad uniforme en el tiempo y el espacio, llegará un momento en que la cantidad de agua que cae es igual a la que sale del área, siempre y cuando el área sea impermeable. (Arrieta Pastrana, 2015, p. 42). Este modelo toma en cuenta, además del área de la cuenca, la altura o intensidad de la precipitación

$$Q = CiA \dots (14)$$

Donde Q es el caudal de escorrentía, i es la intensidad de la precipitación para el tiempo de concentración de la cuenca, A es el área de la cuenca y C es el coeficiente de escorrentía.

El coeficiente de escorrentía es relación que existe entre la escorrentía y la cantidad de agua lluvia que cae en una determinada área y se encuentra establecido Tabla D.4.7 del título D (Ministerio de Vivienda, 2016).

El método racional, aunque es muy simple, tiene sus limitaciones para su aplicación. Este método no toma en cuenta el efecto de almacenamiento en una cuenca y es confiable para cuenca de menos de 500 Ha (Carciente, 1980). Bolinaga (1979) afirma que el método racional puede arrojar datos aceptables solo si se trata de áreas pequeñas. Además, advierte que la bondad del método racional se reduce a una buena elección del coeficiente de escorrentía y del tiempo de concentración. Dado las limitaciones del método respecto al área, se deben dividir las cuencas en subcuencas tal que sea aplicable el método. (Carciente, 1980). Por ello, se propone en calcular el caudal por el método racional con la siguiente fórmula (Arrieta Pastrana, 2015):

$$Q = \frac{CIAR}{360} \dots (15)$$

Donde:

Q: Caudal máximo instantáneo (m^3/s)

C: Coeficiente de escorrentía

I: Intensidad de la lluvia (mm/h)

A: Área de la cuenca (ha)

R: Coeficiente de reducción por área.

El valor del coeficiente de reducción se calcula como sigue (Monsalve Sáenz, 1999):

$$R = \frac{i_m}{i_0} = 1 - 0.0054\sqrt[4]{A} \dots (16)$$

Donde

i_0 : Intensidad de lluvia en el centro de la tormenta

i_m : Intensidad de lluvia total media

A: Área de la cuenca (m^2)

Tabla 1. *Coefficientes de escorrentía*

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

Fuente: RAS 2016, (Ministerio de Vivienda, 2016)

Tabla 2. Coeficiente de escorrentía para zonas rurales, propuesto por el manual de obras públicas de Venezuela.

Tipo de superficie	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				Despreciable
		Pronunciada 50%	Alta 20%	Media 5%	Suave 1%	
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba, grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosques vegetación densa	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.40	0.05

Nota: Para zonas que se espera puedan ser quemadas se deben aumentar los coeficientes así:
 Cultivos multiplicar por 1.1
 Hierbas, pastos y vegetación ligera, bosques y vegetación densa multiplicar por 1.3
 Tomado de Ministerio de Obras Públicas de Venezuela 1975 en Carciente pág. 349

Fuente: (Arrieta Pastrana, 2015).

Para la determinación de coeficiente de escorrentía de un área con diferentes tipos de superficies, el valor que representa toda el área se calcula como la sumatoria de coeficientes de escorrentía individual por cada sub-área, sobre el área total del terreno.

$$C = \frac{(\sum CxA)}{\sum A} \dots (17)$$

El método racional no tiene en cuenta el almacenamiento de la cuenca, por esta razón solo es aplicable a cuencas con áreas menores a 500 ha, puesto que, a mayor área mayor error en la estimación de los caudales.

2.3.8. Método del número de curva del SCS

El Soil conservation service (1972) desarrollo un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Se supone una proporcionalidad entre la lluvia retenida real en el terreno con respecto a la máxima capacidad que el terreno puede retener y la escorrentía superficial real con la máxima que se puede producir.

$$P_e = \frac{(P - 0,2 S)^2}{P + 0,8 S} \dots (18)$$

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \dots (19)$$

Donde P_e es la precipitación efectiva, P es la precipitación total, S es la retención potencial máxima y CN es el número de curva.

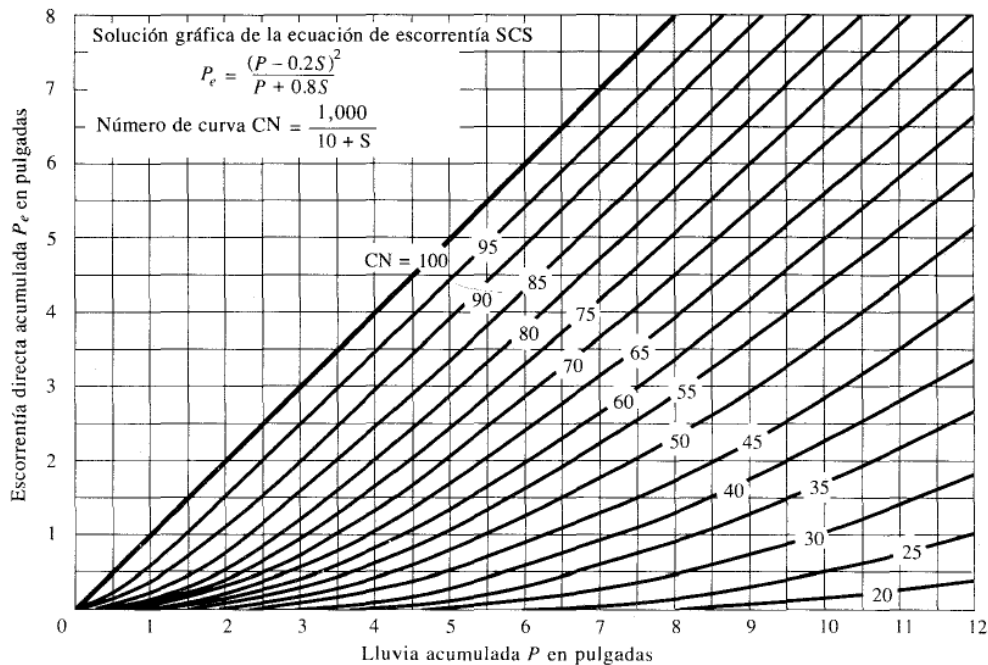


Figura 3. Numero de curva

Fuente: Chow et al., (1994)

Los números de curva que se presenta en la figura 3 dependen de las clases de antecedentes de humedad, del uso de la tierra que están establecidos en la tabla 5.5.1, tabla 5.5.2 respectivamente de (Chow et al., 1994a) y por ultimo del tipo de suelo clasificado como A,B,C o D.

2.3.9. Hidrograma unitario

El hidrograma unitario de una cuenca se define como hidrograma de escurrimiento directo resultante de una lámina unitaria (1 cm) de exceso de lluvia generado uniformemente sobre el área de drenaje de la cuenca a una velocidad constante a lo largo de una duración efectiva. El hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia. (Chow et al., 1994a)

Se considera que cada subcuenca produce un hidrograma triangular simplificado con la forma del hidrograma triangular propuesto por el Soil Conservation Service (SCS) en 1972. (Chow et al., 1994a). En la siguiente figura se muestra la esquematización del hidrograma del SCS

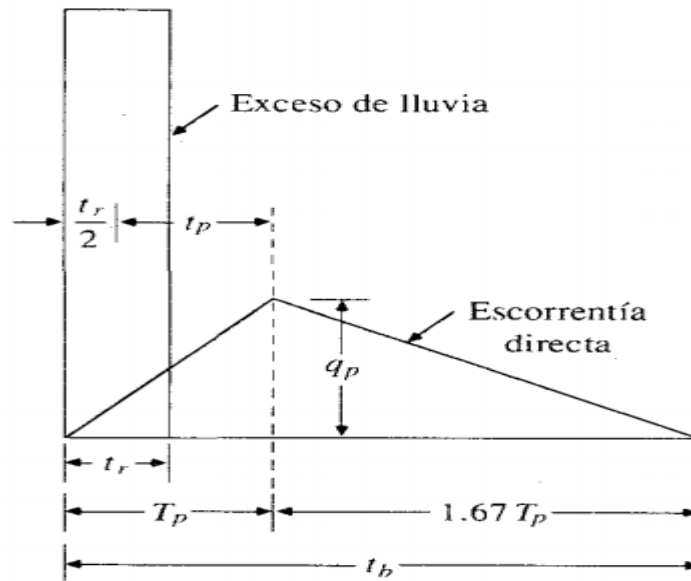


Figura 4. Hidrograma triangular sintético del SCS

Fuente: (Chow et al., 1994)

2.3.10. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal es la capa de vegetación natural que cubre la superficie de la tierra, comprendiendo una amplia gama de biomásas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales, incluyendo las áreas inducidas por factores antropogénicos, como lo son los cultivos.

2.3.11. Fotointerpretación

Es una técnica que tiene como objetivo estudiar y analizar la información extraída mediante la descripción de un diseño con aplicaciones visuales y digitales de percepción remota. Es el proceso por el que se extrae la información contenida en cualquier fotografía aérea.

2.3.12. Geoportales

Los Geoportales son sitios web que permiten el acceso a información georreferenciada de una entidad gubernamental de cualquier país a la ciudadanía (DANE, 2020). La mayor parte de la



información es estos sitios son gratuitas y pueden ser descargadas sin ningún documento o usuario y en otros es obligatorio el uso de una cuenta para su acceso.

2.3.12.1. Portal del IGAC

El Geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) es una herramienta web interactiva que dispone a la ciudadanía diferentes productos de información georreferenciada producida por el instituto. En la sección de visores geográficos se puede encontrar información como: Mapa de Cartografía básica; Mapa de Cartografía Básica con Relieve; Mapa de Sistema Nacional Catastral; Mapa dinámico de Líneas de Vuelo; Mapa de la Subdirección de Agrología; Consulta de Planchas a nivel Nacional, Visor de Patrones Corine Land Cover y Consulta de Aerofotografías a Color. (IGAC, 2021).

2.3.12.2. Portal del USGS

El Portal de datos geográficos (GDP) de El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) proporciona acceso a numerosos conjuntos de datos, incluidos datos en cuadrícula para el clima y el uso de la tierra. Los conjuntos de datos se pueden subdividir o resumir antes de la descarga utilizando varios algoritmos (USGS, 2021).

2.3.12.3. Portal SIAC

El geovisor del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) permite consultar la información geográfica más relevante producida por las entidades que conforman el SIAC y conocer los principales aspectos ambientales de la región de interés. Además, permite acceder a un listado completo para la descarga de las capas de interés en formato shapefile y pdf, también permite consultar los metadatos de la información geográfica disponibles (SIAC, 2021).

2.3.13. Software HEC-HMS

Es un programa gratuito, de dominio público y fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE. UU. HEC-HMS está desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa. Este programa está planteado para ser aplicado en un amplio rango de regiones geográficas para solucionar un rango general de problemas. Como estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc.



Los datos de entrada que necesita el programa dependen directamente del tipo de método que se vaya a utilizar, pero en general se dividen en cuatro datos de entrada.

1. Precipitación histórica o de diseño.
2. Características del suelo.
3. Información morfométrica de las subcuencas.
4. Datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.



3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia de la variación de la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía de la cuenca del arroyo Guayepo mediante el análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas para los años 2004 y 2019, aplicando el software HEC-HMS para comparar con los resultados obtenidos en estudios de campo, estableciendo el grado de importancia en los diseños hidráulicos y el manejo de cuencas.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar mediante el análisis de fotografías aéreas los diferentes tipos de cobertura vegetal existentes en el área de estudio.
- Evaluar el área de cobertura vegetal de la cuenca del arroyo El Guayepo entre el año 2004 y el año 2019 y establecer el porcentaje de variación.
- Realizar una modelación hidrológica mediante el software HEC-HMS y hallar los caudales de escorrentía para los años 2004 y 2019 y calcular el porcentaje de variación de la misma.
- Confrontar los resultados obtenidos y determinar el grado de importancia y la incidencia de la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía de la cuenca estudiada.



4. ALCANCE

4.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en la cuenca del arroyo Guayepo, ubicada a 25 kilómetros del centro de la ciudad de Cartagena de Indias D.T y C. Con una longitud total del cauce 17.8 Kilómetros aproximadamente, desde la cantera La Unión hasta su desembocadura en el mar Caribe en las inmediaciones del Club de Golf Karibana con coordenadas 10°33'26.56" Norte y 75°24'19.66" Oeste, 10°29'32'42.44" Norte y 75°29'42.44" Oeste respectivamente. La cuenca limita al norte con el corregimiento de Guayepo y al este con el corregimiento de Bayunca y al oeste con el Mar Caribe. El área total de estudio es de 38 Km² aproximadamente y comprende parte del territorio de los corregimientos de Punta Canoas, Pontezuela y Guayepo.

4.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL

El estudio se realizó para los años con los que se cuenta con información suficiente para la investigación propuesta, obtenidas de imágenes de Google Earth y SAS PLANET, de mapas de cobertura vegetal y estudios de suelos. Inicialmente, en la propuesta de investigación, se contempló analizar los años 2004 y 2019, pero, dado que se encontró información de cobertura vegetal desde el año 2000, se analizaron los años 2000, 2010 y 2019. El desarrollo de la investigación comprende la recopilación y estudio de información secundaria en el semestre académico 2020-I y su posterior procesamiento y análisis con el fin de obtener las conclusiones del proyecto en un periodo de 16 semanas según el calendario académico del semestre 2020-II.

4.3. DELIMITACIÓN CONCEPTUAL

El tipo de investigación que se propone es aplicada, para la cual, primeramente, se debe realizar la delimitación de la cuenca y determinar los parámetros morfométricos de la misma (Área de drenaje, perímetro, Índice de Gravelius, Factor de forma, tiempo de concentración, pendiente, coeficiente de escorrentía, etc.) que se determinan a partir de datos obtenidos en los sistemas de información geográfica, longitud de la cuenca, ancho medio de la cuenca, longitud de los drenajes y tipo de suelo según la caracterizaciones hechas en estudios previos (Díaz & Dávila, 2020) o proporcionadas por los geoportales disponibles en la web, como el del Servicio Geológico Colombiano o el del IGAC. Luego determinar las variables necesarias para la investigación como las precipitaciones que están relacionadas directamente con la duración de las lluvias, y la variable más importante a ser estudiada que es la estimación de la cobertura vegetal mediante la



fotointerpretación. Los anteriores parámetros son los necesarios para aplicar el método racional y determinar la escorrentía. Posteriormente se seleccionaron las variables de entrada para el modelo en el software HEC-HMS, utilizando el método de pérdidas del SCS con el número de curva, el método de transformación de SCS hidrograma unitario y el método de tránsito de crecientes Muskingum-Cunge (Chow et al., 1994a). Como parámetros de entrada el modelo requiere el área, el tiempo de retardo y el número de curva. El último parámetro mencionado está en función del tipo de suelo, pendiente del terreno, uso del suelo (ganadería, pastoreo, agricultura, etc.), y es donde estaría incluida la variable Cobertura vegetal. La última variable de entrada para la modelación que serían las precipitaciones, para que el software calcule el caudal de entrada, la escorrentía y el caudal de salida. Al finalizar la simulación, se compararon los resultados del modelo con los resultados del método racional y su relación con la variación en el área de cobertura vegetal.

4.4. RESULTADOS Y PRODUCTOS A ENTREGAR

Se buscó determinar la incidencia de la cobertura vegetal en la generación de escorrentía mediante el cálculo de caudales por el método Racional y el uso del software HEC-HMS para poder analizar diferentes alternativas variando el periodo de retorno de la lluvia, y definir la incidencia de la cobertura vegetal en la variación de los caudales de escorrentía entre los años 2000 y 2019, teniendo como hipótesis que la vegetación de la cuenca ha sido alterada por el cambio en el uso del suelo que ha presentado esta zona. Por consiguiente, se pretende demostrar que habrá un aumento significativo en los caudales de escorrentía, si ha habido una reducción considerable en la cobertura vegetal. Finalmente se entregó un informe escrito detallando cada uno de los procedimientos y su posterior análisis e imágenes en las que se identifica la variación de la cobertura vegetal.

4.5. PRODUCTOS COMPLEMENTARIOS Y EXCEPCIONES

La cuenca del arroyo Guayepo presenta un desarrollo urbanístico significativo lo que hace necesario la investigación hidrológica completa de la cuenca. Dependiendo de los resultados obtenidos en el trabajo se realizaron recomendaciones para futuras investigaciones con los que se complementarían el presente estudio realizado al igual que los anteriores. En esta investigación no se estudiaron otras variables que deben ser tenidas en cuenta en un estudio hidrológico como la evapotranspiración, evaporación y la retención superficial. No se presentaron posibles soluciones

Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía de la cuenca del arroyo Guayepo



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

para la disminución en los caudales de escorrentía. Para la determinación del tipo de suelo no se realizaron sondeos, y en general no se tomó ningún dato en campo, pero se usan como referencia datos de estudios recientes realizados en la cuenca.

5. METODOLOGÍA

El estudio se puede clasificar como investigación aplicada o del tipo relacional, que trata de hallar o demostrar la relación entre dos variables, en este caso, la cobertura vegetal y la escorrentía. Se realiza un cambio de nombre para la actividad recopilación de datos hidrológicos, como había sido propuesta anteriormente, y se incorpora el nombre “recopilación y procesamiento de datos hidrológicos”. Para realizar este estudio se siguieron una serie de pasos ordenados de manera lógica y coherente y se muestran a continuación de forma esquemática en la figura 5.



Figura 5. Esquema de metodología

Fuente: Autores

5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO

Se inicia el estudio con la delimitación del área de estudio, sus propiedades y características siguiendo los siguientes pasos:



5.1.1. Recopilación de datos topográficos

Para este paso, inicialmente se indagó en las plataformas y geoportales abiertos, información referente a la topografía del terreno, datos que son indispensables para la delimitación de la cuenca hidrográfica de estudio. Dicha información se obtuvo como modelo digital de elevación DEM, del geoportal del Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS (U.S. Geological Survey) específicamente del satélite SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Al obtener dichos datos topográficos de una fuente extranjera, se debe tener cuidado con la misma, ya que se puede incurrir en posibles errores, por lo que siempre se deben verificar con una información brindada por un ente local de confianza, en este caso, el IGAC. Para ello, del portal de datos abiertos del IGAC, en la cartografía base, se obtuvieron las curvas de nivel para la zona estudiada y así poder corroborar los datos. Cabe resaltar, que las curvas de nivel obtenidas del IGAC se encuentran cada 25 metros. Luego se extraen las curvas de nivel del DEM obtenido previamente mediante softwares especializados como ArcGIS y Global Mapper y se procede a comparar con las curvas suministradas por el IGAC. Se comprueba que, aunque no son exactamente iguales, presenta la mayor similitud en los datos topográficos, por ende, se elige este servidor para el suministro de datos, por encima de algunos conocidos como los datos del satélite ALOS PALSAR o ASTER GDEM.

5.1.2. Delimitación de la cuenca

Una vez realizado esto, mediante los softwares de apoyo, Global Mapper y ArcGIS, se hace la delimitación de la cuenca, obteniendo así su área y perímetro. Teniendo esto, basados en los datos topográficos, se obtuvieron los drenajes de toda la cuenca, y se dividió la misma en microcuencas más pequeñas, con el fin de aplicar el método racional posteriormente. La información de los drenajes de la cuenca también se confrontó con la suministrada por el IGAC en formato shapefile, que fueron procesadas de igual forma en los softwares mencionados, dando como prioridad la información del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

5.1.3. Cálculo de parámetros morfométricos

Seguido a esto, se calcularon algunos de los parámetros morfométricos más importantes de la cuenca, como la forma, índice de Gravelius, factor de forma, etc. Teniendo definidos los parámetros morfométricos se hizo la estimación del tiempo de concentración de la cuenca. Para este cálculo, se usaron las formulaciones de Kirpich (1940), California Culverts Practice (1942),



Bransby-Williams y el método de la velocidad propuesto en el plan maestro de drenajes pluviales. Todos estos tiempos se promediaron para obtener el tiempo de concentración de cada sub cuenca.

5.1.4. Geomorfología de la cuenca

Además de los datos de forma, también se estudió la geomorfología de la cuenca, definiendo los tipos de suelos que se encuentran en la misma. Se recopiló información de mapas geológicos y estudios regionales de caracterización del suelo presente en la cuenca, ya que, para la mayoría de modelaciones y cálculos hidrológicos, el factor tipo de suelo es un importante parámetro de entrada. Se acude al geoportal del IGAC, en donde se obtiene el mapa de suelos del departamento de Bolívar, en formato shapefile. Teniendo el área de la cuenca georreferenciada y el mapa de suelos en ArcGIS, se hace uso de la herramienta Clip y se recorta el mapa general quedando así la información de los distintos tipos de suelos solo para nuestra área de estudio. También se obtiene del portal del IGAC el “*Estudio general de suelos del departamento de bolívar*” que será de utilidad para la interpretación de los perfiles encontrados y sus características. Dichas características son importantes, ya que algunos parámetros necesarios para los cálculos posteriores dependen de los tipos de suelos encontrados. Se definió la permeabilidad del suelo, en base a la definición y características de los perfiles encontrados en la cuenca. De dicha definición depende el cálculo del coeficiente de escorrentía, y también, basado en dichas características y definición de los perfiles, se establece el grupo hidrológico de suelo en función de la relación que existe entre la textura del suelo y los grupos hidrológicos propuesta por Rawls (1983), mencionada en Fernández (2006).

5.2. RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS HIDROLÓGICOS

Esta parte del estudio, comprende la recopilación y el procesamiento de los datos obtenidos como sigue:

5.2.1. Recopilación de registros de lluvias

Para este paso, se recopiló información hidrológica y se definieron los periodos de retorno que se usaron para las lluvias de diseño, se procedió a calcular la misma. Cabe resaltar que en la propuesta no se tenía contemplado el cálculo de las curvas IDF, pero debido a que no se logró adquirir las mismas, se elaboraron, tomando como base los registros de precipitaciones máximas



en 24 horas que se encontraron disponibles desde el año 1974 hasta el 2019 en Diaz & Dávila (2020) para la estación Bayunca.

5.2.2. Cálculo de curvas IDF

La metodología usada fue la propuesta por Olivares (2017), modificado con las relaciones de duración de precipitación expuesta por Chang & Bolívar (1997). De las curvas IDF se obtuvieron las intensidades que se usaron en el método racional y, además, se extrajeron los datos necesarios para el hietograma de diseño.

5.2.3. Determinación de los periodos de retorno

Además del análisis multitemporal de coberturas, también se analizó la variación de los caudales respecto a los periodos de retorno. Dichos periodos de retorno se establecieron teniendo en cuenta lo dictaminado por la resolución 330 por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento básico (RAS, 2017).

5.2.4. Cálculo de hietograma de diseño

La transformación a hietograma de precipitación de diseño se hizo con la metodología del bloque alterno (Chow et al., 1994a, p. 477) y fue introducida al modelo del HEC-HMS.

5.3. EVALUACIÓN DE COBERTURA VEGETAL

Para realizar dicha evaluación, se plantearon dos metodologías, una para los años 2000 y 2010 y la otra para el año 2019. Esto se realizó porque la información encontrada en los mapas de cobertura vegetal solo cubría hasta el año 2010, por lo que para el año 2019, se procedió con una metodología alternativa.

5.3.1. Evaluación de la cobertura vegetal en los años 2000 y 2010

Para los años 2000 y 2010, se hizo uso del *mapa de coberturas de tierra* a escala 1:100.000, que abarca todo el territorio nacional, obtenido del portal SIAC (Sistema de Información Ambiental de Colombia), el cual fue descargado en formato Shapefile. Teniendo la cuenca georreferenciada y el mapa de coberturas, con el software ArcGIS se realizó un geoproceto denominado clip del mapa nacional con la cuenca, quedando así solo la información del mapa que necesitamos. Ya teniendo la información referente a la cuenca, mediante ArcGIS se hallaron las áreas de cada tipo de cobertura vegetal presente para los años 2000 y 2010. Los tipos de coberturas vegetal se hallan en las propiedades del mapa en ArcGIS y se encuentran detallados en Leyenda



Nacional de Coberturas de la Tierra, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000 (IDEAM, 2010).

5.3.2. Evaluación de cobertura vegetal en el año 2019

Dado que la información suministrada en los mapas de coberturas de la tierra obtenidos del SIAC solo llega hasta el año 2010 y se necesita hasta el año 2019, se planteó para el año 2019 una metodología distinta, que consta de identificar visualmente las coberturas vegetales en una imagen satelital y trazar polígonos en Google Earth para así obtener las áreas. Teniendo las coberturas en ArcGIS para los años 2000 y 2010 en formato shapefile, se transformaron a formato Kml para que pueda ser legible en Google Earth y así, se hizo una superposición del mapa de coberturas con las imágenes disponibles en Google Earth a fin de tener una idea visual de las coberturas existentes, las zonas en las que se encuentran y la forma en la que se ven dentro de una imagen satelital y de este modo, poder realizar la digitalización de las coberturas en el año 2019. Además, teniendo el mapa de la cuenca superpuesto con las imágenes de Google Earth, que cuenta con varios años en las fotografías, se realizó un chequeo del cambio de coberturas, haciendo más notorio visualmente una de las hipótesis de la investigación.

Se obtuvo una imagen satelital en el software SAS PLANET del servidor ESRI para el año 2019, la cual fue paneada (exploración del área de estudio a resolución requerida) y georreferenciada para su posterior procesamiento. Se usó un zoom de 18 en SAS PLANET para la obtención de una imagen con alta resolución y así poder procesarla con la mayor precisión posible. Al descargar la imagen georreferenciada, se traslada dicha imagen a Google Earth, se hace una superposición con las imágenes ya existentes en esta plataforma y se identifican en la imagen de SAS PLANET las coberturas que visualmente se habían establecido con las imágenes de Google Earth. Teniendo identificadas las coberturas y sus zonas, se trazan polígonos sobre la imagen de SAS PLANET usando las herramientas de Google Earth y siempre comprobando con las imágenes del servidor de Google. Ya habiendo dibujado todos los polígonos de las coberturas presentes en la cuenca, se encuentran las áreas de cada polígono y se hace la sumatoria para cada tipo de cobertura vegetal. Estos polígonos se muestran en forma de mapa en ArcGis.

5.3.3. Coeficiente de escorrentía y número de curva

Luego de obtener las áreas de cobertura de cada año de análisis, se calcularon los porcentajes de variación de las mismas y, además, se calcularon los parámetros basados en tipo de suelo y



cobertura vegetal, que son el coeficiente de escorrentía, usado en el método racional y el número de curva utilizado en la modelación con el software HEC-HMS para cada año analizado.

Para el coeficiente de escorrentía, se usaron las tablas expuestas en Arrieta Pastrana, (2015, p. 44), propuesta por el manual de obras públicas de Venezuela, dado que la cuenca en su mayoría es rural. Para hallar el número de curva, se usaron las tablas expuestas en (Chow et al., 1994a, p. 477), pero considerando que el Soil Conservation Service en su metodología contiene unas tablas con más información de las que están descritas en Chow et al., (1994). Se investigó en algunas tesis que tratan temas relacionados al SCS y en Fernández (2006) se encontraron todas las tablas propuestas por dicha metodología. Se hizo la comparación de los números de curvas obtenidos en ambos casos y se eligió el calculado con todas las tablas propuestas.

5.4. CÁLCULO DE ESCORRENTÍA

Para el cálculo de los caudales de escorrentía, se aplicaron dos métodos distintos. Los métodos usados en este estudio fueron el Método racional y mediante la modelación en el software HEC-HMS usando el método del número de curva.

