



**VARIACIÓN HISTÓRICA DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA
EN LA MICROCUENCA DEL CANAL RICAUORTE DE LA CIUDAD
DE CARTAGENA**

**ADOLFO JOSÉ SOTOMAYOR CUADRADO
HUGO JAVIER YABRUDY MERCADO**

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

2020



**VARIACIÓN HISTÓRICA DEL COEFICIENTE DE
ESCORRENTÍA EN LA MICROCUENCA DEL
CANAL RICAURTE DE LA CIUDAD DE
CARTAGENA**



**TRABAJO DE GRADO
PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

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

INVESTIGADORES

**ADOLFO JOSÉ SOTOMAYOR CUADRADO
HUGO JAVIER YABRUDY MERCADO**

DIRECTOR

ALFONSO ARRIETA PASTRANA

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

2020



NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director
ALFONSO ARRIETA PASTRANA

Firma del jurado
DALIA MORENO EGEL

Firma del jurado
RAMON ANDRADE CASTILLO



AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Agradecimiento a Dios, a mis padres Dairo Sotomayor y Afife Cuadrado, hermanos y familiares que contribuyeron desde el inicio de mi carrera, sobre todo a Sindy Sotomayor y Jorge Ruiz, quienes incentivaron y colocaron todo su apoyo para que pudiera subsistir en los duros inicio de mi vida universitaria. Agradezco totalmente el apoyo y consejo de la profesora Dalia Moreno, a quien estimo, por ser una gran profesional y excelente maestra.

Dedicatoria especialmente a mi hija Luciana y a su madre Angela Lucia, por ser las motivaciones para seguir luchando y poder conseguir este título.

Adolfo Sotomayor Cuadrado

Le agradezco a Dios por su amor y su bondad, me permite sonreír ante todos mis logros y en momentos de dificultad me fortalece. Gracias a mis padres Hugo Yabrudy y Elcy Mercado que siempre fueron mi apoyo a lo largo de este camino, a mis hermanos, en especial a Daniel Yabrudy el cual es un referente a nivel personal, espiritual y profesional en mi familia.

Finalmente quiero dar mi agradecimiento a todo el cuerpo docente y administrativo de la facultad de Ingeniería Civil de la universidad de Cartagena, los cuales fueron nuestra guía en todo este proceso

Hugo Yabrudy Mercado



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO DE REFERENCIA	4
2.1. ANTECEDENTES	4
2.2. ESTADO DEL ARTE.....	9
2.3. MARCO TEÓRICO.....	13
2.3.1 Ciclo hidrológico y los impactos de la urbanización en este.....	13
2.3.2 Precipitación	14
2.3.3 Infiltración	15
2.3.4 Cuenca Hidrográfica	15
2.3.5 Escorrentía Superficial	18
2.3.6 Coeficiente de escorrentía(C)	19
2.3.7 Intensidad y curvas IDF	21
2.3.8 Estimación de caudales, Método racional.	21
2.3.9 Análisis de fotointerpretación.....	26
3. OBJETIVOS	27



3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	27
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
4.	ALCANCE.....	28
4.1.	DELIMITACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL.....	28
4.2.	DELIMITACIÓN CONCEPTUAL Y RESULTADOS ESPERADOS ..	30
4.3.	PRODUCTOS FINALES A ENTREGAR Y COMPLEMENTOS	30
4.4.	LIMITACIONES Y/O EXCEPCIONES	31
5.	METODOLOGÍA.....	32
5.1.	ESQUEMA GENERAL.....	33
5.2.	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	34
5.2.1	Delimitación y selección del área de estudio.....	34
5.2.2	Características morfométricas de la microcuenca.....	35
5.2.3	Hidrología y climatología.....	35
5.2.4	Uso del suelo en la microcuenca.....	37
5.2.5	Obtención de imágenes satelitales	37
5.3.	FOTOINTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN EN ARCGIS	38
5.3.1	Georreferenciación de la microcuenca.....	38
5.3.2	Clasificación supervisada de imágenes satelitales georreferenciadas..	39



5.4.	CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA Y ESTIMACIÓN DE CAUDALES POR EL MÉTODO RACIONAL	43
5.4.1	Cálculo del coeficiente de escorrentía.....	43
5.4.2	Estimación de caudales pico.....	44
5.5.	EVALUACIÓN FINAL DE LOS DATOS.....	45
5.5.1	Análisis de los resultados obtenidos	45
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
6.1.	ÁREA DE ESTUDIO DE LA CUENCA Y SUBCUENCA ESTUDIADA	46
6.2.	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS SUBCUENCA ESTUDIADA ..	48
6.3.	DISTRIBUCIÓN DE LOS USOS DEL SUELO ENTRE LOS AÑOS 2005 Y 2019	48
5.6.1	Año 2005	49
5.6.2	Año 2007	51
5.6.3	Año 2009	53
5.6.4	Año 2012	55
5.6.5	Año 2015	57
5.6.6	Año 2017	58
5.6.7	Año 2019	60



6.4.	ANÁLISIS VARIACIÓN HISTÓRICA DE LOS USOS DEL SUELO .	62
6.5.	COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA AÑO 2005 HASTA AÑO 2019	63
6.6.	LLUVIAS DE DISEÑO Y CAUDALES PICO AÑO 2005 HASTA 2019	64
7.	CONCLUSIONES.....	66
8.	RECOMENDACIONES.....	68
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	69



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de escorrentía superficial propuesto por RAS 2016.....	20
Tabla 2. Clasificación del terreno según su pendiente media.	35
Tabla 3. Tabla de atributos para cada uso de suelo.	41
Tabla 4. Periodos de retorno Resolución RAS 2017	44
Tabla 5. Parámetros morfométricos subcuenca estudiada.	48
Tabla 6. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2005. .	49
Tabla 7. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2007. .	51
Tabla 8. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2009. .	53
Tabla 9. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2012. .	55
Tabla 10. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2015.	57
Tabla 11. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2017.	58
Tabla 12. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2019.	60
Tabla 13. Coeficientes de escorrentías calculados para cada año de estudio.....	63
Tabla 14. Caudales picos calculados para cada lluvia de diseño de cada año, para un periodo de retorno de 50 años.	64



LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. El ciclo hidrológico natural.....	13
Ilustración 2. La cuenca como un sistema hidrológico.....	15
Ilustración 3. Hidrograma triangular simplificado	23
Ilustración 4. Esquema descriptivo del comportamiento hidrológico de una cuenca.....	25
Ilustración 5. Imagen satelital de localización de la cuenca y subcuenca a estudiar.....	29
Ilustración 6. Imagen satelital localización de la subcuenca y canales existentes.	29
Ilustración 7. Lienzo de trabajo virtual software ArcGIS con microcuenca recortada.....	39
Ilustración 8. Nube de puntos en ArcGIS referentes al uso de suelo: Suelo sin vegetación.....	40
Ilustración 9. Atribución a cada nube de puntos para cada uso de suelo en específico.....	41
Ilustración 10. Clasificación supervisada en ArcGIS.	42
Ilustración 11. Producto final de la clasificación supervisada en ArcGIS.....	43
Ilustración 12. Localización de la subcuencas en estudio.....	47
Ilustración 13. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2005. ...	49
Ilustración 14. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2007. ...	51
Ilustración 15. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2009. ...	53
Ilustración 16. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2012. ...	56
Ilustración 17. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2015. ...	57



Ilustración 18. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2017. ... 59

Ilustración 19. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2019. ... 61

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfico 1. Esquema general de la metodología propuesta. 33

Gráfico 2. Curva IDF-Estación Aeropuerto Rafael Núñez Cartagena de Indias. 36

Gráfico 3. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2005. 50

Gráfico 4. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2007. 52

Gráfico 5. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2009. 54

Gráfico 6. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2012. 55

Gráfico 7. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2015. 58

Gráfico 8. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2017. 59

Gráfico 9. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2019. 60

Gráfico 10. Variación de las áreas de usos del suelo en la microcuenca en estudio. 62

Gráfico 11. Hidrogramas triangulares de caudales pico en cada año estudiado. 65



RESUMEN

El presente informe estimó el coeficiente de escorrentía mediante la clasificación supervisada y la fotointerpretación de imágenes satelitales por medio del software ArcGIS en la microcuenca del canal Ricaurte de la ciudad de Cartagena con el fin de comparar los resultados en cada año estudiado, así como su influencia en la generación de caudales mediante el Método Racional.

Para cumplir con los objetivos del proyecto, se utilizó una metodología que está dividida en 4 etapas, la primera está relacionada con la recolección de información secundaria en la cual se obtuvo información relacionada a la zona de estudio por el IHSA, precipitaciones históricas tomadas del IDEAM así como imágenes satelitales tomadas de Google Earth mediante satélites Landsat; la segunda parte fue el procesamiento de las imágenes satelitales en el software ArcGIS en donde se realizaron diversos procesos para la obtención de las áreas de los diferentes usos del suelos considerados, para posteriormente en la tercera parte estimar el coeficiente de escorrentía y uso del Método Racional para obtener los caudales picos de la zona en cada uno de los años estudiados. La última etapa consistió en el análisis de los datos obtenidos, así como la comparación de la variación de los usos del suelo, los coeficientes de escorrentía y los caudales en cada uno de los años para dar conclusiones y recomendaciones respectivas.

Los coeficientes de escorrentía y los caudales pico estimados dieron una variación total desde el año 2005 hasta el año 2019 de 14.41%. Cabe resaltar que, en la estimación de estos coeficientes, solo se tuvo en cuenta la variación histórica de los diferentes usos del suelo estudiados, concluyendo que los usos del suelo tales como pavimentos y cubiertas tienden a aumentar cada año a función de la dinámica poblacional.



ABSTRACT

The present report estimated the runoff coefficient by means of supervised classification and photointerpretation of satellite images by means of the Arcgis software in the micro-watershed of the Ricaurte channel of the city of Cartagena in order to compare the results in each year studied, as well as its influence on the generation of flows through the Rational Method.

In order to achieve the objectives of the project, a methodology was used that is divided into four stages, the first being related to the collection of secondary information in which information related to the study area was obtained by the IHSA, historical precipitations taken from IDEAM as well as satellite images taken from Google Earth using Landsat satellites; the second part was the processing of satellite images in the Arcgis software where various processes were carried out to obtain the areas of the different uses of the soil under consideration, For later in the third part to estimate the runoff coefficient and use of the Rational Method to obtain the peak flows of the area in each of the years studied. The last step consisted of the analysis of the data obtained, as well as the comparison of land-use variation, run-off coefficients and flows in each of the years to give respective conclusions and recommendations.

The coefficients of runoff and the estimated peak flows gave a total variation from 2005 to 2019 of 14.41%. It should be noted that, in the estimation of these coefficients, only the historical variation of the different land uses studied was taken into account, concluding that the land uses such as pavements and roofs tend to increase each year depending on the population dynamics.



1. INTRODUCCIÓN

La escorrentía superficial es un fenómeno importante desde el punto de vista de la ingeniería, y consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre, gracias a sus pendientes naturales. La mayoría de los estudios hidrológicos están ligados al aprovechamiento del agua superficial y a la protección contra los fenómenos provocados por su movimiento (Monsalve Saenz, 1995). La cobertura vegetal del suelo, las áreas construidas, suelos sin vegetación, pavimentos, entre otros, cumplen un rol importante, sobre caudales generados por las precipitaciones. Una reducción de la cubierta de vegetación genera alteraciones al ciclo hidrológico como también una redistribución de las precipitaciones y un aumento en la escorrentía superficial y en los procesos erosivos ya que la vegetación actúa como un factor interceptor y regulador de dichos procesos, haciendo que el coeficiente de escorrentía disminuya. (Meunier, 1996). La planificación de los sistemas de recolección de aguas lluvias está tomando mayor relevancia e importancia debido a las inundaciones presentadas, esto se evidencia debido al cambio climático a causa de las actividades antropogénicas; ante esta situación se necesita de una evaluación de los diferentes parámetros intervenidos en los estudios hidrológicos, identificar su grado de influencia, para así poder mitigar este posible problema; entre ellos está el coeficiente de escorrentía superficial, cuyo coeficiente, no se le da la mayor importancia a la hora de estimarlo, sin tener en cuenta posibles incrementos en la variación de este en los siguientes años. Este argumento se justifica en las constantes inundaciones registradas en la zona que se estudió y que a pesar que se han realizado diseños que alivien este flagelo, no logra cesar.

Este trabajo se realizó con la finalidad de determinar la variación de los usos del suelo de la microcuenca en estudio, mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales, al igual que la estimación del coeficiente de escorrentía en los diferentes años propuestos y su incidencia en la generación de caudales. El estudio comprendió la utilización de información geográfica (SIG), información hidro-meteorológica, geomorfológica, entre otros. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos denotando el incremento en los diferentes usos del suelo estudiados, especialmente en las áreas con pavimentos y cubiertas.



Estos no guardan relación con los descrito en la única y última investigación que se hizo del coeficiente de escorrentía en la zona de estudio (Martin & Reyes, 2004), debido a que las conclusiones dadas por la pasada investigación fueron de carácter experimental y no se justificó la variación en los valores obtenidos, ni tampoco se tuvo en cuenta los diferentes usos del uso en la cuenca, por lo tanto, la presente investigación buscó en estimar el coeficiente de escorrentía evaluando las variables, consideraciones y excepciones correspondientes, como las áreas que correspondían a pavimentos, cubiertas, etc. De igual forma, esta investigación verificó y comparó los resultados que muestran investigaciones como la elaborada por Samie et al. (2019), donde afirmaban el incremento tanto del uso del suelo urbano como de la escorrentía superficial en un periodo de tiempo determinado en una microcuenca urbana de un país asiático, utilizando la misma metodología de fotointerpretación descrita en este estudio.

El Canal Ricaurte es de las cuencas más densas que tiene el Distrito. En sus cinco kilómetros de longitud, atraviesa barrios de todos los estratos: San Fernando, Santa Mónica, El Socorro, La Plazuela, San Pedro, El Ruby, Los Alpes, Contadora I y II, 13 de junio y Olaya Herrera hasta desembocar en la Ciénaga de La Virgen. Además, tiene varios afluentes importantes como El Pilón (San Fernando), Jorge Eliécer (detrás de Alameda), el canal del barrio Blas de Lezo y El Caimán, (sector Central, en Olaya) por lo que el desbordamiento de sus aguas es considerado por el Distrito como un problema estructural que amerita una solución integral. Otero Brito (2012). Este proyecto se llevó acabo en Cartagena de Indias D.T. y C, la cual tiene una temperatura promedio que oscila entre los 24°C a los 31° con una humedad relativa del 85%, se encuentra ubicada al norte de Colombia junto al Mar Caribe y cuyas coordenadas son 10°25'30" N y 15°32'25" W, tiene una población aproximada según el DANE en 2018 de 1.036.412 habitantes y una extensión de 709,1km². La microcuenca estudiada empieza en los barrios El Nazareno y El Educador y finaliza en la entrada del Barrio San pedro a la altura de la Biblioteca Distrital, esta tiene un área de aproximadamente 82,5 ha la cual alberga dos canales principales que son el Canal Villa Rubia y el Canal Emiliano Alcalá entre ambos tienen una longitud total de aproximadamente 2.5km.



Esta investigación es importante para el campo profesional referente al medio ambiente y los recursos hídricos, porque presenta una metodología útil al momento de estimar el coeficiente de escorrentía por medio de la distribución de los usos del suelo, y analizar su variación en un intervalo definido del tiempo, siendo este proceso, un estudio rápido y eficaz con errores aceptables, utilizando información veraz y actualizada, comparado con metodologías convencionales de campo, comparación descrita específicamente en la investigación realizada por Chiarito et al. (2019); convirtiendo a este presente estudio en favorable al momento de la estimación de caudales para el diseño de estructuras hidráulicas y estudios de inundaciones, teniendo en cuenta las excepciones tomadas en el proyecto, para que así se obtenga el menor error posible.

Cabe destacar que, al momento de comenzar esta investigación, se trazaron diferentes interrogantes que permitieron definir la ruta a seguir para encontrar los objetivos y resultados, preguntas como ¿Cuál es la variación de los usos del suelo en la microcuenca del canal Ricaurte?, ¿Cuál es la variación de los coeficientes de escorrentía en la microcuenca del canal Ricaurte en los años estudiados, en función de la variación de los usos del suelo? y ¿Qué incidencia tiene esta variación del coeficiente de escorrentía en los caudales generados?, fueron analizadas y resueltas en este informe final de investigación, calculando áreas de distintos usos del suelo mediante el análisis de imágenes satelitales en una zona específica entre los años 2005 y 2019.



2. MARCO DE REFERENCIA

Para lograr una correcta contextualización sobre la investigación a realizar, es menester recurrir a la recolección de información sobre estudios afines al presente para analizar las experiencias y conclusiones, poder no solo justificar la realización del presente estudio, sino tomar referencias de lo hecho por otros autores teniendo en cuenta el año en que fue realizada la investigación. Por ello se hace necesario, organizar cada estudio desde el más antiguo a lo actual, considerando el lugar de estudio, ya sea local, nacional o internacional.

2.1. ANTECEDENTES

El tema de investigación propuesto se relaciona con diversos estudios realizados con anterioridad, en los cuales la importancia de analizar la variación del coeficiente de escorrentía queda plasmada mediante las conclusiones expuestas. Determinar los factores y el respectivo grado de influencia de los mismos, que afectan el coeficiente de escorrentía puede ser la clave para establecer la variación que este sufre a lo largo de los años. El efecto de la urbanización sobre la escorrentía e inundaciones en determinada zona se ha evaluado con la aplicación de sistemas de modelado integrado, donde el uso del suelo a través de la historia y datos hidrográficos son las principales variables. La cuenca del río Qinhuai en la provincia de Jiangsu, China fue estudiada mediante sistemas de modelado hidrológico y mapas de uso futuro del suelo. La integración de ambos modelos fue calibrada a través de procesos prácticos y análisis histórico del terreno de la cuenca. Los escenarios de urbanización para varios años, los cuales se desarrollaron superponiendo superficies impermeables de diferentes mapas de uso del suelo, indican que la escorrentía anual, el flujo máximo diario y las inundaciones aumentaron en diferentes grados debido a la expansión urbana durante el período de estudio (1988–2009), y continuará aumentando a medida que las áreas urbanas aumenten en el futuro. El análisis de sensibilidad reveló que los cambios potenciales en la descarga máxima y el volumen de inundación con el aumento de la impermeabilidad en la superficie siguen una relación lineal. Estos resultados sugieren que la integración del modelo de uso variable del suelo y el modelo hidrológico puede ser un buen enfoque para evaluar los impactos hidrológicos de la urbanización que son esenciales para la



gestión de cuencas hidrográficas, la planificación de recursos hídricos y la gestión de inundaciones para desarrollo sostenible (Du et al., 2012). En el presente proyecto se plantean modelos de análisis similares al aplicado en esta investigación, al proponer integrar el método grafico de caracterización de las subcuencas mediante herramientas informáticas y el método racional para calcular los caudales de salida que se ven afectados por la variación del coeficiente de escorrentía. Los coeficientes de escorrentía se usan ampliamente como una variable de diagnóstico de la generación de escorrentía en procesos de estudio y como un importante parámetro en el diseño hidrológico. Esta puede ser la razón de los diversos métodos existentes para su cálculo y la amplia variedad de factores físicos con los cuales se relaciona.