5.4.1. Cálculo de escorrentía con el Método Racional

Teniendo definidos y calculados todos los parámetros de entrada para la modelación hidrológica obtenidos anteriormente se procedió a calcular la escorrentía para cada año (2000, 2010 y 2019) y cada periodo de retorno (25,50 y 100 años). Para el método racional, se calculó el hidrograma de caudales de cada microcuenca y el acumulado general, siendo la suma de todos los hidrogramas de las microcuencas que alimentan al cauce principal, obteniendo los caudales pico para cada periodo de retorno y para cada año de análisis. Se estimaron los tiempos de viaje de cada fin del cauce de cada cuenca con el método de la velocidad, habiendo así encontrado las distintas variaciones en los caudales en rangos de tiempo de 1 minuto.

5.4.2. Cálculo de escorrentía por la modelación HEC-HMS

Para la determinación de los caudales picos en el modelo HEC-HMS con el método del número de curva, fue necesario integrar cuatro componentes en el programa, el primero fue el modelo de la cuenca (*Basin Model*) donde se añadió un archivo shapefile con el perímetro de las subcuencas y sus respectivos cauces, para crear los elementos subcuenca, cauce y punto de salida o aforo (*Subbasin, Sink y Reach*), y su unión y para posteriormente introducir el área de la cuenca y escoger



el método de pérdidas (Número de curva de SCS) y el método de transformación (hidrograma unitario del SCS) y el método de tránsito de crecientes (Muskingum-Cunge). Luego de haber escogido el método de pérdidas se introdujo la abstracción inicial y el número de curva para cada subcuenca al modelo, para el método de transformación se introdujeron los tiempos de retardo y para el método de tránsito de crecientes se añadieron la longitud de tramo, pendiente, coeficiente de rugosidad de Manning y los datos de la sección. El segundo componente fue de Serie temporal de datos (*Time-Series Data*) donde se escogió el tipo de entrada del componente hidrológico que para este caso será manual con un hietograma, se utilizaron deltas de tiempo de 15 min. Posteriormente se introdujo fecha y hora del inicio y fin de la lluvia, para que el programa cree la tabla de datos del hietograma y se suministraron los datos calculados anteriormente con el método del bloque alterno. El tercer componente fue el de *Meteorologic Models* donde se escogió el hietograma anteriormente añadido. Y el último componente fue el de *Control Specifications* donde se introdujo fecha y hora de todas las gráficas y tablas que finalmente arroja el programa. Para la visualización de los resultados se corrió el modelo y se revisó en la pestaña de resultados los datos que se desean como hidrogramas o tablas de datos de infiltración y escorrentía.

5.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de realizar todos los cálculos pertinentes del estudio, se analizaron los resultados y se compararon tanto la variación de los caudales de escorrentía para los distintos años y periodos de retorno respecto a la variación de la cobertura vegetal calculada para esos años. Con esta comparación, se establecieron las relaciones de incidencia que tiene el cambio en la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía, cumpliendo así con el objetivo del presente estudio.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

Para la delimitación de la cuenca, se usaron softwares de apoyo especializados como ArcGIS, Global Mapper y Google Earth. Primeramente, para la utilización de los sistemas de información geográfica antes mencionados se establecieron las coordenadas del lugar de estudio, luego se utilizó el modelo digital de elevación DEM, del geoportal del Servicio Geológico de los Estados Unidos del satélite SRTM y las curvas de nivel encontradas en el geoportal del IGAC, posteriormente se extraen las curvas del nivel de las imágenes satelitales de SRTM y se delimitó la cuenca se muestra en la figura 6.

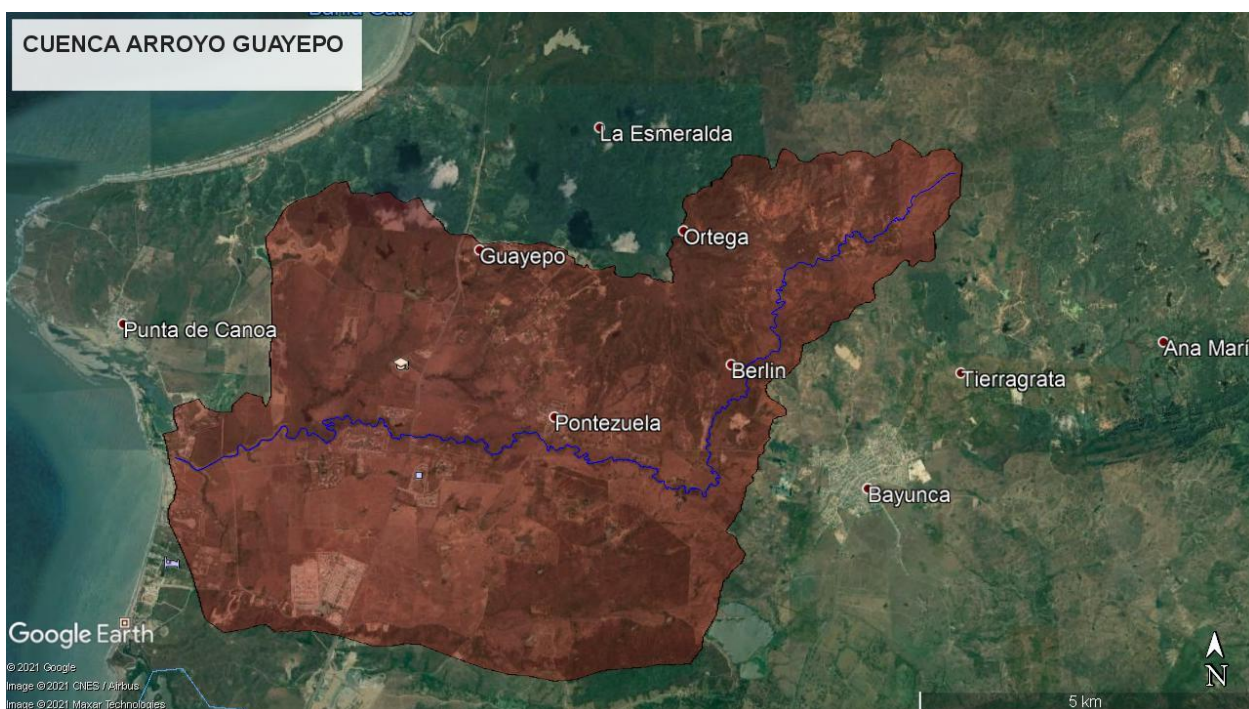


Figura 6. Delimitación de la cuenca del arroyo Guayepo y su cauce principal

Fuente: Autores

Se presentan en la tabla 3 los datos representativos de la cuenca y en la figura 7 se muestra la cuenca subdividida en subcuencas:

Tabla 3. *Parámetros principales de la cuenca*

Parámetro	Valor
Área (km^2)	59.1
Perímetro (km)	40.7
Longitud cauce principal (km)	22.9
Longitud máxima axial (km)	13.02

Fuente: Autores



Figura 7. *Subcuencas del arroyo Guayepo y drenajes*

Fuente: Autores

La figura 7 presenta las subcuencas clasificadas desde la A hasta la I con sus respectivos drenajes. La subcuenca I ubicada en la parte baja, drena al final de arroyo Guayepo, cuyo cauce presenta varias bifurcaciones, además de ubicarse en una topografía plana que dificulta los cálculos hidráulicos por la falta de información y la alta intervención que presentan los cauces al igual que la cobertura vegetal. Las subcuencas F y G, drenan hacia un embalse que se comunica con el arroyo Guayepo en la zona baja de la cuenca. Dado que, no se tiene información sobre el tamaño ni los niveles del embalse y su funcionamiento, se decidió no incluir estas subcuencas en el análisis de escorrentía del cauce principal del arroyo Guayepo. Por lo tanto, NO se considerarán las

subcuencas F, G e I en el análisis de la escorrentía y se considerará solo parte de la subcuenca H hasta un punto antes de que se bifurque el cauce principal en la parte baja de la cuenca y las subcuencas A, B, C, D y E. Partiendo de lo anterior, en la figura 8 se muestra el área de la cuenca considerada para el análisis de cobertura vegetal y escorrentía en este estudio y en la figura 9 se muestra la subdivisión en subcuencas del área considerada.

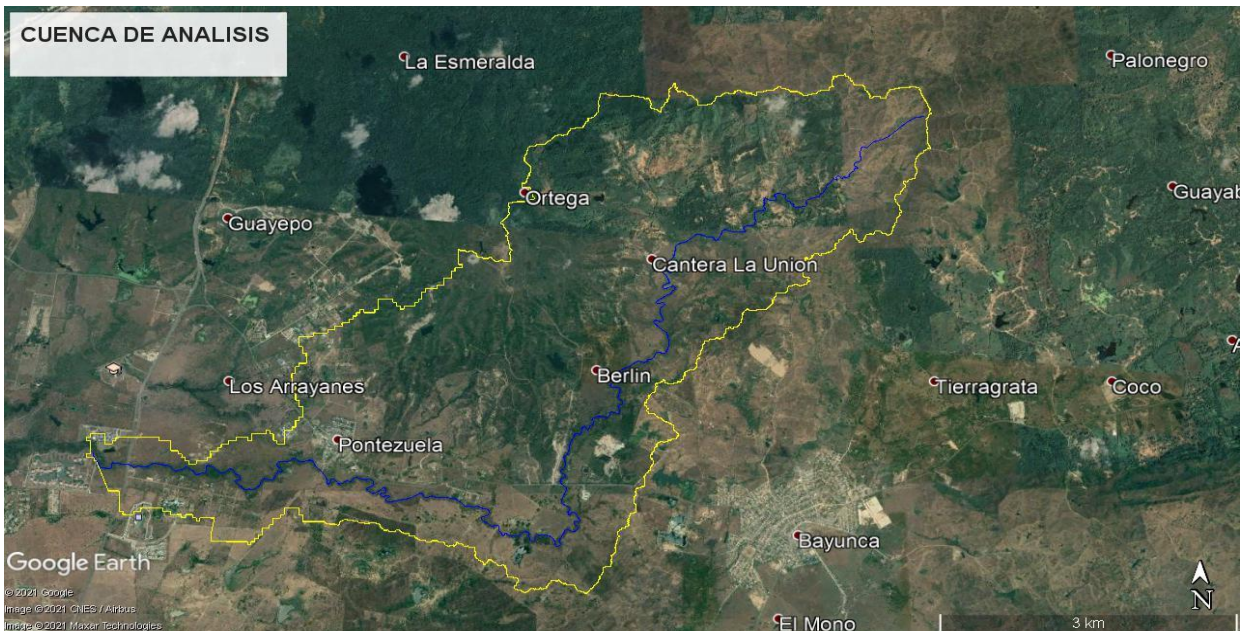


Figura 8. Área de la cuenca del arroyo Guayepo considerada para análisis de cobertura vegetal y escorrentía.

Fuente: Autores

El área de estudio seleccionada se subdividió en 79 microcuencas para aplicar el método racional, teniendo en cuenta que se recomienda que las cuencas no sean mayores de 80 ha (Ras, 2017). Usando el software Global Mapper se dividió la cuenca general en subcuencas de menor tamaño para la aplicación del método racional como se muestra en la figura 10.

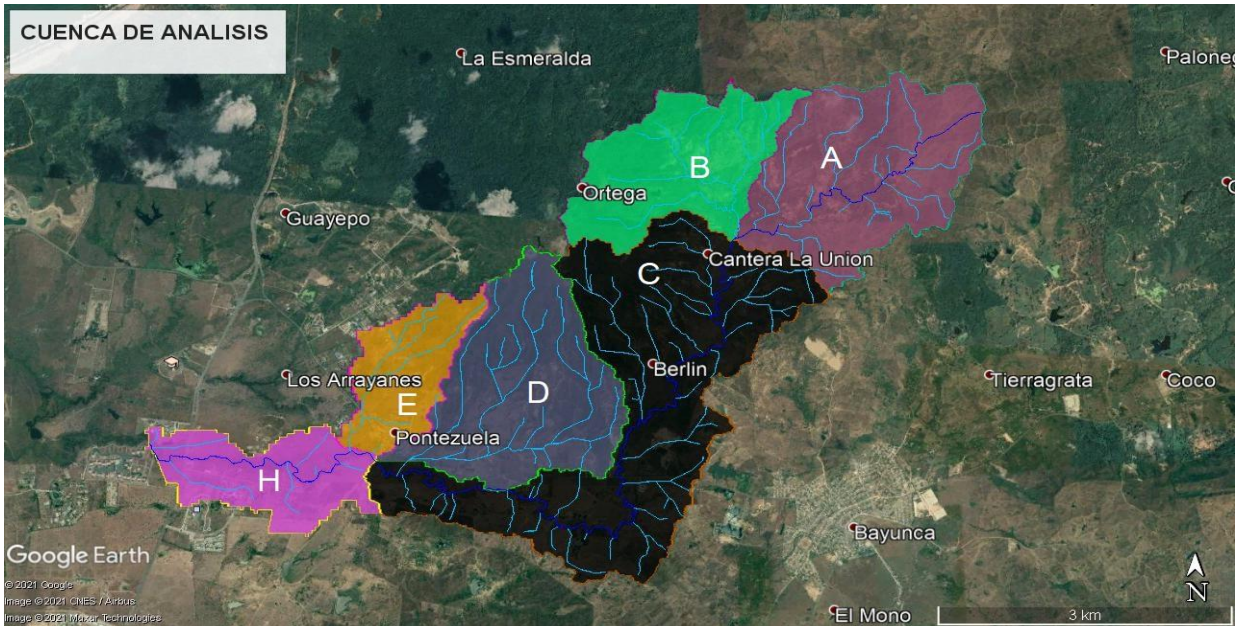


Figura 9. Subcuencas de análisis del área de estudio consideradas para el análisis

Fuente: Autores

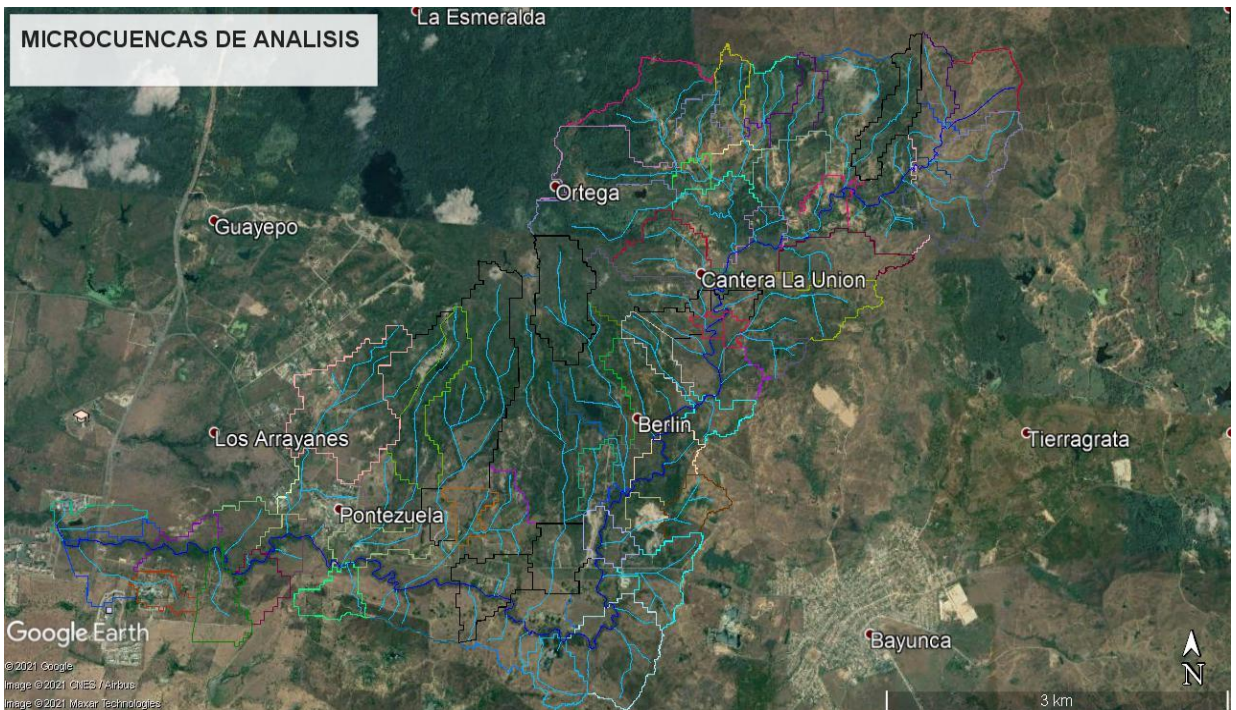


Figura 10. Distribución de microcuencas y sus respectivos drenajes para la aplicación del método racional sobre una imagen de Google Earth.

Fuente: Autores

Con el software AutoCAD se determinaron las áreas de cada microcuenca, la longitud de sus cauces principales y los desniveles del cauce para la obtención de las pendientes medias para el cálculo del tiempo de concentración de cada microcuenca para la aplicación del método racional como se muestra en la figura 11. Todos estos datos se presentan para las 79 microcuencas en la tabla del anexo A. Además, se hallaron los datos necesarios para calcular los parámetros morfométricos en la cuenca de estudios.

ura alámbrica 2D]

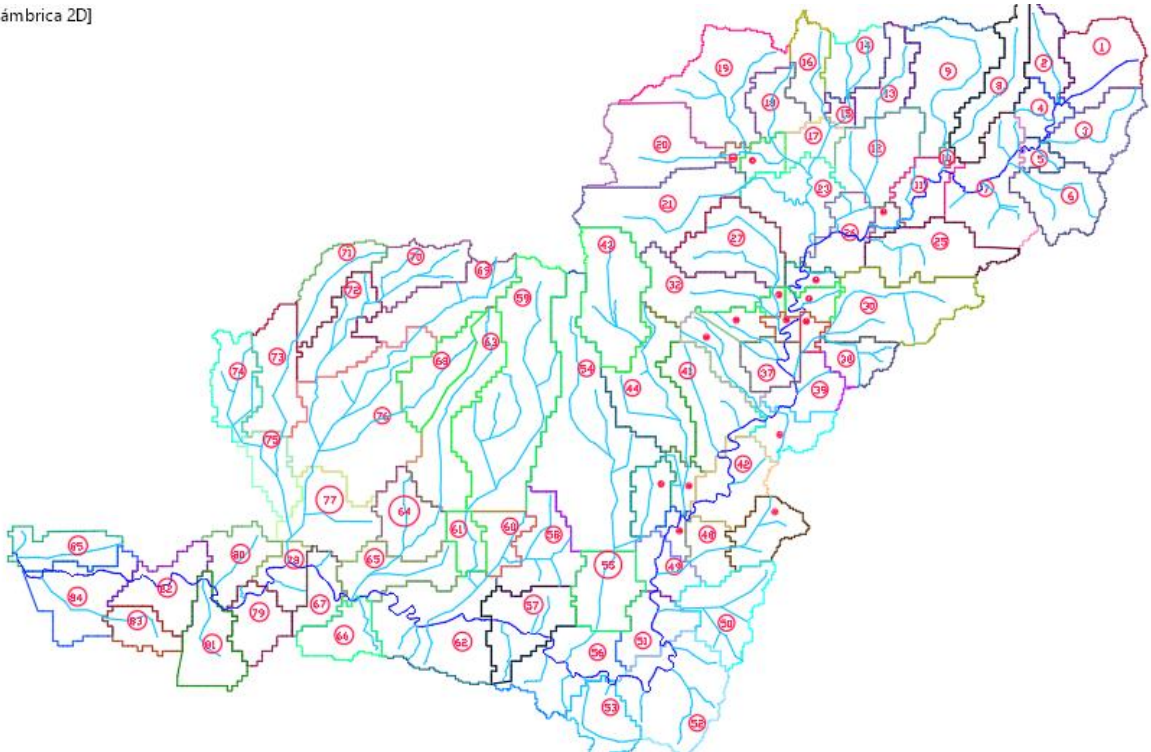


Figura 11. Delimitación de las microcuencas en el área de estudio para la aplicación del método racional en el software AutoCAD

Fuente: Autores

6.1.1. Parámetros morfométricos de la cuenca

Se calculan los parámetros morfométricos de la cuenca, índice de compacidad, factor de forma, densidad de drenaje y sinuosidad que se detallan a continuación.

6.1.1.1. Índice de Gravelius o compacidad

Se calcula como:

$$K_c = 0.28 \frac{38.94 \text{ km}}{(21.07 \text{ km}^2)^{1/2}} = 2.375$$

La cuenca tiene un coeficiente de compacidad mayor que uno, lo que quiere decir que tiene una forma irregular, muy poca parecida a un círculo lo que nos indica que no es propensa a sufrir de inundaciones.

6.1.1.2. Factor de forma

Se calcula el factor de forma como sigue:

$$K_f = \frac{38.13 \text{ km}^2}{(13.02 \text{ km})^2} = 0.234$$

Debido a que el factor de forma es bajo la cuenca tiene pocas posibilidades de crecientes por su forma alargada.

6.1.1.3. Densidad del drenaje

La densidad del drenaje se calcula de la siguiente manera:

$$D_d = \frac{104.21 \text{ km}}{38.13 \text{ km}^2} = 3.48 \text{ km/km}^2$$

De acuerdo al valor de referencia (3.5) la cuenca se puede catalogar como bien drenada, aunque este valor es relativo porque depende de la escala en la que se encuentren los planos.

6.1.1.4. Sinuosidad de la corriente

La sinuosidad de la corriente de agua en este caso el cauce principal se calcula de la siguiente manera.

$$S = \frac{17633.15 \text{ m}}{12881.1 \text{ m}} = 1,36$$

La corriente del cauce principal tiene una sinuosidad normal, por lo que no es catalogado como un cauce principal recto.

Partiendo de la figura 9 se calcularon los parámetros morfométricos más importantes de las subcuencas de análisis cuyos valores se encuentran resumidos en la tabla 4.

Tabla 4. *Parámetros morfométricos calculados de las subcuencas A, B, C, D, E y H.*

Subcuenca	AREA (Km2)	Long Cauce (m)	Pendiente	K_c	K_f	S
A	3.935	4067.21	0.00836	1.76	0.456	1.18
B	2.758	2283.19	0.01577	2.06	1.221	1.14
C	7.087	10152.77	0.00217	2.61	0.265	1.52
D	3.840	3641.75	0.01922	1.83	0.443	1.03
E	1.552	2265.42	0.01501	1.89	0.375	1.09
H	1.885	3413.16	0.00234	1.94	0.350	1.25

Fuente: Autores



En la tabla 4 se evidencia que el cauce más largo es el de la subcuenca C, por tanto, en el factor de forma de esta subcuenca establece que tiene forma alargada. Todas las subcuencas tienen un índice de Gravelius (K_c) mayor que 1 lo que implica que todas ellas tienen formas irregulares. Por otro lado, la mayoría las subcuencas tienen un factor de forma bajo lo que quiere decir que tienen forma alargada y no son propensas a inundaciones exceptuando la cuenca B que supera la unidad lo que indica una tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas. El parámetro de la sinuosidad en las subcuencas A, B, D y E es inferior a 1.25 lo que implica que sus cauces principales son rectos y probablemente la circulación de sus flujos más rápidos, las subcuencas restantes presentan de una sinuosidad normal.

6.1.2. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es uno de los parámetros más importantes y más difícil de estimar en el estudio de cuencas hidrográficas por las diferentes formulaciones que existen, las más utilizadas son la formulación de Kirpich (1940), la de California Culverts Practice (1942) y la propuesta por Bransby-Williams. A manera de ejemplo, se muestran los cálculos del tiempo de concentración para la subcuenca A y de los resultados obtenidos se hará un promedio. Los datos de la hoya se muestran a continuación:

$$\text{ÁREA (ha)} = 393.48$$

$$\text{LONGITUD CAUCE PRINCIPAL (m)} = 4067.21$$

$$\text{DESNIVEL DEL CAUCE PRINCIPAL (m)} = 34$$

La pendiente media del cauce principal para esta subcuenca se calcula como:

$$S_1 = \frac{34 \text{ m}}{4067.21 \text{ m}} = 0.008359 \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

6.1.2.1. Tiempo de concentración por Kirpich (1940)

Se calcula el tiempo de concentración usando la ecuación 7. Se calcula primero la longitud del cauce en pies como sigue:

$$L_{FT} = 3.281 * 4067.21 \text{ m} = 13344.52 \text{ pies}$$

Luego:

$$t_c = 0,0078 (13344.52)^{0,77} (0.008359)^{-0,385} = 73.88 \text{ min}$$

6.1.2.2. Tiempo de concentración por California Culverts Practice (1942)

Se calcula el tiempo de concentración usando la ecuación 9. Primero, se halla la longitud del cauce en millas:

$$L_{mi} = \frac{4067.21 \text{ m}}{1609 \text{ m/mi}} = 2.53 \text{ mi}$$

El desnivel H debe estar en pies, y se calcula:

$$H_{FT} = 3.281 * 34 \text{ m} = 111.55 \text{ ft}$$

Por lo que el tiempo de concentración se calcula:

$$t_c = 60 \left(11.9 \frac{(2.53 \text{ mi})^3}{(111.55 \text{ ft})} \right)^{0.385} = 71.77 \text{ min}$$

6.1.2.3. Tiempo de concentración por Bransby – Williams

Se calcula el tiempo de concentración con la ecuación 13. Primero, se halla el área en Km^2 :

$$M = \frac{393.48 \text{ ha}}{100 \text{ ha/km}^2} = 3.93 Km^2$$

L se calcula como:

$$L = \frac{4067.21 \text{ m}}{1000 \text{ m/km}} = 4.07 \text{ km}$$

Se calcula D como sigue:

$$D = \sqrt{4 * \frac{(3.93 \text{ Km}^2)}{\pi}} = 2.24 \text{ km}$$

Y el tiempo de concentración será:

$$T_c = \frac{4.07 \text{ km}}{1.5(2.24 \text{ km})} \sqrt{\frac{(3.93 \text{ km}^2)^2}{0.008359 \text{ m/m}}} = 130.31 \text{ min}$$

6.1.2.4. Tiempo de concentración promedio

Luego de tener todos los tiempos de concentración calculados, se estima el promedio de ellos como se muestra a continuación:

$$t_{cprom} = \frac{73.88 \text{ min} + 71.77 \text{ min} + 130.31 \text{ min}}{3} = 91.99 \text{ min}$$

Adicionalmente como dato de entrada para el modelo en el software HEC-HMS se necesita el tiempo de retardo que se calcula como el 60% del tiempo de concentración. Los resultados de tiempos de concentración y retardo se muestran en la tabla 5 para cada subcuenca.

Tabla 5. *Tiempos de concentración y de retardo para las subcuencas A, B, C, D, E y H.*

Subcuenca	Tc (min) (kiprich)	Tc (min) (california)	Tc (min) (Bransby – Williams)	Tc promedio (min)	Tiempo de retardo
A	73.88	71.77	130.31	91.99	55.19
B	37.10	36.04	66.76	46.63	27.98
C	251.30	244.13	401.77	299.07	179.44
D	49.25	47.84	99.02	65.37	39.22
E	37.58	36.51	70.86	48.32	28.99
H	105.32	102.32	151.79	119.81	71.89

Fuente: Autores

Para cada microcuenca se aplicó este mismo procedimiento para calcular los tiempos de concentración. Dichos cálculos se muestran en el anexo A.

6.1.3. Geomorfología de la cuenca

A partir de los mapas del IGAC se analizó y geoprocesó la información encontrada (1998), se encontraron los siguientes tipos de suelos presentes en la cuenca como los muestra en la figura 12.