Según Merz et al. (2006), se han calculado coeficientes de escorrentía a partir de los datos de escorrentía por hora, precipitación por hora y estimaciones de deshielo para analizar, durante el período 1981-2000, 337 cuencas austríacas con áreas de captación que van desde 80 hasta 10,000 km². Los resultados indican que la distribución espacial de los coeficientes de escorrentía está altamente correlacionada con la precipitación media anual pero poco correlacionado con el tipo de suelo y la tierra utilizar. La distribución temporal de los coeficientes de escorrentía puede ser representada con precisión por una distribución Beta, cuyos parámetros exhiben patrones espaciales que coinciden con seis regiones climáticas de Austria. Un análisis de los coeficientes de escorrentía según el tipo de inundación indica que, para inundaciones repentinas, los coeficientes de escorrentía son más pequeños y aumentan en este orden, para inundaciones de lluvia corta, inundaciones de lluvia largas, inundaciones de lluvia sobre nieve e inundaciones de deshielo. Parece que en este tipo de clima y en la escala de las cuencas examinadas los principales eventos que controlan los coeficientes de escorrentía son el clima y la humedad del suelo. Las características de la cuenca, como los suelos y el uso de la tierra, afectan los coeficientes de escorrentía en menor grado. (Merz et al., 2006)

Las variables que se proponen evaluar, como es la caracterización del uso del suelo, demuestran una gran correlación con el coeficiente de escorrentía según lo concluido en la



investigación mencionada; dando lugar incluso a modelos de regresiones y distribuciones de frecuencia que pueden plantearse para realizar un análisis descriptivo profundo de la región climática a la cual pertenece la cuenca estudiada, según los resultados que se obtengan. Al considerar que la cobertura del suelo tiene una influencia significativa en la respuesta hidrológica de una cuenca fluvial, se ha evaluado cómo dichos cambios a lo largo del tiempo afectaron el comportamiento de las inundaciones entre 1988 y 2005 en la cuenca superior del río Ping, norte de Tailandia. Los tipos de cobertura del suelo se correlacionaron con la lluvia, la escorrentía e inundaciones que tuvieron lugar durante este período. Para cuantificar la cobertura del suelo, se obtuvieron y procesaron imágenes satelitales para examinar los cambios interanuales de la cobertura del suelo. Se seleccionaron 68 estaciones de lluvia y 11 estaciones de escorrentía para evaluar el caudal máximo y coeficiente de escorrentía durante inundaciones. Para subcuencas individuales, fuertes correlaciones no lineales se encontraron entre el coeficiente de escorrentía general y las tasas de flujo máximo. Estos coeficientes de escorrentía de las relaciones de flujo máximo variaron de un año a otro con una cubierta de tierra diferente para cada subcaptación. El coeficiente de escorrentía es mayor para la alta cubierta forestal durante grandes inundaciones; pero para inundaciones más pequeñas, el coeficiente de escorrentía es menor cuando la cubierta forestal es alta. Sin embargo, para grandes inundaciones la situación de una cuenca con mayor humedad inicial del suelo o incluso en estado de saturación puede ser diferente. La humedad del suelo de las tormentas anteriores podría retenerse mejor dentro del área forestal que dentro del área no forestal debido a una mayor capacidad de retención de humedad del suelo. (Merz et al., 2006)

Estos hallazgos dan una comprensión más profunda del efecto de los tipos de cobertura del suelo en el comportamiento de inundación, en diferentes etapas de condiciones de humedad del suelo y la gravedad de tormentas. Puede ser útil para el uso del suelo y la gestión de inundaciones de la cuenca del río (Sriwongsitanon & Taesombat, 2011). Al proponer la cuantificación del tipo de suelo en la subcuenca mediante el análisis de imágenes satelitales, se tiene la posibilidad de comprender y representar mediante modelos matemáticos la relación entre las variables estudiadas y establecer conclusiones respecto a parámetros que, si bien no son evaluados, se relacionan con la metodología propuesta. Al investigar los



efectos de la urbanización en la red fluvial y el proceso hidrológico en la cuenca del río Qinhuai, las tecnologías GIS y RS se aplicaron para extraer información sobre el uso de la tierra y analizar los cambios en la cobertura de acuerdo con imágenes y mapas topográficos. El análisis de regresión mostró que la proporción de urbanización aumentó rápidamente de 8.34% a 16.83% de 1991 a 2006. De 1961 a 2001, la lluvia aumentó con una brecha cada vez mayor entre lo urbano y lo suburbano. La rápida urbanización cambia fuertemente la naturaleza de la superficie terrestre y la estructura de la red fluvial, resultando en variaciones evidentes del proceso hidrológico o eventos hidrológicos extremos. El análisis de la influencia a largo plazo de la urbanización en la escorrentía da evidencia que, bajo la misma circunstancia de lluvia, el factor principal que genera variaciones de escorrentía es el cambio de la superficie. La impermeabilidad se relacionó logarítmicamente con la escorrentía, con un coeficiente de correlación de hasta el 99%. Se encontró que, bajo las condiciones de los mismos cambios en el uso de la tierra, la respuesta hidrológica más fuerte a dichos cambios ocurrió en años secos, la siguiente sucedió en años normales y la más débil ocurrió en inundaciones años (Ya, Youpeng, & Yi, 2012). La metodología propuesta plantea la determinación del coeficiente de escorrentía mediante la caracterización del área de la cuenca estudiada, lo cual, según lo anteriormente descrito, representa una variable representativa en el análisis de procesos hidrológicos poco comunes que afectan a la comunidad. Plantear alternativas para responder a dichos procesos con base en las conclusiones que se planteen, dependerá de las consideraciones realizadas al cuestionar los resultados que se obtengan.

Daza y Pérez (2013) recientemente realizaron un estudio en la ciudad de Cuenca Ecuador, para determinar la variación del coeficiente de escorrentía y su impacto en la capacidad de la red de alcantarillado en los colectores de las calles Arirumba e Imbabura, evaluando la capacidad de trabajo a la cual están sometidos los colectores actualmente. Para la obtención del coeficiente de escorrentía se utilizaron levantamientos Aero fotogramétricos en los cuales realizó una división en subcuencas a partir de una cuenca inicial, para que de esta manera se consiga un mayor grado de homogeneidad. Una vez realizada la subdivisión mediante el programa AUTOCAD 2012 se sectorizó la zona. Al terminar la sectorización y mediante el uso del software antes mencionado se obtuvo el área correspondiente a cada



parámetro para así mediante el uso de una tabla propuesta del código ecuatoriano, obtener el coeficiente de escorrentía. Posteriormente mediante el método racional, se obtuvieron los caudales correspondientes. En el año 1985 en las calles de Arirumba e Imbabura se obtuvieron unos coeficientes de 0.56 y 0.51 respectivamente y en el año 2010, 0.66 y 0.67 respectivamente. Se pudo identificar que, en la evolución de los usos del suelo las áreas de cubiertas de teja, pavimentos de hormigón y asfálticos aumentaron su área; lo contrario a los parques y jardines los cuales disminuyeron su área, esto se manifiesta en el aumento del coeficiente de escorrentía. Las variaciones del coeficiente de escorrentía superficial en las zonas de estudio, dentro del período 1985-2010, demuestran que las intervenciones realizadas por el hombre han producido un aumento en el coeficiente y escorrentía superficial. (Daza y Pérez, 2013)

En la actualidad, solo existe un estudio hidrológico cuyo objetivo principal fue determinar el coeficiente de escorrentía en la microcuenca del Canal Ricaurte (Padilla et al., 2004), la cual abarca los barrios Socorro, Blas de Lezo, Los Alpes, Las Gaviotas de la ciudad de Cartagena. La metodología planteada estuvo basada en el método Racional, interpretando datos pluviométricos de recolección propia en el área de estudio, brindando mayor confianza a sus conclusiones. Los coeficientes de escorrentía hallados por el método racional varían de 0,47 a 0,12 para lluvias del mes de junio y septiembre respectivamente; fenómeno no explicado por los autores, pero que se puede interpretar por las condiciones del suelo, nivel freático y demás. Según la investigación los coeficientes de escorrentía hallados por la relación entre volumen de escorrentía y volumen precipitación, teniendo en cuenta las precipitaciones medias de cuatro estaciones cercanas al área, se alejan bastante de la realidad ya que la mayoría de los valores sobrepasan el valor 1. (Padilla et al., 2004),

Al tener esta investigación como referencia, se contempla la posibilidad de obtener resultados no acordes a lo planteado; lo cual no significa que lo propuesto no sea válido por la aplicación de métodos inadecuados, pero sí que se deben realizar consideraciones para corregir de alguna forma los resultados que se obtengan a lo largo de la ejecución de la investigación propuesta.



2.2. ESTADO DEL ARTE

Estudiar la escorrentía superficial es un tema complejo en la ingeniería, así que, muchos investigadores se han dedicado a trabajar sus fenómenos y en específico se han enfocado en el efecto de la urbanización sobre la escorrentía superficial y el riesgo que esto genera, puesto que es un problema que se está presentando a nivel global. Muchas de las investigaciones han tenido resultados positivos y negativos, como se mostrará a continuación:

En la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la ciudad de Bogotá Colombia, Pérez & Quispe (2017) realizaron un estudio en las cuencas de los ríos Coello, Totaré y Totaré- Coello, en donde se realizó la estimación del volumen de agua superficial mediante el uso del modelo hidrológico Disapro 1; en esta investigación se usaron imágenes satelitales Landsat 5 de los años 1996, 2001 y Landsat 8 del año 2015, y a partir de los datos disponibles cartográficos y meteorológicos del IDEAM e IGAC, se hicieron los respectivos análisis de temperatura, evapotranspiración y precipitaciones con el software de fotointerpretación ArcGIS, además de obtener el NDVI con el cual se calculó el coeficiente de escorrentía como lo plantea el modelo hidrológico utilizado. Los coeficientes de escorrentía para las cuencas en estudio, variaron desde 0.090 hasta 0.45, quiere decir que gran parte de la cuenca presenta alta cobertura vegetal y se refleja dichos resultados obtenidos en el cálculo del NDVI. Los caudales picos obtenidos para la cuenca del río Coello fueron de 20.28 L/s, para la cuenca del río Totaré 16.28 L/s y para la cuenca Totaré- Coello de 6.04 L/s.

La urbanización es una de las modificaciones antropogénicas más importantes del medio ambiente a nivel global, en los Estados Unidos las regiones urbanas se han expandido sustancialmente en el área en las últimas décadas según el USEPA, esto genera una controversia debido a que por un lado, el desarrollo urbano es esencial porque proporciona la conveniencia de la infraestructura, bienes y servicios que necesitan las personas, el gobierno, el desarrollo económico, la industria y el comercio, pero por otro lado, las modificaciones de la superficie de la tierra que ocurren durante el proceso de urbanización,



incluida la reducción de la vegetación, la compactación del suelo y el cambio de superficies permeables a superficies impermeables como techos, carreteras y estacionamientos, generan cambios en el suministro de agua debido a procesos hidrológicos alterados de infiltración, recarga de aguas subterráneas, degradación de la calidad del agua por escorrentía urbana y desbordamientos de canales y alcantarillados combinados. En la Purdue University de West Lafayette de los Estados Unidos, se estudió este fenómeno en donde se calculó la escorrentía media anual normalizada (NAARD) mediante el uso del modelo L-THIA. Se utilizó el software ArcGIS y mediante imágenes satelitales se evaluó el NAARD desde 2001 hasta 2011, evaluando específicamente los años 2001, 2006 y 2011. Se clasificaron los condados dependiendo del NAARD obtenido, en donde las zonas de baja escorrentía urbana están en el rango de 0.00- 17.76mm, las de escorrentía media de 17.77- 37.39mm, las de alta escorrentía de 34.40- 57.02mm y las de muy alta escorrentía de 34.40- 331mm. El número total de condados de baja escorrentía disminuye de 2001 a 2011, los condados de escorrentía alta se mantienen constante durante el periodo de 10 años, mientras que los condados de escorrentía media y muy alta aumenta con un porcentaje de 21.8% y 23.3% respectivamente. EL aumento porcentual de condados de escorrentía media y muy alta entre los años 2001 y 2006 (12.1% y 16.54% respectivamente) fue mayor que el de 2006 a 2011 (8.6% y 5.9% respectivamente), lo que corresponde a la tendencia de expansión en el suelo urbano durante los dos periodos de 5 años (Chen et al., 2017).

En un estudio realizado por Chunlin et al. (2018), en Shenyang China, realizaron una investigación donde analizaron las características y los efectos de la escorrentía directa en la ciudad, y asumen que el incremento de la escorrentía directa podría caracterizarse como el que se logra al reemplazar las superficies impermeables con áreas con vegetación en buenas condiciones. Entonces, el coeficiente de escorrentía presentado antes de la urbanización podría calcularse reemplazando el coeficiente de escorrentía de la superficie impermeable con el coeficiente de escorrentía de las áreas con vegetación en buenas condiciones. Se utilizó el modelo hidrológico de Mishra y Singh para poder evaluar la escorrentía directa en condiciones previas a la urbanización. Utilizando el software ArcGIS para la evaluación del modelo hidrológico se obtuvo la escorrentía de cuatro anillos en el que se dividió la ciudad,



la profundidad promedio de escorrentía directa del área de cuatro anillos fue de 118.94 mm, y el coeficiente de escorrentía directa fue de 0.27. Los coeficientes obtenidos dieron entre el rango de 0 a 0.59 dependiendo del tipo de uso del suelo en el que se caracterizó. La profundidad promedio de la escorrentía directa y el coeficiente de escorrentía de la zona 1 a la 4 disminuyeron gradualmente de 166.52 a 83.44 mm, y de 0.38 a 0.19, respectivamente. El aumento de la escorrentía total de la zona 1 a la 4 se debe principalmente al gran aumento del área urbana de la zona. La razón de la disminución de la zona 1 a la 4 es que la intensidad de la urbanización disminuyó gradualmente desde el área del núcleo urbano al área suburbana. Las zonas 1 a 4 reflejaron la dirección de la expansión urbana, representando el grado de urbanización de mayor a menor. El proceso de expansión urbana ha llevado a la transformación de grandes cantidades de tierra permeable en superficies impermeables, lo que resulta en un mayor coeficiente de escorrentía y profundidad en el área altamente urbanizada.

El método a trabajar en esta investigación ha sido utilizado en diferentes países y sobre todo ha sido comparado con otras alternativas más convencionales, analizando los desfases en resultados que pueda tener en diferentes metodologías, claro ejemplo fue la investigación realizada por Chiarito et al, (2019), en la ciudad de Rosario, Argentina en 3 cuencas urbanas, donde comparan los resultados obtenidos al determinar el coeficiente de escorrentía por medio de la teledetección de los diferentes usos del suelo, utilizando imágenes satelitales del satélite Landsat 8, utilizando la clasificación supervisada. El otro método se basó en la obtención del coeficiente en campo, calculando áreas de los diferentes usos del suelo con cartografía y topografía actual de la zona, teniendo en cuenta las pendientes actuales de las superficies de escurrimiento. Los resultados obtenidos mediante la metodología de clasificación supervisada presentan diferencias porcentuales respecto a la metodología denominada convencional comprendidas entre el 3 % y el 16%, valores que los autores, consideran como un método útil porque implica una reducción significativa en el tiempo requerido para estimar lo más óptimo posible el coeficiente de escorrentía.



Además de comparar resultados obtenidos de coeficientes de escorrentía calculados por diferentes métodos, Samie et al. (2019) determinaron el efecto de la variación de los diferentes usos del suelo sobre los caudales en la cuenca de Chenar Rahdar en Irán. Para esto, se utilizaron imágenes satelitales de la cuenca estudiada, para los años 2004 y 2015, utilizando los satélites Landsat, y procesando dichas fotografías en el software de geointerpretación ENVI, empleando el método de la clasificación supervisada en función del algoritmo de máxima probabilidad para mapear el cambio en el uso del suelo en el área de estudio. Se analizaron 6 tipos diferentes de uso del suelo (suelo descubierto, suelo seco, suelo forestal, suelo fértil, suelo para ganado y áreas urbanas). Los resultados indicaron que la mayor tendencia de los cambios en el uso del suelo dentro del intervalo de tiempo del año 2004 a 2015 fue el tipo de suelo referente al área urbana con un 108.45% de incremento, mientras que la mayor tendencia en disminuir se observó en los suelos fértiles con 12.46%. Además, los resultados muestran que la escorrentía superficial aumentó en un 11%, en 2015 en comparación con 2004. Este estudio como el presente que se llevará a cabo, busca minimizar en gran parte las incertidumbres en las variables al utilizar la clasificación supervisada, para que los resultados sean lo mayor útil posible.



2.3. MARCO TEÓRICO

Esta investigación se basa principalmente en dos variables las cuales son el ciclo hidrológico y el sistema de información geográfica, a continuación, se encuentran los diferentes conceptos y aplicaciones para identificar e interpretar el desarrollo y conclusiones del estudio.

2.3.1 Ciclo hidrológico y los impactos de la urbanización en este.

Es el proceso mediante el cual se describe la ubicación, el movimiento y transferencia de agua en la tierra, analizando el paso de sus diferentes estados (sólido, líquido y gaseoso). Para describir el ciclo hidrológico natural (Ilustración 1), se tiene que un porcentaje de agua lluvia es almacenada en la superficie del suelo, mientras el resto de la precipitación es interceptada por la vegetación. El agua recogida en el suelo se infiltra, de manera que ésta se satura para producir escorrentía superficial. Posteriormente, parte de la escorrentía superficial formada, se concentra en ríos, lagos y humedales, y el sobrante se infiltra en los acuíferos. Finalmente, el ciclo se completa mediante la vegetación que produce los fenómenos de evapotranspiración y evaporación.



Ilustración 1. El ciclo hidrológico natural.

Fuente: University Corporation of Atmospheric Research, (2006)



No obstante, el ciclo hidrológico urbano posee muchas diferencias con el ciclo hidrológico natural. Antes de llegar el agua al suelo, realiza un proceso de purificación del aire, recogiendo micropartículas contaminantes, las cuales serán arrastradas posteriormente en el agua; además el suelo no tiene apenas permeabilidad por lo que el agua corre rápidamente por las canaletas y pavimentos. Así, el agua pluvial limpia el aire, tejados, pavimentos y a su vez arrastra una carga importante de contaminantes como sólidos en suspensión, materia orgánica, metales pesados e hidrocarburos que terminan llegando a los cursos de agua a través del alcantarillado. Por otro lado, en las zonas urbanas la infiltración disminuye de fuertemente, con lo cual los acuíferos naturales situados bajo las ciudades quedan aislados.

Daza & Pérez (2013) afirman que “el crecimiento demográfico de las ciudades está ligado de manera estrecha con el proceso de urbanización, es uno de los aspectos que afecta de manera significativa el ciclo hidrológico, debido al cambio que existe en el uso del suelo y a la ocupación que se le asigne al mismo. Se debe anotar que en la zona urbana no existe una cobertura vegetal de intercepción marcada, sino la presencia de tejados impermeables; además el suelo es prácticamente impermeable, con lo que se produce una menor infiltración debido a lo cual el agua viaja rápidamente por canaletas y el pavimento, acumulando una carga importante de sólidos en suspensión, materia orgánica, metales pesados e hidrocarburos, que terminan en los cursos de agua” (Daza & Pérez, 2013)

2.3.2 Precipitación

La precipitación (P) es el descenso del agua condensada en la atmosfera (nubes), que al llegar a un punto de saturación retornan hacia el suelo o las diferentes masas de agua; esta puede ser en forma de lluvia, llovizna, nieve, entre otras. Su unidad de medida es en alturas de columna de agua, en el sistema internacional comúnmente es medida en milímetros (mm) de altura de agua y en el sistema ingles en pulgadas (in) de altura de agua. Esta variable es medida con ayuda de un equipo llamado pluviómetro, el cual es uno de los principales equipos en las estaciones meteorológicas. Para presentar de forma ordenada los eventos de precipitación en relación al tiempo se presenta mediante un gráfico llamado Hietograma. (Chow, et al., 1994)



2.3.3 Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo, por poros o pequeñas aberturas atravesando el perfil del suelo. La infiltración de agua en el suelo es necesaria para el crecimiento de las plantas, contribuye al flujo base de las corrientes de agua, disminuye la escorrentía, y el movimiento de sedimentos y contaminantes de las fuentes superficiales. (Chow et al., 1994)

2.3.4 Cuenca Hidrográfica

Una cuenca es una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar dado. La divisoria de aguas es una línea que separa la superficie de tierra cuyo drenaje fluye hacia un río dado de las superficies de tierras cuyos desagües corren hacia otros ríos. La frontera del sistema se dibuja alrededor de la cuenca proyectando la divisoria de aguas verticalmente hacia arriba, y abajo hacia planos horizontales (véase la Ilustración 2). La lluvia es la entrada, distribuida en el espacio sobre el plano superior; el caudal es la salida, concentrado en el espacio de la salida de la cuenca. La evaporación y el flujo superficial también pueden darse como salidas, pero son muy pequeños comparados con el caudal durante una tormenta. 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 la cuenca (Chow et al., 1994)

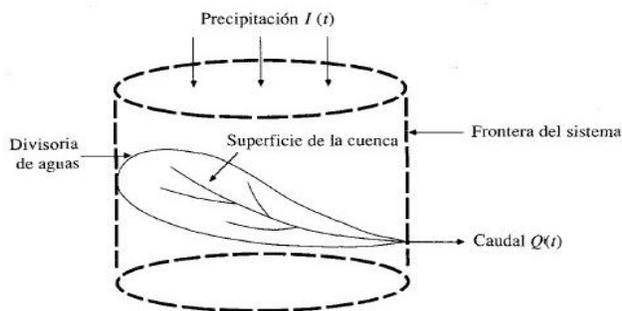


Ilustración 2. La cuenca como un sistema hidrológico.
Fuente: Chow et al., (1994)



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

Las características morfométricas de una cuenca dependen de la forma, del relieve, de la red de drenaje, del tipo de suelo, de la cobertura vegetal, y de las características geológicas de la zona. (Arrieta, 2010). A continuación, se encuentran las principales características a tener en cuenta para este estudio.