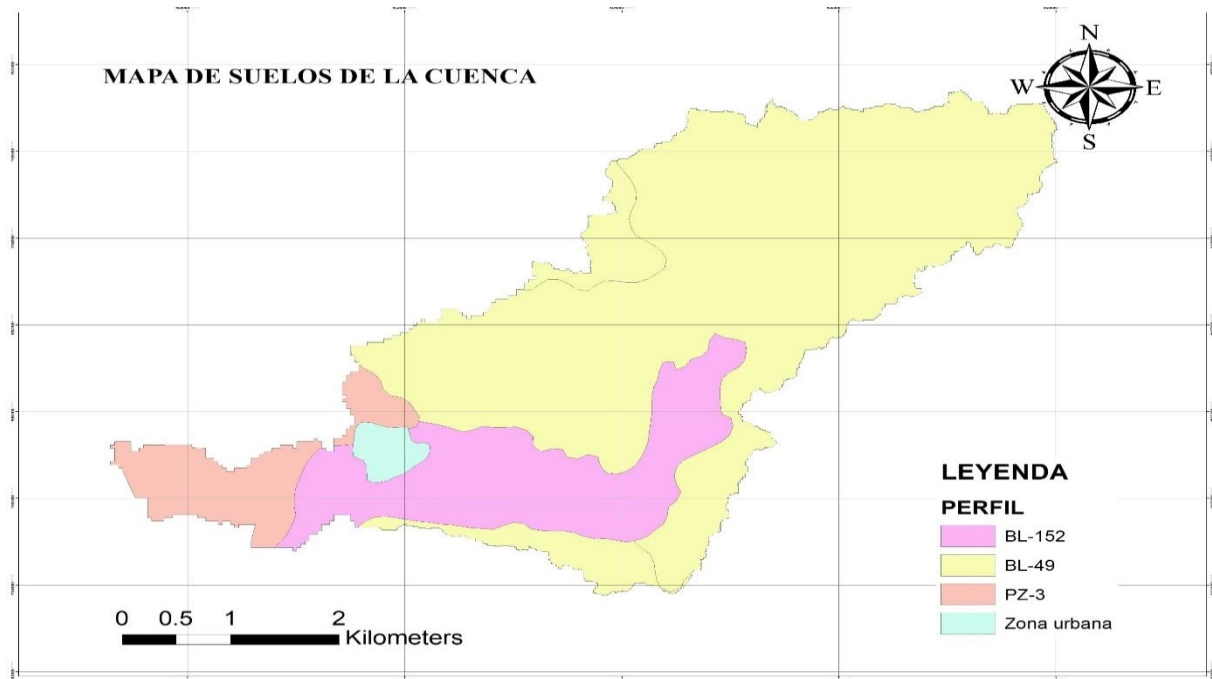


Figura 12. *Mapa de perfiles de suelos en la cuenca de estudio, a partir del geoprocesamiento de los mapas del IGAC*

Fuente: Autores

En la tabla 6 se encuentran las unidades cartográficas y la litología y los perfiles de los suelos encontrados en la cuenca de estudio de acuerdo a con los mapas del IGAC geoprocesados.

Tabla 6. *Unidades cartográficas, litología y perfiles de suelos*

UNIDADES CARTOGRÁFICAS		LITOLOGÍA	PERFIL
ZU	ZU	Zona urbana	Zona urbana
LWI	LWic	Arcillolitas	BL-49
LWN	LWNa	Sedimentos aluviales actuales	BL-152
LWI	LWic2	Arcillolitas	BL-49
LWI	LWic2	Arcillolitas	BL-49
PWD	PWDa	Sedimentos aluviales actuales	PZ-3

Fuente: (IGAC, 1998)

Como se puede observar, la litología de la mayoría de suelos presentes en la cuenca están constituidos por arcillolitas y sedimentos aluviales. A continuación, se describen las características de los diferentes perfiles de suelo tomados del estudio general de suelos del IGAC (1998).

6.1.3.1. Perfil BL-49 (Suelos Typic Ustropepts)

Son suelos superficiales, limitados por altos contenidos de arcilla, moderadamente bien drenados y formados a partir de arcillolitas. Son perfiles tipo A/B/C, donde el horizonte A es grueso, de color pardo amarillento, textura arcillosa gravilosa y estructura en bloques; el B es grueso, de color pardo amarillento claro, con manchas litocrómicas gris verdosas, de textura arcillosa gravilosa y estructura en bloques. El horizonte C aparece a los 600 cm de profundidad y tiene estructura de roca en 50% por volumen.

6.1.3.2. Perfil BL-152 (Suelos Fluventic Ustropepts)

Estos suelos son profundos, bien drenados y ocupan todas las posiciones de los vallecitos. El perfil modal es de la forma A/B/C; el horizonte A es delgado, de 12 cm de espesor, de color pardo oscuro, textura franca y estructura en bloques; el horizonte B es grueso, y se divide en Bw1 y Bw2, de color pardo amarillento combinado con pardo oscuro, textura franco arcillosa y estructura en bloques; sigue un horizonte transicional BC rico en carbonatos, de textura franco arcillosa y estructura en bloques. El horizonte C aparece entre los 60 y los 100 cm, de color pardo amarillento y textura franco arcillosa.



6.1.3.3. Perfil PZ-3 (Suelos Sodic Haplusterts)

Son moderadamente profundos a y moderadamente bien drenados. La morfología del perfil es de tipo A/B/C; el horizonte A es grueso, de color pardo grisáceo muy oscuro, textura arcillosa y estructura en bloques; el horizonte B es muy grueso, de color gris oscuro a pardo oscuro, textura arcillosa y estructura columnar que parte en bloques angulares; el C es de color pardo grisáceo oscuro con manchas pardo amarillentas y textura arcillosa.

6.1.3.4. Definición del grupo hidrológico

Para aplicar el método del número de curva es necesaria la definición del grupo hidrológico, en este caso se usó la relación que establece Rawls *et al.* (1983) que es una de las más difundidas llegando a ser admitida por el órgano de referencia (SCS)(Fernández, 2006). Dicha relación se usa debido a que la información que se tiene correspondiente al tipo de suelos es la textura, y en la metodología explicada en Chow *et al.*, (1994a) hace referencia a otro tipo de información con la que no se cuenta. Rawls *et al.* (1983) propone determinar el grupo hidrológico a partir de las texturas del suelo como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Grupos hidrológicos de suelo según textura

Grupo Hidrológico	Textura del suelo
Grupo A	Arenosa
	Arenoso-franco
	Franco-arenosa
Grupo B	Franca
	Franco-limosa
Grupo C	Franco-arcillo-arenosa
Grupo D	Franco-arcillosa
	Franco-arcillo-limosa
	Arcillo-arenosa
	Arcillo-limosa
	Arcillosa

Fuente: (Fernández, 2006).

Dado que los suelos encontrados en la cuenca son de textura arcillosa en su totalidad, teniendo y teniendo en cuenta la profundidad de los estratos, el grupo hidrológicos de suelo para cada uno de los perfiles pertenece al grupo D.



6.1.3.5. Determinación de la permeabilidad del suelo

Para la aplicación del método racional, el tipo de suelo es una variable importante para la estimación del coeficiente de escorrentía. Para la elección del coeficiente de escorrentía se usaron los propuestos por el Manual de Obras Públicas de la república de Venezuela (Arrieta Pastrana, 2015, p. 35), debido a que la mayor parte de la cuenca se encuentra en una zona rural y este manual contempla los coeficientes de dichas zonas. Ellos proponen que el coeficiente de escorrentía está en función de la pendiente, el tipo de suelo y tipo de superficie. Por ende, se definen el tipo de suelo como permeable, impermeable y semipermeable basado en la definición de cada perfil expuesta anteriormente en el numeral 6.1.3. Se asume que los perfiles bien drenados, moderadamente bien drenados y drenaje imperfecto corresponden al tipo de drenaje permeable, semipermeable e impermeable, respectivamente. En la tabla 8 se muestra la relación entre los perfiles y su permeabilidad.

Tabla 8. Definición de permeabilidad del suelo

Perfil	Tipo de Drenaje
BL-152	<i>permeable</i>
BL-49	<i>semipermeable</i>
PZ-3	<i>semipermeable</i>
ZU	<i>impermeable</i>

Fuente: Autores

6.2. RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS HIDROLÓGICOS

Para la elaboración de las curvas IDF se siguió lo expuesto por Olivares (2017) y Caña y Pérez (2018) que usaron la formulación siguiente:

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

Para la obtención de la precipitación máxima probable se utilizó como distribución probabilística la de Gumbel teniendo como base los registros históricos de precipitaciones máximas en 24 horas para la estación Bayunca, desde el año 1974 hasta el 2019. Dichos datos fueron tomados de Diaz & Dávila (2020). A continuación, se muestra el proceso para la obtención de la fórmula de intensidad.

6.2.1. Registro de precipitaciones

Los datos de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Bayunca que se muestran en la tabla 9, se procesaron para calcular el promedio y la desviación estándar, parámetros probabilísticos necesarios para la función de ajuste de probabilidad de Gumbel.

Tabla 9. *Registro anual de precipitaciones máximas en 24 horas*

AÑO	Precipitación (mm)	AÑO	Precipitación (mm)
1974	137	1997	94
1975	174	1998	62.5
1976	95	1999	106
1977	120	2000	32.5
1978	140	2001	112.2
1979	140	2002	90.3
1980	83	2003	80.5
1981	78.8	2004	122
1982	52.8	2005	106
1983	120	2006	138
1984	84	2007	122
1985	95.7	2008	108.5
1986	60.34	2009	81
1987	72.73	2010	109.3
1988	150	2011	75
1989	100	2012	105.1
1990	137	2013	56.1
1991	85.5	2014	132
1992	56.6	2015	50.5
1993	87.4	2016	121.8
1994	85	2017	50
1995	84	2018	85.4
1996	80	2019	127

Fuente : (Díaz & Dávila, 2020)

Se calculan las variables probabilísticas de la muestra como sigue:

Promedio:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \dots (20)$$

Donde n es el número de datos de la muestra. Reemplazando valores:

$$\bar{X} = \frac{4486.57 \text{ mm}}{46} = 97.53 \text{ mm}$$

Desviación estándar:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = 30.82 \text{ mm}$$

6.2.2. Distribución de probabilidad de Gumbel

La función de distribución acumulada de Gumbel se muestra como sigue:

$$F(x) = e^{-e^{-(x-\mu)/\alpha}} \dots (21)$$

Para la aplicación de la distribución acumulada de Gumbel se necesitan calcular los parámetros probabilísticos que se muestran a continuación.

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot S = 24.03 \text{ mm}$$

$$\mu = \bar{X} - 0.5772 \cdot \alpha = 83.66 \text{ mm}$$

La variable de Gumbel se determina a partir del periodo de retorno y se halla mediante la siguiente expresión:

$$Y_T = -\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)$$

Luego el factor de frecuencia se halla como:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left(0.5772 + \ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)\right)$$

Reemplazando:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} (0.5772 - Y_T)$$

Gumbel establece que el valor extremo o máximo probable de una variable específica este dado por la siguiente expresión:

$$X_T = \bar{X} + K_T \cdot S$$

Reemplazando K_T

$$X_T = \bar{X} + \left(-\frac{\sqrt{6}}{\pi} (0.5772 - Y_T) \right) \cdot S$$

Reemplazando α

$$X_T = \bar{X} - \alpha \cdot 0.5772 + \alpha \cdot Y_T$$

Finalmente

$$X_T = \mu + \alpha \cdot Y_T$$

Con esta última ecuación se determinó el valor máximo probable en función de los periodos de retorno. Mediante la función de distribución acumulada de Gumbel se determinó la probabilidad de ocurrencia de precipitación para cada periodo de retorno considerado en el análisis. Posteriormente se aplicó una corrección a los datos de precipitaciones máximas por intervalo fijo, debido a que los registros de lluvias máximas anuales en 24 horas se toman de 8:00 AM de un día a 8:00 AM del día siguiente, dando así lluvias registradas en 24 horas, pero no de tormentas que tengan duración continua durante las 24 horas del día. El incremento de intervalo fijo es de 13% según Weiss (1964) y Chulsang (2015). Los resultados se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. *Precipitaciones máximas probables por periodo de retorno y corregidas por intervalo fijo*

Periodo de retorno	Variable Reducida	Precipitación (mm)	Probabilidad de ocurrencia	Corrección
Años	Y_T	X_T	F(X)	X_t corregido
2	0.37	92.47	0.50	104.49
5	1.50	119.71	0.80	135.27
10	2.25	137.74	0.90	155.65
25	3.20	160.53	0.96	181.39
50	3.90	177.43	0.98	200.50
75	4.31	187.25	0.99	211.60
100	4.60	194.21	0.99	219.45
500	6.21	232.98	1.00	263.27
1000	6.91	249.65	1.00	282.10

Fuente: Autores

6.2.3. Cálculo de precipitaciones

Luego de tener calculada la precipitación diaria máxima probable usando la distribución acumulada de Gumbel, se hallan las precipitaciones para duraciones menores a 24 horas



($X_t \text{ corregido} * \%P_t$). Para determinar qué porcentaje de la precipitación máxima en 24 horas sucede a duraciones menores, se usará la relación establecida por Chang y Bolívar (1997), quienes analizaron los registros de lluvias para la estación Rafael Núñez y determinaron la relación entre la precipitación registrada en 24 horas con una de duración menor. De su estudio proponen la siguiente ecuación para duraciones menores a 4 horas y 20 minutos dado que en Cartagena y sus alrededores, las lluvias normalmente no superan esta duración:

$$\%P_T = -0.0067t^4 + 0.090t^3 - 0.4236t^2 + 0.897t + 0.0026$$

Donde t es la duración de la lluvia en horas y $\%P_T$ es el porcentaje de la lluvia presentada en 24 horas caída en una duración menor. En la tabla 11 se encuentran los porcentajes para las distintas duraciones.

Tabla 11. *Coefficientes para las relaciones a la lluvia de 24 horas*

Relación de precipitación en 24 horas y menor duración										
duración (h)	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.33
%P	20.18%	35.61%	55.95%	66.55%	71.66%	74.53%	77.39%	81.49%	87.06%	91.21%

Fuente: (Chan & Bolívar, 1997)

Teniendo esto se calculan los valores de precipitación para cada periodo de retorno y las distintas duraciones con los porcentajes obtenidos y se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. *Producto de precipitación y coeficiente de duración*

Tiempo de duración	Coeficiente %P	PRECIPITACIÓN MÁXIMA PARA CADA DURACIÓN (mm)							
		2	5	10	25	50	100	500	1000
4.33	0.91	95.30	123.38	141.96	165.44	182.86	200.16	240.12	257.30
4	0.87	90.97	117.77	135.51	157.92	174.55	191.06	229.20	245.60
3.5	0.81	85.15	110.23	126.84	147.82	163.38	178.83	214.54	229.89
3	0.77	80.87	104.69	120.46	140.38	155.16	169.84	203.74	218.32
2.5	0.75	77.87	100.81	116.00	135.19	149.42	163.55	196.20	210.24
2	0.72	74.88	96.93	111.54	129.99	143.67	157.26	188.66	202.16
1.5	0.67	69.54	90.02	103.58	120.72	133.43	146.05	175.21	187.74
1	0.56	58.46	75.68	87.08	101.49	112.18	122.78	147.30	157.84
0.5	0.36	37.21	48.16	55.42	64.59	71.39	78.14	93.74	100.44
0.25	0.20	21.08	27.29	31.40	36.60	40.45	44.28	53.12	56.92

Fuente: Autores basados en (Olivares, 2017)

Teniendo esto, se determinan las intensidades para cada periodo de retorno mediante la siguiente relación y los resultados se muestran en la tabla 13:

$$I = \frac{P(mm)}{t(h)}$$

Tabla 13. Cálculo de intensidad de lluvia para cada periodo de retorno

Tiempo de duración (h)	Tiempo de duración (min)	Intensidad de la lluvia por cada periodo de retorno (mm/h)							
		2	5	10	25	50	100	500	1000
4.33	259.8	22.01	28.49	32.79	38.21	42.23	46.23	55.45	59.42
4	240	22.74	29.44	33.88	39.48	43.64	47.76	57.30	61.40
3.5	210	24.33	31.49	36.24	42.23	46.68	51.10	61.30	65.68
3	180	26.96	34.90	40.15	46.79	51.72	56.61	67.91	72.77
2.5	150	31.15	40.32	46.40	54.07	59.77	65.42	78.48	84.10
2	120	37.44	48.47	55.77	64.99	71.84	78.63	94.33	101.08
1.5	90	46.36	60.02	69.06	80.48	88.95	97.37	116.80	125.16
1	60	58.46	75.68	87.08	101.49	112.18	122.78	147.30	157.84
0.5	30	74.41	96.33	110.84	129.17	142.78	156.28	187.48	200.89
0.25	15	84.33	109.17	125.61	146.39	161.81	177.11	212.47	227.67

Fuente: Autores, basados en (Olivares, 2017)

6.2.4. Obtención de los coeficientes k, m y n

Los coeficientes de la ecuación de intensidad-duración-frecuencia se hallaron por regresión lineal, de acuerdo con los siguientes pasos.

Primero se realizó un cambio de variable

$$d = K \cdot T^m$$

Quedando la expresión de la intensidad como:

$$I = \frac{d}{t^n} = d \cdot t^{-n}$$

Dicha expresión potencial se resolvió usando una regresión potencial para cada periodo de retorno. Como ejemplo se muestra el procedimiento para el periodo de retorno de 2 años como sigue. Posteriormente, se graficaron los datos de intensidad vs duración en Excel para cada periodo de retorno y se agregó la línea de tendencia de tipo exponencial, mostrando su ecuación y su coeficiente de la regresión R. Como se muestra en la figura 13.

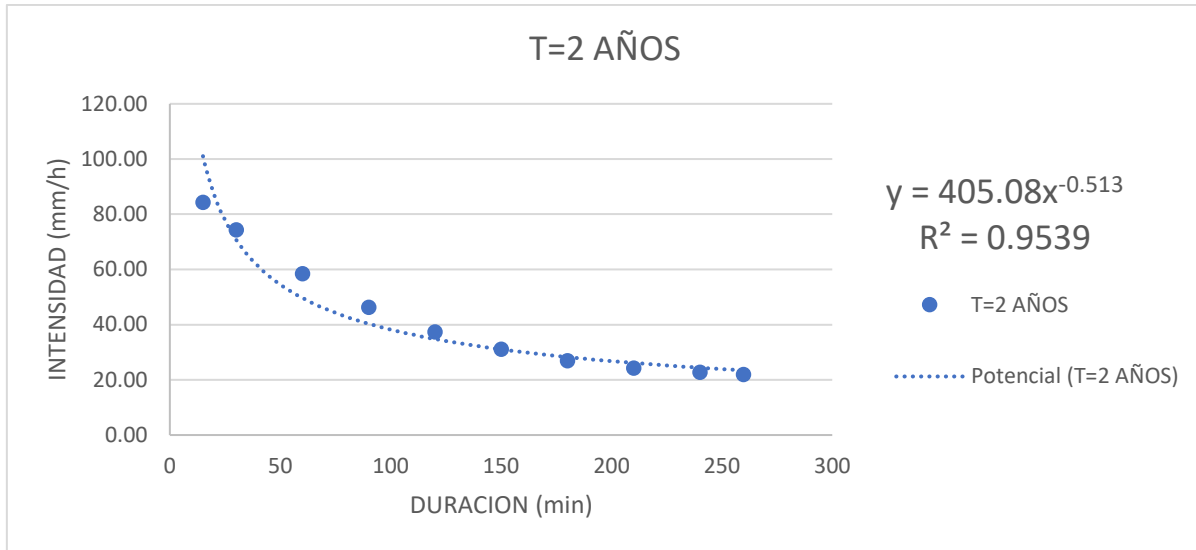


Figura 13. Curva de regresión potencial de intensidades para T=2años

Fuente: Autores

Para el periodo de retorno de 2 años, el coeficiente d hallado fue

$$d = 405.08$$

Y el exponente n fue:

$$n = 0.513$$

Siguiendo el mismo procedimiento se realizaron los ajustes y se determinaron las variables d y n para cada uno de los periodos de retorno, estos valores se exponen en la tabla 14:

Tabla 14. Resumen de los coeficientes hallados en la regresión aplicada para cada periodo de retorno

RESUMEN DE LA REGRESION POTENCIAL APLICADA		
Periodo de retorno (años)	coef regresión (d)	Exponente (n)
2	405.08	0.513
5	524.4	0.513
10	603.4	0.513
25	703.21	0.513
50	777.26	0.513
100	850.76	0.513
500	1020.6	0.513
1000	1093.6	0.513

Fuente: Autores.

Partiendo de los resultados de la tabla 14, se realizó un nuevo gráfico de dispersión de datos, para hallar los coeficientes K y m , incluidos en el coeficiente d debido al cambio de variable que se realizó previamente. En la figura 14 se muestra la gráfica de los coeficientes d obtenidos previamente contra los periodos de retorno para obtener la ecuación de regresión potencial y extraer los valores de K y m , cuyo resultado fueron 406.8 y 0.1522 respectivamente.

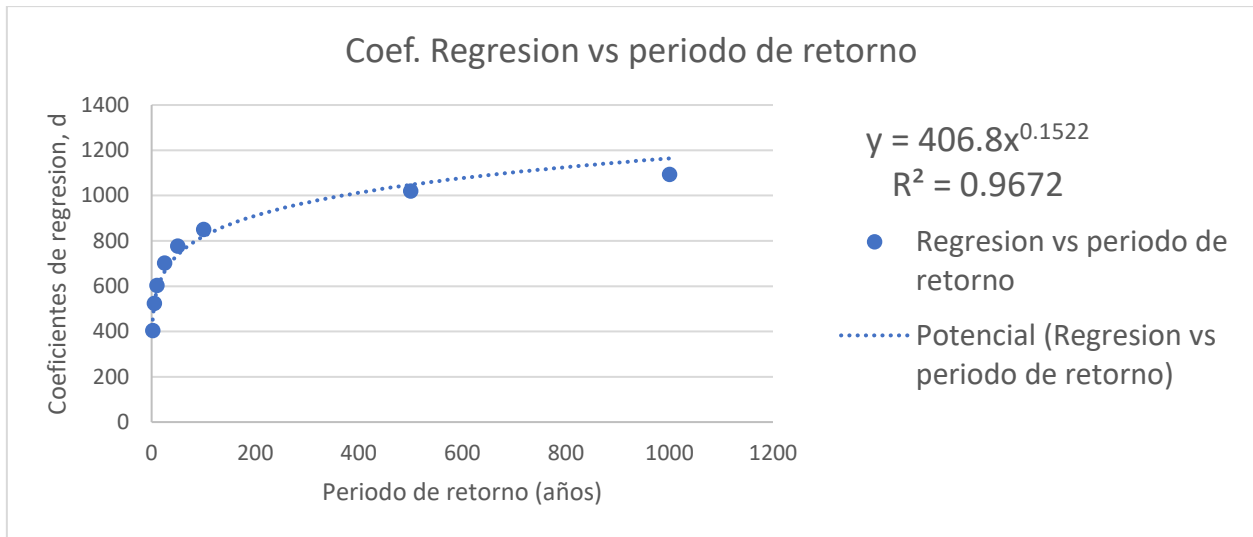


Figura 14. Regresión potencial para hallar k y m

Fuente: Autores

Teniendo los parámetros calculados, a continuación, se muestra la ecuación 22 de intensidad-duración-frecuencia:

$$I = \frac{406.8 \cdot T^{0.15}}{t^{0.513}} \dots (22)$$

De la ecuación 22, se obtienen las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para cada periodo de retorno analizado y que se muestran en la figura 15.

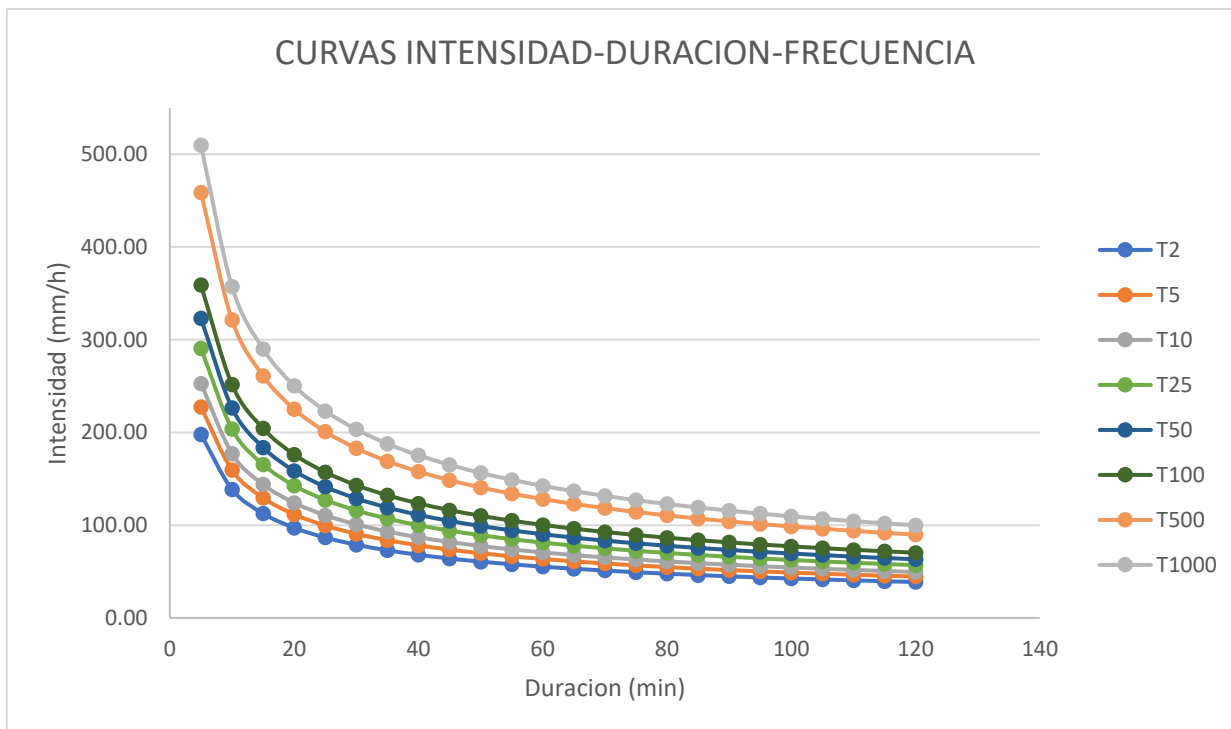


Figura 15. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de la estación Bayunca para diferentes periodos de retorno

Fuente: Autores

6.2.5. Determinación de periodos de retorno para el análisis

El RAS (2017) en su artículo 135, establece los periodos de retorno según las características del área de drenaje los que se muestran a continuación en la tabla 15.

Tabla 15. Periodos de retorno según características del área de drenaje

Características del área de drenaje	Periodo de retorno (años)
Tramos iniciales en zonas residenciales con áreas tributarias menores de 2 hectáreas	3
Tramos iniciales en zonas comerciales o industriales con áreas tributarias menores de 2 hectáreas	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias entre 2 y 10 hectáreas	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores a 10 hectáreas	10
Canales abiertos que drenan áreas menores a 1000 hectáreas	50
Canales abiertos en zonas planas y que drenan áreas mayores a 1000 hectáreas	100
Canales abiertos en zonas montañosas (alta velocidad) o a media ladera, que drenan áreas mayores a 1000 hectáreas	100

Fuente: (RAS, 2017)

Para nuestro caso de estudio, la cuenca se encuentra en una zona plana y, además, cuenta con un área de drenaje de más de 1000 hectáreas. Dado esto, el periodo de retorno base para analizar la cuenca será de 100 años. Para el análisis de variación de caudales, se tomará un periodo corto, uno intermedio y el periodo establecido por el RAS. Se propone como periodo corto 25 años y como periodo intermedio 50 años para realizar el análisis de variabilidad de caudales.

6.2.6. Cálculo del hietograma por el método del bloque alterno

Como datos de entrada el programa HEC-HMS en el componente de Time-Serie Data permite la introducción de una lluvia de diseño en forma de hietograma, el método del bloque alterno es uno de los más utilizados para obtener un hietograma de precipitación de diseño a partir de las curvas IDF que para el caso de estudio es con lo que se cuenta, básicamente el método permite la “distribución normal” de una lluvia basado en algunos supuestos. Primeramente, se determinó que la duración de la lluvia sería de 5 horas ya que en Cartagena y sus alrededores, por lo general las lluvias no superan este tiempo y si lo superan, son similares a las lluvias de 4 o 5 horas.

Tabla 16. *Cálculo de hietograma por el método del bloque alterno para periodo de retorno de 25 años.*

Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad acumulada (mm)	Profundidad incremental (mm)	Tempo (min)	Precipitación (mm)
15	165.51	41.38	41.38	0-15	4.51
30	115.98	57.99	16.61	15-30	4.78
45	94.20	70.65	12.66	30-45	5.11
60	81.27	81.27	10.63	45-60	5.52
75	72.48	90.60	9.33	60-75	6.03
90	66.01	99.02	8.41	75-90	6.72
105	60.99	106.74	7.72	90-105	7.72
120	56.95	113.91	7.17	105-120	9.33
135	53.61	120.63	6.72	120-135	12.66
150	50.79	126.99	6.35	135-150	41.38
165	48.37	133.02	6.03	150-165	16.61
180	46.26	138.78	5.76	165-180	10.63
195	44.40	144.29	5.52	180-195	8.41
210	42.74	149.59	5.30	195-210	7.17
225	41.26	154.71	5.11	210-225	6.35
240	39.91	159.65	4.94	225-240	5.76
255	38.69	164.43	4.78	240-255	5.30
270	37.57	169.07	4.64	255-270	4.94
285	36.54	173.58	4.51	270-285	4.64
300	35.59	177.97	4.39	285-300	4.39

Fuente: Autores

Luego, se escoge el periodo de retorno que para este ejemplo será de 25 años. Los incrementos de tiempo serán de 15 min. Se calcula con la ecuación 22 para cada duración hasta llegar a los 300 min de la lluvia como se muestra en la columna 2 de la tabla 16.

$$I = \frac{406.8 \cdot (25)^{0.15}}{(15)^{0.513}} = 165.51 \text{ mm/h}$$

Posteriormente se calcula la profundidad acumulada multiplicando la intensidad hallada con su tiempo respectivo en horas, como se muestra en la columna 3 de la tabla 16.

$$\text{Profundidad acumulada} = \left(165.5 \frac{\text{mm}}{\text{h}}\right) * \left(\frac{15}{60}\right) h = 41.38 \text{ mm}$$

Luego se realiza el análisis siguiente, si en el intervalo de media hora, o sea tomando dos incrementos, cayó un total de 57.99 mm en el primer incremento debió caer lo correspondiente a 15 min, $(57.99 - 41.38) = 16,61 \text{ mm}$ como se muestra en la columna 4 de la tabla 16, a este valor se le llama profundidad incremental porque se supone que se añade al valor inmediatamente anterior de la lluvia.

Por último, se reorganizan los valores hallados en la profundidad incremental colocando en el centro el mayor valor y los siguientes alternando del lado derecho e izquierdo como se muestra en el hietograma de ejemplo en la figura 16.

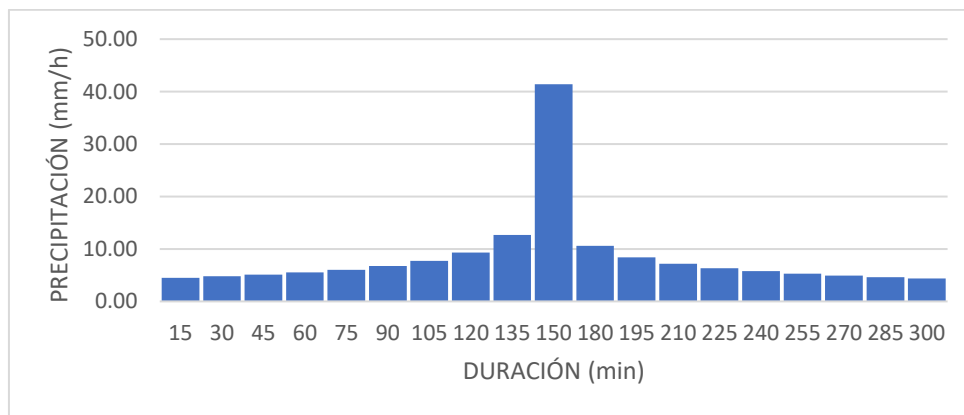


Figura 16. Hietograma de diseño para periodo de retorno de 25 años

Fuente: Autores

Los datos obtenidos en la tabla 16 serán ingresados en el programa HEC-HMS para realizar la modelación hidrológica con el método de abstracción del número de curva



6.3. ANÁLISIS DE LA COBERTURA VEGETAL

Luego de haber realizado lo correspondiente al geoprocesamiento con la ayuda del software especializado ArcGIS de los mapas obtenidos de la leyenda nacional de cobertura de la tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia y de la herramienta de Google para realizar la digitalización de las coberturas para el año 2019, se obtuvieron los resultados esperados con algunas variaciones que se explicarán a brevedad a continuación

6.3.1. Análisis por años

Se realizó el análisis multitemporal como sigue:

6.3.1.1. Año 2000

Después de la obtención de los mapas de coberturas fue necesario la diferenciación de las áreas de cada cobertura para cada subcuenca en su respectivo año de estudio. Los mapas obtenidos de la leyenda nacional de cobertura de la tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia presenta una clasificación más especializada como se muestra en la leyenda de la figura 17, es el caso de las coberturas de bosque denso y bosque de galería y ripario que serán incluidos en el grupo de Bosques, Tejido urbano continuo y tejido urbano discontinuo que será clasificadas como Zona urbana. Las coberturas de pastos limpios, pastos enmalezados, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mosaico de pastos con espacios naturales serán agrupados en la cobertura de pastos y las zonas de extracción minera junto con las zonas de tierras desnudas y degradadas serán clasificados en la cobertura de tierras desnudas o suelo desnudo. Esta clasificación también fue tomada para el año 2010.

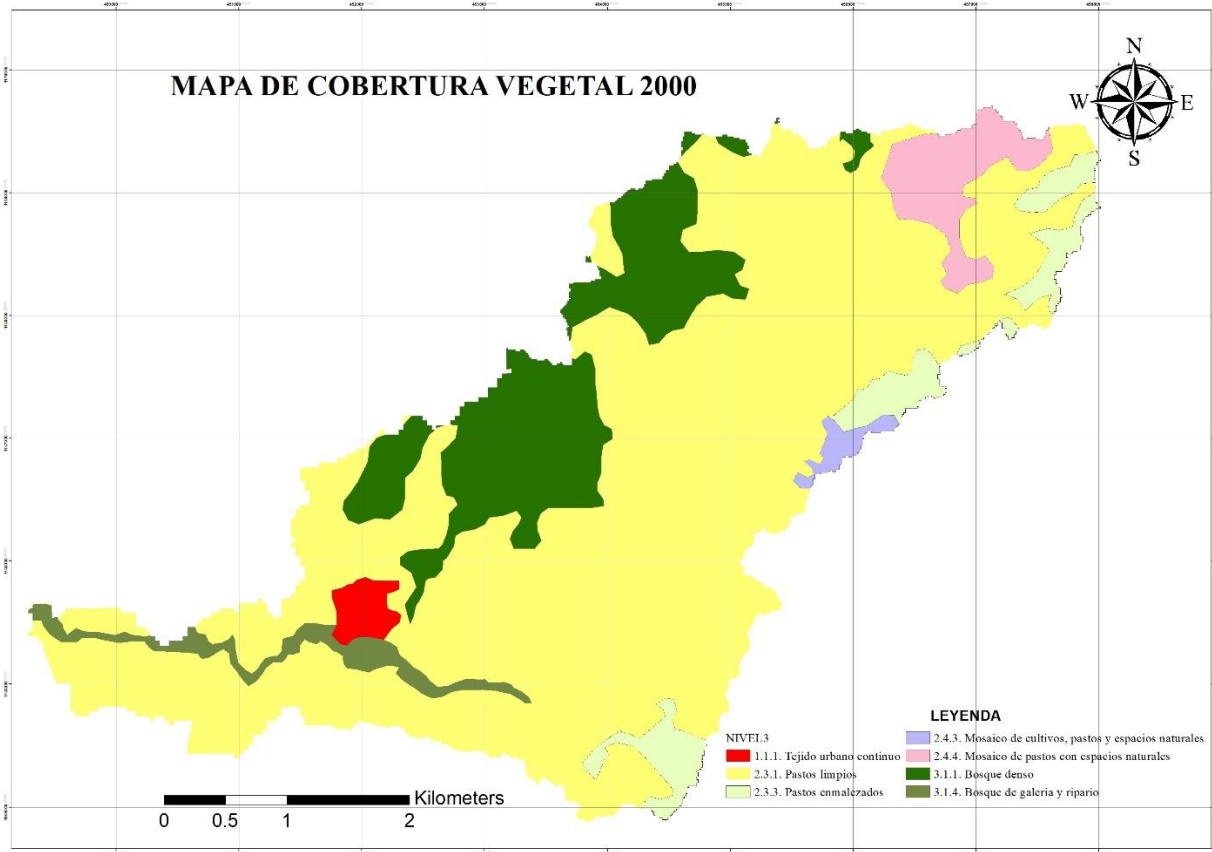


Figura 17. Mapa de cobertura vegetal en el año 2000.

Fuente: Autores

En el plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Cartagena (2001) se establece que la cuenca de estudio en su mayoría es utilizada para la ganadería y cultivos de diversa índole, por esta razón el área de pastos sería considerable, y que el cambio en las coberturas generado por el crecimiento urbano se comenzó a presentar en el nuevo milenio, las áreas de zona urbana que presenta el año 2000 son solo de los asentamientos ya establecidos como el corregimiento de Pontezuela identificado en la figura 17 por el polígono de color rojo. En la figura 17 se puede ver que los boques representados por verde y verde oliva tienen un gran porcentaje en la superficie estudiada, y la mayoría está dentro de la categoría de bosques.

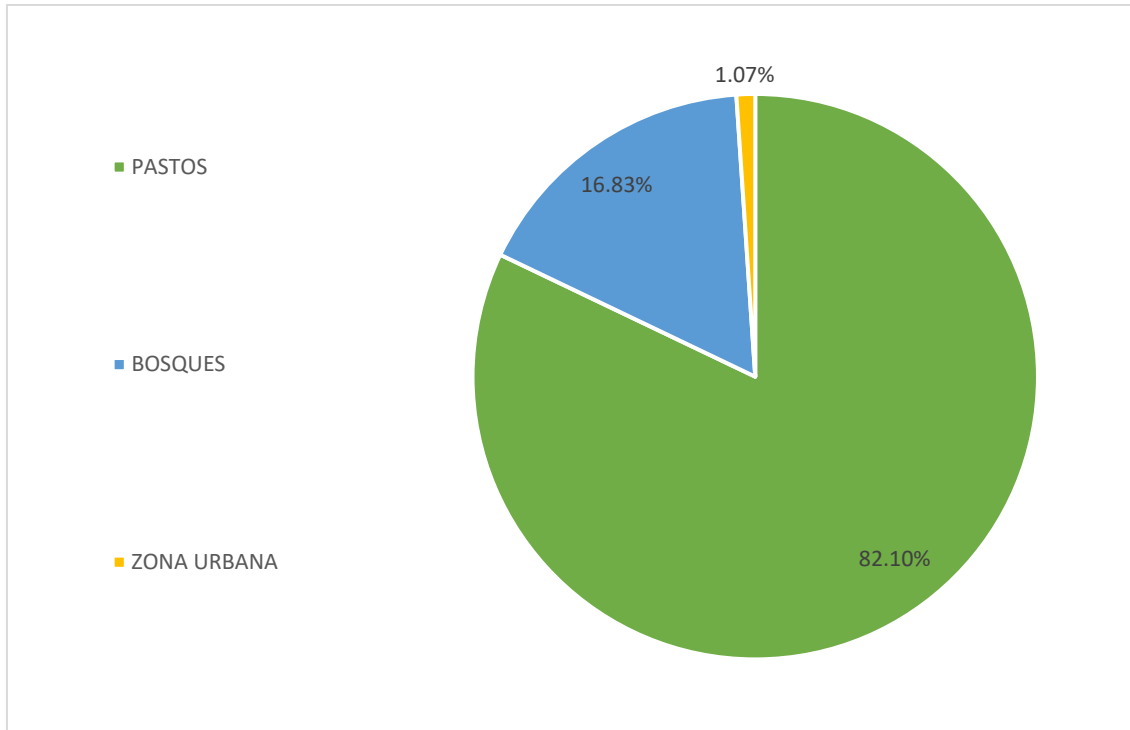


Figura 18. Distribución porcentual de coberturas para el año 2000

Fuente: Autores

En concordancia con lo anterior, en la figura 18 se muestra que el porcentaje de área de pastos fue de 82.1%, que sumado al área de bosques superan el 98% de la cobertura vegetal en año 2000. Evidenciando que el área urbanizada es solo del 1.07%.

6.3.1.2. Año 2010

Según lo investigado, para este año la cobertura de la zona urbana debe haber aumentado porque es la década en la que más hubo publicidad de nuevas urbanizaciones, y nuevos establecimientos escolares y de educación superior.

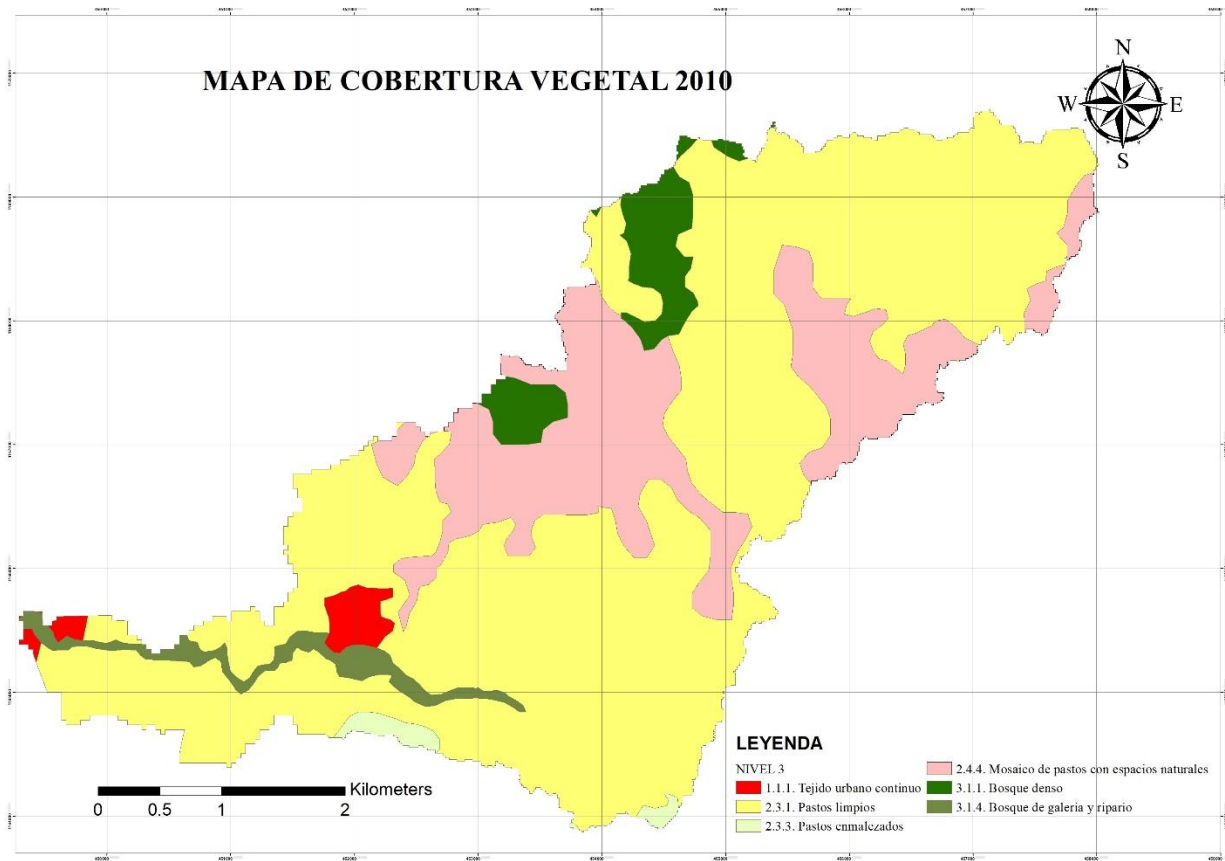


Figura 19. Mapa de cobertura vegetal año 2010

Fuente: Autores

En la figura 19 se ve claramente que los polígonos rojos emigraron a la parte baja de cuenca específicamente a la subcuenca H. Además, la gran parte de la cobertura de bosque denso ubicado en la zona alta-media identificado en el año 2000, fue reemplazada por la cobertura de mosaico de pastos con espacios naturales. Este tipo de cubierta vegetal es una mezcla de pastos (hasta el 70% del área) y espacios naturales que pueden ser pantanos o bosques. Lo anterior nos indica que las áreas de bosques fueron transformadas en zonas de pastoreo en su mayoría y el restante podría seguir siendo área de bosques. Por otra parte, el área de bosque en la zona baja de la cuenca ha permanecido constante en este periodo de tiempo.

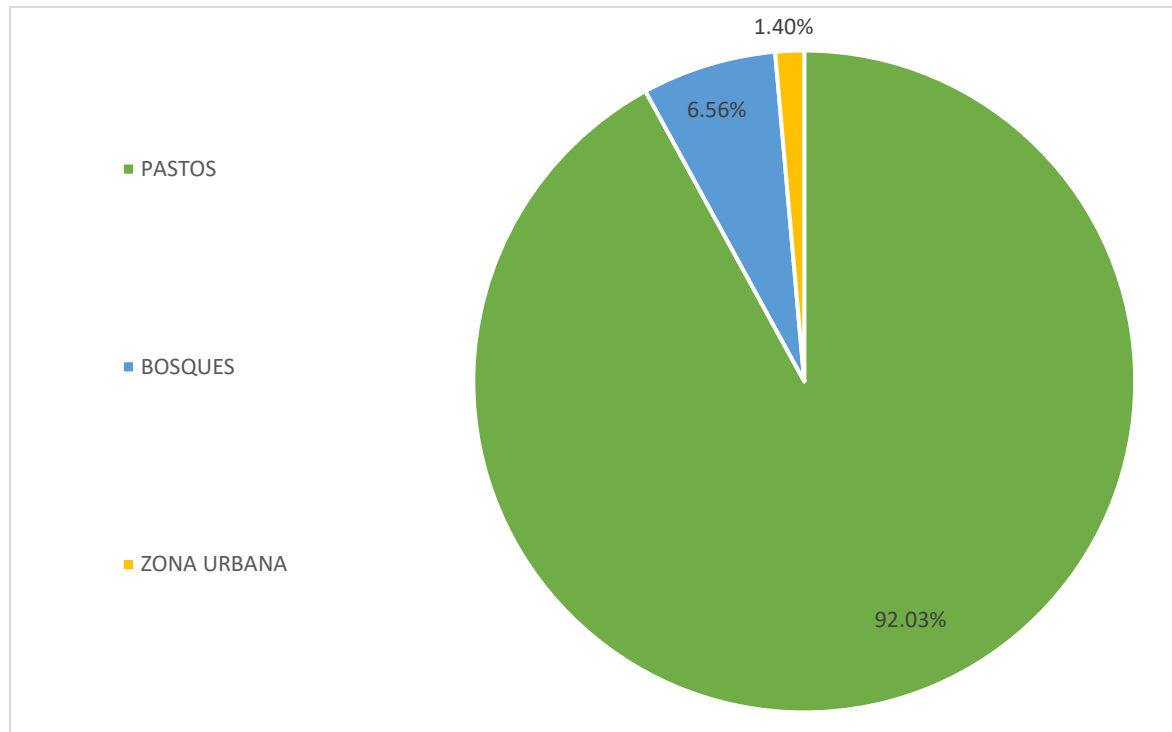


Figura 20. Distribución porcentual de coberturas para el año 2010

Fuente: Autores

En concordancia con lo anterior la cobertura de zona urbana tuvo un aumento de aproximadamente 31.50% con respecto al año anterior de estudio con un crecimiento a una tasa promedio de 3.1% por año. Por otro lado, la disminución en la cobertura de Bosque es preocupante debido a que la mayoría de las crecientes son controladas por este tipo de vegetación, y para este año esta cobertura disminuyó en un 61.01% con respecto al año anterior, es decir a una tasa de 6.1% por año.

6.3.1.3. Año 2019

Para este año el área en la cobertura de zona urbana fue aumentando también, presentando el mayor ascenso al llegar al 2.31% con respecto al área total de la cuenca como se muestra en la figura 21.

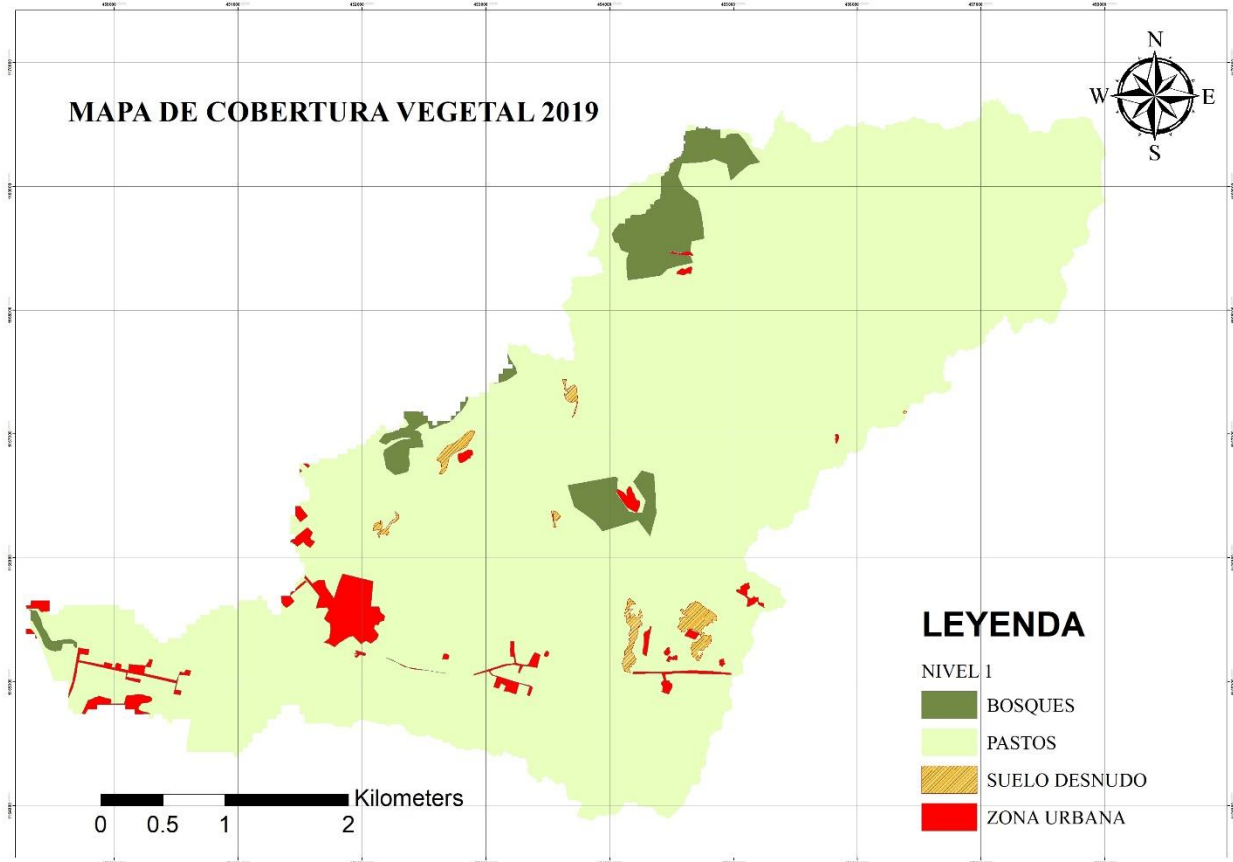


Figura 21. Mapa de cobertura vegetal año 2019.

Fuente: Autores

En la figura 21 se puede ver que el área de bosques ubicado en la zona baja de la cuenca, encontrada en los años 2000 y 2010 ha desaparecido casi por completo y en parte ha sido remplazada por áreas urbanizadas. Estos pequeños polígonos rojos también han ido colonizando el resto de la cuenca hasta llegar a la parte alta específicamente en la subcuenca B. Se comienzan a ver manchas de tierras desnudas que posiblemente en los próximos años se conviertan en áreas impermeables transformándose de naranjas a rojas.

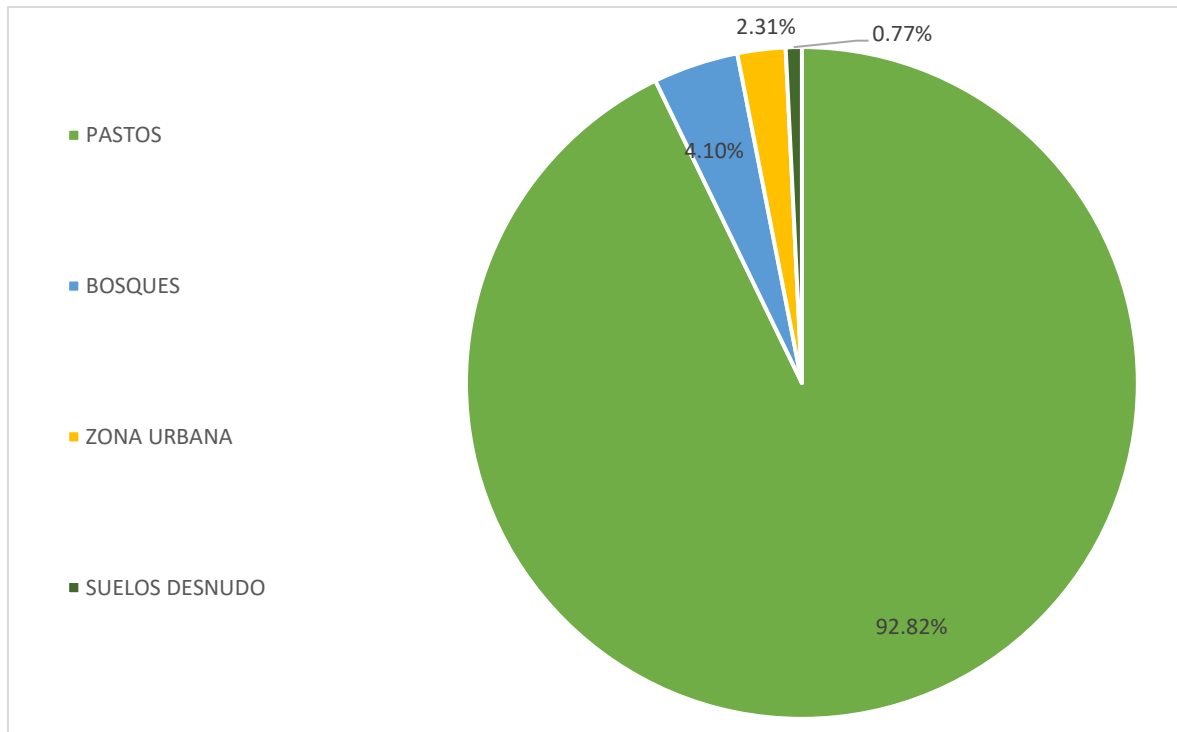


Figura 22. Distribución porcentual de coberturas para el año 2019

Fuente: Autores

En la figura 22 se evidencia que la cobertura de Bosque sigue disminuyendo a un ritmo acelerado presentando una degradación del 37.53% con respecto al año 2010 áreas remplazadas en su mayoría por la cobertura de pastos, aunque en estos años solo se perdieron un poco más de 50 ha de bosques mucho menor en comparación con las más de 200 ha perdidas en el periodo de 2000-2010 sigue siendo preocupante la disminución de esta cobertura. En este año se encontró la presencia de tierras desnudas y degradadas que mediante fotointerpretación se evidenció que eran áreas preparadas para futuras construcciones que pueden disminuir en los próximos años luego de verse culminadas.