Área de Drenaje (A).

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

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.

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.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots (1)$$

P= Perímetro de la cuenca en km

A= Área de drenaje de la cuenca en km².



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

Factor de Forma (Kf)

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.

$$K_f = \frac{B}{L} \dots (2)$$

$$B = \frac{A}{L} \dots (3)$$

$$K_f = \frac{A}{L^2} \dots (4)$$

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

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

Pendiente media(S).

Se conoce como la diferencia entre la altura máxima en el nacimiento del escurrimiento y la altura de la desembocadura de la cuenca dividida entre la longitud del cauce principal.

$$S = (H_{max} - H_{min})/L_c \dots (5)$$

Donde Hmax y Hmin es la altura máxima y mínima de la cuenca respectivamente y Lc la longitud del cauce principal.



2.3.5 Escorrentía Superficial

La escorrentía superficial es el fenómeno más importante desde el punto de vista de ingeniería, y consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre. La mayoría de los estudios hidrológicos están ligados al aprovechamiento del agua superficial y a la protección contra los fenómenos provocados por su movimiento. De la precipitación que alcanza el suelo, parte queda retenida ya sea en depresiones o como película en torno a partículas sólidas. Del excedente de agua retenida, parte se infiltra y parte escurre superficialmente. Se define como exceso de precipitación la precipitación total caída al suelo menos la retenida e infiltrada. Puede ocurrir que el agua infiltrada venga, posteriormente, a aflorar en la superficie como fuente de una nueva escorrentía superficial. La escorrentía superficial comprende el exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno, y la escorrentía de agua, que puede ser alimentada tanto por el exceso de precipitación como por las aguas subterráneas. (Monsalve Saenz, 1995)

Factores que influyen en la escorrentía superficial

Estos factores pueden ser de naturaleza climática de naturaleza climática (relacionados con la precipitación), de naturaleza fisiográfica (ligados a las características físicas de la cuenca) y de naturaleza humana (relacionados con la intervención humana).

Factores climáticos

Intensidad de precipitación. Cuanto mayor es la intensidad de precipitación más rápido el suelo colma su capacidad de infiltración, y se provoca un exceso de precipitación que escurrirá superficialmente.

Duración de precipitación. La duración de la precipitación es directamente proporcional a la escorrentía superficial; para lluvias de intensidad constante habrá mayor oportunidad de escorrentía superficial cuanto mayor haya sido su duración.



Precipitación antecedente. Una precipitación que ocurre cuando el suelo este húmedo debido a una lluvia anterior, tendrá mayor facilidad de convertirse en escorrentía superficial.

Factores fisiográficos

Área. La extensión del área está directamente relacionada con la mayor o menor cantidad de agua de escorrentía superficial que la cuenca puede generar.

Permeabilidad. Influye directamente en la capacidad de infiltración. Cuanto más permeable sea el suelo, mayor será la cantidad de agua que puede absorber, disminuyéndose así la escorrentía de exceso de precipitación.

Factores humanos. Obras hidráulicas construida en la cuenca

En el caso, por ejemplo, de una presa, que el acumular agua en un embalse se reduce los caudales máximos de la escorrentía superficial y retarda su propagación. (Monsalve Saenz, 1995)

2.3.6 Coeficiente de escorrentía(C)

Este coeficiente es la relación entre el volumen de agua de escorrentía superficial total y el volumen total de agua precipitado, en un intervalo de tiempo determinado.

$$C = \frac{V_{\text{escorrentia superficial}}}{V_{\text{precipitado total}}} \quad (6)$$

Este coeficiente se puede definir como relativo a una lluvia aislada o a un intervalo de tiempo en donde ocurren varias lluvias. Se debe aclarar que, conociendo el coeficiente de escorrentía para una determinada lluvia con cierta intensidad y cierta duración en un área dada, se puede determinar la escorrentía superficial de otras precipitaciones de intensidades diferentes, desde que la duración de la lluvia sea la misma. (Monsalve Saenz, 1995)



El coeficiente de escorrentía es ampliamente usado en muchos métodos de obtención de caudales, el cual describe la respuesta de la cuenca. Esta variable es la menos precisa de estos métodos utilizados, su uso implica una relación fija entre la tasa de escorrentía superficial y las lluvias en la cuenca de drenaje. Una selección apropiada de este dependerá del conocimiento y experiencia de las personas que harán el estudio.

El coeficiente de escorrentía, es función del tipo de suelo del área tributaria, del grado de permeabilidad de la zona, de la pendiente del terreno y de todos aquellos otros factores que determinen que parte de la precipitación se convierte en escorrentía. Por consiguiente, el diseñador debe considerar las pérdidas por infiltración en el subsuelo y cualquier otro efecto que tenga como consecuencia el retraso del flujo de escorrentía. Para aquellas áreas de drenaje que incluyan zonas con diferentes coeficientes de escorrentía, el valor del coeficiente de escorrentía representativo para toda el área debe calcularse como el promedio ponderado de los coeficientes de impermeabilidad individuales para cada sub-área, de acuerdo con la ecuación (7), mostrada a continuación. (Ministerio de Vivienda, 2016)

$$c = \frac{\sum C \cdot A}{\sum A} \quad \dots \quad (7)$$

Usando los coeficientes de escorrentía de la Tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de escorrentía superficial propuesto por RAS 2016.

Tipo de superficie	C
Cubiertas	0,90
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0,90
Vías adoquinadas	0,85
Zonas comerciales o industriales	0,90
Residencial, con casas contiguas, predominio de zonas duras	0,75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas duras entre estos	0,75
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)



2.3.7 Intensidad y curvas IDF

La intensidad de la lluvia se puede definir como la cantidad de lluvia precipitada en un intervalo de tiempo. La forma más común de representar una tormenta de tal forma que sea útil en el diseño de obras hidráulicas de ingeniería es realizando gráficas o funciones donde se relacionen la intensidad de la lluvia la duración y el período de retorno. Usualmente los datos se presentan en formas de curvas para cada período de retorno donde en el eje de las X, se representa la duración en minutos y el eje de la Y la intensidad en mm/hora o pulgadas/hora.

Cuando se tiene información suficiente se puede realizar un análisis de frecuencia para cada duración utilizando una función de probabilidad de valor extremo semejantes a las de tipo I o Gumbel. Para cada una de las duraciones seleccionadas se extraen las lluvias máximas anuales de los registros históricos de lluvias y se le aplica un análisis de frecuencia a la información anual. Posteriormente se estiman con las funciones encontradas el valor de la precipitación o intensidad de la precipitación para el período de retorno que se requiera. Con esta información se construyen las gráficas IDF. (Arrieta, 2010). Wenzel en 1982 dedujo para algunas ciudades de los Estados Unidos, coeficiente para utilizarse en una ecuación de la forma, donde i es la intensidad de la lluvia, T_d la duración; c , e , y f , son coeficientes que varían con el lugar y el periodo de retorno:

$$i = \frac{c}{T_d^e + f} \dots (8)$$

2.3.8 Estimación de caudales, Método racional.

El método Racional es el método más sencillo y de mayor uso para estimar el escurrimiento superficial de una cuenca. Fue desarrollado originalmente para estimar el escurrimiento en áreas urbanas y su uso se encuentra referenciado desde 1889 cuando fue mencionado por primera vez por Emil Kuichling (en Carciente 1985 pag 347). La fórmula racional expresa que el caudal de una cuenca es igual a un porcentaje de la precipitación caída sobre la cuenca 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. El tiempo en el que se alcanza este equilibrio se denomina tiempo de concentración. Se fundamenta en las siguientes hipótesis:

- La intensidad de la lluvia es constante en el tiempo y el espacio durante toda la tormenta.
- El coeficiente de Escorrentía es constante en toda el área.
- Supone que el caudal calculado tiene la misma frecuencia que la precipitación que lo produce.
- La duración de la lluvia que produce el máximo caudal es igual al tiempo de concentración de la cuenca.
- El coeficiente de escorrentía es independiente de la frecuencia y naturaleza de las lluvias.

La fórmula Racional está dada por la siguiente expresión:

$$Q = C i A \dots (9)$$

Donde Q es el caudal, i es la intensidad de la precipitación para el tiempo de concentración de la cuenca: A, es el área de la cuenca a drenar, y C es el coeficiente de escorrentía o porción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial.

El método Racional no tiene en cuenta el efecto de almacenamiento de la cuenca. Este método es confiable para cuencas pequeñas generalmente menores de 500 hectáreas (Carciente pag.348). La fórmula Racional sobrestima el caudal y su error aumenta en la medida que aumenta el área de la cuenca.

En cuanto a las limitaciones del método Racional (Bolinaga 1979 pag 145) puede arrojar resultados aceptables sólo sí el área es pequeña y tiene un alto porcentajes de áreas impermeables y el tiempo de concentración es corto. Según Bolinaga no se recomienda su aplicación para superficies mayores de 20 hectáreas, 80% urbanizadas y tiempo de concentración t_c superior a 15 minutos. Cuando estas recomendaciones no se cumplen, la



formula Racional tiende a dar valores mayores que los reales. La bondad del método Racional se reduce a una buena selección del coeficiente de escorrentía y del tiempo de concentración de la cuenca. Por ello, las cuencas se dividen en subcuencas de tal forma que su tamaño permita la aplicación de la ecuación del Método Racional (Jacob Carciente, pg 348) y que tengan características particulares de pendiente y forma. Por ello surge la siguiente ecuación con un coeficiente de reducción debido a las causas antes mencionadas:

$$Q = \frac{C i A R}{360} \dots \quad (10)$$

Dónde: Q es el caudal instantáneo máximo(m³/s), C el coeficiente de escorrentía, i la intensidad de la lluvia(mm/h), A el área de la cuenca en hectáreas y R es el coeficiente de reducción por el tamaño del área. R se calcula con la siguiente expresión, donde A es el área de la cuenca en metros cuadrados (Monsalve Saenz, 1995)

$$R = 1 - 0.0054\sqrt[4]{A}\dots \quad (11)$$

Se considera que cada subcuenca produce un hidrograma triangular simplificado con la forma del hidrograma triangular propuesto por el Soil Conservation Service, en 1972. (Chow et al., 1994). En la Ilustración 3, se muestra un esquema del hidrograma triangular que se obtiene para cada subcuenca.

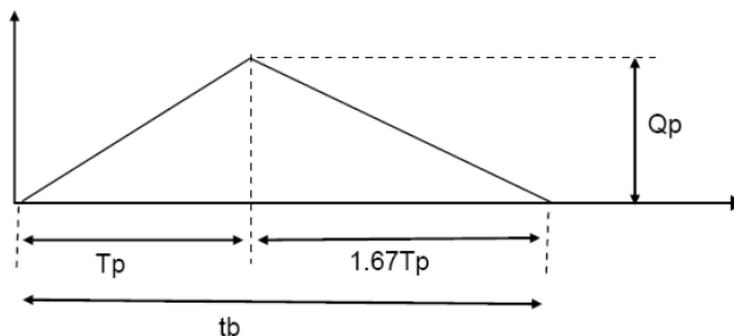


Ilustración 3. Hidrograma triangular simplificado
Fuente: Soil Conservation Service.



Estimación del Tiempo de Concentración

Se define como el tiempo necesario para que una partícula o gota de agua viaje desde el punto más alejado hasta el punto de salida de la cuenca. Para el cálculo del tiempo concentración se utiliza el Método de la Velocidad, propuesto en el “Plan Maestro de Drenajes Pluviales de Cartagena” del año 1981. La velocidad de concentración es proporcional a la raíz cuadrada de la pendiente media de la cuenca o subcuenca, con:

$$T_c = \frac{L_c}{V_c} \dots \quad (12)$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración.

L_c : Longitud del cauce mayor de la cuenca en metros.

V_c : Velocidad de concentración m/s.

La velocidad de concentración se calcula con la siguiente ecuación (Aparicio, 1989):

$$V_c = K\sqrt{S} \dots \quad (13)$$

Donde:

S: Pendiente de la cuenca (m/m).

K: Constante regional.

En el “Plan Maestro de Drenajes Pluviales de Cartagena” del año 1981 se determinó que la constante regional, K, para la ciudad de Cartagena con un valor de 4.47.



En la Ilustración 4, se muestra una cuenca idealizada dividida en cinco subcuencas, donde cada subcuenca tiene un tiempo de concentración T_c , un área de drenaje A , y un caudal pico Q_p . Cada subcuenca produce un hidrograma triangular de salida. Entre las subcuencas 1, y las subcuencas 2 y 3, existe un cauce definido que ocasiona un tiempo de viaje (desfase) tv_1 , por lo tanto, el hidrograma combinado resultante será la suma de los hidrogramas triangulares de las subcuencas 2 y 3 más el Hidrograma triangular de la subcuenca 1, desfasado un tiempo tv_1 . Aplicando igual criterio para toda la cuenca se tiene que el hidrograma combinado para toda la cuenca es la suma de los hidrogramas triangulares de las subcuencas 4 y 5, más los hidrogramas triangulares de las subcuencas dos y tres desfasados tv_2 , más la suma del hidrograma triangular de la subcuenca 1, desplazado un tiempo de tv_1+tv_2 . Estos tv (Tiempo de viaje) se obtienen luego de utilizar la fórmula de Manning para velocidad de flujo en canales abiertos.

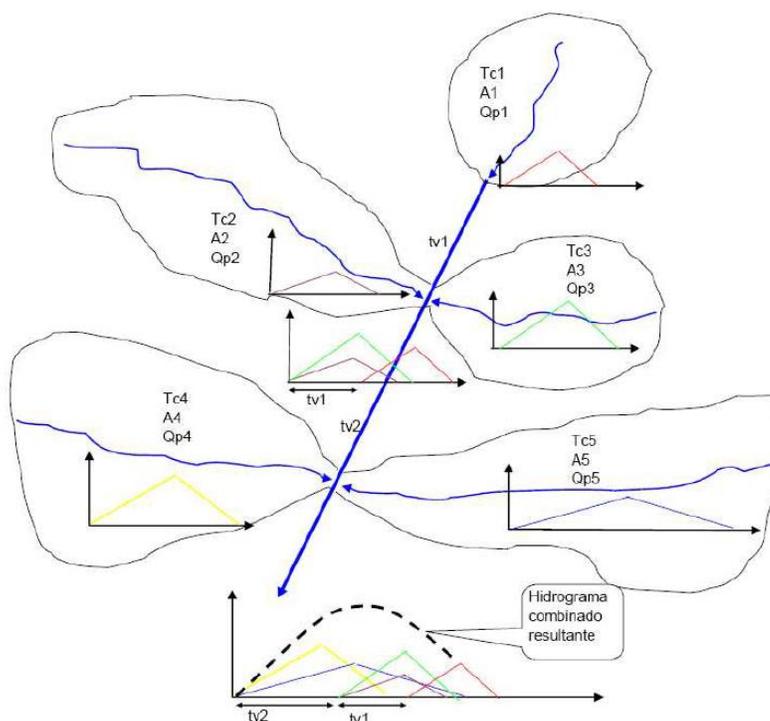


Ilustración 4. Esquema descriptivo del comportamiento hidrológico de una cuenca.
Fuente: (Arrieta, 2010)



2.3.9 Análisis de fotointerpretación

La Fotointerpretación es una técnica utilizada por los geólogos desde los años 60 con fines de mapeo y se define como el conjunto de principios y técnicas tendientes a identificar y deducir características de los fenómenos registrados en las Fotografías Aéreas. Una Fotografía aérea es la imagen de un terreno captada desde un avión u otra nave aérea mediante cámaras fotográficas especialmente diseñadas para tal fin.(Universidad Nacional de San Luis, 2011a)

La fotointerpretación presenta una serie de ventajas respecto a los métodos que tradicionalmente utilizaban los geólogos antes de la aparición de la fotografía aérea; entre ellas:

- Permite observar el terreno en forma tridimensional.
- Permite realizar mediciones de distancias, áreas y ángulos.
- La fotografía aérea muestra una visión sinóptica del terreno: es decir, en una pequeña superficie como la que abarca la foto aérea, se encuentra condensada abundante información del terreno.
- Permite obtener información de áreas de difícil acceso o inaccesibles como por ejemplo las áreas montañosas.
- Su utilización disminuye los costos de un estudio ya que permite hacer más eficiente el trabajo de campo, al poder seleccionar los sitios de interés y las vías de acceso en forma previa.

(Universidad Nacional de San Luis, 2011)



3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la variación histórica del coeficiente de escorrentía mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales en la microcuenca de los canales Emiliano Alcalá y Villa Rubia, pertenecientes a la cuenca del Canal Ricaurte, y su influencia en la generación de caudales en la zona, con el fin de comparar los resultados obtenidos en cada año estudiado.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las características físicas y geomorfológicas de la microcuenca en estudio.
- Identificar variables que influyen en la determinación del coeficiente de escorrentía como áreas verdes, suelos sin vegetación, cubiertas, pavimentos y superficies de concreto para cada año en específico.
- Analizar mediante clasificación supervisada imágenes satelitales de diferentes años propuestos, en el software ArcGis para estimar las variables que influyen en la determinación del coeficiente de escorrentía.
- Estimar y calcular el coeficiente de escorrentía y los caudales en cada periodo analizado mediante el método racional.
- Comparar resultados del coeficiente de escorrentía y caudales obtenidos en cada época analizada, para conocer la variación y comportamiento de estos.



4. ALCANCE

Este proyecto procuró ayudar como fundamento para futuros estudios que se realicen ya sea en la misma zona, en zonas cercanas o zonas con cierta similitud en las características de la cuenca de estudio, teniendo en cuenta que estos estudios tienen como perspectivas principales temas ambientales, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, etc. El enfoque de este trabajo de grado fue el estudio georeferencial e hidrológico de la microcuenca que abarca los canales Emiliano Alcalá y Villa Rubia, microcuenca perteneciente a la cuenca del Canal Ricaurte de la ciudad de Cartagena en el departamento de Bolívar.

4.1. DELIMITACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

El proyecto se realizó en la ciudad de Cartagena de Indias D.T. y C., la cual presenta una humedad relativa del 85% y temperatura promedio comprendida entre los 24°C y 31° C, esta encuentra ubicada sobre el mar caribe, cuyas coordenadas son 10° 25' 30" latitud norte y 15° 32' 25" de longitud oeste respecto al Meridiano de Greenwich, con una población aproximada de 1.036.412 habitantes según la proyección del DANE a 2018, y una extensión de 709,1km².

La microcuenca en estudio comprende los barrios: El Nazareno, El Educador (siendo este barrio con mayor altitud), María Cano, Consolata, San Fernando, Villa Rubia, El Socorro (Barrio que alberga el colegio Emiliano Alcalá) y finaliza en la entrada del Barrio San Pedro, a la altura de la Biblioteca Distrital. El área de estudio del proyecto comprende una franja de 82.5 ha correspondiente al 11% de la cuenca total del Canal Ricaurte, la cual desemboca en la Ciénaga de la Virgen. Actualmente esta microcuenca cuenta con dos canales artificiales (Canal Villa Rubia y Canal Emiliano Alcalá), el primero tiene una extensión aproximada de 1.44 km, recubierto en concreto, este canal inicia en el barrio Villa Rubia y finaliza en su enlace con el canal Emiliano Alcalá en el lugar donde actualmente funciona Portales de San Fernando III, el segundo posee una extensión aproximada de 1 km, recubierto en concreto, el cual tiene un tramo tipo Box Culvert hasta la altura del condominio Torres de la Victoria, finalizando su extensión con un tramo descubierto a la entrada del Canal San Pedro.