6.3.1.4. Análisis para todos los años.

Para tener una mayor percepción sobre las coberturas se realiza el análisis de toda la cuenca en una sola gráfica, pero ahora comparando las áreas en km².

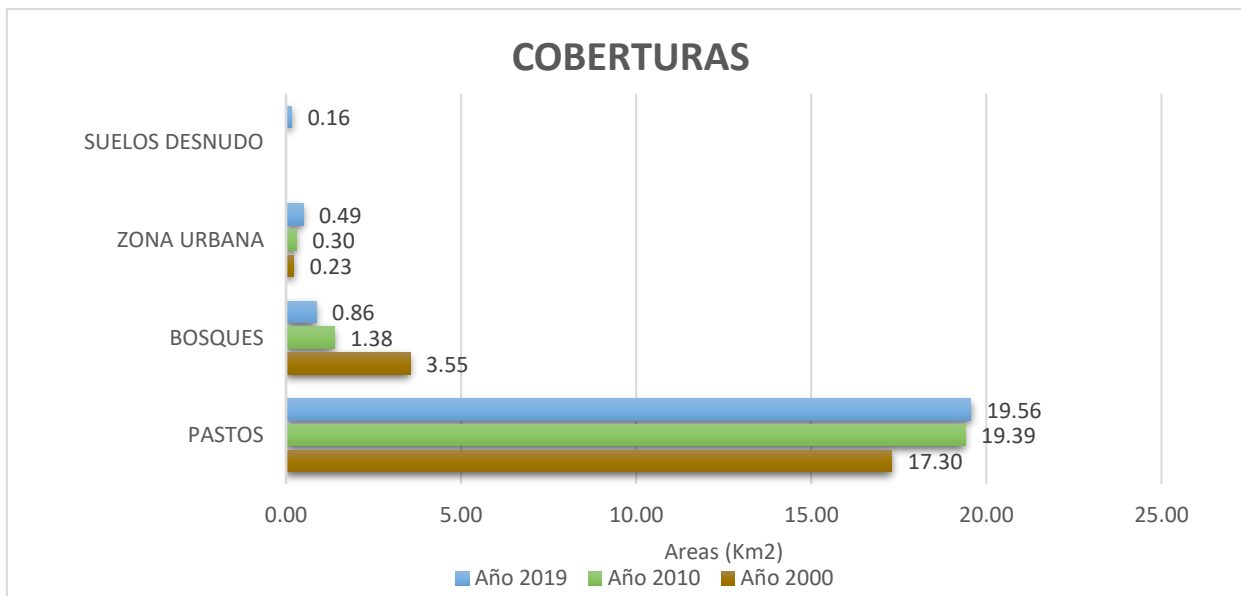


Figura 23. Variación de las coberturas vegetales en Km² en los años 2000, 2010 y 2019.

Fuente: Autores

En la figura 23 se evidencia que en el área de Bosques se perdieron más de 2,6 km², siendo una cifra alarmante. Se indagó sobre el manejo de estas alteraciones y no se encontró estudios ni proyectos para controlar las cifras. Las áreas de Zona Urbana tuvieron un aumento de 0.26 Km². El área de pastos presentó un aumento significativo en el periodo 2000-2010 aumentando 2 km² en solo 10 años, estas áreas remplazaron la mayoría de las zonas de bosques encontrados en el año 2000.

Tabla 17. Variación de la cobertura vegetal en el área total de la cuenca respecto al 2000.

Año	COBERTURA		SIN COBERTURA	
	PASTOS	BOSQUES	ZONA URBANA	TIERRAS DESNUDAS
2000	-	-	-	-
2010	12,10%	-61,01%	31,50%	-
2019	13,05%	-75,64%	116,44%	-

Fuente: Autores

En la tabla 17 se ve que las coberturas que más tuvieron variación con respecto a sí mismas en el año 2000 fueron la de zona urbana y bosques, las zonas urbanas con tendencia al aumento con un 116.44%. Por otra parte, los bosques perdieron más del 75% de su extensión en los últimos 19 años.



La presente investigación pretende establecer la incidencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales de escorrentía, por esta razón es necesario categorizar todas las coberturas halladas en COBERTURA VEGETAL o SIN COBERTURA VEGETAL para establecer su porcentaje con respecto al área total de la cuenca y su variación en los años que se consideraron para el estudio. Las coberturas consideraras como cobertura vegetal fueron las coberturas de bosque y pastos, y sin cobertura vegetal el área de zona urbana y tierras desnudas y degradadas.

Tabla 18. *Variación de la cobertura vegetal en el área total de la cuenca en los años 2000, 2010 y 2019.*

Año	COBERTURA VEGETAL				SIN COBERTURA VEGETAL			
	Área (ha)	%	tasa de variación anual	% Área total	Área (ha)	%	tasa de variación anual	% Área total
2000	2084.77	-	-	98.93%	22.51	-	-	1.07%
2010	2077.67	-0.34%	-0.034%	98.60%	29.61	31.50%	3.15%	1.40%
2019	2042.27	-2.04%	-0.107%	96.92%	64.99	188.68%	9.93%	3.08%

Fuente: Autores

En la tabla 18 se encuentra la suma de cada una las áreas pertenecientes a las dos categorías de interés y su porcentaje de variación con respecto al año 2000, su tasa de variación anual y su porcentaje con respecto al área total de la cuenca. Se ve que el aumento en el área sin cobertura vegetal ha sido aproximadamente de un 188% en los 19 años del estudio, teniendo una tasa de variación anual en promedio de más de 9.9%. Se evidencia que, aunque el aumento con respecto a si misma, en el área sin cobertura vegetal casi se duplica, con respecto al área total solo varía un poco más del 3% demostrando que la variación en cobertura no ha sido tan abismal como se creía.

6.3.2. Análisis por subcuencas

Para tener un mayor detalle en las variaciones de las coberturas se debe analizar cuáles han sido las zonas en la que más se han presentado cambios, por esta razón se subdividió la cuenca en cuenca A, B, C, D, E y H como se muestra en la figura 9. En tabla 19, se presenta el análisis realizado es cada una de las subcuencas para los años de estudio.



Tabla 19. *Porcentajes de cobertura vegetal por subcuencas con respecto los porcentajes de cobertura total dado en años.*

Subcuenca	Área 2000 (ha)	Porcentaje	Área 2010 (ha)	Porcentaje	Área 2019 (ha)	Porcentaje
A	393.48	18.89%	393.48	18.96%	393.46	19.28%
B	275.84	13.24%	275.84	13.29%	274.99	13.48%
C	708.71	34.03%	708.71	34.14%	690.56	33.85%
D	376.32	18.07%	376.32	18.13%	369.74	18.12%
E	139.89	6.72%	139.89	6.74%	133.18	6.53%
H	188.48	9.05%	181.43	8.74%	178.32	8.74%
Total	2084.77	100.00%	2077.67	100.00%	2042.27	100.00%

Fuente: Autores

En la tabla 19 se muestra la distribución de los porcentajes obtenidos anteriormente en la tabla 18, se evidencia que del 98.93% de cobertura vegetal con respecto al área total de la cuenca para el año 2000 el 18.89% pertenece a la subcuenca A, el 13.24% a la subcuenca B, el 34.03% a la subcuenca C, el 18.07% a la subcuenca D, el 6.72% a la subcuenca E y 9.05% a la subcuenca H. La subcuenca F fue la única en presentar disminución en la cobertura vegetal en el periodo de 2000-2010 tendencia que siguió en los siguientes años.

Para visualizar el comportamiento de las coberturas en cada una de las subcuencas en los años de estudio. Se realiza un análisis por separado de las coberturas como se muestra a continuación.

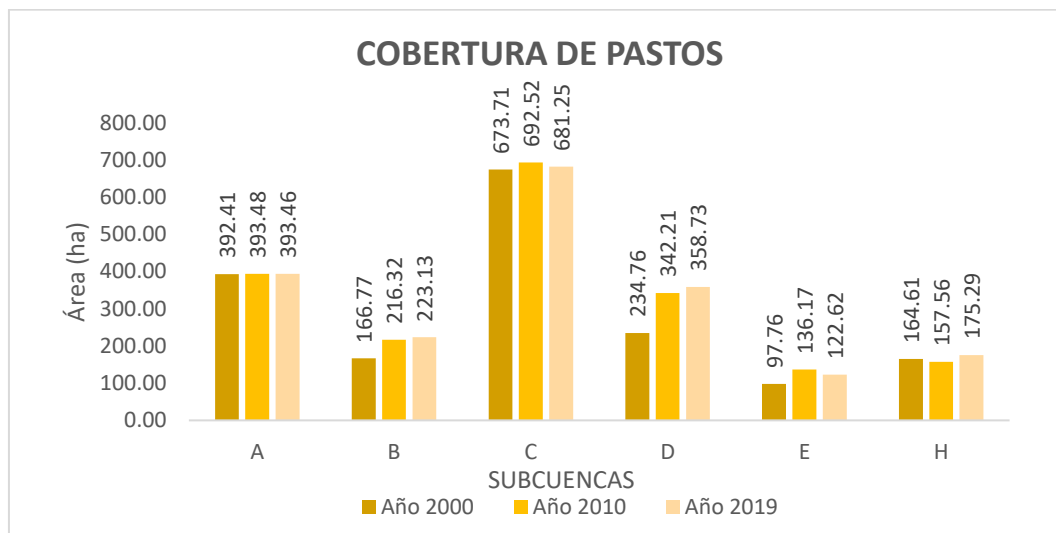


Figura 24. *Variación de la cobertura de pastos en cada una de las subcuencas en ha en los años 2000, 2010 y 2019.*

Fuente: Autores

En la figura 24 se muestra que el área de la cobertura de pastos por subcuencas para cada uno de los años de estudio. Las subcuencas que más presentan variación en la cobertura de pastos son la B y D, pasando de tener 166.77 a 223.13 ha y 234.76 a 358.73 ha respectivamente.

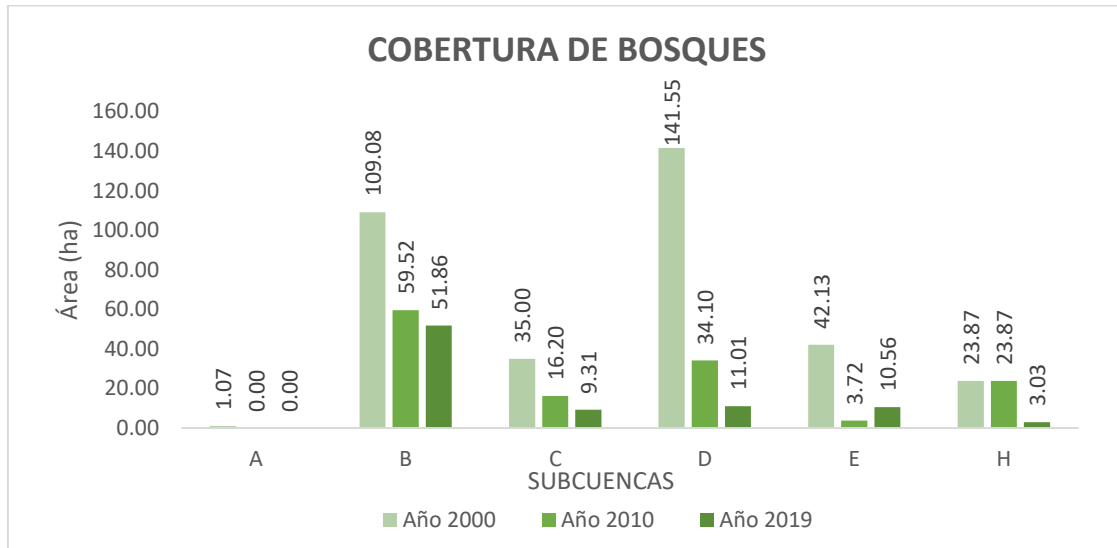


Figura 25. Variación de la cobertura de Bosques en cada una de las subcuencas en ha en los años 2000, 2010 y 2019

Fuente: Autores

En la figura 25 se evidencian cifras alarmantes sobre la extensión de la cobertura de bosques a lo largo y ancho del área de estudio, presentando tendencia a la disminución en todas las subcuencas en cada uno de los años de análisis, hasta llegar a desaparecer por completo en la subcuenca A. La mayor área de bosque la presentaba la subcuenca D en el año 2000, y esta perdió más 130 ha en los últimos 19 años. La subcuenca E fue la única que presentó un leve aumento de 7 ha en el periodo de 2010-2019, aproximadamente 2% de la cobertura de bosques en el año 2000.

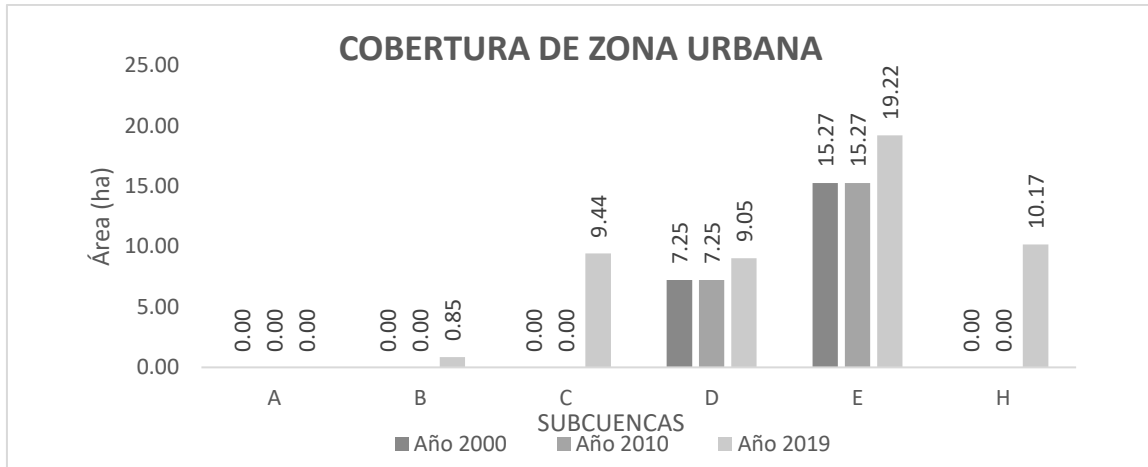


Figura 26. Variación de la cobertura de Zona urbana en cada una de las subcuencas en ha en los años 2000, 2010 y 2019

Fuente: Autores

En la figura 26 se puede ver que las subcuencas A, B, C y H eran completamente rurales en los años 2000 y 2010 y las subcuencas D y H presentaban áreas constantes de zona urbana en estos mismos años. La variación en la cobertura de zona urbana se comienza a presentar en el periodo de 2010-2019 evidenciando aumento en todas las subcuencas exceptuando la subcuenca A que sigue siendo 100% rural.

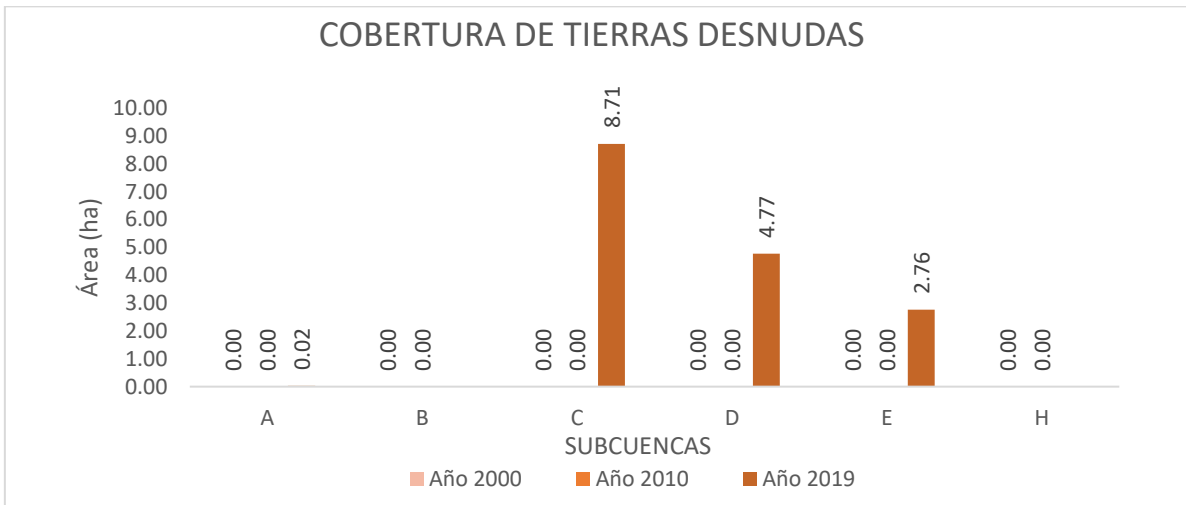


Figura 27. Variación de la cobertura de suelo desnudo en cada una de las subcuencas en ha en los años 2000, 2010 y 2019.

Fuente: Autores



En la figura 27 se muestra la aparición de la cobertura de Tierras desnudas y degradadas en el periodo de 2010-2019 en las subcuencas C, D y E lo que significa que el aumento en edificaciones o cobertura de zona urbana va estar concentrado en estas subcuencas en los próximos años.

En términos generales las áreas de la cobertura de bosque disminuyeron mucho con respecto a sí mismo y más del 12% con respecto al área total de la cuenca. Se pudo demostrar que en todas las subcuencas más de 90% de las coberturas pertenecen a pastos y bosques dejando porcentajes muy bajos de superficies de áreas no cubiertas por vegetación.

6.3.3. Cálculo del coeficiente de escorrentía

Como se dijo anteriormente para la aplicación del método racional es necesario que las cuencas de estudio tengan un área menor o igual a 80 ha, por esa misma razón se subdividió la cuenca como se muestra en la figura 11, para el cálculo del coeficiente de escorrentía se escogerá la microcuenca número 67 ubicada en la subcuenca H de la hoya para el año 2000. Primeramente, se debe identificar el tipo de suelo de esta zona, en la figura 12 se precisa que en esa zona se encuentra el perfil *BL-152* y en la tabla 8 se reconoce como un suelo permeable.

Como se pudo ver anteriormente ya cada subcuenca tenía el área de cada cobertura clasificada, en la microcuenca 67 para el año 2000 se tuene 12.31 ha de Pastos, 3.19 ha de Bosque y 0.39 ha de Zona urbana.

Ya conociendo estos datos podemos entrar en las tablas para determinar el coeficiente de escorrentía a partir de las coberturas previamente hallada en la microcuenca. De tabla 2 se determina que el coeficiente de escorrentía para pastos es de 0.2 y para Bosque es de 0.1, para un suelo permeable y de la tabla 1 se extrae que el coeficiente de escorrentía para zona urbana es de 0.75. Con la ecuación 17 procedemos a calcular el coeficiente de escorrentía promedio.

$$C = \frac{(0.2 * 12.31) + (0.1 * 3.19) + (0.75 * 0.39)}{12.31 + 3.19 + 0.39} = 0.19$$

El coeficiente de escorrentía para a la microcuenca 67 para el año 2000 es de 0.19. Estos mismos cálculos se realizaron para cada una de las 79 microcuencas en las que se dividió el área de estudio para la aplicación del método racional, en los años 2000, 2010 y 2019. Todos los cálculos de coeficientes de escorrentía se encuentran en el anexo A.



6.3.4. Cálculo del número de curva

Para la modelación en el software HEC-HMS uno de los parámetros de entrada es el número de curva para aplicar el método de abstracciones que lleva su mismo nombre. Para estimar este parámetro es necesario conocer el grupo hidrológico de suelo ya expuesto anteriormente en la tabla 7 según la textura y la cobertura vegetal hallada en el numeral 6.3.2. Debido a que todos los perfiles hallados tienen texturas arcillosas o arcillo limosa, el grupo hidrológico se clasificó como D. Habiendo definido lo anterior se utilizaron de las tablas propuestas por el SCS, encontradas en el Manual de Referencias técnicas de HEC-HMS.

Para este ejemplo se tomará el año 2000 para la subcuenca A, la cual presenta un área de 392.41 ha de cobertura de Pastos y 1.07 ha de Bosques. Entrando en la tabla 20 y 21 se determinaron los números de curvas para cada tipo de cobertura y posteriormente aplicando la ecuación 17 se hallaron los números de curva promedio para cada subcuenca.

Tabla 20. *Números de curva de escorrentía para usos del suelo agrícola, suburbano y urbano. Para condición de humedad antecedente II*

Descripción de la Cobertura		CN para grupos hidrológicos de suelos			
		A	B	C	D
Tipo de cobertura y condición hidrológica					
Tierra cultivada	<i>sin tratamientos de conservación</i>	72	81	88	91
	<i>Con tratamientos de conservación</i>	62	71	78	81
Pastizales	<i>Condiciones pobres</i>	68	79	86	89
	<i>Condiciones óptimas</i>	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas		30	58	71	78
Bosques	<i>Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas</i>	45	66	77	83
	<i>Cubierta buena</i>	25	55	70	77
Zonas impermeables:					
Estacionamientos pavimentados, techos, entradas para autos, etc. (excluyendo el derecho de paso)		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentado; bordillos y alcantarillas pluviales (excluyendo el derecho de paso)		98	98	98	98
Pavimentado; zanjas abiertas (incluido el derecho de paso) . . .		83	89	92	93



Grava (incluido el derecho de paso)	76	85	89	91
Suciedad (incluido el derecho de paso)	72	82	87	89
Comercial y empresarial.	89	92	94	95
Industrial.	81	88	91	93
Distritos residenciales por tamaño de lote promedio				
1/8 acre o menos (casas adosadas)	77	85	90	92
1/4 acre.	61	75	83	87
1/3 acre.	57	72	81	86
1/2 acre.	54	70	80	85
1 acre.	51	68	79	84
<i>Desarrollo de áreas urbanas</i>				
Áreas recién niveladas (solo áreas permeables, sin vegetación) 5	77	86	91	94

Fuente: Ven te Chow, Pag 154.

Tabla 21. *Números de curvas método SCS*

Descripción de la cobertura			CN para grupos hidrológicos de suelos			
Tipo de cubierta	Tratamiento	Condición hidrológica	A	B	C	D
Barbecho	Suelo desnudo	-	77	86	91	94
	Cobertura de residuos de cultivos (CR)	Pobre	76	85	90	93
		Bueno	74	83	88	90
Cultivos en hileras	Fila recta (SR)	Pobre	72	81	88	91
		Bueno	67	78	85	89
	SR + CR	Pobre	71	80	87	90
		Bueno	64	75	82	85
	Contorneado (C)	Pobre	70	79	84	88
		Bueno	65	75	82	86
	C + CR	Pobre	69	78	83	87
		Bueno	64	74	81	85
	Contorneado y aterrazado (C & T)	Pobre	66	74	80	82
		Bueno	62	71	78	81
	C y T + CR	Pobre	65	73	79	81
		Bueno	61	70	77	80
Grano pequeño	SR	Pobre	65	76	84	88
		Bueno	63	75	83	87
	SR + CR	Pobre	64	75	83	86



	C	Bueno	60	72	80	84	
		Pobre	63	74	82	85	
	C + CR	Bueno	61	73	81	84	
		Pobre	62	73	81	84	
	C y T	Bueno	60	72	80	83	
		Pobre	61	72	79	82	
	C y T + CR	Bueno	59	70	78	81	
		Pobre	60	71	78	81	
	Semillas cerradas o transmitir legumbres o rotación prado	SR	Pobre	66	77	85	89
			Bueno	58	72	81	85
		C	Pobre	64	75	83	85
			Bueno	55	69	78	83
C y T		Pobre	63	73	80	83	
		Bueno	51	67	76	80	

Fuente: Manual de referencias técnicas de HEC-HMS, (Hydrologic Engineering Center, n.d.)

$$CN(II) = \frac{(392.41 * 80) + (1.07 * 77)}{392.41 + 1.07} = 79.99$$

Todos estos números de curvas son para una condición de humedad antecedente dos (AMC II) o sea una humedad normal, también se trabaja el número de curva para humedad antecedente seca (AMC I) con la ecuación 23 y para una humedad antecedente saturada, que sería la más crítica (AMC III) con la ecuación 24. Estos dos últimos se calculan como se muestra a continuación:

$$CN(I) = \frac{4.02 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)} \dots (23)$$

Se calcula para el número de curva hallado anteriormente

$$CN(I) = \frac{4.02 * (79.99)}{10 - 0.058 * (79.99)} = 59.99$$

De igual manera se calcula para condición de humedad antecedente (AMC III).

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0.13 * CN(II)} \dots (24)$$

$$CN(III) = \frac{23 * (79.99)}{10 + 0.13 * (79.99)} = 90.19$$

En las tablas 22, 23 y 24 se muestran los números de curva promedios para cada año y cada condición de humedad antecedente.



Tabla 22. *Numero de curva de las subcuencas A, B, C, D, E y F para cada condición de humedad antecedente para el año 2000.*

Subcuenca (2000)	CN(I)	CN(II)	CN(III)
A	59.99	79.99	90.19
B	58.36	78.81	89.54
C	59.79	79.85	90.11
D	58.57	78.97	89.62
E	59.41	79.58	89.96
H	59.47	79.62	89.99

Fuente: Autores.

Tabla 23. *Numero de curva de las subcuencas A, B, C, D, E y F para cada condición de humedad antecedente para el año 2010.*

Subcuenca (2010)	CN(I)	CN(II)	CN(III)
A	60.00	80	90.20
B	59.10	79.35	89.84
C	59.90	79.93	90.16
D	59.73	79.81	90.09
E	60.45	80.32	90.37
H	55.45	76.63	88.29

Fuente: Autores.

Tabla 24. *Numero de curva de las subcuencas A, B, C, D, E y F para cada condición de humedad antecedente para el año 2019.*

Subcuenca (2019)	CN(I)	CN(II)	CN(III)
A	60.00	80.00	90.20
B	59.23	79.45	89.89
C	60.26	80.19	90.30
D	60.26	80.18	90.30
E	60.76	80.54	90.49
H	60.23	80.17	90.29

Fuente: Autores.

6.4. CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA

Teniendo todos los parámetros definidos se procede a calcular los caudales de escorrentía para cada año de análisis de cobertura (2000, 2010 y 2019) y, además, para los periodos de retorno establecidos previamente (25, 50 y 100 años). Estos caudales se calcularon por el Método racional



y mediante el software HEC-HMS usando el método del Número de curva. Los resultados se muestran a continuación.

6.4.1. Cálculo de la escorrentía con el método racional

Se calculan los caudales mediante el método racional, luego de haber dividido la cuenca total en 79 microcuencas de áreas en su gran mayoría menores a 80 ha y se aplica el hidrograma triangular, separados por los tiempos de viajes de cada una de las microcuencas hasta obtener el hidrograma final de caudales. Se muestra a manera de ejemplo los caudales calculados en las microcuencas 1 y 2 y, además, los tiempos de viajes para la llegada de caudal se la microcuenca 3, 4, 5 y 6 y la superposición de hidrogramas.