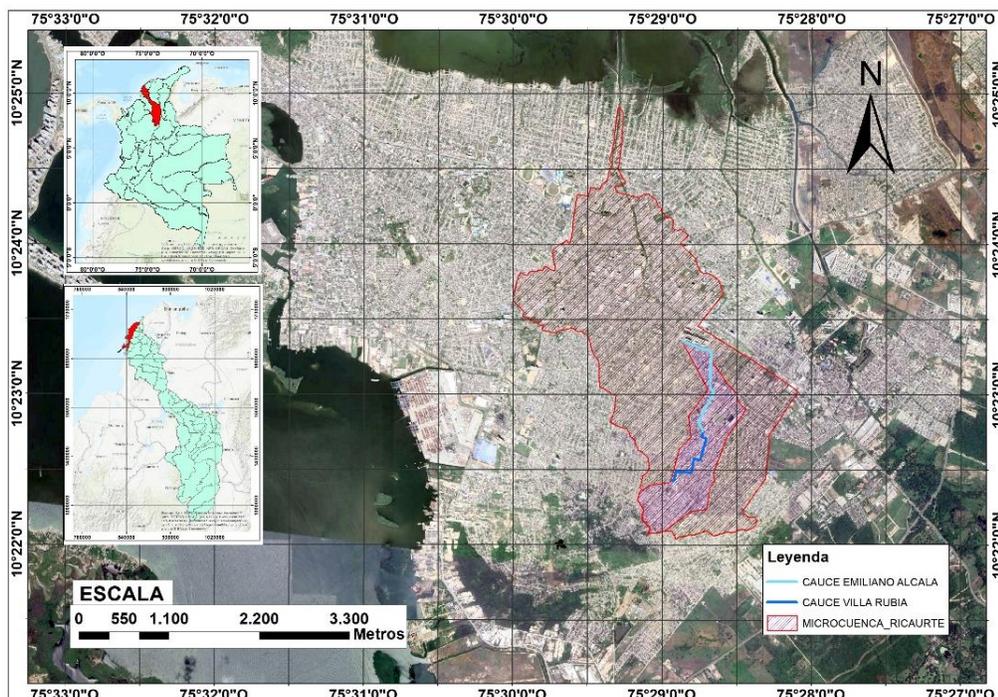


Ilustración 5. Imagen satelital de localización de la cuenca y subcuenca a estudiar.
Fuente: Google Earth (2020) Modificado por autores.

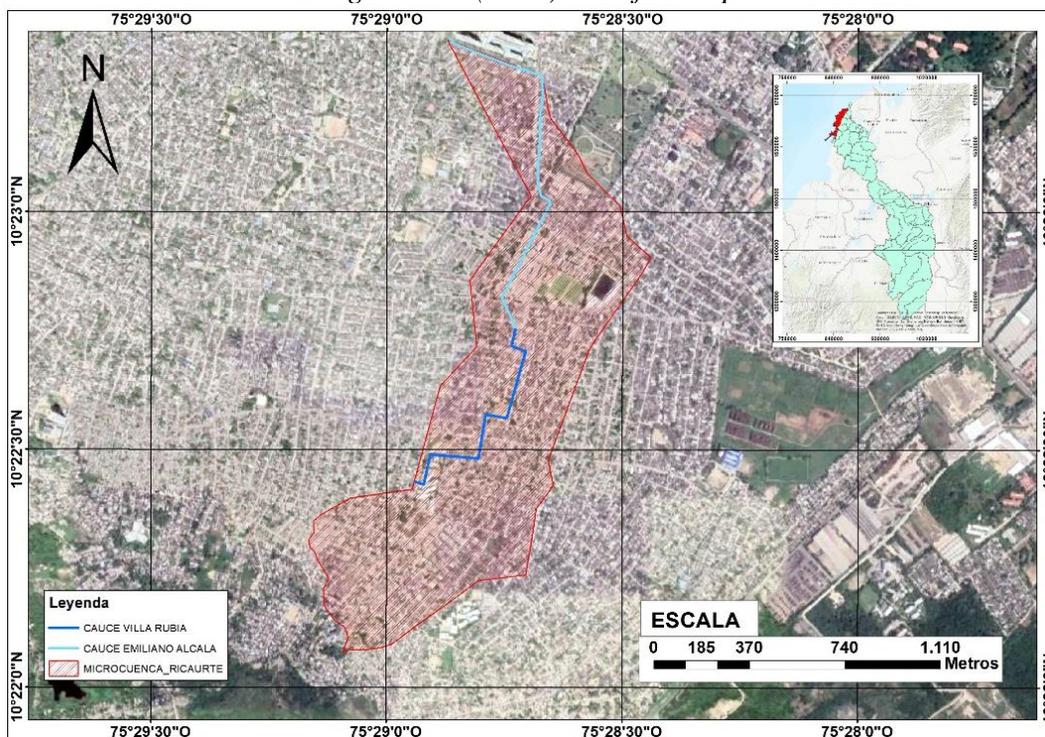


Ilustración 6. Imagen satelital localización de la subcuenca y canales existentes.
Fuente: Google Earth (2020) Modificado por autores.



La recopilación de información para el desarrollo del proyecto se empezó a inicios del mes de marzo de 2019, referente a la información bibliográfica e información histórica de la cuenca como imágenes satelitales de la zona de estudio comprendida entre el año 2005 y el año 2019, analizando así 7 épocas diferentes, para así comenzar el procesamiento de dichas imágenes y su fotointerpretación para el mes de diciembre de 2019, finalizando y entregando dicha investigación para el mes de febrero de 2020.

4.2. DELIMITACIÓN CONCEPTUAL Y RESULTADOS ESPERADOS

El proyecto se realizó en base a información secundaria referente a la subcuenca y cuenca que se estudió. Ante la ausencia de recursos tanto técnicos como económicos que permitieran un estudio más detallado con tecnología de punta, fue necesario utilizar fotografías gratuitas de Google Earth para realizar el estudio de fotointerpretación. Las variables de estudio al calcular el coeficiente de escorrentía fueron la época de estudio, el área de cada uso de suelo (pavimento, pasto.), precipitaciones, el área de la subcuenca, etc. Una vez realizado el estudio se conocieron los resultados aproximados de los valores de coeficientes de escorrentía para cada año específico y así su caudal máximo de escorrentía que se generaba en la microcuenca.

4.3. PRODUCTOS FINALES A ENTREGAR Y COMPLEMENTOS

Finalizado el estudio previsto para finales del mes de febrero de 2020, se presentaron en una secuencia gráfica las variaciones de las áreas de los diferentes usos del suelo que se dieron en la subcuenca de estudio, calculando el coeficiente de escorrentía para cada época y su respectivo caudal máximo, y análisis final. Además, como producto complementario se hicieron ciertas recomendaciones tanto para futuros estudios y futuras construcciones como obras hidráulicas ya sea en la zona o zonas geomorfológicamente similares.



4.4. LIMITACIONES Y/O EXCEPCIONES

Las imágenes satelitales al ser gratuitas, no contaban con la resolución esperada dando resultado a errores menores. Se debe tener en cuenta que la estimación de caudales con el método racional siempre tiende a ser mayor que el real a pesar de las reducciones.

Además, a la hora de la estimación del coeficiente de escorrentía solo se consideró el uso del suelo específico, omitiendo variables que influyen en este como lo es la pendiente del área de estudio, y así estudiar el comportamiento y cambio de la urbanización al pasar de los años.



5. METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolló en la ciudad de Cartagena de Indias, Colombia, en el área del proyecto que comprende las microcuencas Emiliano Alcalá y Villa Rubia, las cuales abarcan varios barrios del occidente de la ciudad, este proyecto se inició a mediados del año 2019 y finalizó a inicios del año 2020.

A fin de lograr los objetivos planteados en este proyecto, fue necesario asignarlo en ciertas clasificaciones para saber el tipo de naturaleza de la investigación, y definir una metodología que hizo posible su realización. Por ello, la presente investigación fue de tipo mixto debido a que cuenta con aspectos cuantitativos y cualitativos, ya que se requirió medir y cuantificar variables, como es el área de zonas verdes, haciendo un análisis descriptivo y estadístico a la vez, para dar una conclusión como efecto de una causa: la variación del coeficiente de escorrentía. Este coeficiente tiende a ser una variable dependiente a variables como las áreas verdes o áreas urbanizadas; así mismo el coeficiente de escorrentía tiende a ser una variable independiente a la estimación de caudales pico calculado por el método racional.

De igual manera, se definió la investigación como no experimental, de carácter longitudinal, es decir, se hizo un análisis de las variables en estudio, siendo específicos en los cambios a través del tiempo. Cabe anotar que las fuentes de información clasifican a la investigación como un estudio en campo, debido a que los datos se obtuvieron de visitas y métodos de campo que se hicieron en la zona en un determinado tiempo, como son las imágenes satelitales.

5.1. ESQUEMA GENERAL

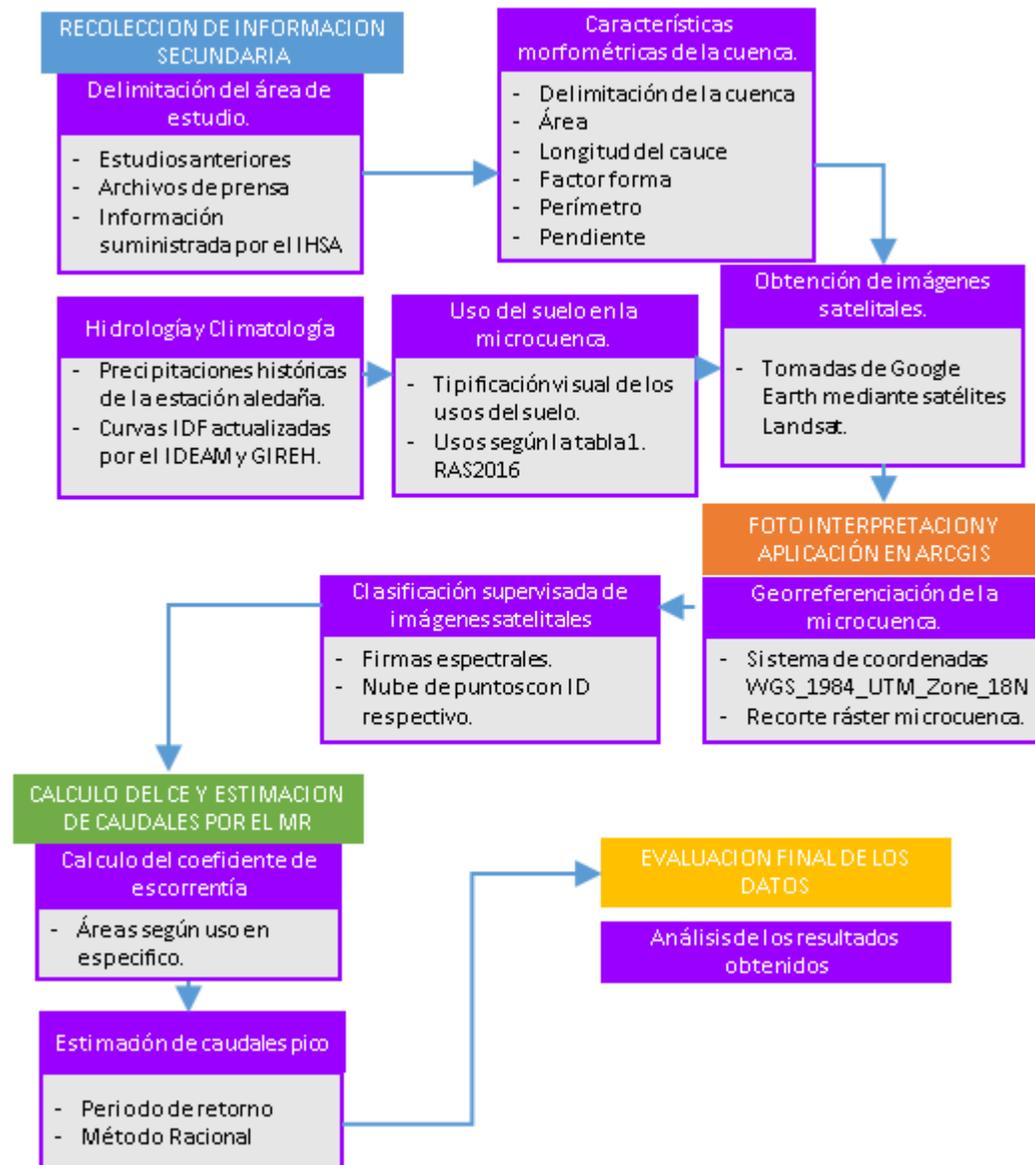


Gráfico 1. Esquema general de la metodología propuesta.
Fuente: Autores



5.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Para iniciar el desarrollo de la investigación se recolectó toda la información relacionada al tema tanto para el cálculo del coeficiente de escorrentía mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales como su análisis en la variación histórica de este coeficiente, por ello se buscaron referencias bibliográficas a nivel mundial, regional y local, así como también fue proporcionada información por parte instituciones involucradas en la gestión de los recursos hídricos tanto local y regional (IHSA, IDEAM). De igual manera, se gozó de la información tecnológica que se obtiene gratuitamente por medio de plataformas de sistemas de información geográfica (Google Earth), que permitieron obtener imágenes satelitales, funcionales para nuestro objetivo.

5.2.1 Delimitación y selección del área de estudio

La cuenca del Canal Ricaurte de aproximadamente 800 ha, fue delimitada gracias a la información topográfica representada en curvas de nivel suministrada por el Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental (IHSA) de la Universidad de Cartagena, información avalada en su estudio de consultoría más reciente que abarca el Plan Maestro de Drenajes Pluviales de Cartagena, donde la zona de estudio de este proyecto, está incluida. Este estudio topográfico fue procesado mediante softwares especializados tales como ArcGis y AutoCAD, donde se generaron planos geográficamente referenciados sobre la cuenca teniendo en cuenta sus afluentes y altimetría del terreno, subdividiendo la cuenca mayor del Canal Ricaurte en subcuencas de características geomorfológicas similares, esto con el fin de poder aplicar el método racional, método recomendable para cuencas de área menor a 80 hectáreas, según la última resolución del RAS en el año 2017. (Ministerio de Vivienda, 2017)

Debido a la condición descrita por el Ministerio de Vivienda, se escogió una de las subcuencas, teniendo en cuenta otras razones importantes como: mayor altimetría, mayor variación del uso del suelo en diferentes épocas estudiadas, además es una de las zonas dentro de la cuenca del Canal Ricaurte. que más ha sufrido problemas de inundación en la



actualidad(El Universal, 2019). Por ello se escoge la microcuenca que abarca los canales artificiales conocidos como Canal Villa Rubia y Canal Emiliano Alcalá (Box Culvert).

5.2.2 Características morfométricas de la microcuenca

Mediante la información característica (levantamiento topográfico y delimitación de la cuenca) de la zona brindada por el IHSA, las características morfométricas calculadas estuvieron basadas en la forma y relieve de la microcuenca, parámetros como lo son el área, perímetro, pendiente media, longitud del cauce y coeficientes como compacidad y forma.

A partir de lo anterior se estableció la pendiente media y se clasificó el tipo de terreno, teniendo en cuenta la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del terreno según su pendiente media.

Pendientes medias %	Relieve
0 – 3	Plano
3 – 7	Suave
7 – 12	Mediano
12 - 20	Accidentado
20 - 35	Fuerte
35 – 50	Muy fuerte
50 - 75	Escarpado
Mayor de 75	Muy escarpado

Fuente: *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas.*(Henao, 1988)

5.2.3 Hidrología y climatología

Para obtener información climatológica e hidrológica se estudiaron las precipitaciones a partir de información de estaciones del IDEAM. Cuyo instituto celebró el contrato 116 de 2016 con el Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, realizando la actualización de las curvas IDF para 110 estaciones empleando la información disponible hasta 2010. Dentro de las estaciones analizadas se encuentra la estación del Aeropuerto Rafael Núñez. Para el cálculo de la IDF se utilizaron datos desde 1970 a 2010.

La ecuación generalizada para calcular la intensidad, en función de los coeficientes y la duración, para la estación del Aeropuerto Rafael Núñez es la siguiente (Ver Figura 1), donde D es la duración y C1, C2 y Xo, son constantes que dependen del periodo de retorno.

$$I = \frac{C1}{(D+X0)C2} \quad \dots (14)$$

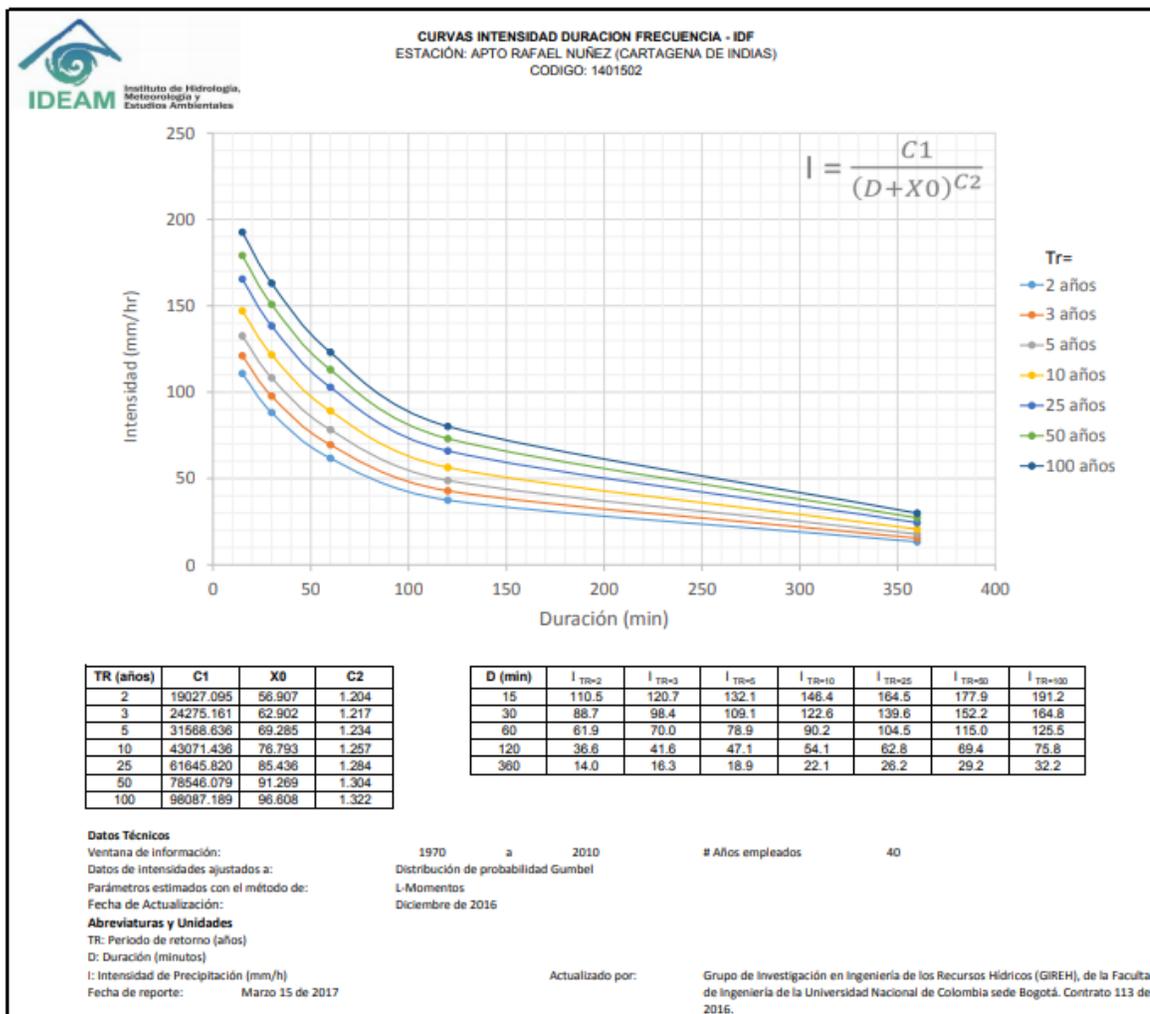


Gráfico 2. Curva IDF-Estación Aeropuerto Rafael Núñez Cartagena de Indias.
 Fuente: (IDEAM, 2017)

Por recomendación del IHSA, los valores de las intensidades fueron aumentadas en un 10% con el fin de cubrir los posibles aumentos por cambio climático.



5.2.4 Uso del suelo en la microcuenca

Para proceder a la fotointerpretación de las imágenes satelitales, fue necesario definir los tipos de suelo y sus usos dentro de la microcuenca, por ello se realizó una verificación visual de la zona mediante imágenes satelitales, distinguiendo cada uso del suelo definidos en la tabla 1 del RAS 2016. Esta información fue corroborada en el Plan de Ordenamiento Territorial de Cartagena 2001, esto con el fin de identificar de manera correcta cada área del suelo y evitar el menor error posible al momento de la fotointerpretación.