6.4.1.1. Cálculo de caudales para las microcuencas 1 a 6

En la tabla 25, se presentan los datos para el cálculo de los caudales de escorrentía de las 6 microcuencas presentes en el ejemplo, tomando como base los datos de cobertura para el año 2000 y los datos hidrológicos para el periodo de retorno de 25 años.

Tabla 25. Principales datos por microcuenca analizada

MICROCUENCA	Área (ha)	Cauce ppal.	Tiempo de concentración (min)	Coef. Escorrentía
1	33.32	694.16	17.61	0.40
2	16.63	875.31	21.23	0.40
3	27.44	1099.40	23.34	0.40
4	12.70	340.46	7.33	0.40
5	6.42	240.61	6.18	0.40
6	29.26	858.72	18.12	0.40

Fuente: Autores

La intensidad de la lluvia usada para el cálculo del caudal depende del tiempo de concentración de cada microcuenca. Usando la ecuación 22 obtenida de los datos hidrológicos se calculó la intensidad para la microcuenca 1 como sigue:

$$I = \frac{406.8 \cdot (25 \text{ años})^{0.15}}{(17.61 \text{ min})^{0.513}} = 152.41 \text{ mm/h}$$

El coeficiente de reducción por área se calcula usando la ecuación 16 para la microcuenca 1 y se muestran los resultados en la tabla 26:

$$R = \frac{i_m}{i_0} = 1 - 0.0054 \sqrt[4]{483013.13 \text{ m}^2} = 0.86$$

Tabla 26. Cálculo de intensidades y coeficiente de reducción para las microcuencas 1-6.

MICROCUENCA	Intensidad (mm/h)	R
1	152.41	0.87
2	138.48	0.89
3	131.92	0.88
4	239.01	0.90
5	260.91	0.91
6	150.19	0.87

Fuente: Autores

Partiendo de los resultados obtenidos se calcula el caudal pico usando la ecuación 15 para la cuenca 1 y se muestran los resultados de las cuencas de ejemplo en la tabla 27:

$$Q_{pico} = \frac{(0.4)(152.41 \text{ mm/h})(33.32 \text{ ha})(0.87)}{360} = 4.91 \text{ m}^3/\text{s}$$

El hidrograma triangular se divide en dos partes. En la primera, el caudal va en aumento hasta llegar al tiempo pico. En la segunda, el caudal disminuye hasta llegar a ser 0.

El tiempo al pico de cada caudal se calcula según el hidrograma triangular, con la fórmula:

$$T_p = 0.6 T_c = 0.6 * (17.61 \text{ min}) = 10.57 \text{ min}$$

El tiempo al cierre del hidrograma se calcula como:

$$1.67T_p = 1.67 * (10.57 \text{ min}) = 17.65 \text{ min}$$

El tiempo total del hidrograma triangular se calcula como:

$$T_{total} = 2.67T_p = 2.67 * (10.57 \text{ min}) = 28.22 \text{ min}$$

Tabla 27. Cálculo de caudales pico y tiempos del hidrograma triangular

MICROCUENCA	Q _{pico}	T _p	1.67T _p	2.67T _p
1	4.91	10.57	17.65	28.22
2	2.28	12.74	21.28	34.02
3	3.52	14.00	23.39	37.39
4	3.03	4.40	7.34	11.74
5	1.70	3.71	6.19	9.90
6	4.27	10.87	18.16	29.04

Fuente: Autores

Ahora, para hacer la suma de los hidrogramas debemos analizar el punto de descarga de cada una de las microcuencas. En la figura 28 se muestra la disposición de cada una de ellas.

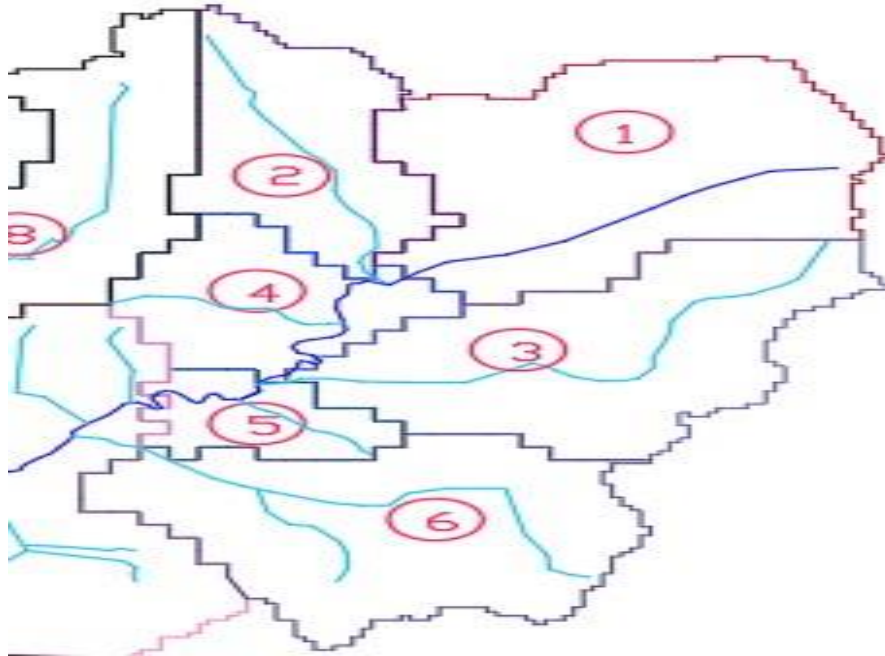


Figura 28. Puntos de descargas de las microcuencas 1 a 6 en AutoCAD

Fuente: Autores

En la figura 28 se puede observar que los cauces de las microcuencas 1 y 2 alimentan al mismo punto, por lo que estos hidrogramas se presentan en una suma en simultaneo, es decir, no hay tiempo de desfase. Se muestran los hidrogramas individuales y sumados en las figuras 26 y 27.

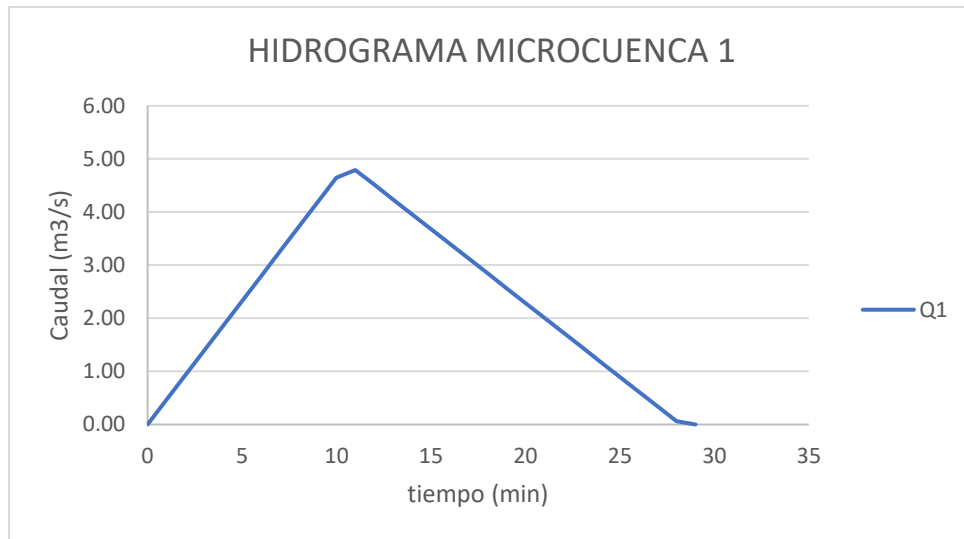


Figura 29. Hidrograma triangular de la microcuenca 1

Fuente: Autores

En la figura 29 se muestra el hidrograma de la microcuenca 1, donde se ve claramente que el caudal pico está alrededor de los $4.9 \text{ m}^3/\text{s}$ a un tiempo pico de 10 minutos aproximadamente.

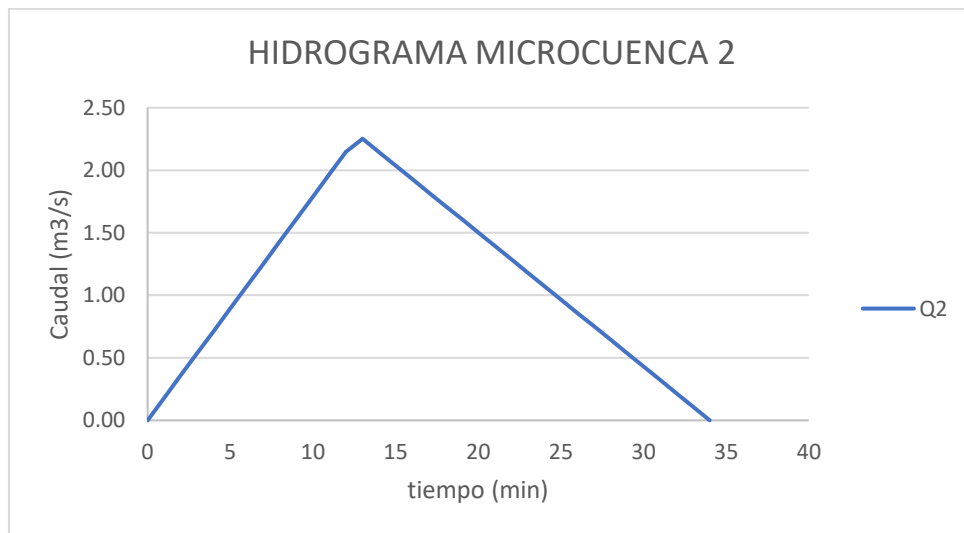


Figura 30. Hidrograma triangular de la microcuenca 2

Fuente: Autores

En la figura 30 se muestra el hidrograma de la microcuenca 2, donde se ve claramente que el caudal pico está alrededor de los $2.28 \text{ m}^3/\text{s}$ a un tiempo pico de 12 minutos aproximadamente.

Ahora, como se dijo anteriormente, al estar descargando en el mismo punto se suman simultáneamente y se muestra el hidrograma de las microcuencas 1+2 como sigue:

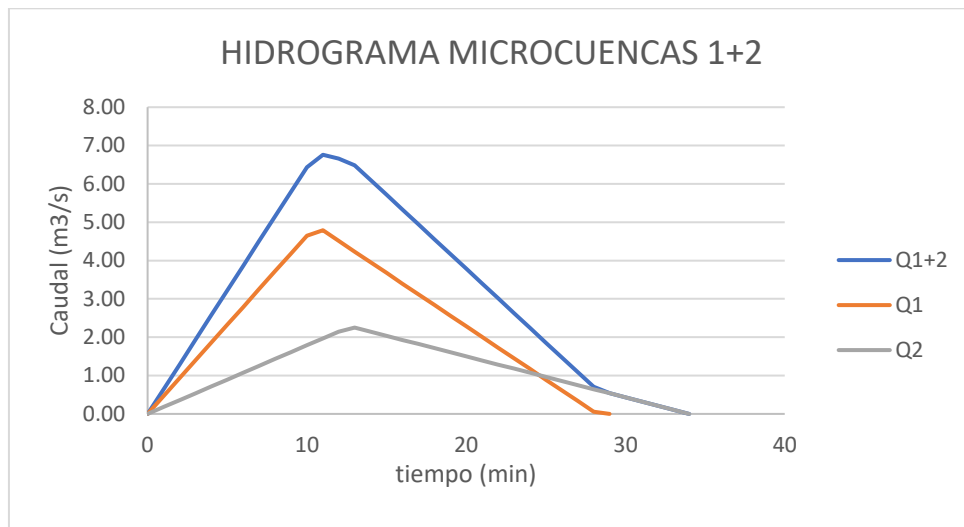


Figura 31. Hidrograma resultante de las microcuencas 1 y 2 y resultante.

Fuente: Autores

Como podemos observar en la figura 31, al ser dos microcuencas que suman al cauce de manera simultánea, la suma de sus caudales pico genera el pico total en un tiempo pico corrido hacia los 11 minutos, dado que la microcuenca 1 genera más aporte que la 2. La suma se hace de manera lineal y obtenemos un caudal pico de $6.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

Siguiendo con el análisis de las 6 microcuencas iniciales, en la figura 28 observamos que hay una distancia desde el punto donde se unen las microcuencas 1 y 2 hasta el punto donde la microcuenca 4 aporta al cauce principal. Ese cauce definido ocasiona un tiempo de viaje o tiempo de desfase entre los hidrogramas de las microcuencas 1 y 2 y el hidrograma de la microcuenca 4. Este tiempo se calcula usando la ecuación 11. Para este caso, la longitud de viaje es:

$$L = 182.44 \text{ m}$$

El desnivel que tiene el cauce en ese tramo es de:

$$D = 4 \text{ m}$$

La pendiente se calcula como:

$$S = \frac{4 \text{ m}}{182.44 \text{ m}} = 0.02193$$

El tiempo de viaje o desfase será de:

$$T_v = \frac{182.44 \text{ m}}{4.47 \cdot \sqrt{0.02193}} = 4.59 \text{ min}$$

Este será el tiempo de desfase o separación de los hidrogramas. Se muestra a continuación en la figura 32 el hidrograma de la microcuenca 4 y la suma con los anteriores como sigue:

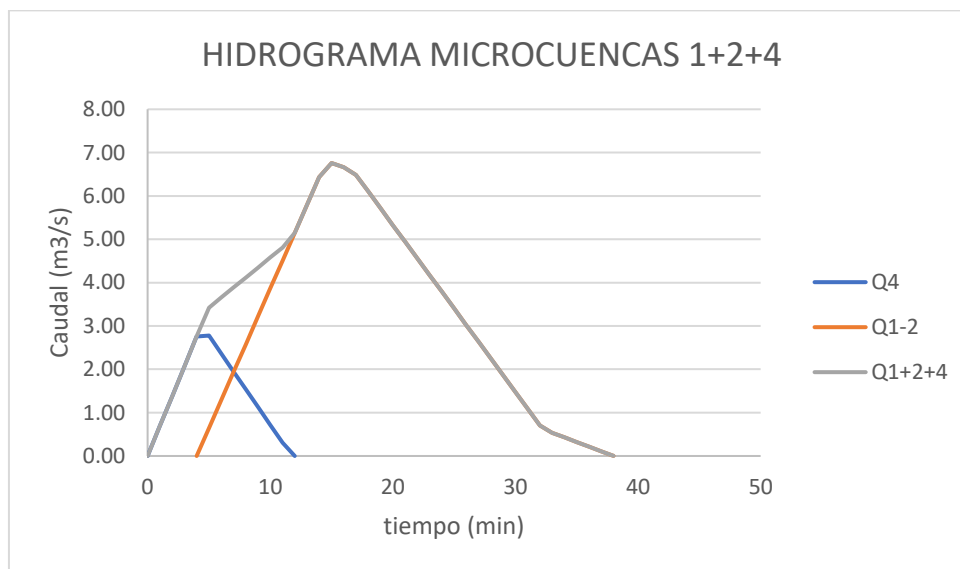


Figura 32. Hidrogramas de las microcuencas 1,2 y 4 y resultante.

Fuente: Autores

En la figura 32 se muestra el hidrograma resultante de la suma de las microcuencas 1 y 2, con su tiempo de desfase respecto al hidrograma de la microcuenca 4, Q4. Como se puede observar, los valores del caudal pico de $6.76 \text{ m}^3/\text{s}$ a un tiempo pico de 15 minutos aproximadamente. Para este caso, al ser tiempos de viaje relativamente cortos, no se notan caídas de caudal seguidas de algún repunte de escorrentía, es decir, el hidrograma resultante sigue manteniendo la misma forma triangular de tipo regular. La siguiente cuenca que alimenta el cauce es la cuenca 3, sus datos se muestran a continuación:

Para este caso, la longitud de viaje es:

$$L = 297.44 \text{ m}$$

El desnivel que tiene el cauce en ese tramo es de:

$$D = 62 - 58 = 4 \text{ m}$$

La pendiente se calcula como:

$$S = \frac{4 \text{ m}}{279.44 \text{ m}} = 0.0134$$

El tiempo de viaje o desfase será de:

$$T_V = \frac{297.9 \text{ m}}{4.47 \cdot \sqrt{0.0134}} = 9.56 \text{ min}$$

Este será el tiempo de desfase o separación del hidrograma de las microcuencas 1,2 y 4 con el hidrograma de la microcuenca 3. Se muestra a continuación en la figura 33 el hidrograma de la microcuenca 3 y la suma con los anteriores como sigue:

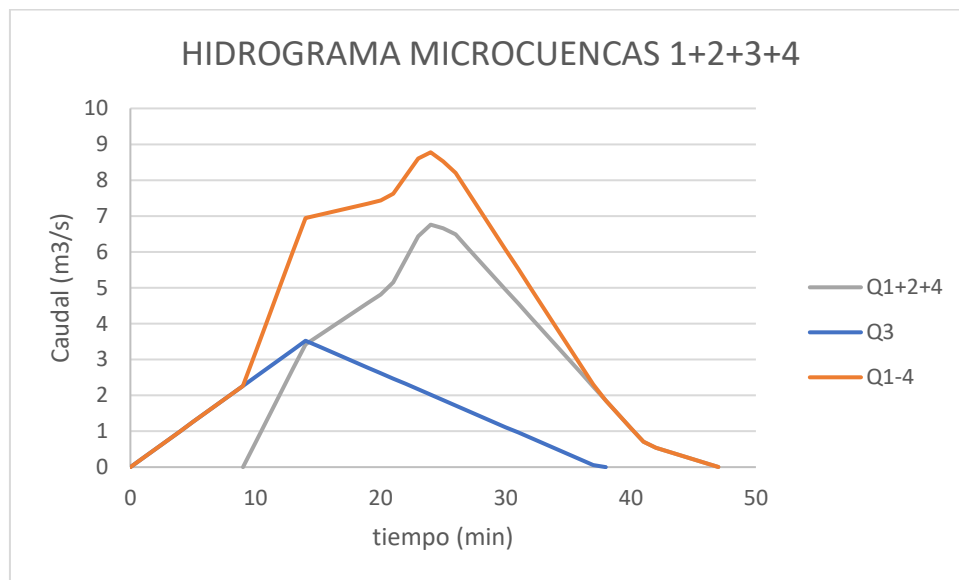


Figura 33. Hidrograma de las microcuencas 1 a 4

Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 33, aunque se sigue manteniendo la forma tipo “triangular”, el caudal pico cada vez más se está alejando hacia la derecha. Esto se debe a que cada vez que se tengan tiempos de desfases, los caudales picos que surgían en torno a el tiempo pico de cada cuenca individual, se van alejando y desfasando cada vez que llega el aporte de una nueva microcuenca.

Como se observa en la figura 28, la cuenca siguiente en aportar al cauce es la microcuenca 5. Se muestran los datos de longitud y pendiente para el cálculo del tiempo de viaje como sigue:

Para este caso, la longitud de viaje es:

$$L = 88.25 \text{ m}$$

El desnivel que tiene el cauce en ese tramo es de:

$$D = 1 \text{ m}$$

La pendiente se calcula como:

$$S = \frac{1 \text{ m}}{88.25 \text{ m}} = 0.01133$$

El tiempo de viaje o desfase será de:

$$T_v = \frac{88.25 \text{ m}}{4.47 \cdot \sqrt{0.01133}} = 3.09 \text{ min}$$

Este será el tiempo de desfase o separación del hidrograma de las microcuencas 1, 2, 3 y 4 con el hidrograma de la microcuenca 5. Se muestra a continuación el hidrograma de la microcuenca 5 y la suma con los anteriores como sigue:

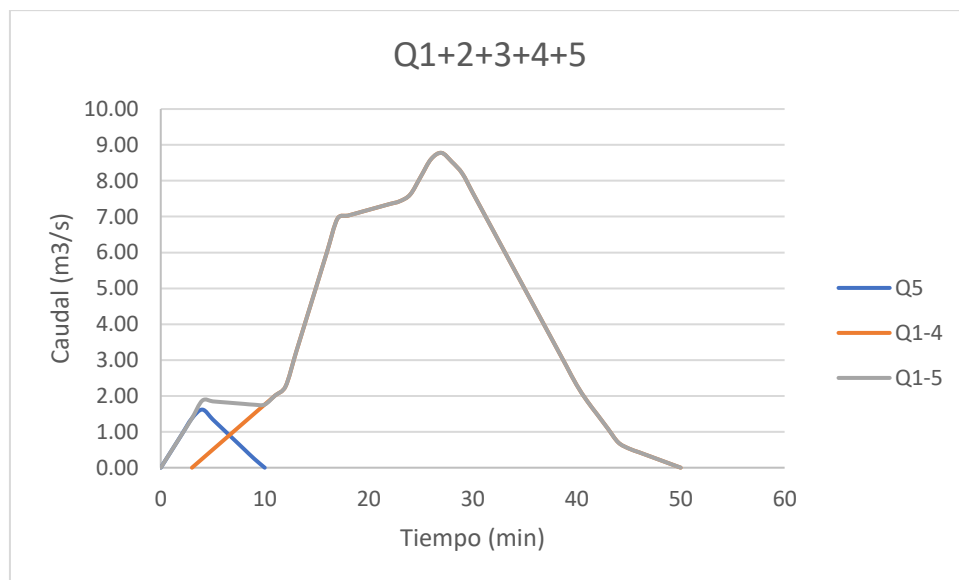


Figura 34. Hidrogramas de las microcuencas 1 a 5

Fuente: Autores

En la figura 34 se observa como el hidrograma de la sumatoria desde la microcuenca 1 hasta la microcuenca 5, en su caudal pico, no se ve afectado, debido a que la aportación de la microcuenca 5, al ser un área pequeña, no alcanza aportar o sumar al caudal pico, sino que su aporte se queda solo al principio del hidrograma resultante. Esto es muy importante para comprender los resultados posteriores que involucran a toda la cuenca. También cabe resaltar, que cada vez el caudal pico se

sigue alejando hacia la derecha del gráfico, ubicándose aproximadamente en 28 minutos y un valor de $8.78 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por último, se muestra a manera de ejemplo, como indica la figura 28 en aporte al cauce principal continua la microcuenca 6. Se muestran los datos de longitud y pendiente para el cálculo del tiempo de viaje como sigue:

Para este caso, la longitud de viaje es:

$$L = 217.41 \text{ m}$$

El desnivel que tiene el cauce en ese tramo es de:

$$D = 2 \text{ m}$$

La pendiente se calcula como:

$$S = \frac{2 \text{ m}}{217.41 \text{ m}} = 0.0092$$

El tiempo de viaje o desfase será de:

$$T_v = \frac{217.41 \text{ m}}{4.47 \cdot \sqrt{0.0092}} = 8.45 \text{ min}$$

Este será el tiempo de desfase o separación del hidrograma de las microcuencas 1, 2, 3, 4 y 5 con el hidrograma de la microcuenca 6. Se muestra a continuación el hidrograma de la microcuenca 6 y la suma con los anteriores como sigue:

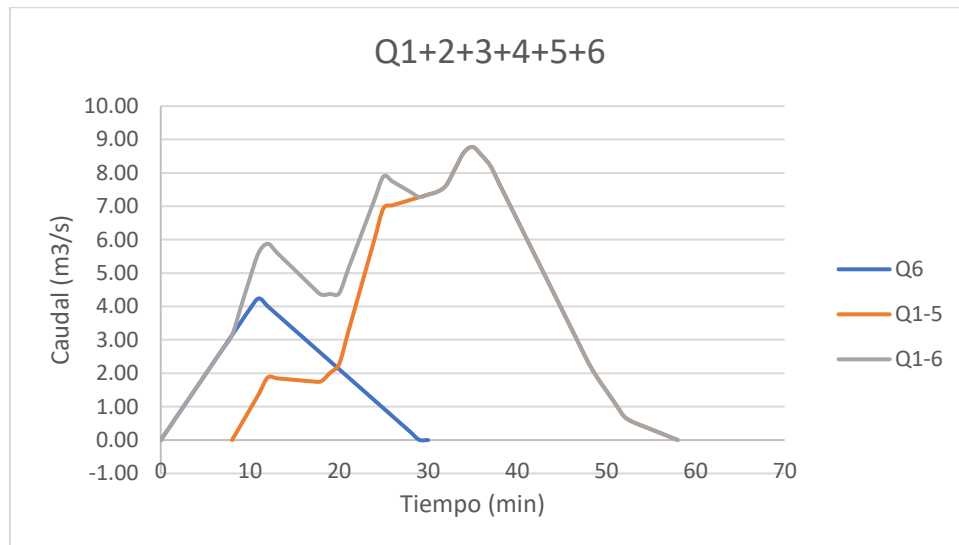


Figura 35. Hidrogramas de microcuencas 1 a 6.

Fuente: Autores



En la figura 35 se puede apreciar como la forma del hidrograma resultante ya deja de ser triangular de tipo “regular”. En el lapso de tiempo entre el minuto 10 y el minuto 20, se presenta un descenso gradual del caudal, debido a que, en dicho momento, los aportes de la microcuenca 6 ya no son suficientes para seguir aumentando la escorrentía. En dicho intervalo de tiempo, finaliza luego que los aportes de las cuencas anteriores ya son suficientes para seguir aumentando los caudales y vuelve a llegar al pico. De manera que se ilustra como es el comportamiento de varias cuencas ante tiempos de desfases o viajes diferentes. Este concepto servirá para entender los hidrogramas totales de toda la cuenca. Cabe resaltar, que el caudal pico, aunque siguen llegando aportes de microcuencas, NO se ha modificado de su valor anterior. Esto nos indica, que para que se acumule caudal en mayor cantidad tal que sume al caudal máximo del hidrograma resultante, deben darse varias condiciones: primero, que más microcuencas aporten al cauce principal en el mismo punto, lo que haría que los hidrogramas se sumen de manera simultánea y pueda aumentar el caudal o que los tiempos de desfases entre hidrogramas sean lo suficientemente cortos para que el hidrograma que recién inicia aportar al cauce logre sumar al caudal pico.

En las zonas de cuenca baja, esta condición no se cumple, debido a que los tramos o longitudes de viajes son curvas y se genera una mayor longitud y, además, los desniveles en cuenca baja son mínimos. Al aumentar los tiempos de desfases, los caudales picos cada vez se alejan más del inicio del hidrograma.

6.4.1.2. Escorrentía total para el año 2000 y periodo de retorno de 25 años

Habiendo mostrado el ejemplo de cálculo por el método racional para varias microcuencas, se muestra el cálculo del hidrograma total resultante de los aportes de cada microcuenca en la que se dividió la cuenca de análisis. Para el año de análisis de cobertura 2000 y el periodo de retorno de 25 años, el hidrograma resultante que se obtuvo se muestra en la figura 36.