5.2.5 Obtención de imágenes satelitales

Esta actividad definió el intervalo de tiempo o los años en los que se estudió la variación del coeficiente de escorrentía, debido a que, solo se pudieron obtener imágenes de buena calidad visual, con los requerimientos mínimos como resolución y visibilidad desde el año 2005 hasta el año 2019. Estas imágenes fueron obtenidas de la plataforma gratuita Google Earth, la cual cuenta con imágenes satelitales de la zona desde el año 1960, pero con una resolución insuficiente para nuestro objetivo. Cabe anotar que la plataforma Google Earth cuenta con imágenes satelitales provenientes de los satélites Landsat, estos satélites son propiedad del estudio geológico estadounidense de la NASA (USGS), quienes desde el año 1972 hasta la actualidad, con sus 9 satelitales han capturado imágenes de la superficie terrestre con el fin de estudios científicos y toma de decisiones gubernamentales.(USGS, 2020)

El proceso comenzó a mediados del mes de marzo de 2019, con la búsqueda de imágenes satelitales de mejor resolución, en institutos que guardan información geográfica histórica como el IGAC, donde las imágenes que se podían obtener no estaban enfocadas a la zona de estudio si no enfocadas a la ciudad en general, lo que hizo tomar la decisión de desistir de dicha información y se decide por utilizar las panorámicas históricas ofrecidas por Google Earth para luego procesarlas en ArcGis.



Los instrumentos que se utilizaron para la obtención de las panorámicas consistieron simplemente del uso de computadoras que tuvieran el acceso a internet, una cuenta de usuario Google y un básico conocimiento para reconocer la zona, capturar y almacenar la imagen deseada. Se tuvo en cuenta para cada imagen las coordenadas de ubicación geográfica para poder georreferenciar el material en el proceso de fotointerpretación.

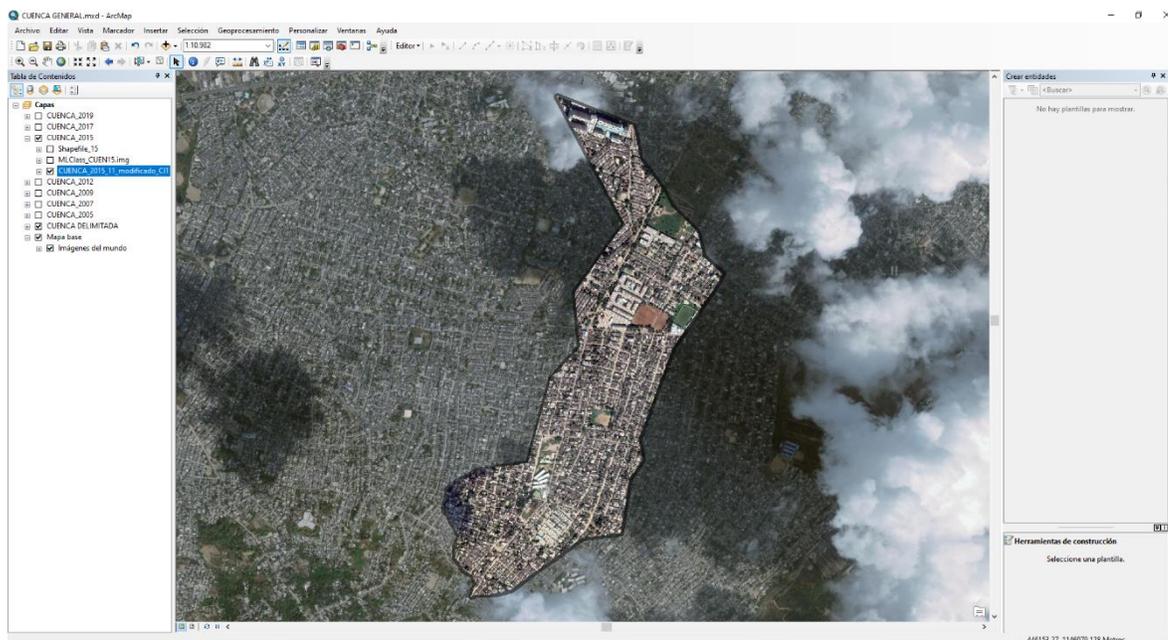
5.3. FOTOINTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN EN ARCGIS

Con la realización de este proceso se logró el punto más importante de la investigación, en donde se procede a manipular las imágenes satelitales con inteligencia artificial para así obtener medidas cuantitativas y cualitativas del uso del suelo. A continuación, se presenta la descripción y el procedimiento de esta parte importante del proyecto.

5.3.1 Georreferenciación de la microcuena

El software ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica (ArcGIS Resource Center, 2020). Este software maneja una licencia privada la cual fue accesible por medio del IHSA, exclusivamente para fines educativos acordes a esta tesis.

Por ello fue una herramienta tecnológica muy importante para el desarrollo de la investigación, su sistema de georreferenciación permitió procesar imágenes importadas sin ninguna información geográfica por parte de Google Earth, lo que posibilitó la localización exacta de la zona de estudio en el software para su debido procesamiento, utilizando una referencia espacial oficial en SIG mundial en un sistema de coordenadas identificado como WGS_1984_UTM_Zone_18N. Continuo a esto, utilizando herramientas propias del programa se recortó la microcuena en el área de trabajo de virtual lista para la metodología siguiente.



*Ilustración 7. Lienzo de trabajo virtual software ArcGIS con microcuenca recortada.
Fuente: ArcGIS, Modificado por autores.*

5.3.2 Clasificación supervisada de imágenes satelitales georreferenciadas.

Esta herramienta exclusiva del software ArcGIS, permite al investigador, por medio de inteligencia artificial, reconocer cierta área y darle atributos de cierto uso del suelo por medio de múltiples puntos al programa para que este reconozca las franjas de píxeles (firmas espectrales) que son representativos o similares y estadísticamente idénticos, los agrupe y cuantifique.

Las clases de uso del suelo que se definieron fueron los suelos sin vegetación, los suelos con vegetación, los suelos con pavimentos asfálticos y/o superficies de concreto, cuerpos de agua y las áreas que representan las cubiertas

A continuación, se describe paso a paso la metodología para la clasificación supervisada de una imagen satelital en ArcGIS.



Teniendo el ráster (imagen) de la microcuenca recortada y delimitada se procedió a realizar una capa diferente (Shapefile) para introducir la nube de puntos para cada uso del suelo en toda el área de la microcuenca.



*Ilustración 8. Nube de puntos en ArcGIS referentes al uso de suelo: Suelo sin vegetación.
Fuente: ArcGIS, Modificado por autores.*

Con la herramienta calculadora de atributos, se procedió a definir el atributo que se había colocado en cada punto dado por las firmas espectrales para que el programa reconociera a estos puntos como un uso de suelo en específico, este atributo se representa con un número único o ID, como se muestra en la ilustración 9.

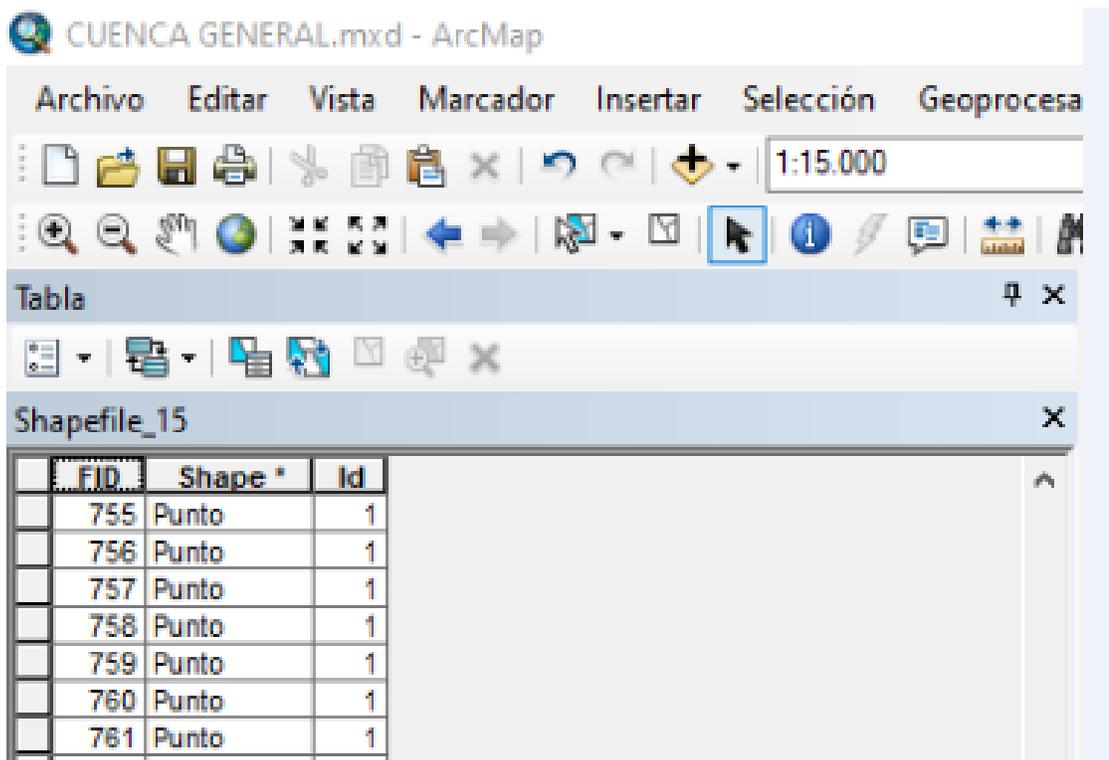


Ilustración 9. Atribución a cada nube de puntos para cada uso de suelo en específico.
Fuente: ArcGIS, Modificado por autores.

El proceso anterior se realizó para cada uso de suelo en específico y así permitir que el programa reconozca cada atribución que se le dio a cada punto introducido en el área de trabajo. En la tabla 3, se encuentran las cuatro clases de uso del suelo definidas con sus respectivos ID, y color.

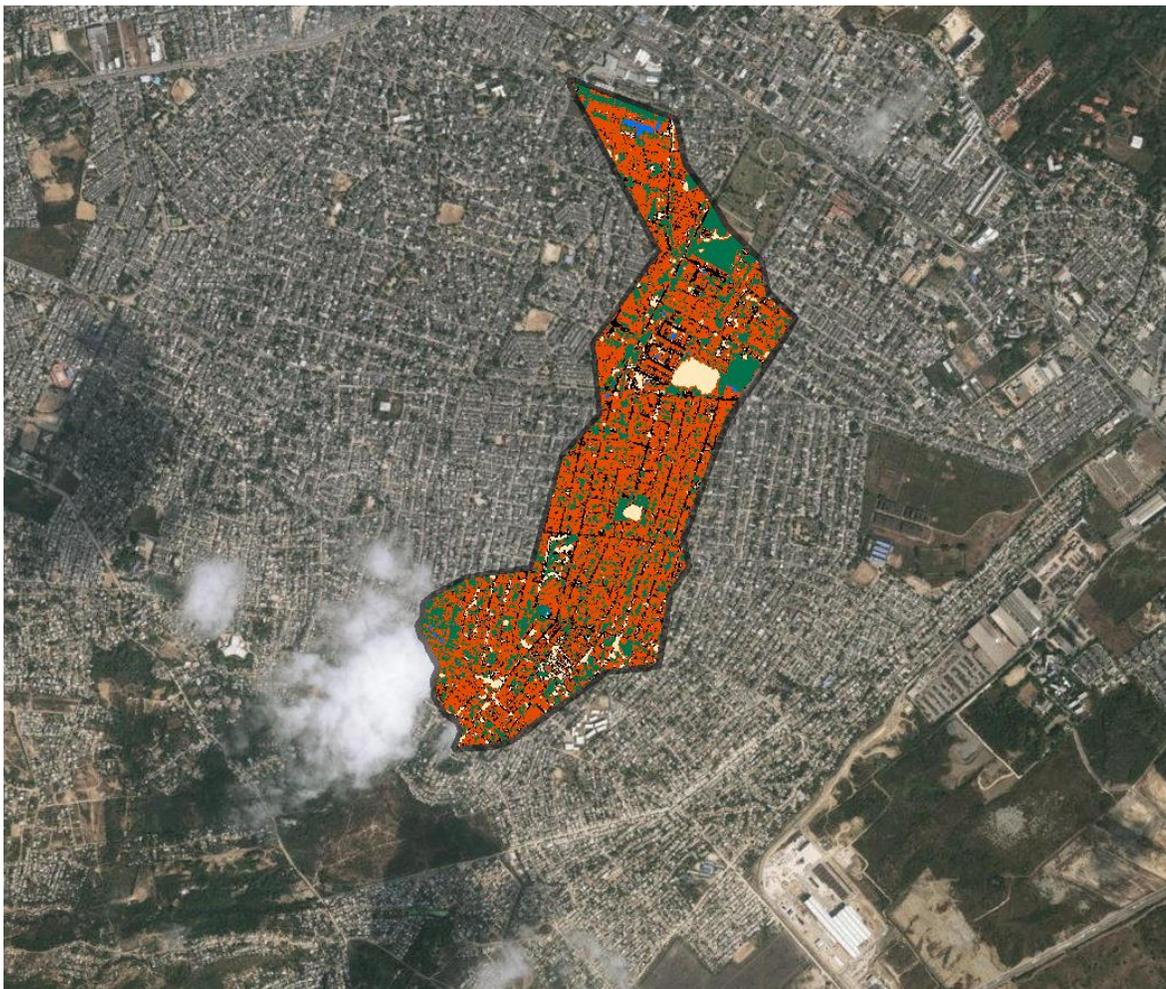
Tabla 3. Tabla de atributos para cada uso de suelo.

ID	Uso del suelo	Valor/Atributo	Color asignado
1	Sin vegetación	1	
2	Con vegetación	2	
3	Pavimentos	3	
4	Cubiertas	4	
5	Aguas	5	

Fuente: Autores



Definido lo anterior, se realizó por medio de la herramienta “Clasificación de Imagen”, la clasificación supervisada para cada imagen satelital de cada año en específico, dando como resultado lo mostrado en la ilustración 10.



*Ilustración 10. Clasificación supervisada en ArcGIS.
Fuente: ArcGIS, Modificado por autores.*

Por último, se procedió a arrojar del programa las áreas estimadas para cada uso de suelo por cada imagen satelital estudiada, para así exportarlas a una hoja de cálculo y realizar sus análisis y cálculos respectivos.

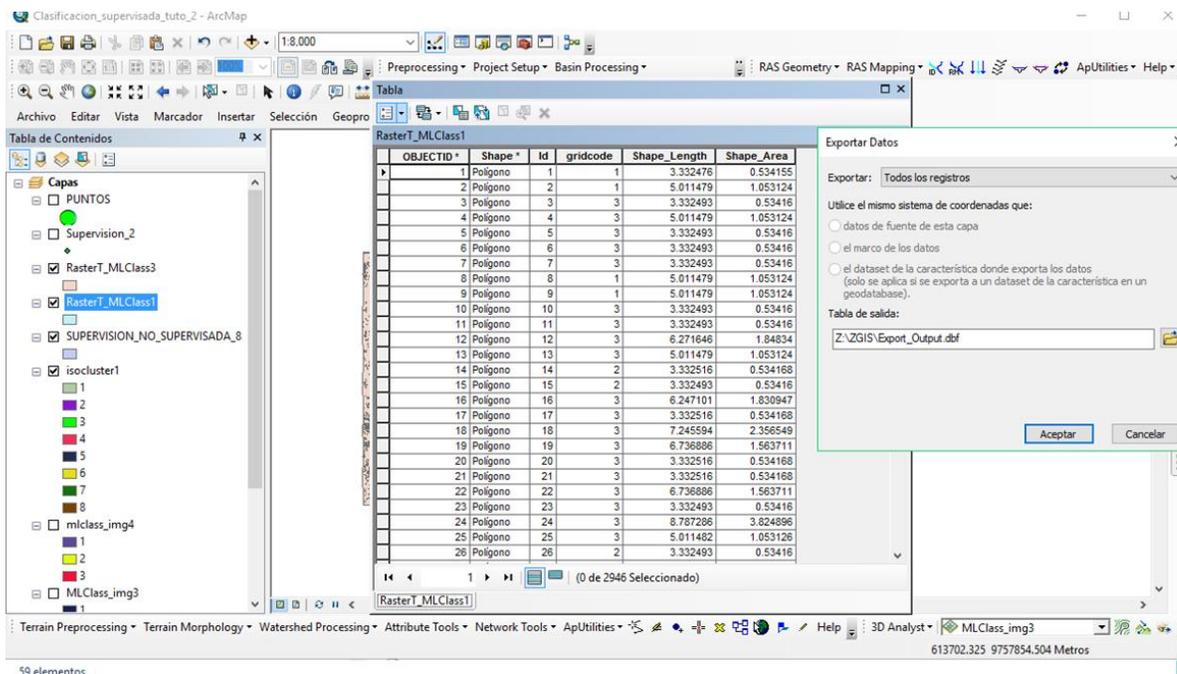


Ilustración 11. Producto final de la clasificación supervisada en ArcGIS.

Fuente: ArcGIS, Modificado por autores.

5.4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA Y ESTIMACIÓN DE CAUDALES POR EL MÉTODO RACIONAL

En esta fase se organizaron los datos obtenidos por parte de la fotointerpretación y se procedió a realizar los cálculos respectivos, denotados a continuación.

5.4.1 Cálculo del coeficiente de escorrentía

Luego que se realizó la clasificación supervisada con cada una de las imágenes satelitales propuestas, a través del software ArcGIS se obtuvieron las áreas de cada uno de los tipos de suelos propuestos. Por medio de la ecuación 7, se estimó el coeficiente de escorrentía para la cuenca en cada uno de los años propuestos anteriormente. Los valores del coeficiente de escorrentía utilizados son los descritos por el RAS 2016 en la Tabla 1.



5.4.2 Estimación de caudales pico

Antes de estimar los caudales pico para cada año estudiado, se definió el periodo de retorno a emplear para así también definir la intensidad de la lluvia de diseño descrita en la sección 5.1.3. El periodo de retorno o frecuencia de diseño, debe determinarse teniendo en cuenta la importancia de la zona, el tipo de obra de drenaje y los daños, perjuicios o molestias que las inundaciones periódicas puedan ocasionar a los habitantes, tráfico vehicular, comercio, industria, etc.

En las Tabla 4 se muestran los valores de periodos de retorno establecidos por la última resolución del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Tabla 4. Periodos de retorno Resolución RAS 2017

Características del área de drenaje	Período 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 de 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: (Ministerio de Vivienda, 2017)

Definido lo anterior se procedió a utilizar el método racional descrito en la sección 2.3.8 para calcular los diferentes caudales para año específico, teniendo en cuenta sus respectivos supuestos y reducciones.



5.5. EVALUACIÓN FINAL DE LOS DATOS

Esta última parte se compone del análisis de los resultados arrojados referentes al coeficiente de escorrentía y el caudal pico para cada año estudiado

5.5.1 Análisis de los resultados obtenidos

Después de obtener todos los datos referentes al coeficiente de escorrentía y el caudal pico para cada estudiado, se procedieron a tabular dichos datos, con el fin de dar una conclusión al respecto y así marcar una tendencia de este coeficiente y definir si este incurría de manera importante en la generación de caudales picos de diseño.

Por lo tanto, se analizaron año tras años los incrementos del coeficiente de escorrentía, y se justificaron estos incrementos con causales descritos en los resultados.



6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. ÁREA DE ESTUDIO DE LA CUENCA Y SUBCUENCA ESTUDIADA

La cuenca del Canal Ricaurte limita al norte con la Ciénaga de la Virgen, al sur con el barrio Nelson Mandela, al oriente con la cuenca del Canal Matute, la cuenca del Canal Maravilla y, al occidente con los barrios que van desde Villas del Rosario, El Carmelo, Los Caracoles, Escallón Villa entre otros, hasta la cuenca del Canal las Flores (El Tigre).

Posee un área aproximada de 733.32 ha, la longitud del cauce principal es aproximada de 5.6 km, la altura máxima de la cuenca es de 65 m.s.n.m. y su altura mínima de 4 m.s.n.m., con una pendiente promedio de 1.09%.

El canal de mayor importancia de esta cuenca es el Ricaurte, el cual inicia con el nombre de Canal San Pedro con una longitud de 2194.8 m. Desde la entrada al barrio San Fernando y Villa Rubia, frente a la Estación de la Policía Vial, hasta la Avenida Pedro de Heredia, el Canal Ricaurte tiene una longitud total de 4517.06 m. Entre otros cauces se encuentran los de los canales San Pedro N°2, Blas de Lezo, Los Caracoles, Las Gaviotas y el Canal Chiquinquirá. (IHSA, 2017)

La zona objeto del proyecto, está situada al sur de la ciudad de Cartagena entre las coordenadas $10^{\circ} 23' 22.15''$ °N - Longitud: $75^{\circ} 28' 52''$ W y $10^{\circ} 24' 55.55''$ N – $75^{\circ} 29' 16.90''$ W, encontrándose el canal Ricaurte en el área antes descrita.

El Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental de la Universidad de Cartagena (IHSA), mediante contrato N° 17 - 0025 – 2017, con la Alcaldía de Cartagena y la empresa Edurbe, realizó el estudio llamado “Revisión, Ajustes y Complementación de los Diseños Existentes y Realización de Estudios, Diseños, Especificaciones Técnicas Definitivas y los Planos de Construcción de los Canales del Sistema de Alcantarillado Pluvial de la Zona Urbana del Distrito de Cartagena.”, en el cual para el caso del informe hidrológico e hidráulico del Canal Ricaurte, en su Etapa 1, la cuenca mayor del Canal, se dividió el área de

drenaje en diez subcuencas, de características geomorfológicas similares, en la Ilustración 12, se puede observar dicha clasificación.

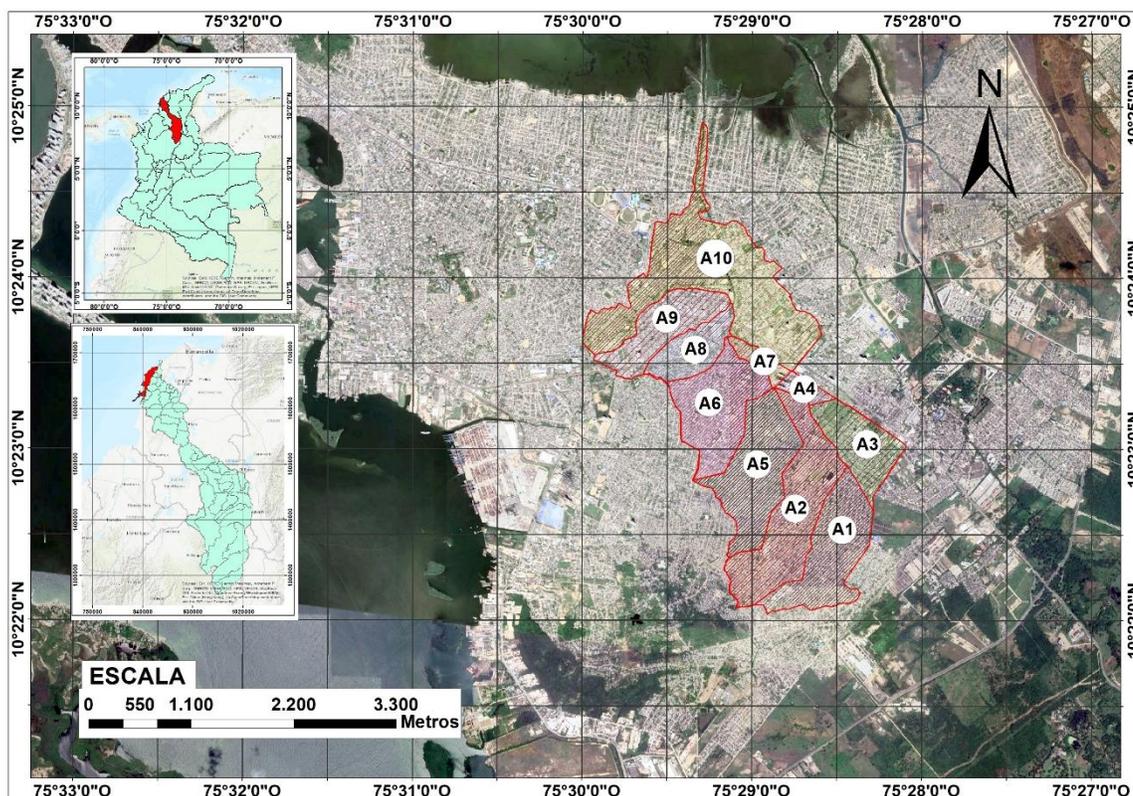


Ilustración 12. Localización de la subcuencas en estudio.

Fuente: Mapa Base ArcGIS/Shapefile SIG-OT, con información topográfica de (IHSA, 2017).

Por las limitaciones y criterios analizados en la sección 5.1.1 de la metodología de esta investigación, se escoge como subcuenca de estudio la Número A2, la cual abarca los Canales, Ricaurte sector Emiliano Alcalá y Villa Rubia. A continuación, se presentan los parámetros morfométricos de esta subcuenca.



6.2. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS SUBCUENCA ESTUDIADA

Teniendo la información topográfica detallada en curvas de nivel se pudieron determinar las siguientes características morfométricas de la subcuenca, descritas en la siguiente tabla:

Tabla 5. Parámetros morfométricos subcuenca estudiada.

Parámetro	Unidad	Magnitud
Área de drenaje	Ha	82.5
Perímetro de drenaje	Km	6.34
Longitud axial	Km	2.39
Extensión cauce principal	Km	1.90
Coef. Compacidad (Kc)	-	1.95
Factor de forma (Kf)	-	0.14
Pendiente media	%	2.89

Fuente: Autores.

Considerando la información anterior, se puede definir la subcuenca como irregular, alargada y/o poco circular en su forma, lo que se puede interpretar que tendrá menor tendencia a presentar mayores crecientes que otra cuenca del mismo tamaño con un factor de forma mayor. Así mismo, la pendiente media, según la Tabla 2, clasifica el terreno de la subcuenca como plano.

6.3. DISTRIBUCIÓN DE LOS USOS DEL SUELO ENTRE LOS AÑOS 2005 Y 2019

Luego de procesar las imágenes satelitales en el software ArcGIS, proceso descrito en la metodología de este proyecto, este programa arrojó las siguientes gráficas y datos para su interpretación y conclusiones. A continuación, se presentan las distintas distribuciones de los usos del suelo en la zona que abarca la microcuenca entre los años 2005 y 2019.

5.6.1 Año 2005

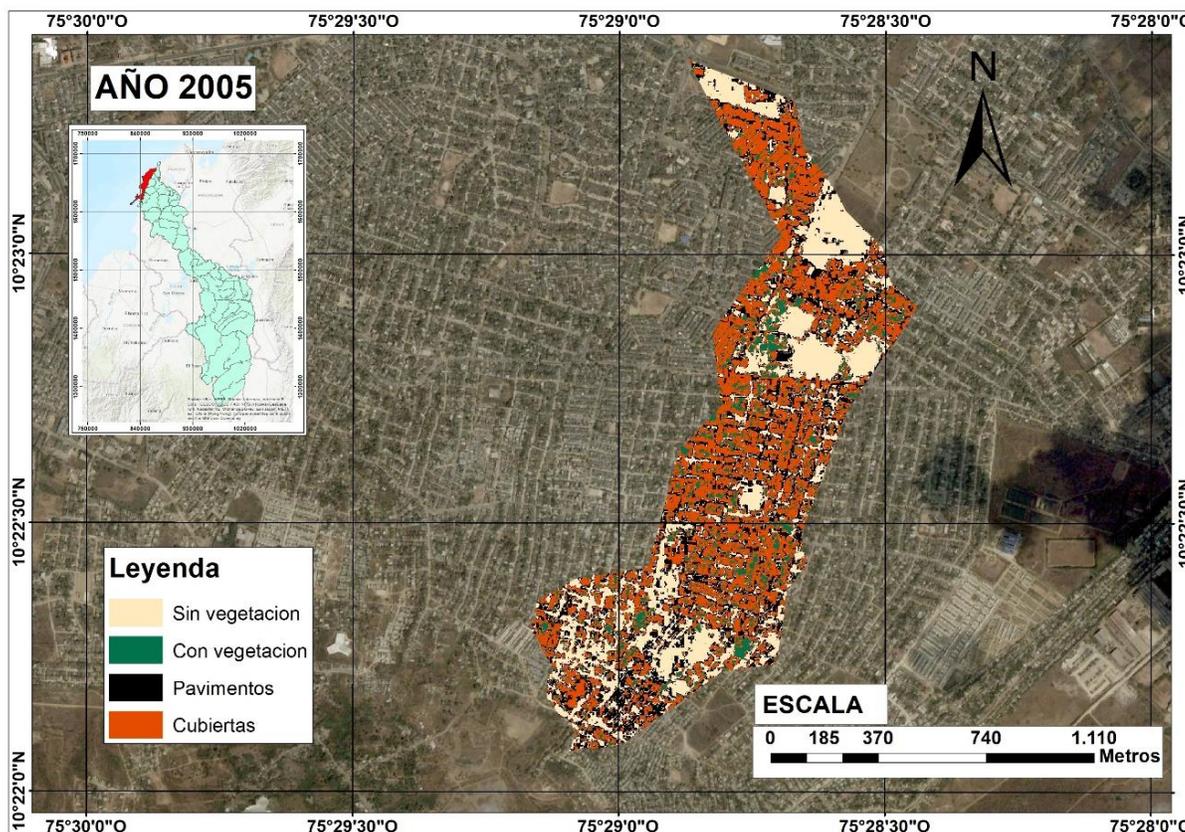


Ilustración 13. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2005.
Fuente: Imagen satelital Google Earth 2005, modificado por autores.

Tabla 6. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2005.

Uso del suelo	ID	Área(m ²)	Área(Ha)	%
Sin vegetación	A1	210004	21,00	25
Con vegetación	A2	135431	13,54	16
Pavimentos	A3	163305	16,33	20
Cubiertas	A4	316726	31,67	38
Aguas	A5	0	0	0
Área Total		825465	82,55	100

Fuente: ArcGIS, tabulado por autores.

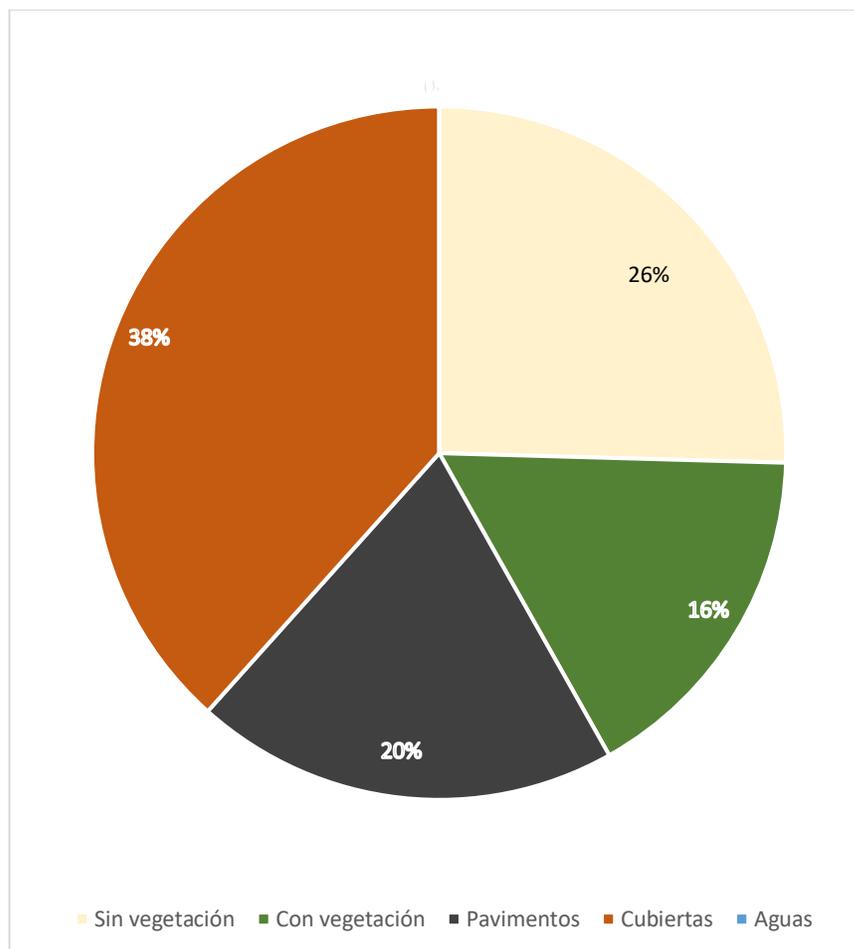


Gráfico 3. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2005.

Fuente: Autores.

Este año al ser el inicial en este estudio, se identifica como un diagnóstico de los diferentes usos del suelo en la zona. En la ilustración 13, se observan los distintos usos y su distribución porcentual en el área, al igual que en el gráfico 3. En la tabla 6, se encuentran los valores de las áreas de los respectivos usos del suelo para el año 2005. Se observa predominancia de cubiertas y áreas sin vegetación, así como la poca existencia de pavimentos, debido a la poca malla vial de la zona en ese año. Cabe anotar que para esta época no se encontraban cuerpos de agua en la zona.

5.6.2 Año 2007

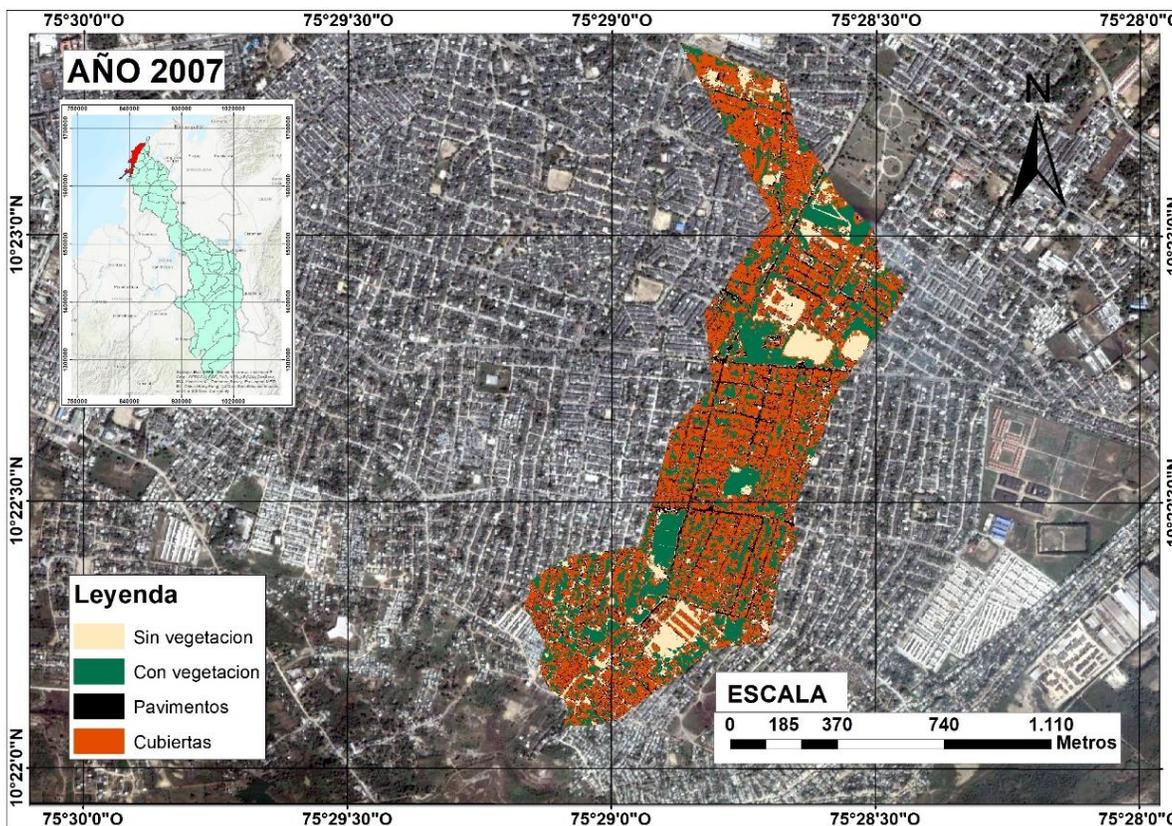


Ilustración 14. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2007.
Fuente: Imagen satelital Google Earth 2007, modificado por autores.

Tabla 7. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2007.

Uso del suelo	ID	Área(m2)	Área(Ha)	%
Sin vegetación	A1	155151	15,52	19
Con vegetación	A2	188191	18,82	23
Pavimentos	A3	164670	16,47	20
Cubiertas	A4	317454	31,75	38
Aguas	A5	0	0	0
Área Total		825465	82,55	100

Fuente: ArcGIS, tabulado por autores.

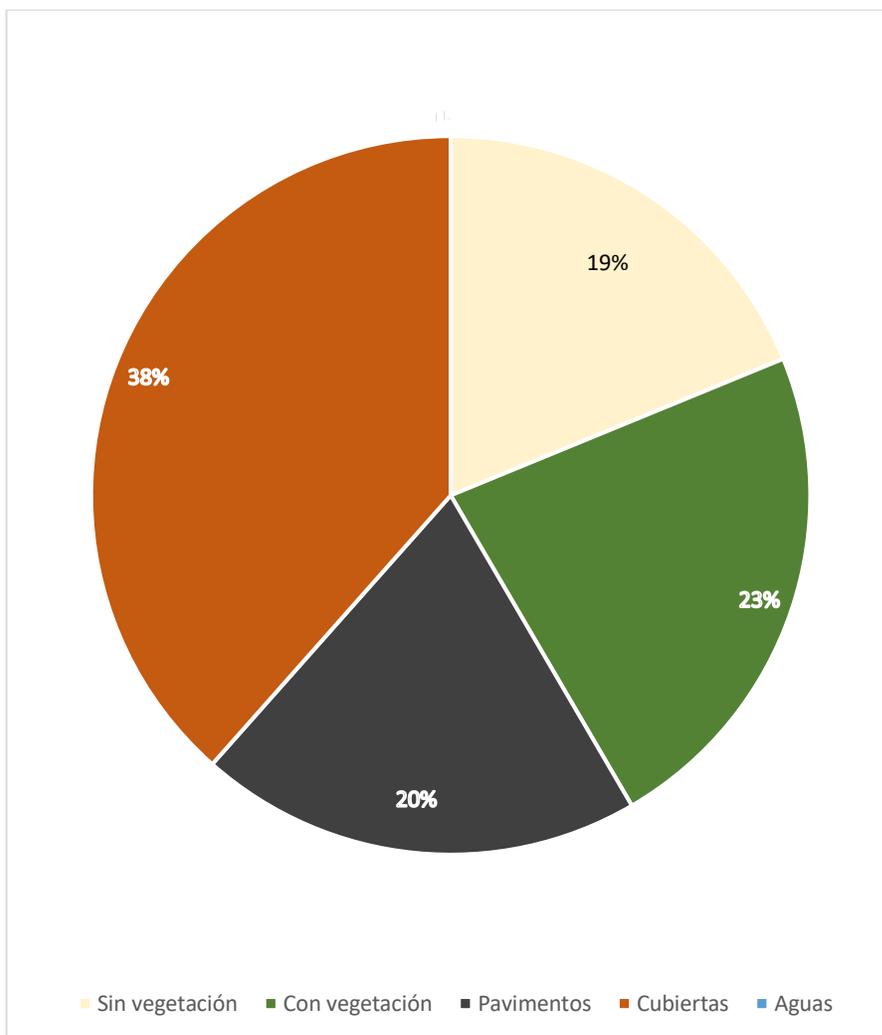


Gráfico 4. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2007.
Fuente: Autores.

Ya en el año 2007, se empezó a observar el crecimiento demográfico representado en el aumento de construcciones tanto viales como de vivienda. En la ilustración 14, el gráfico 4 y la tabla 7, demuestra lo antes descrito. Aumentando los usos del suelo de cubierta de 31,67 Ha a 31,75 Ha, y uso del suelo de pavimento de 16,33 Ha a 16,47 Ha, con respecto al año 2005. Además, se observa una constante en la distribución porcentual entre el uso de suelo pavimento y cubiertas, diferente a los usos de suelo como suelos con y sin vegetación en donde se notó un aumento de los suelos con vegetación, que varían dependiendo a su tamaño y la época del año.