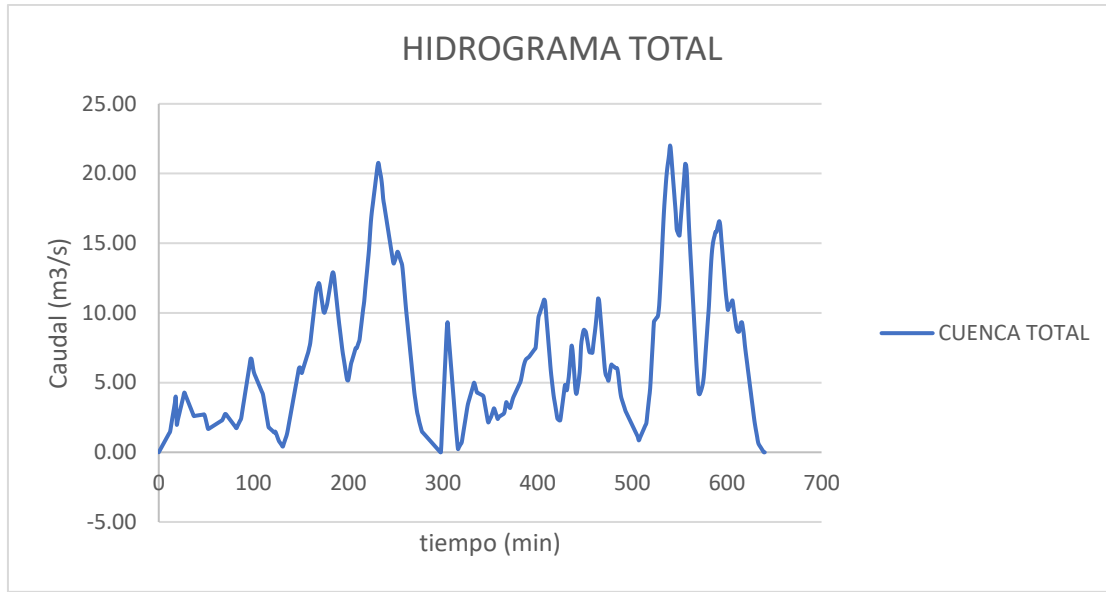


Figura 36. Hidrograma total año 2000 y $T=25$ años

Fuente: Autores

De la figura 36 se obtiene que el caudal pico para esta condición de cobertura y periodo de retorno fue de:

$$Q_{pico} = 22.01 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_p = 540 \text{ min}$$

Se observa que el hidrograma en la figura 36, como se indicó anteriormente, contiene su caudal máximo muy alejado del inicio del mismo. Esto nos indica, que la dinámica que se mostró en las cuencas 1 hasta 6, en donde el tiempo al pico aumentaba cada vez más a causa de tiempos de viajes más largos. También se observan zonas en las cuales los caudales disminuyen de manera drástica. Estas zonas representan los tiempos de viajes extensos dado que en esas zonas al estar tan separados los hidrogramas, no se genera suma de caudales de distintas microcuencas. La mayor caída de caudal se da en la primera parte del hidrograma, en el intervalo de los 236 a 300 minutos. Esto corresponde, como se había dicho antes, a la zona de cuenca baja y media, en donde los tiempos de viajes se hacen muy largos debido al poco cambio de altura que presentan y los largos recorridos que tiene que hacer el flujo hasta esperar el aporte de una microcuenca siguiente. También se puede notar que se forman varios picos de caudal respectivamente en el hidrograma. El primer pico representativo, para este caso, simula los aportes de la parte baja y media de la



cuenca, y su valor se presentó a los 232 minutos registrando un caudal de $20.77m^3/s$. El segundo pico representativo y el caudal máximo, simboliza la zona alta de la cuenca, al minuto 540 y su valor de caudal fue de $22.01m^3/s$. Los hidrogramas resultantes no cambian su forma, solo varían los valores de caudales pico. Se muestran los resultados y se confrontan en la tabla 28.

6.4.1.3. Comparación de caudales

Luego de calcular todos los caudales para cada periodo de retorno y cada año de análisis de cobertura, se calculó su variación. Se resumen los datos hallados en la tabla 28.

Tabla 28. Resumen de cálculo de escorrentía

AÑO	PERÍODO DE RETORNO (años)		
	25	50	100
2000	22.01	24.46	27.18
2010	22.90	25.45	28.28
2019	23.83	26.48	29.42

Fuente: Autores

Con los resultados en la tabla 28, se calculan los porcentajes de variación del caudal manteniendo el periodo de retorno fijo y solo analizando la variación debido a los cambios de cobertura. Del año 2000 a 2010 y el periodo de retorno de 25 años

$$\%V = \frac{22.90 - 22.01}{22.01} = 4.05 \%$$

Dado que los caudales son muy cercanos, los porcentajes de variación del caudal para estos 10 años se hacen casi nulos o muy pequeños. Esto se debe a que la variación del área de zona urbana ha aumentado más del 116% desde el año 2000 al 2019, en relación a toda la cuenca este aumento se vio reflejado solo en un 1.24%. Es decir, respecto a ella misma, la cobertura de zona urbana ha sido la que más ha tenido un aumento, respecto a la cuenca, su porcentaje de variación no genera un aumento significativo de caudal. Los resultados de porcentajes de variación se muestran en la tabla 29.

Tabla 29. *Porcentajes de variación de caudales*

Periodo de retorno	Periodo de variación	% de variación
25 años	2000-2010	4.05
	2010-2019	4.04
	2000-2019	8.25
50 años	2000-2010	4.05
	2010-2019	4.04
	2000-2019	8.25
100 años	2000-2010	4.05
	2010-2019	4.04
	2000-2019	8.25

Fuente: autores

De la tabla 29, se tiene que del año 2010 a 2019 y período de retorno de 25 años, muestra un valor similar respecto a la variación del año 2000 a 2010. Desde el año 2000 hasta el año 2019 se ha aumentado el caudal de escorrentía analizado en el método racional en un 8.25%. Si se analiza el período de retorno de 50 y 100 años se obtiene un valor igual al aumento que tuvo para el período de retorno de 25 años.

Se calcula la relación R entre el porcentaje de la variación de caudales vs el porcentaje de la variación áreas de cobertura, para determinar cuánto incide uno en la variación del otro como sigue. Para los años de 2000 a 2019 y período de retorno de 25 años (la variación la escorrentía 8.25% y de las coberturas, 2.08%)

$$R = \frac{8.25\%}{2.08\%} = 3.96$$

Por lo que la relación calculada sería 1:3.96, es decir, por cada 1% de cobertura vegetal perdida, se aumenta 3.96% el caudal de escorrentía. Para los años 2000 a 2019 y períodos de retorno de 50 y 100 años los resultados de la relación se muestran en la tabla 30:

Tabla 30. *Relación R para cada periodo de retorno para caudales calculados con el método racional*

Periodo de retorno	Periodo de variación	R
25 años	2000-2019	3.96
50 años		3.96
100 años		3.96

Fuente: Autores



De la tabla 30 se observa que la relación se mantuvo igual al tener incrementos de caudales proporcionales, las variaciones de caudal se mantuvieron en 8.25% con respecto al 2000, por ende, la relación R se mantuvo en 3.96 para todos los periodos de retorno de estudio.

6.4.2. Modelación con HEC-HMS

Ya teniendo todos los parámetros de entrada para el software HEC-HMS, se procedió a realizar la modelación para cada uno de los años de estudio (2000, 2010 y 2019) y los respectivos periodos de retorno para cada año (25, 50 y 100 años). A diferencia del método racional, el parámetro número de curva puede ser calculado teniendo en cuenta la condición de humedad antecedente, ya sea seca, húmeda o saturada. L.Vargas *et al.*, (2018) establecieron mediante la comparación de los caudales hallado por hidrograma unitario del SCS y el número de curva que los resultados para la condición antecedente de humedad AMC III, con valores de CN mayores a 80, reporta diferencias muy altas, con errores relativos hasta de 1000% o mayores. Lo que nos permitió descartar modelar la condición de humedad antecedente AMC III que presentaba número de curva por encima de 90. Aunque, en los CN calculados para la condición de humedad antecedente AMC II también son cercanos a 80, decidimos calcularlos y mirar su variación con respecto a la modelación con el método racional.

Para la modelación primeramente se debió crear un archivo con el nombre y descripción de la modelación, posteriormente se añadió el componente de modelo de cuenca (*Basin Models*). Se tomará como ejemplo para explicar el procedimiento el año 2000 con periodo de retorno de 25 años y condición de humedad antecedente AMC I (seca). Luego de haber creado el componente de *Basin Models*, se agregó la capa de mapas (*Maps layer*) en formato (*Shapefile*) de las subcuencas y respectivos cauces principales y los elementos hidrológicos que en este caso fueron 11, los 6 elementos (A, B, C, D, E y H) de subcuencas (*Subbasin*), los dos elementos de salidas (*Junction*), dos elementos de unión de puntos de salida (*Reach*) y el elemento aforo (*Sink*) o el punto más bajo de la hoya. En la figura 37 se muestra la unión de los elementos antes mencionados, cabe resaltar que las delgadas líneas negras solo representan uniones entre elementos, independientemente de sus longitudes.

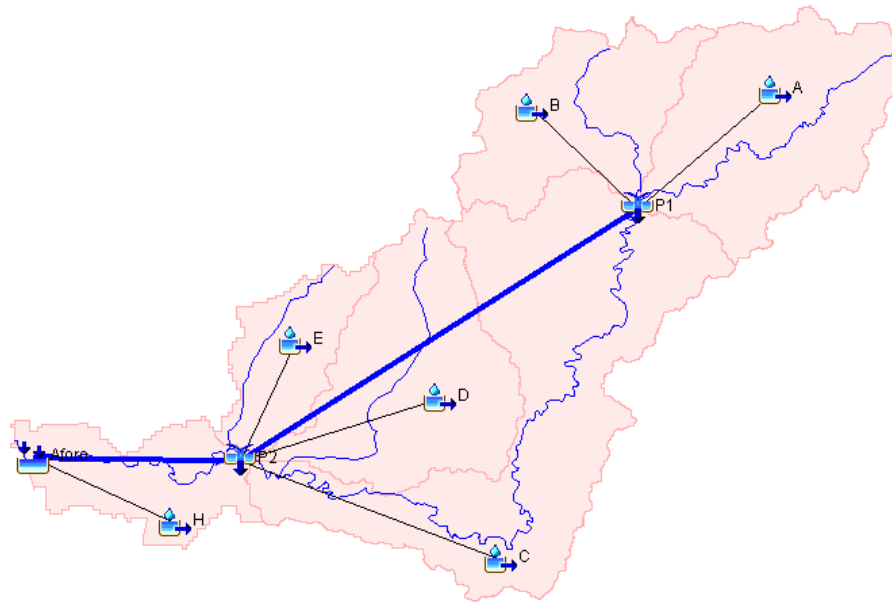


Figura 37. Modelo de la cuenca en HEC-HMS.

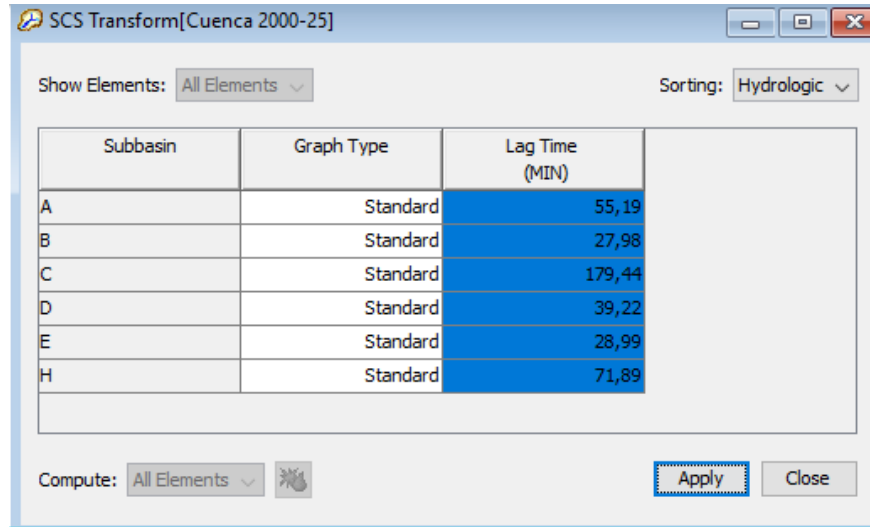
Fuente: Autores

Se ingresaron los datos referentes al área de las subcuencas, se escogió el método de pérdidas y se añadieron los números de curva y la abstracción inicial. Posteriormente se escogió el método de transformación y se proporcionaron los tiempos de retardo al modelo. Todo lo anterior se muestra las figuras 38 y 39.

Subbasin Area [Cuenca ...]		Curve Number Loss [Cuenca grande]		
Subbasin	Area (KM2)	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
A	3,935	33,88	59,99	0,0
B	2,758	36,24	58,36	0,0
C	7,087	34,16	59,79	0,0
D	3,840	35,93	58,57	0,0
E	1,552	34,70	59,41	0,0
H	1,885	34,62	59,47	0,0

Figura 38. Parámetros de entrada (áreas de las subcuencas y números de curva).

Fuente: Autores



The screenshot shows the 'SCS Transform[Cuenca 2000-25]' window. It features a 'Show Elements' dropdown set to 'All Elements' and a 'Sorting' dropdown set to 'Hydrologic'. Below these is a table with three columns: 'Subbasin', 'Graph Type', and 'Lag Time (MIN)'. The table contains six rows of data, with the 'Lag Time' column highlighted in blue. At the bottom, there is a 'Compute' dropdown set to 'All Elements', a 'Compute' button with a lightning bolt icon, an 'Apply' button, and a 'Close' button.

Subbasin	Graph Type	Lag Time (MIN)
A	Standard	55,19
B	Standard	27,98
C	Standard	179,44
D	Standard	39,22
E	Standard	28,99
H	Standard	71,89

Figura 39. Parámetros de entrada para el método de transformación (hidrograma unitario del SCS)

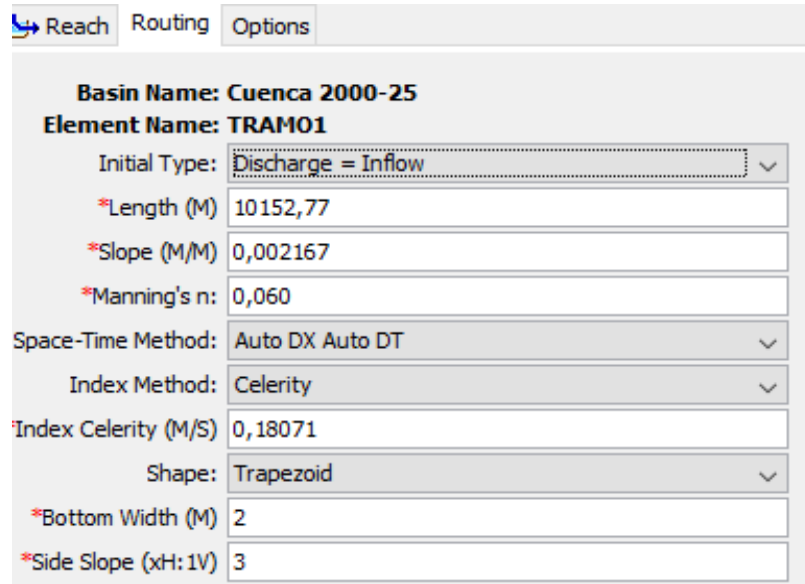
Fuente: Autores

Para la modelación fue necesario añadir los tramos 1 y 2 del elemento *reach*, permitiendo establecer el comportamiento hidrológico del área del arroyo Guayepo analizada durante las crecidas, se debió escoger un método para el tránsito de avenidas, para este caso se escogió el de Muskingum-Cunge por que para su aplicación son necesarios parámetros hidráulicos como la longitud del tramo, el coeficiente de rugosidad de Manning, las pendientes y la sección transversal del tramo, a diferencia de otros métodos que utilizan series de datos difíciles de estimar como es el caso del modelo de Muskingum. De estos tramos se conocen sus longitudes y pendientes pero faltaría estimar su coeficiente de rugosidad (n de Manning) y su sección transversal.



*Figura 40. Fotografías del cauce principal de arroyo Guayepo.
Fuente: Díaz & Dávila (2020)*

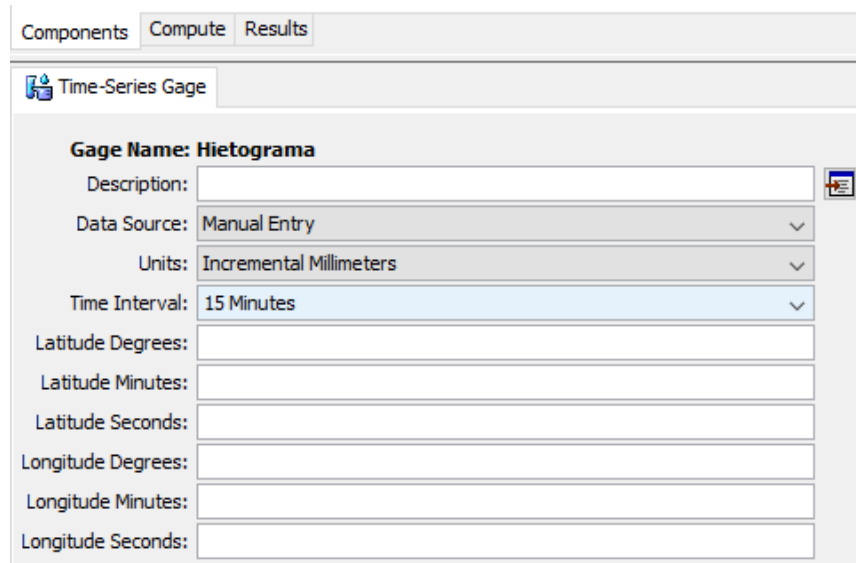
Para la estimación de los parámetros necesarios para el método de Muskingun-Cunge se analizaron fotografías tomadas de los anexos de Díaz & Dávila (2020) mostradas en la figura 40, donde se puede observar que la lámina de agua es pequeña, presenta vegetación en las paredes laterales, muy parecida a la figura 5-5 (20) de (Chow et al., 1994a) la cual es descrita como “zanja o cuneta en arcilla, con pendientes laterales y fondo irregulares prácticamente toda la sección cubierta de vegetación y árboles grandes, sección transversal muy uniforme” para lo que se estipula un $n = 0.060$. Para la sección transversal se escogió una sección trapezoidal con 2 metros en la base y pendiente 1:3 según lo visto en la figura 40. Teniendo lo anterior se procede introducir estos datos en el modelo como se muestra en la figura 41.



Basin Name:	Cuenca 2000-25
Element Name:	TRAMO1
Initial Type:	Discharge = Inflow
*Length (M)	10152,77
*Slope (M/M)	0,002167
*Manning's n:	0,060
Space-Time Method:	Auto DX Auto DT
Index Method:	Celerity
Index Celerity (M/S)	0,18071
Shape:	Trapezoid
*Bottom Width (M)	2
*Side Slope (xH: 1V)	3

Figura 41. Parámetros de entrada para el método de transito de crecientes
Fuente: Autores

Se crea el componente de Series de datos temporales (*Time-Series Data*), se introduce el tamaño del intervalo del hietograma de la lluvia de diseño como se muestra en la figura 42, la fecha y hora del inicio y finalizacion de la lluvia como se muestra en la figura 43.



Components	Compute	Results
Time-Series Gage		
Gage Name:	Hietograma	
Description:		
Data Source:	Manual Entry	
Units:	Incremental Millimeters	
Time Interval:	15 Minutes	
Latitude Degrees:		
Latitude Minutes:		
Latitude Seconds:		
Longitude Degrees:		
Longitude Minutes:		
Longitude Seconds:		

Figura 42. Pestaña del componente *Time-Series Data* en HEC-HMS
Fuente: Autores

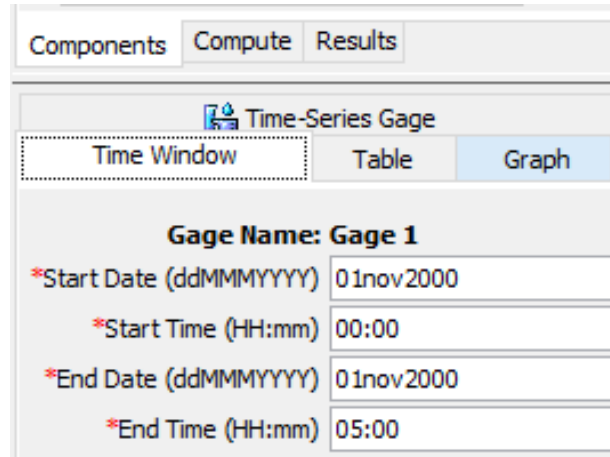
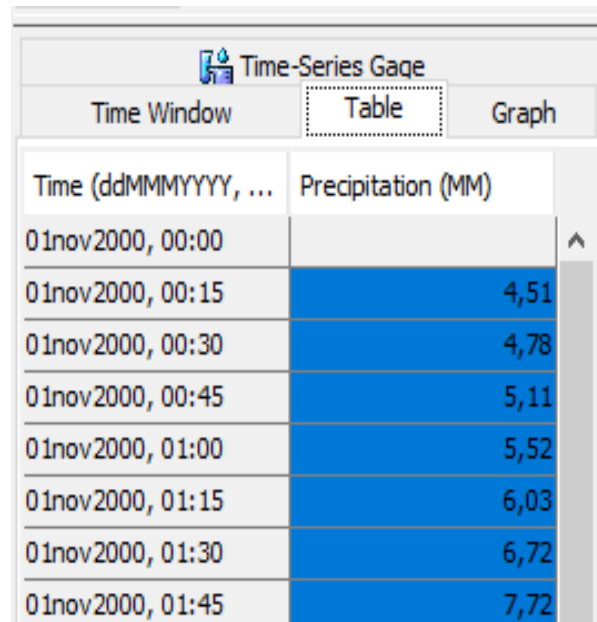


Figura 43. Pestaña de componente Time-Series Data de la fecha y hora del inicio y fin del hietograma de diseño

Fuente: Autores

Se copió el hietograma previamente calculado con el método del bloque alterno y posteriormente se verifica que se haya graficado correctamente en el software como se muestra en las figuras 44 y 45.



Time (ddMMYYYY, ...)	Precipitation (MM)
01nov2000, 00:00	
01nov2000, 00:15	4,51
01nov2000, 00:30	4,78
01nov2000, 00:45	5,11
01nov2000, 01:00	5,52
01nov2000, 01:15	6,03
01nov2000, 01:30	6,72
01nov2000, 01:45	7,72

Figura 44. Pestaña de la tabla para ingresar hietograma en HEC-HMS

Fuente: Autores

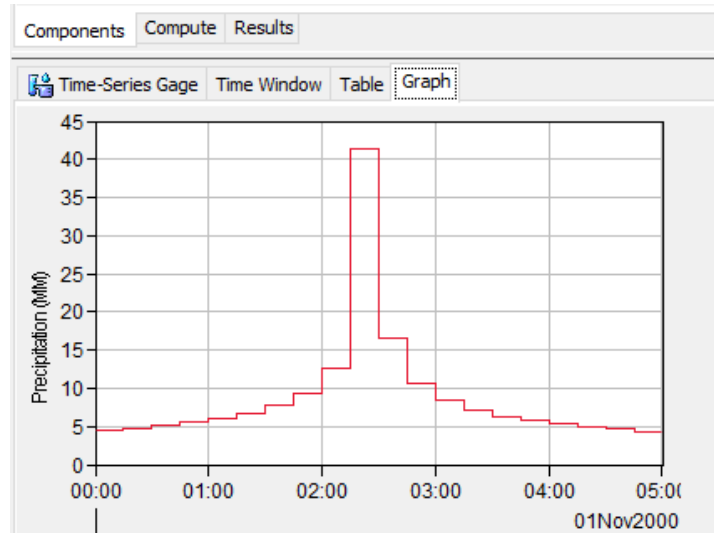


Figura 45. Hietograma graficado en HEC-HMS de los datos de entrada al modelo
Fuente: Autores

Se crearon los componentes de modelos meteorológicos (*Meteorologic Models*) donde se asignaron el hietograma introducido a cada una de las subcuencas de estudio, como se muestra en la figura 46.

Specified Hyetograph	
Met Name: Met 1	
Subbasin Name	Gage
A	Hietograma
B	Hietograma
C	Hietograma
D	--None--
E	--None--
H	--None--

Figura 46. Pestaña del Meteorologic Models y asignación de hietograma a cada subcuenca en HEC-HMS

Fuente: Autores

Posteriormente se corre el modelo y se entra en la pestaña de resultados en la ventana de resumen global, se muestra el área de las subcuencas, el caudal pico presentado y el volumen total aportado por la subcuenca que escurre hasta llegar al punto de salida o aforo. Su resumen se muestra en la figura 47.

Global Summary Results for Run "Run 1"

Project: Cuenca arroyo guayepo Simulation Run: Run 1

Start of Run: 01nov2000, 00:00 Basin Model: Cuenca 2000-25
 End of Run: 02nov2000, 20:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 25abr2021, 04:42:43 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
A	3,935	27,6	01nov2000, 03:45	66,22
B	2,758	24,2	01nov2000, 03:00	62,19
P1	6,693	46,0	01nov2000, 03:30	64,56
C	7,087	27,1	01nov2000, 06:15	65,73
TRAMO1	6,693	40,0	01nov2000, 05:45	64,10
D	3,840	29,5	01nov2000, 03:15	62,71
E	1,552	14,0	01nov2000, 03:00	64,78
P2	19,172	75,4	01nov2000, 05:30	64,48
TRAMO 2	19,172	24,3	01nov2000, 09:15	56,35
H	1,885	11,5	01nov2000, 04:00	64,93
AFORO	21,057	24,4	01nov2000, 08:45	57,12

Figura 47. Resumen de la modelación en HEC-HMS para el año 2000, T=25 años y condición AMC I

Fuente: autores

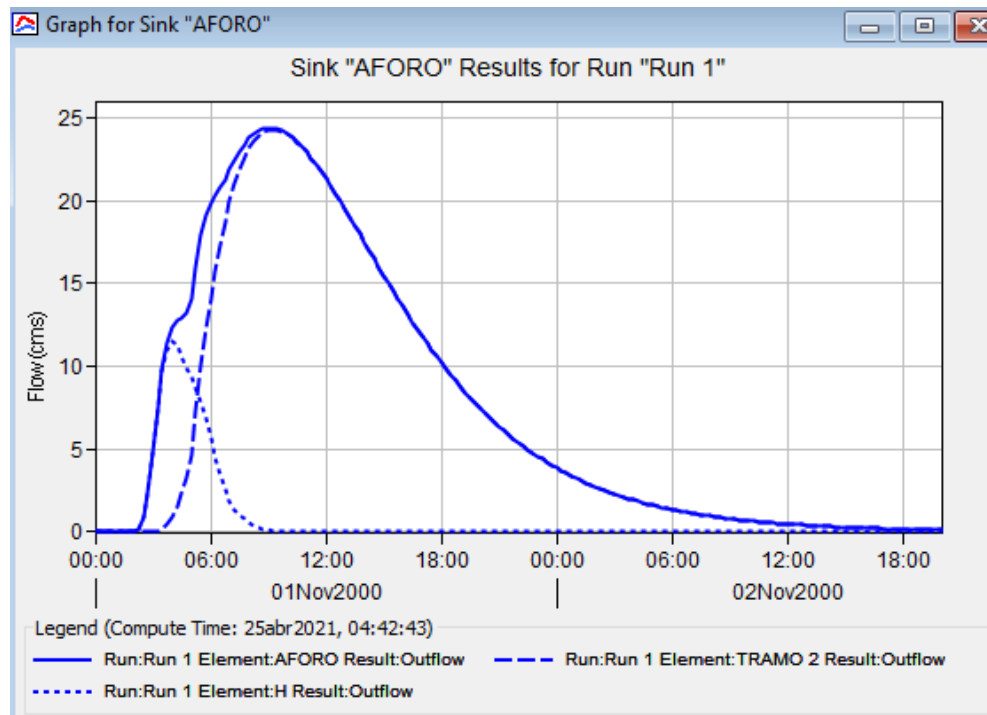


Figura 48. Hidrograma unitario del SCS en HEC-HMS para el año 2000, T=25 años y AMC I

Fuente: Autores



El programa permite la obtención de diferentes tablas de datos y gráficos referentes a la precipitación, acumulación de la precipitación, la infiltración en el suelo, el exceso de precipitación, la acumulación del exceso de precipitación, la pérdida de precipitación y el flujo de escorrentía, el cual es de nuestro interés y este se muestra en la figura 48. El procedimiento anterior se repite para cada uno de los periodos de retorno (25, 50 y 100) y los años (2000, 2010 y 2019) y las condiciones de humedad antecedente AMC I y AMC II. Como se muestra en la tabla 31.

Tabla 31. *Caudales de escorrentía máximos para cada uno de los años, periodo de retorno y condición de humedad antecedente.*

Año	Periodo de retorno (años)	Caudal (m ³ /seg)	
		AMC I	AMC II
2000	25	24.4	51.7
	50	28.0	63.6
	100	32.7	77.6
2010	25	24.9	51.9
	50	28.6	63.8
	100	33.4	77.8
2019	25	25.2	52.7
	50	29.0	64.6
	100	33.9	78.7

Fuente: Autores

En concordancia con lo expuesto por L.Vargas *et al.*, (2018) los caudales de escorrentia calculados con numeros de curva para una condicion antecedente de humedad II, muy cercanos a 80 o por encima de este valor, son excesivamente altos en comparacion con los caudales calculados con el metodo racional. En este caso los números de curva variaron entre 76.63 y 80.54, produciendo una diferencia de mas del 250%, razón por la cual estos caudales se descartan.

De lo anterior se evidencia la necesidad de realizar la instrumentacion de la cuenca de estudio, para la medición de caudales de escorrentía y los parametros necesarios para aplicar el metodo de transito de crecientes de Muskingum-Cunce y corroborar los estimados en el presente estudio, y poder realizar una calibracion del modelo con el metodo del número de curva en el software HEC-HMS, para finalmente obtener los caudales reales de la zona.

Debido a lo anterior solo se comparan los caudales para la condicion de humedad antecedente I. La variacion entre los años 2000-2010 para un periodo de retorno de 25 se calcula como se muestra acontinuacion.

$$\%V = \frac{24.9 - 24.4}{24.4} = 2.05\%$$

El porcentaje de variación encontrado duplica al del método racional, pero igual sigue siendo bajo. Para el periodo de 2010 al 2019 para un periodo de retorno de 25 años tenemos que

$$\%V = \frac{25.2 - 24.9}{24.9} = 1.20\%$$

Aunque los porcentajes de variación fueron diferentes al del método racional, no son tan exagerados como es el caso de los caudales para la condición de humedad II y III.

Tabla 32. *Porcentaje de variación para cada periodo de retorno y cada periodo de años.*

Periodo de retorno	Periodo de variación	% de variación
25 años	2000-2010	2.05
	2010-2019	1.20
	2000-2019	3.28
50 años	2000-2010	2.14
	2010-2019	1.40
	2000-2019	3.57
100 años	2000-2010	2.14
	2010-2019	1.50
	2000-2019	3.67

Fuente: Autores

En la tabla 32, se puede ver que en general el periodo en que más se presenta variación es el 2000-2010, aunque tienen una serie de años similares al del periodo 2010-2019 presenta diferencias significativas en la variación de los caudales de escorrentía.

Se calcula la relación R entre el 3.28% de la variación de caudales vs el 2.08% de la variación áreas de cobertura, para determinar cuánto incide uno en el otro como sigue. Para los años de 2000 a 2019 y período de retorno de 25 años.

$$R = \frac{3.28\%}{2.08\%} = 1.57$$

Por lo que la relación calculada sería 1:1.57, es decir, por cada 1% de cobertura vegetal perdida, se aumenta 1.57% el caudal de escorrentía. Para los años 2000 a 2019 y períodos de retorno de 50 y 100 años los resultados de la relación se muestran en la tabla 33.



Tabla 33. *Relación R para cada periodo de retorno para caudales calculados con el método del número de curva*

Periodo de retorno	Periodo de variación	R
25 años	2000-2019	1.58
50 años		1.72
100 años		1.76

Fuente: Autores

Según lo expuesto en la tabla 33, se puede concluir que la variación en la cobertura vegetal incide directamente en los caudales de escorrentía para este método de cálculo.

6.4.3. Comparación de caudales por los dos métodos

Se muestra la relación entre los caudales hallados por el método racional y los calculados por la modelación en el software HEC-HMS como se muestra en la tabla 34.

Tabla 34. *Variación de los caudales de escorrentía obtenidos por el método del número de curva con respecto al método racional.*

Año	Periodo de retorno (años)	Racional	Número de curva	Variación %
		(m3/seg)	(m3/seg)	
2000	25	22.01	24.4	10.86
	50	24.46	28.0	14.47
	100	27.18	32.7	20.30
2010	25	22.90	24.9	8.73
	50	25.45	28.6	12.38
	100	28.28	33.4	18.10
2019	25	23.83	25.2	5.75
	50	26.48	29.0	9.52
	100	29.42	33.9	15.23

Fuente: Autores

Como se puede observar, los valores hallados por el método racional obtienen resultados más cercanos a los calculados por el software HEC-HMS para el periodo de retorno de 25 años. Cuando se aumenta el periodo de retorno, también se aumenta la variación entre los mismos, siendo la máxima diferencia de 20 %. Cabe resaltar que los valores de caudal pico obtenidos por el método SCS número de curva fueron superiores a los obtenidos por el método racional.



7. CONCLUSIONES

La cuenca del arroyo Guayepo cuenta con un área de drenaje de 59.1 Km² y una longitud total del cauce principal de 22.9 km aproximadamente, de los cuales se analizaron 21.07 Km² de área y 17.63 km de longitud de cauce. Es una zona que ha presentado un desarrollo urbanístico en los últimos años, pasando de ser una cuenca netamente rural a una cuenca urbanizada, con desarrollo de infraestructura, viviendas y centros de estudios.

Del área de estudio considerada, se analizaron los parámetros morfométricos de la cuenca encontrado un índice de compacidad y factor de forma de 2.375 y 0.234 respectivamente catalogándola como irregular y alargada, por lo que en general no es propensa a inundaciones repentinas.

Se implementaron dos metodologías para calcular los porcentajes cobertura vegetal, la primera aplicada para los años 2000 y 2010, basada en la obtención y geoprocesamiento de mapas de la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia; y la segunda implementada para el año 2019, mediante la digitalización de coberturas, utilizando imágenes satelitales adquiridas en Google Earth y SAS PLANET.

Para los años 2000, 2010 y 2019 se determinaron principalmente 4 tipos de coberturas vegetal: Pastos, Bosques, Zona urbana y Tierras Desnudas. Las coberturas se agruparon en dos categorías: áreas con cobertura vegetal (Pastos y Bosques) y sin cobertura vegetal (Zona urbana y Tierras Desnudas). En los 19 años analizados, la cobertura vegetal con respecto al área total de la cuenca fue de 98.93%, 98.6% y 96.92% para los tres años considerados, teniendo una tasa de variación promedio anual de 0.10%.

La cobertura vegetal en la cuenca fue evaluada en las seis subcuencas (A, B, C, D, E y H) para determinar en qué zonas de la hoya se concentraba el crecimiento urbanístico.

Del análisis de la cobertura vegetal, se encontró que para el año 2000 las subcuencas A, B, C y H se catalogaban como netamente rurales, exceptuando las subcuencas D y E, donde se ubica el corregimiento de Pontezuela. Para 2019 todas subcuencas aumentaron el área de zona urbana exceptuando la subcuenca A. El porcentaje de variación del área sin cobertura con respecto al área total de la cuenca no fue tan drástico (2.08%). En concordancia con lo anterior, hubo un aumento en la cobertura de Tierras Desnudas y Degradadas que posiblemente en los años siguientes se transformarán en zonas impermeables.



En términos generales todas las subcuencas tuvieron más del 90% de sus áreas cubiertas con vegetación, dado que la cuenca del arroyo Guayepo es catalogada como rural. Sin embargo, cabe resaltar la disminución de la cobertura de bosques, que en los 19 años disminuyó el 75,64% de su área, perdiendo 268.26 ha. Dicho comportamiento, no deja de ser preocupante, ya que los bosques son el tipo de cobertura que más favorece a que se genere menos escorrentía en los eventos de lluvia extrema.

El estudio es la actualización de las curvas intensidad-duración- frecuencia de la estación Bayunca con registros desde el año 1974 a 2019, de las previamente elaboradas por Cañaveras & Perez (2018) con registro hasta el 2016. Se establecen los nuevos valores de las constantes K, m y n para futuros estudios en la zona constituyendo una contribución de este estudio.

El coeficiente de escorrentía estimado en este estudio en toda la cuenca fue de 0.35, 0.36 y 0.37 para los años 2000, 2010 y 2019 respectivamente. Estos valores son similares a los hallados en campo en la misma cuenca del arroyo Guayepo por Diaz & Dávila (2020), dándole relevancia y validez al cálculo de caudales realizado por el método racional.

Los números de curvas propuestos por SCS para la condición **AMC I, II o III** arrojaron valores entre 59.11 y 60.27 para la condición **I**, entre 79.49 y 80.09 para la condición **II** y entre 89.83 y 90.25 para la condición **III**. Para la condición **AMCII** se obtuvieron caudales muy superiores al compararlos con los obtenidos con el método racional (hasta 185% de diferencia). Estos resultados coinciden con En relación a estos cálculos, L.Vargas *et al.*, (2018) quien establece que para números de curva cercanos o superiores al 80, las diferencias entre los caudales de escorrentía estimados y los medidos en campo son muy altas, con errores relativos hasta de 1000% o mayores.

La modelación hidrológica se realizó mediante dos métodos, el Método Racional y el Método SCS Número de curva de los que se obtuvieron distintos valores de caudales pico de escorrentía para los tres periodos de retorno analizados. Para el periodo de retorno de 100 años, los caudales hallados para la cobertura del año 2000 fueron de $27.18 \text{ m}^3/\text{s}$ para el método racional y $31.7 \text{ m}^3/\text{s}$ para el SCS numero de curva. Al otro extremo se encontró para el análisis de la cobertura del año 2019, los caudales de escorrentía para el método racional y numero de curva fueron $29.42 \text{ m}^3/\text{s}$ y $33.9 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente para el mismo periodo de retorno.



Al analizar la variación de caudales respecto al periodo de retorno de 25 años, variando solo las coberturas en el intervalo de 2000-2019 los porcentajes de variación fueron de 8.25% para método racional y 3.28% para SCS número de curva. Por otra parte, analizando el periodo de retorno de 100 años con el mismo intervalo fueron 8.25% y 3.67 % respectivamente.

Las variaciones de cobertura vegetal desde el año 2000 al 2019 tuvieron una tasa de variación decreciente de 2.08% con respecto al área total de la cuenca. La variación de la cobertura se relacionó con la variación de los caudales mencionados en el párrafo anterior para un periodo de retorno de 100 años, arrojando una relación R igual a 3.9 para el método racional y 1.76 para el método del número de curva, indicando que por cada 1% de área de cobertura vegetal que se pierde, la escorrentía aumenta 3.9% y 1.76% respectivamente.

Aunque los valores de variación de caudal de escorrentía entre el método racional y el método del número de curva en porcentaje no son iguales y que el aumento en términos de m^3/s no haya sido tan “relevante” , al confrontarlo con la variación de cobertura vegetal en términos porcentuales, se determina que SI incide la cobertura vegetal de manera directa en la generación de caudales de escorrentía en una cuenca hidrográfica local.



8. RECOMENDACIONES

En las investigaciones relacionadas con modelaciones hidrológicas es necesario el estudio de muchas variables y de la obtención de datos de campo para ser verificados mediante las metodologías implementadas. Se recomienda:

- Realizar la instrumentación de la cuenca de la arroyo Guayepo para la obtención de caudales de escorrentía reales y validar la calibración del modelo con el método del número de curva en el software HEC-HMS..
- Realizar vigilancia y control de las zonas de cobertura de bosque en la cuenca de estudio e implementar campañas para rearbolicación en nuevas zonas de la hoya.
- Profundizar en la aplicación de otras metodologías para estimar las áreas de cobertura vegetal mediante el uso de SIG.
- Examinar y corroborar las coberturas vegetales presentes en la actualidad en la cuenca del arroyo Guayepo
- Realizar análisis multitemporales de cobertura vegetal en otras cuencas de la zona norte y comprobar si se presenta la misma tendencia de la cuenca estudiada.
- Manejar con cuidado los datos obtenidos en los sistemas de información geográfica, ya que pueden presentar errores si no se interpretan de manera adecuada o si se cuentan con referencias distintas.
- La principal limitación que tuvo el estudio fue la NO verificación en campo de los cálculos realizados de caudales. Se deben realizar visitas de campo y corroborar las cubiertas vegetales en la zona, el estado del cauce y los usos y tipos de suelos, etc.
- Realizar la actualización de las relaciones propuestas por Chan y Bolívar para lluvias menores a 24 horas, dado que la serie de datos con las que se halló dicha relación ya tienen más de 20 años desde su análisis.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Decreto No 0977 de 2001. *Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias*, 1 (2001) (testimony of Alcaldía Mayor de Cartagena).
- Aparicio Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos De Hidrología De Superficie*. (GRUPO NORIEGA (ed.); Vol. 53, Issue 9). LIMUSA. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Arrieta Pastrana, A. (2015). *Aplicaciones hidrológicas en la ingeniería*.
- Bernal, S. M., & Prado, C. A. (2015). Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales de la cuenca de la quebrada Granadillo en los años 1993 y 2009 a partir de aerofotografías y cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. In *Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería*. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2722/1/Trabajo de grado-Especialización RH.pdf>
- Brakensiek, D. L., Rawls, W. J. y Stephenson, G. R. (1984). Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. *American Society of Agricultural Engineers*, 84-203. 1 -13 pp.
- Bolinaga, J. (1979). *Drenaje urbano. Caracas, Venezuela:Ministerio del ambiente y de los recursos naturales renovables, insituto Nacional de Obras Sanitarias*
- Cañaveras ,E, & Perez, A. (2018). *Analisis de amenaza por inundacion y diagnostico del sistema de drenaje urbano de la cabecera municipal de Clemencia, Bolivar*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cartagena.
- Carciente, J.(1985). *Carreteras. Estudio y proyecto. Caracas, Venezuela:ediciones Vega s.r.l*
- Castro, C. V., & Maidment, D. R. (2020). GIS preprocessing for rapid initialization of HEC-HMS hydrological basin models using web-based data services. *Environmental Modelling and Software*, 130(August 2019), 104732. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104732>
- Chang, & Bolívar. (1997). Relaciones entre la precipitación en 24 horas y una duración menor. En A. Arrieta, *Hidrología practica para ingenieros*. (pág. 77). Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Chantre, M. (2017). *Analisis comparativo de cambios de area en coberturas en la parte alta de la subcuenca del rio palacé, a traves de imágenes Landsat entre 1989 y 2016. (tesis de especializacion)*. Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.



- Chen, D., Li, J., Yang, X., Zhou, Z., Pan, Y., & Li, M. (2020). Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use optimization: A case study in the YanHe watershed. *Ecosystem Services*, 43, 101–117. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101117>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994a). *Hidrología aplicada*. McGRAW-HILL.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994b). *Hidrología aplicada*. McGRAW-HILL.
- Chulsang, Y., Changhyun, J., Changyeol, P. (2015). Effect of Rainfall Temporal Distribution on the Conversion Factor to Convert the Fixed-Interval into True-Interval Rainfall. *Journal of Hydrologic Engineering*. 20. 04015018. 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001178. <https://www.researchgate.net/publication/273507833>
- DANE. (2020). *GEOPORTAL DANE*. <https://geoportal.dane.gov.co/acerca-del-geoportal/acerca/>
- Del Castillo, L., & Ortiz, M. (2013). *Evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca hidrográfica del arroyo policarpa para el control de inundaciones*. Universidad de Cartagena.
- Díaz, I., & Dávila, J. (2020). *Estimación de la influencia de la infiltración en el coeficiente de escorrentía en el suelo de la cuenca del arroyo guayepo de pontezuela, Cartagena*. Universidad de Cartagena.
- Fernández, R. (2006). *Mejora de los parámetros de cálculo del modelo del número de curvas y su validación mediante un modelo hidrológico distribuido*. <http://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/2723>
- Gao, H., Wu, Z., Jia, L., & Pang, G. (2019). Vegetation change and its influence on runoff and sediment in different landform units, Wei River, China. *Ecological Engineering*, 141(May). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105609>
- Genxu, W., Guangsheng, L., & Chunjie, L. (2012). Effects of changes in alpine grassland vegetation cover on hillslope hydrological processes in a permafrost watershed. *Journal of Hydrology*, 444–445, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.033>
- González, A., Alvarez, P., González, M., & Aguirre, Z. (2016). Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Catamayo, Ecuador. *Cedamaz*, 6, 50–59.
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1–4), 83–95.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>

Hydrologic Engineering Center. (n.d.). *Manual de Referencias técnicas de HEC-HMS*. 2021.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra, Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá, Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1998). Estudio General de Suelos del Departamento de Bolívar. En I. G. Codazzi, Estudio General de Suelos del Departamento de Bolívar. IGAC.

IGAC. (2021). *Geoportal la información geográfica de colombia*. <https://geoportal.igac.gov.co/>

Jianzhong, Y., & Fenqin, H. (2012). Researching the Relationship between the Change of Vegetation Cover and Runoff Based on RS and GIS. *Procedia Environmental Sciences*, 12, 1077–1081. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.390>

Leonardo Vargas, Oscar Torres, G. C. (2018). Evaluación del modelo de hidrograma unitario SCS en la determinación de caudales máximos en cuencas de Norte de Santander. *Journal of Engineering Sciences*, 23(1), 6. <https://doi.org/10.22463/0122820x.1323>

Liu, Y. F., Liu, Y., Wu, G. L., & Shi, Z. H. (2019). Runoff maintenance and sediment reduction of different grasslands based on simulated rainfall experiments. *Journal of Hydrology*, 572(March), 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.008>

Mendonça dos Santos, F., Proença de Oliveira, R., & Mauad Fábio, F. (2020). Evaluating a parsimonious watershed model versus SWAT to estimate streamflow, soil loss and river contamination in two case studies in Tietê river basin, São Paulo, Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 29(March), 100685. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100685>

MINVIVIENDA. (2017). Reglamentos técnicos de agua y saneamiento básico Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Principales lineamientos de la Resolución por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS Viceministerio de A. Recuperado de http://www.minvivienda.gov.co/GuiasRAS/RAS_009.pdf

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia. (2016). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO D. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y



Saneamiento

Básico.

http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf

Miyata, S., Gomi, T., Sidle, R. C., Hiraoka, M., Onda, Y., Yamamoto, K., & Nonoda, T. (2019).

Assessing spatially distributed infiltration capacity to evaluate storm runoff in forested catchments: Implications for hydrological connectivity. *Science of the Total Environment*, 669, 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.453>

Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrologia en la Ingeniería. In *Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería* (p. 382).

Olivares, J. (2 de 12 de 2017). hidrojING. Obtenido de hidrojING: <http://www.hidrojing.com>

Patiño, J., León peláez, J., Montes, L., & hernández, L. (2007). Nota Técnica - Propuesta Metodológica Para Comparar El Efecto De Diferentes coberturas Vegetales En La Regulación De Caudales En Cuencas Hidrográficas. Aplicación En La Microcuenca De La Quebrada La Murciélago, Antioquia. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 0(15), 89–100.

SIAC. (2021). *GEOVISOR IDEAM*. <http://www.siac.gov.co/geovisorconsultas>

USGS. (2021). *USGS Geo Data Portal*. <https://cida.usgs.gov/gdp/>

Weiss, L. L. (1964). “Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall.” *J. Hydraul. Eng.*, 90(HY1), 77–82

Xu, G., Zhang, J., Li, P., Li, Z., Lu, K., Wang, X., Wang, F., Cheng, Y., & Wang, B. (2018). Vegetation restoration projects and their influence on runoff and sediment in China. *Ecological Indicators*, 95(March), 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.047>

Xu, Q. X., Wang, T. W., Cai, C. F., Li, Z. X., Shi, Z. H., & Fang, R. J. (2013). Responses of Runoff and Soil Erosion to Vegetation Removal and Tillage on Steep Lands. *Pedosphere*, 23(4), 532–541. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60046-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60046-6)

Yabrudy, H., & Sotomayor, A. (2020). *Variación histórica del coeficiente de escorrentía en la microcuenca del canal ricaurte de la ciudad de cartagena*. Universidad de Cartagena.

Zhang, L., Wang, J., Bai, Z., & Lv, C. (2015). Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. *Catena*, 128, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.016>

Zhang, X., Liu, Y., Fang, Y., Liu, B., & Xia, D. (2012). Modeling and assessing hydrologic processes for historical and potential land-cover change in the Duoyingping watershed,



southwest China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 53–54, 19–29.

<https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.08.021>

Zuecco, G., Penna, D., & Borga, M. (2018). Runoff generation in mountain catchments: Long-term hydrological monitoring in the rio vauz catchment, Italy. *Geographical Research Letters*, 44(2), 397–428. <https://doi.org/10.18172/cig.3327>



10. ANEXO

ANEXO A. Áreas, longitudes del cauce principal, desniveles, pendientes, tiempos de concentración y coeficientes de escorrentía para los años 2000, 2010 y 2019 para cada subcuenca.

NUMERO	Área (HA)	Longitud cauce ppal (m)	Desnivel (m)	Pendiente (m/m)	Tc (min)	C (2000)	C (2010)	C (2019)
1	33.32	694.16	12	0.0173	17.61	0.40	0.40	0.40
2	16.63	875.31	18	0.0206	21.23	0.40	0.40	0.40
3	27.44	1099.40	30	0.0273	23.34	0.40	0.40	0.40
4	12.70	340.46	16	0.0470	7.33	0.40	0.40	0.40
5	6.42	240.61	8	0.0332	6.18	0.40	0.40	0.40
6	29.26	858.72	26	0.0303	18.12	0.40	0.40	0.40
7	44.60	866.67	12	0.0138	22.56	0.40	0.40	0.40
8	30.65	1210.55	32	0.0264	25.51	0.40	0.40	0.40
9	47.86	1524.73	40	0.0262	30.68	0.40	0.40	0.40
10	1.61	99.78	2	0.0200	3.55	0.40	0.40	0.40
11	17.95	511.77	12	0.0234	12.67	0.40	0.40	0.40
12	35.46	683.59	8	0.0117	19.49	0.40	0.40	0.40
13	18.76	668.56	38	0.0568	12.38	0.39	0.40	0.40
14	20.06	510.76	28	0.0548	9.81	0.39	0.40	0.40
15	4.52	263.31	4	0.0152	8.59	0.40	0.40	0.40
16	18.66	730.27	24	0.0329	15.68	0.40	0.40	0.40
17	11.38	248.65	4	0.0161	7.71	0.40	0.40	0.40
18	17.66	652.86	20	0.0306	14.53	0.40	0.40	0.40
19	54.66	927.77	34	0.0366	17.79	0.36	0.36	0.35
20	45.25	832.53	40	0.0480	15.08	0.33	0.35	0.35
21	49.61	1140.20	28	0.0246	24.12	0.32	0.37	0.40
22	8.61	358.98	1	0.0028	18.43	0.36	0.40	0.40
23	37.21	1126.70	10	0.0089	32.71	0.39	0.40	0.40
24	4.52	322.28	2	0.0062	13.44	0.40	0.40	0.40
25	36.62	627.81	10	0.0159	16.46	0.40	0.40	0.40
26	21.60	404.79	4	0.0099	13.29	0.40	0.40	0.40
27	37.21	948.07	18	0.0190	22.41	0.40	0.40	0.40
28	6.42	643.56	6	0.0093	21.41	0.40	0.40	0.40
29	8.90	357.10	8	0.0224	9.68	0.40	0.40	0.40
30	47.65	1376.99	28	0.0203	30.18	0.40	0.40	0.40
31	3.65	253.38	1	0.0039	12.67	0.40	0.40	0.40
32	31.23	575.56	32	0.0556	10.62	0.40	0.40	0.40
33	9.34	417.53	12	0.0287	10.29	0.40	0.40	0.40
34	16.20	927.07	22	0.0237	21.46	0.40	0.40	0.40
35	4.52	377.51	1	0.0026	20.05	0.40	0.40	0.40
36	4.52	184.79	2	0.0108	7.00	0.40	0.40	0.40

*Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en los caudales de escorrentía de la
cuenca del arroyo Guayepo*



37	15.47	305.62	6	0.0196	8.57	0.40	0.40	0.40
38	15.01	610.74	16	0.0262	14.46	0.40	0.40	0.41
39	18.59	331.02	8	0.0242	8.55	0.40	0.40	0.40
40	15.86	400.43	4	0.0100	13.30	0.40	0.40	0.40
41	36.19	882.59	12	0.0136	23.27	0.40	0.40	0.40
42	28.59	885.97	6	0.0068	29.11	0.20	0.20	0.20
43	45.57	858.19	36	0.0419	16.11	0.36	0.40	0.40
44	42.17	1446.69	52	0.0359	26.92	0.39	0.40	0.39
45	8.03	533.59	6	0.0112	16.99	0.20	0.20	0.20
46	5.98	267.71	1	0.0037	13.25	0.20	0.20	0.20
47	19.99	541.14	8	0.0148	15.19	0.40	0.40	0.40
48	14.74	330.51	4	0.0121	10.65	0.40	0.40	0.46
49	16.05	293.67	2	0.0068	11.44	0.20	0.20	0.27
50	30.55	750.31	8	0.0107	21.89	0.40	0.40	0.42
51	21.31	586.65	4	0.0068	20.56	0.20	0.20	0.23
52	52.42	680.52	48	0.0705	11.20	0.40	0.40	0.42
53	21.54	792.63	34	0.0429	15.50	0.40	0.40	0.42
54	100.79	2094.32	54	0.0258	39.34	0.36	0.39	0.39
55	26.70	645.20	4	0.0062	22.77	0.20	0.20	0.21
56	37.35	719.16	4	0.0056	25.50	0.40	0.40	0.40
57	32.29	599.61	24	0.0400	12.09	0.19	0.19	0.25
58	30.06	596.81	10	0.0168	15.65	0.20	0.20	0.22
59	95.50	2083.63	60	0.0288	38.04	0.33	0.38	0.40
60	14.15	525.74	8	0.0152	14.92	0.20	0.20	0.20
61	10.94	533.10	4	0.0075	18.91	0.20	0.20	0.20
62	58.62	1437.55	6	0.0042	49.82	0.19	0.19	0.20
63	42.31	1698.67	54	0.0318	32.18	0.34	0.40	0.42
64	26.12	648.13	12	0.0185	16.43	0.29	0.31	0.20
64+	15.18	555.14	8	0.0144	15.86	0.40	0.40	0.40
65	26.27	959.84	6	0.0063	32.10	0.25	0.25	0.29
66	19.31	486.59	16	0.0329	10.93	0.20	0.20	0.20
67	15.91	516.70	2	0.0039	22.21	0.19	0.19	0.24
68	24.05	829.74	36	0.0434	16.00	0.36	0.40	0.40
69	83.47	1455.98	30	0.0206	30.71	0.37	0.40	0.40
70	34.73	799.32	4	0.0050	28.96	0.52	0.52	0.56
71	14.88	364.55	4	0.0110	11.94	0.17	0.17	0.20
72	20.43	409.34	2	0.0049	16.73	0.19	0.19	0.20
73	21.74	524.11	4	0.0076	18.00	0.39	0.39	0.40
74	28.09	700.23	4	0.0057	25.01	0.40	0.40	0.40
75	26.41	689.93	2	0.0029	30.55	0.38	0.38	0.43
76	14.01	535.97	4	0.0075	18.83	0.40	0.40	0.47
77	35.46	588.87	2	0.0034	25.09	0.40	0.40	0.44
78	21.78	816.97	4	0.0049	30.30	0.37	0.48	0.41