5.6.3 Año 2009

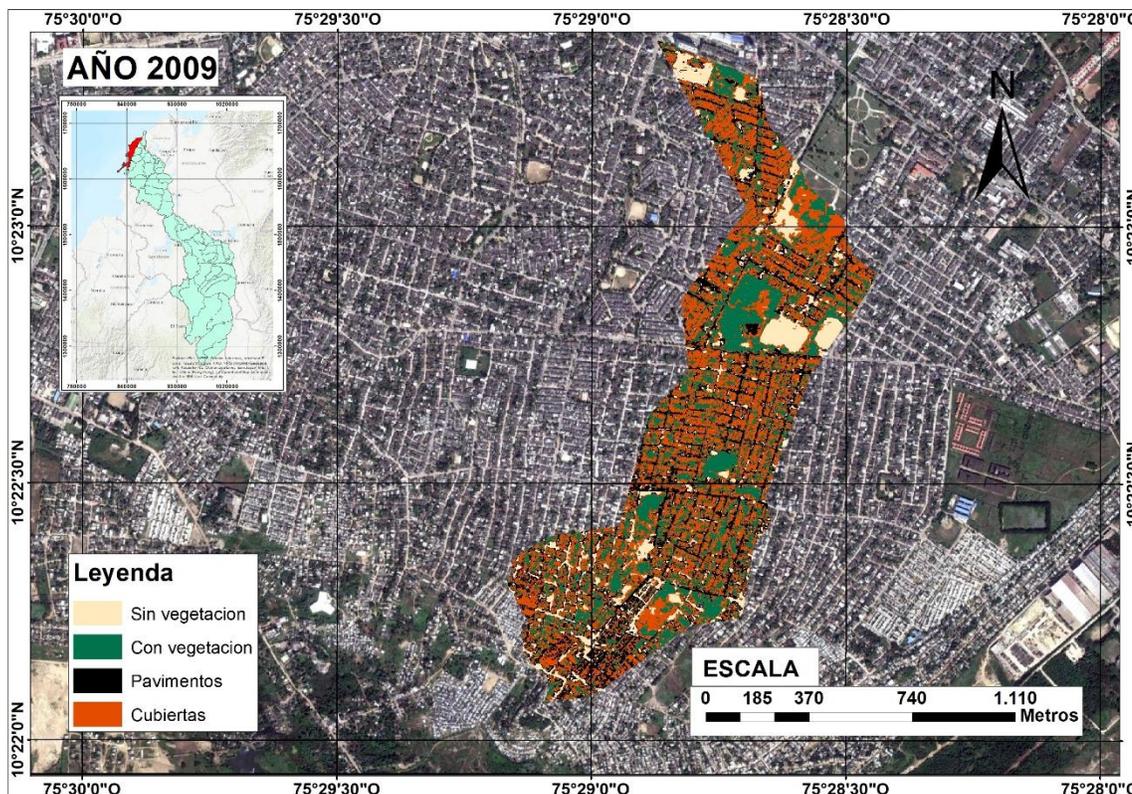


Ilustración 15. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2009.
Fuente: Imagen satelital Google Earth 2009, modificado por autores.

Tabla 8. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2009.

Uso del suelo	ID	Área(m ²)	Área(Ha)	%
Sin vegetación	A1	114037	11,40	14
Con vegetación	A2	216622	21,66	26
Pavimentos	A3	175071	17,51	21
Cubiertas	A4	319736	31,97	39
Aguas	A5	0	0	0
Área Total		825465	82,55	100

Fuente: ArcGIS, tabulado por autores.

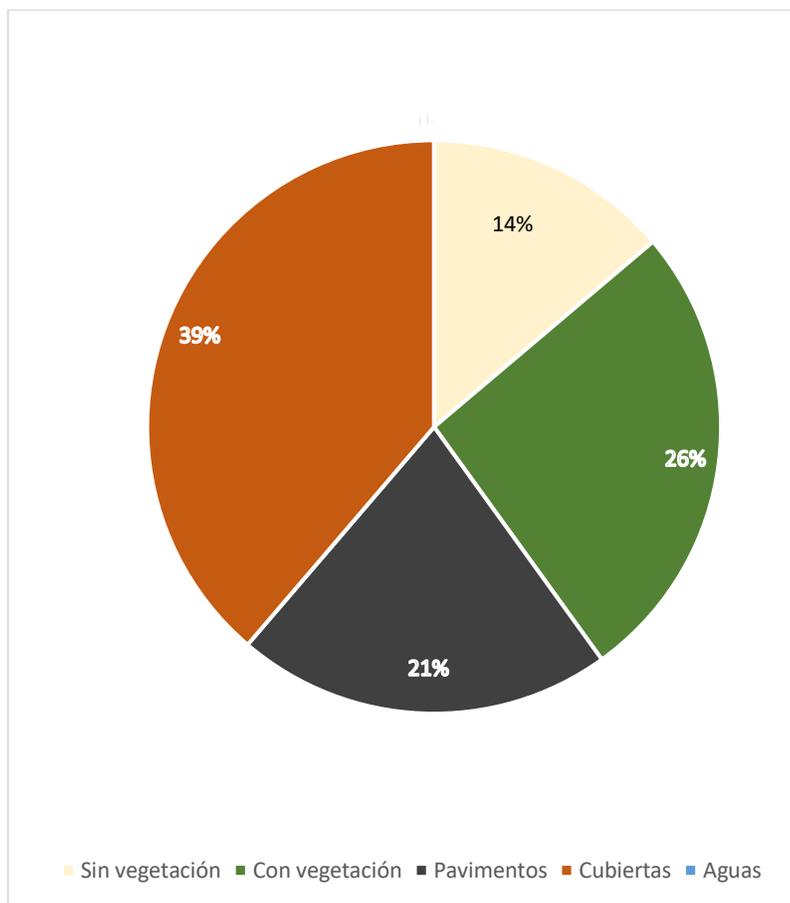


Gráfico 5. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2009.
Fuente: Autores.

En este año, se observa también un aumento significativo en las zonas de cubiertas y pavimentos donde hay un incremento de 31,75 Ha a 31,97 Ha, representando un incremento porcentual del 1%, para cubiertas; Así mismo, en pavimento, hubo un aumento de 16,47 Ha a 17,51 Ha, representado un aumento porcentual del 1%. De igual manera, este año se caracterizó por tener gran arborización y pocas zonas de suelos sin vegetación, con respecto a años anteriores.



5.6.4 Año 2012

Tabla 9. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2012.

Uso del suelo	ID	Área(m2)	Área(Ha)	%
Sin vegetación	A1	139646	13,96	17
Con vegetación	A2	113199	11,32	14
Pavimentos	A3	222092	22,21	27
Cubiertas	A4	348460	34,85	42
Aguas	A5	0	0	0
Área Total		823397	82,34	100

Fuente: ArcGIS, tabulado por autores.

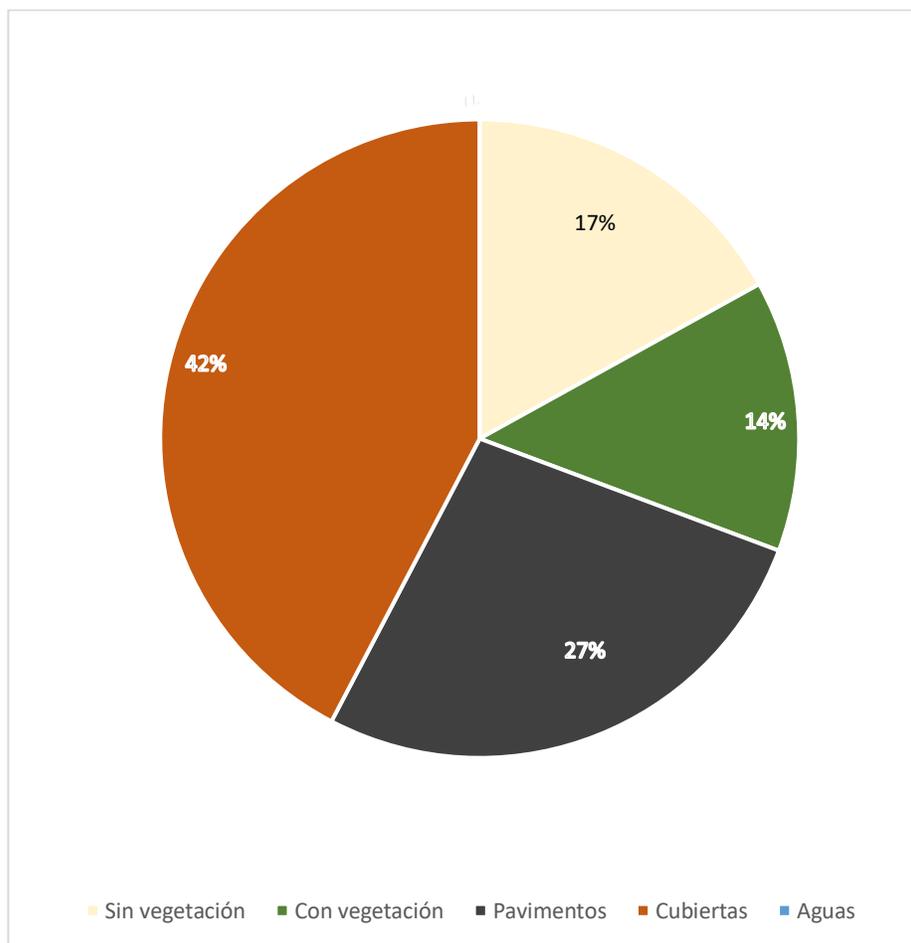


Gráfico 6. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2012.

Fuente: Autores.

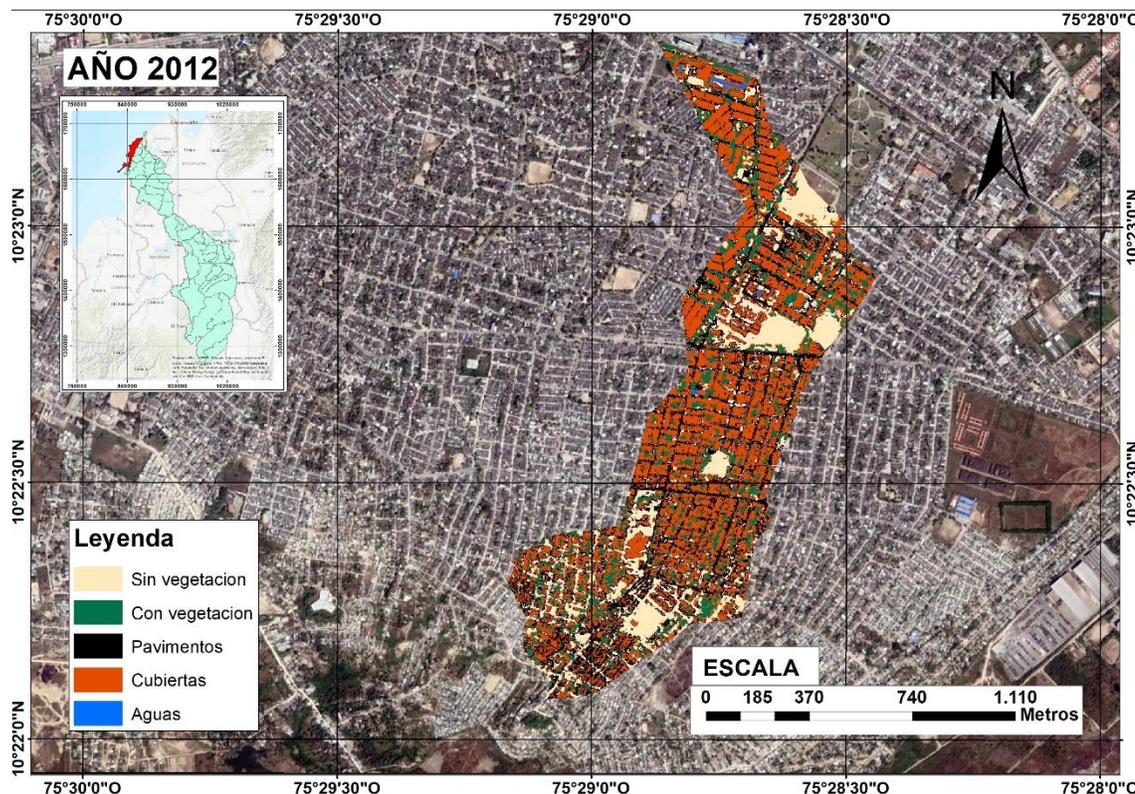


Ilustración 16. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2012. Fuente: Imagen satelital Google Earth 2012, modificado por autores.

En este año, se puede observar un considerable aumento en la construcción de viviendas y carreteras, lo que redujo gran parte los suelos con y sin vegetación. En donde se observa, un incremento en la zona de cubiertas de 31,97 Ha a 34,85 Ha, incrementando un 3%, de igual manera, aumentaron las zonas de pavimentos de 17,51 Ha a 22,21 Ha, incrementando un 6%.

5.6.5 Año 2015

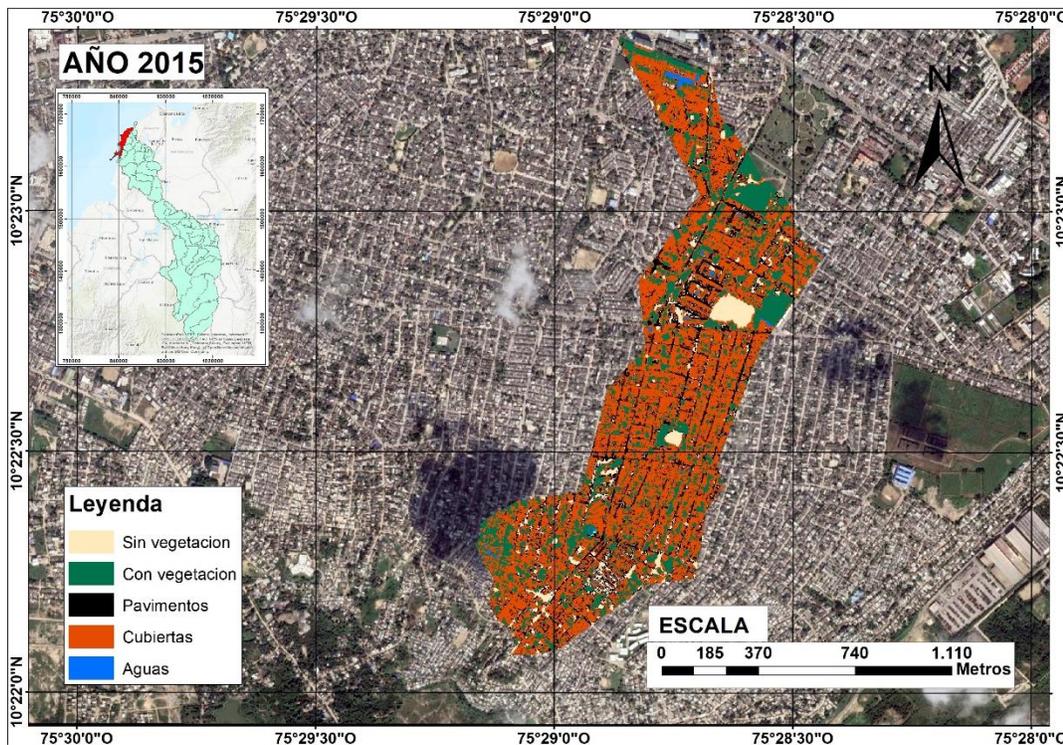


Ilustración 17. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2015.
Fuente: Imagen satelital Google Earth 2015, modificado por autores.

Tabla 10. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2015.

Uso del suelo	ID	Área(m2)	Área(Ha)	%
Sin vegetación	A1	68453	6,85	8
Con vegetación	A2	187625	18,76	23
Pavimentos	A3	223628	22,36	27
Cubiertas	A4	341406	34,14	41
Aguas	A5	4353	0	1
Área Total		825465	82,55	100

Fuente: ArcGIS, tabulado por autores.

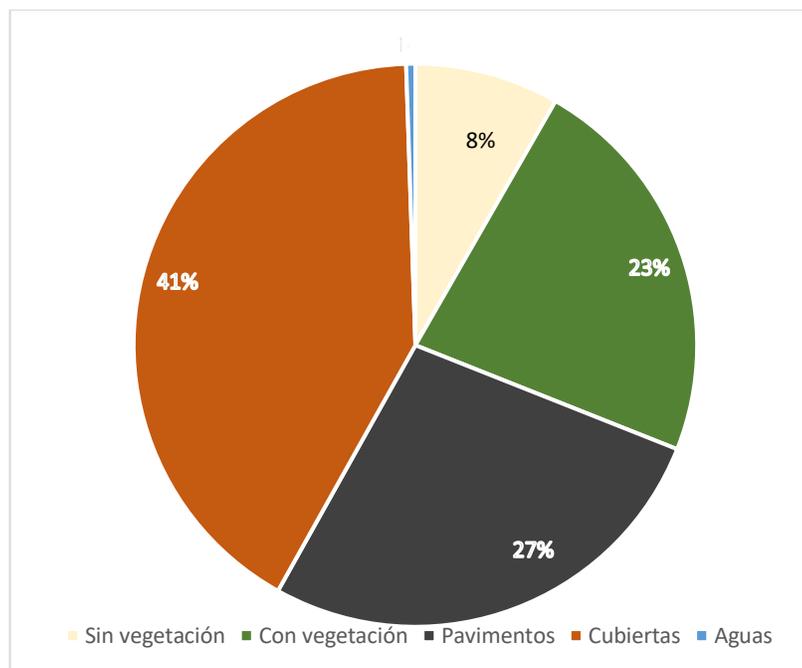


Gráfico 7. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2015.
Fuente: Autores.

En este año se estabiliza la creciente construcción de viviendas, y se conservan en parte los porcentajes respectivos a las áreas de cubiertas y pavimentos. Esto debido a que los pavimentos tienen un porcentaje de 27% que corresponde a 22,36 Ha y las cubiertas un 41% que corresponde a 34,14Ha.

5.6.6 Año 2017

Tabla 11. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2017.

Uso del suelo	ID	Área(m2)	Área(Ha)	%
Sin vegetación	A1	101208	10,12	12
Con vegetación	A2	111508	11,15	14
Pavimentos	A3	241150	24,11	29
Cubiertas	A4	365332	36,53	44
Aguas	A5	6267	1	1
Área Total		825465	82,55	100

Fuente: ArcGIS, tabulado por autores.

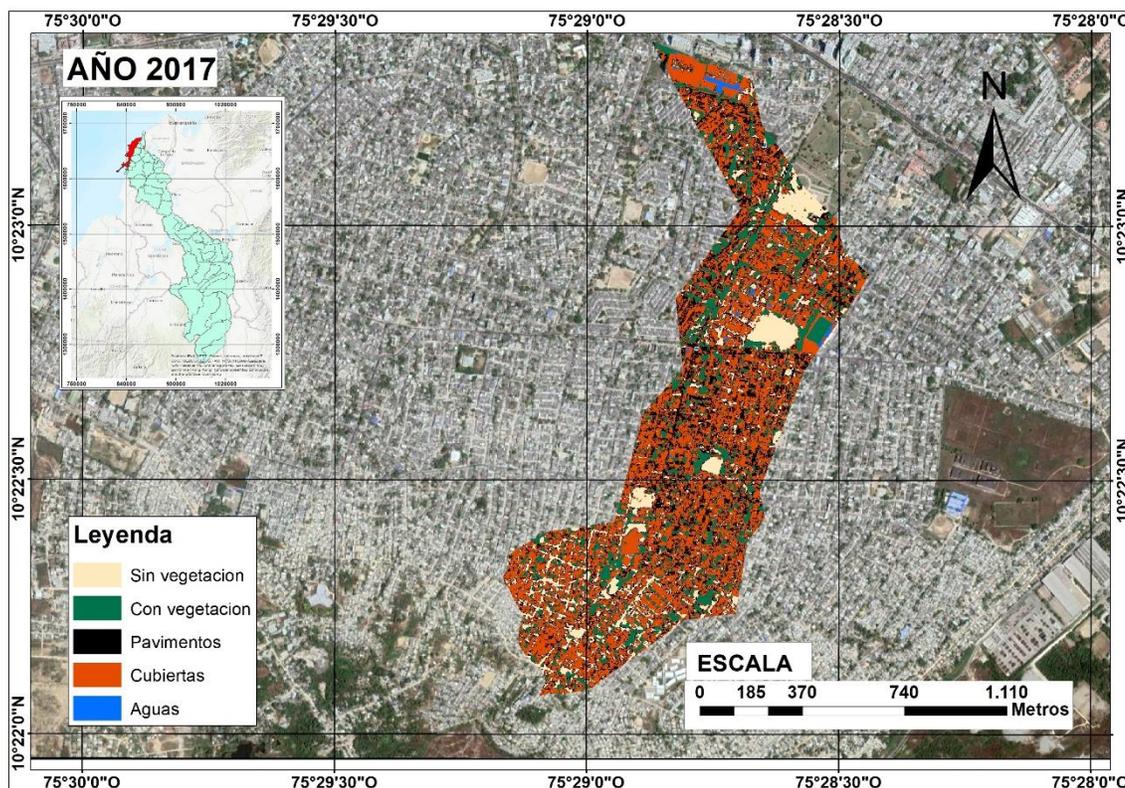


Ilustración 18. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2017.
Fuente: Imagen satelital Google Earth 2017, modificado por autores.

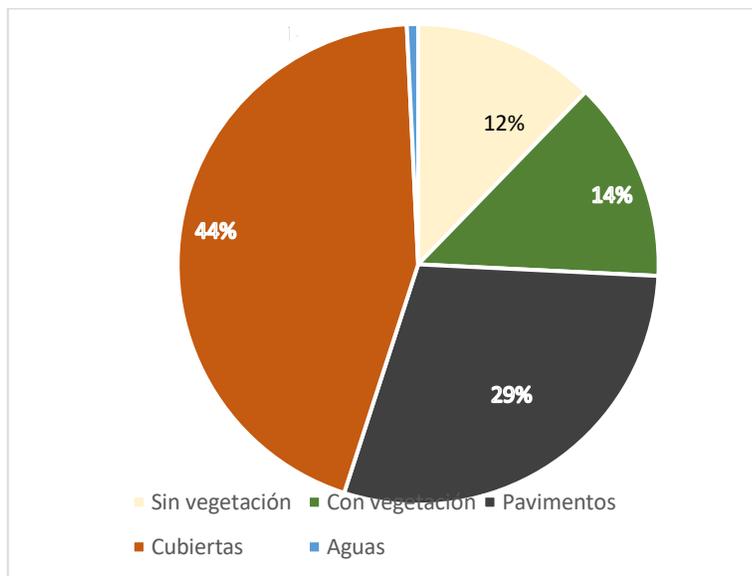


Gráfico 8. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2017.
Fuente: Autores.



En este año se presenta una creciente en los porcentajes correspondientes a las cubiertas y pavimentos, en donde hay 36,53Ha de cubiertas respecto a 34,14Ha del año 2015 y 24,11Ha de pavimentos respecto a 22,36Ha del año 2015, dando un incremento porcentual de 3% y 2% respectivamente.

5.6.7 Año 2019

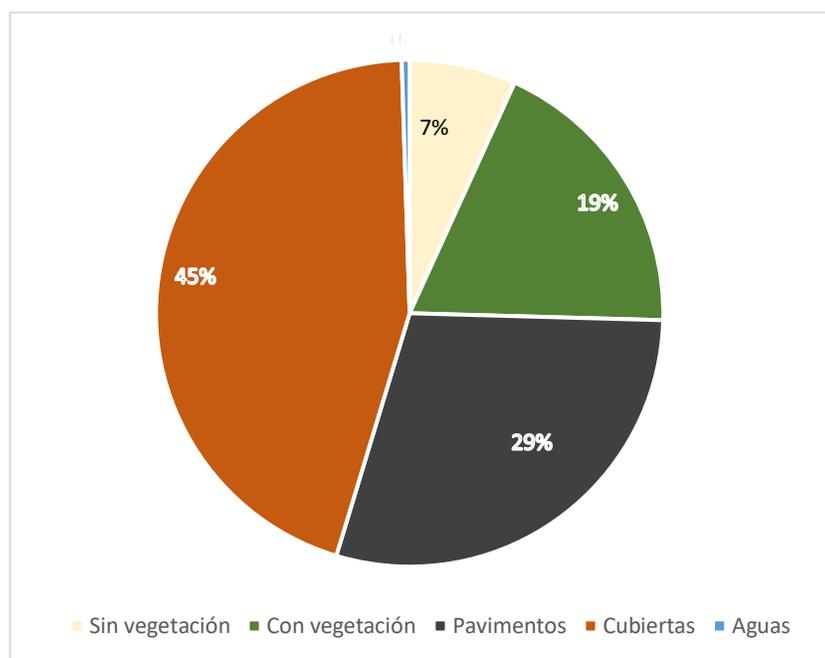


Gráfico 9. Distribución porcentual de los usos del suelo para el año 2019.

Fuente: Autores.

Tabla 12. Áreas usos del suelo y su porcentaje en el área total de la subcuenca. Año 2019.

Uso del suelo	ID	Área(m2)	Área(Ha)	%
Sin vegetación	A1	56135	5,61	7
Con vegetación	A2	153853	15,39	19
Pavimentos	A3	241321	24,13	29
Cubiertas	A4	369988	37,00	45
Aguas	A5	4169	0	1
Área Total		825465	82,55	100

Fuente: ArcGIS, tabulado por autores.

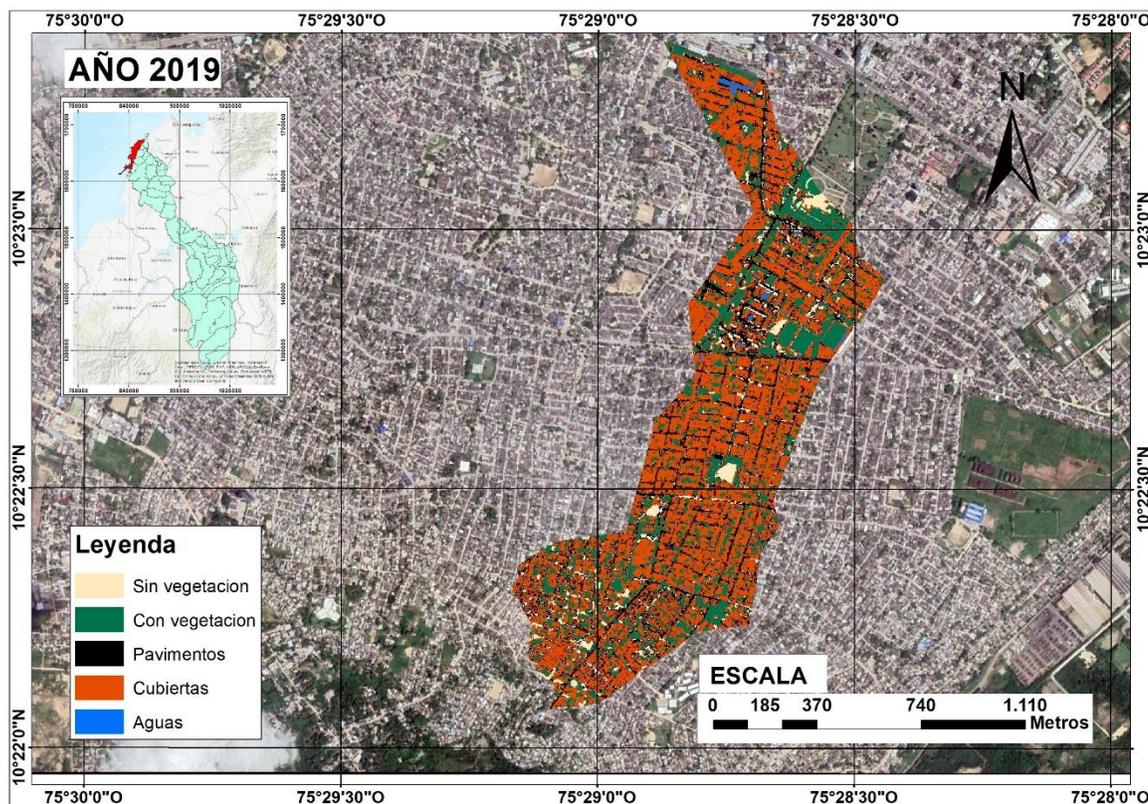


Ilustración 19. Distribución espacial- Usos del suelo en la microcuenca en el año 2019. Fuente: Imagen satelital Google Earth 2019, modificado por autores.

En el último año de estudio de la investigación, se pudo observar poco aumento en cubiertas y pavimentos en donde el 45% corresponde a áreas de cubiertas y el 29% de áreas de pavimentos respecto al 44% y 29% del año 2017 respectivamente.



6.4. ANÁLISIS VARIACIÓN HISTÓRICA DE LOS USOS DEL SUELO

En los distintos años estudiados se observaron diferentes variaciones, demostrando ciertos comportamientos en su tendencia, los cuales pueden influir en el cálculo del coeficiente de escorrentía.

Por un lado, el uso del suelo sin vegetación y con vegetación, en cada año tendían a tener un comportamiento inversamente proporcional, debido a que a pesar de que la suma de sus áreas se reducía gradualmente con el tiempo, sus porcentajes variaban dependiendo las épocas del año, es decir, en cierta época los suelos sin vegetación predominaban ante los suelos con vegetación, y viceversa.

Por otro lado, tanto el uso del suelo de cubiertas y pavimentos, siempre tendieron a ser crecientes, en una relación directamente proporcional, esta situación se avala en la constante evolución de las construcciones de viviendas y pavimentación de vías.

Lo antes descrito se puede observar e interpretar, de manera más detallada en el siguiente gráfico.

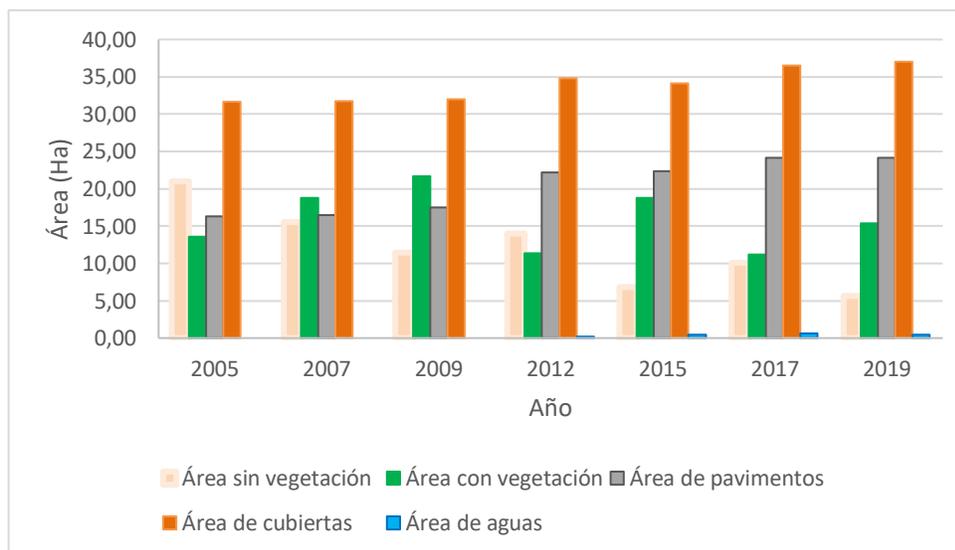


Gráfico 10. Variación de las áreas de usos del suelo en la microcuenca en estudio.
Fuente: Autores.



6.5. COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA AÑO 2005 HASTA AÑO 2019

Utilizando la información descrita en la tabla 1 por parte del ministerio de vivienda en el RAS2016, y tomando la ecuación (7), se obtuvieron los diferentes coeficientes de escorrentía en los años específicos estudiados y su variación por cada periodo, denotados en la tabla 13, cabe anotar que la variación entre el coeficiente de escorrentía calculado en el año 2005(Fotografía inicial estudiada) y el año 2019(Fotografía final estudiada), fue de 14.41%.

Tabla 13. Coeficientes de escorrentías calculados para cada año de estudio.

Año	% A Total. (Ha)						Coeficiente de escorrentía calculado	Variación por periodo (%)
	A1	A2	A3	A4	A5	Total		
2005	21,00	13,54	16,33	31,67	0,00	82,55	0,698	
2007	15,52	18,82	16,47	31,75	0,00	82,55	0,719	2,96
2009	11,40	21,66	17,51	31,97	0,00	82,55	0,738	2,72
2012	13,96	11,32	22,21	34,85	0,21	82,55	0,755	2,26
2015	6,85	18,76	22,36	34,14	0,44	82,55	0,777	2,94
2017	10,12	11,15	24,11	36,53	0,63	82,55	0,779	0,23
2019	5,61	15,39	24,13	37,00	0,42	82,55	0,799	2,52

Fuente: Autores.

Se determinó una variación promedio de 2.27% entre cada periodo estudiado, lo que indica una creciente urbanización en la zona y que a futuro puede seguir aumentando. Cabe resaltar que en el periodo que comprende los años 2015 y 2017, la variación no fue mayor debido a que, en parte los suelos no construidos fueron establecidos a usos distintos de vivienda o pavimentos como campos o parques, ejemplo específico, es la construcción de las canchas del barrio Alameda.



6.6. LLUVIAS DE DISEÑO Y CAUDALES PICO AÑO 2005 HASTA 2019

Los caudales máximos seleccionados para el diseño hidráulico del canal corresponden a un periodo de retorno de 50 años según lo indica la nueva Resolución 0330 de 2017, para lo cual se considera el tamaño de la cuenca que aporta escorrentía al canal Ricaurte. Teniendo en cuenta lo anterior, utilizando la información descrita en el gráfico 1, para el periodo de retorno de 50 años, se definió la ecuación de la intensidad de lluvia de diseño, descrita así:

$$I = \frac{78546.079}{(D+91.269)^{1.304}} \quad \dots (15)$$

La velocidad y el tiempo de concentración de la lluvia se definió utilizando la ecuación (12) y (13) respectivamente, dando un valor de 0.76 m/s y 41.67 minutos, respectivamente. Teniendo en cuenta lo anterior la intensidad de lluvia de diseño se calculó en 133.62 mm/h. En la Tabla 14 y el Gráfico 11, se pueden observar los caudales picos obtenidos calculados por medio de la ecuación (10), teniendo en cuenta la reducción del área calculada mediante la ecuación (11), para cada lluvia de diseño de cada año estudiado en este proyecto, y su respectivo hidrograma triangular. El coeficiente de reducción (R) quedó determinado en 0.837. Se aplicó el hidrograma triangular teniendo en cuenta los supuestos descritos en la sección 2.3.8, determinándose el valor de Tp en 25 min y el valor de Tb en 66.76min.

Tabla 14. Caudales picos calculados para cada lluvia de diseño de cada año, para un periodo de retorno de 50 años.

Año	Coefficiente de escorrentía	Caudal pico Q50 (m3/s)	Variación por periodo(%)
2005	0,698	17,91	
2007	0,719	18,44	2,96
2009	0,738	18,94	2,72
2012	0,755	19,37	2,26
2015	0,777	19,94	2,94
2017	0,779	19,99	0,23
2019	0,799	20,49	2,52

Fuente: Autores.

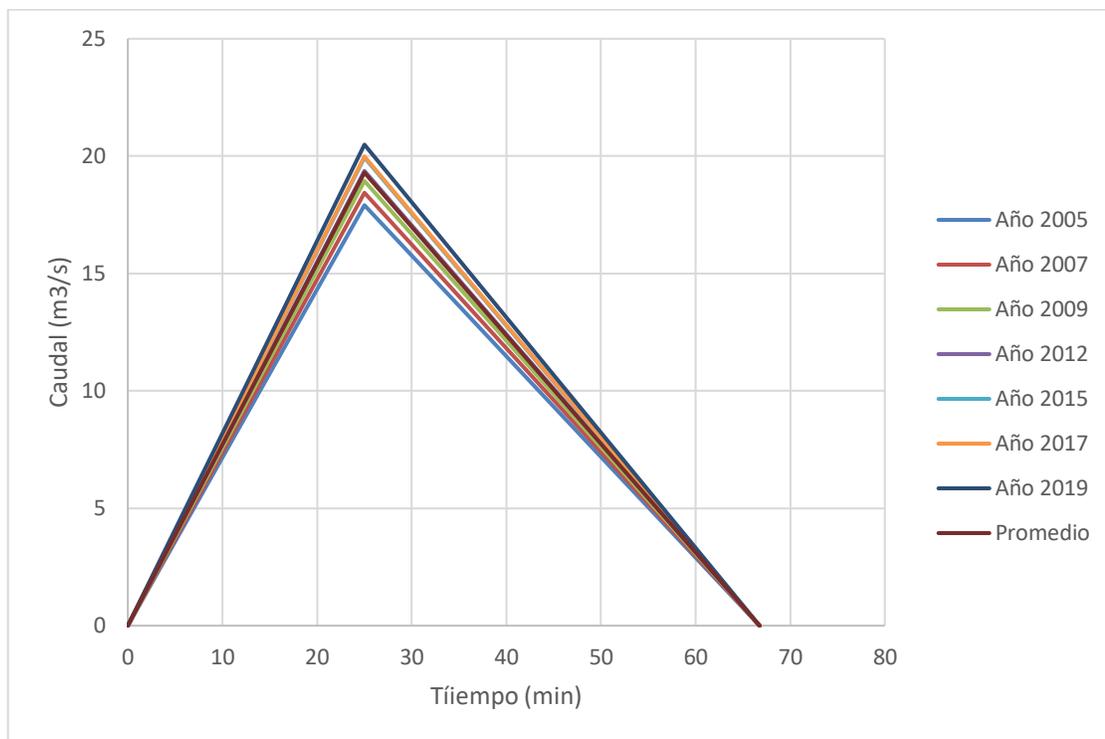


Gráfico 11. Hidrogramas triangulares de caudales pico en cada año estudiado.

Fuente: Autores.

El caudal pico calculado para el año inicial en el estudio fue de $17.91 \text{ m}^3/\text{s}$, y se evidenció un incremento promedio del 2.27% en cada intervalo de tiempo estudiado, en donde la variación del caudal pico del año inicial respecto al del año final, fue de 14.40%. Esto se puede denotar en el gráfico 11, para un tiempo mínimo determinado (T_p).

Comparando los resultados de esta investigación frente al estudio realizado por Samie et al., (2019), utilizando la misma metodología de clasificación supervisada, muestran que la escorrentía superficial para un intervalo de tiempo entre los años 2004 y 2019 fue de 11%, comparado con el incremento calculado en la presente investigación. Validando la premisa principal, al utilizar el método de tratamiento de imágenes satelitales de varios años en específico, para calcular la variación de las diferentes extensiones de los tipos de suelos estudiados.



7. CONCLUSIONES

La microcuenca estudiada abarca los canales Villa Rubia y Emiliano Alcalá los cuales tienen una longitud de 2.44km, un área de drenaje de aproximadamente 82.55 Ha, pendiente media del terreno de 2.89%, considerándose un terreno plano, y un coeficiente de compacidad y factor de forma de 1.95 y 0.14, respectivamente, apreciando la cuenca como irregular y alargada. En el análisis fotogramétrico, se identificaron las variables a estudiar, definidas en las áreas correspondientes a suelos sin vegetación, suelos con vegetación, pavimentos y cubiertas; predominando las áreas de pavimentos y cubiertas en todos los años estudiados, esto se debe a que la zona de estudio es una cuenca urbana. Las áreas de pavimentos en el año 2005 tenían una extensión de 16.33Ha y en el año 2019 un área de 24.13Ha por lo que se observó un incremento de estas. Las áreas de cubiertas en el año 2005 tenían una extensión de 31.67Ha y al llegar el año 2019, 37.00Ha por lo que también se observa un incremento, esto se debe a que la zona tuvo un crecimiento urbanístico.

Este crecimiento de las superficies impermeables (cubiertas y pavimentos) conllevó también a una variación significativa 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, donde la variación en los años de estudio fue un promedio de 2.27% entre cada periodo, dando un incremento total entre el año 2005 hasta el 2019 de 14.41%.

Por último, los caudales estimados para cada año, en el 2005 fueron de 17.91m³/s y en el año 2019 de 20.49m³/s para un periodo de retorno de 50 años. Esta variación en los caudales de diseños no es significativa a la hora del diseño de una obra hidráulica, no obstante, esta variación no deja de ser importante ya que funciona como un punto de partida para futuras investigaciones en otras áreas de estudio.

Por otro lado, al considerarse los valores de coeficientes de escorrentía propuestos por el RAS, este se sobre estimó, ya que, según la última investigación realizada en el año 2004, el mayor resultado fue de 0.47, un valor lejos del obtenido en el año 2005, considerando un error diferencial del 46 %.



Además, debido a las limitaciones de las imágenes satelitales estudiadas, estas no fueron obtenidas en la misma época del año, lo que conllevó a un resultado inesperado en los usos del suelo específicamente en los suelos con vegetación y los suelos sin vegetación, resultando valores dispersos. Ejemplo puntual, sucedió en las imágenes satelitales tomadas en el año 2005 y 2007, donde en el primero año, el área de los suelos sin vegetación disminuyó mientras que el área de suelo con vegetación aumentó con respecto al año siguiente estudiado. Concluyendo que los suelos sin vegetación se transformaron, cierta extensión, en suelos con vegetación.

En la actualidad, solo existe un estudio hidrológico de la zona realizado por Padilla et al.,(2004), calculando el coeficiente de escorrentía de manera experimental en un sector del Canal Ricaurte por medio del método racional, cuyos resultados, en parte no son confiables, ya que se alejan de lo racional resultando valores mayores a 1, diferentes a los valores calculados y expresados en el actual documento. Al tener esta investigación como referencia, no se pudo contemplar la posibilidad de obtener resultados acordes a lo planteado; resultando de mayor validez lo propuesto en esta investigación, al considerar nuevos métodos tecnológicos y una variable diferente, como lo son los diferentes usos del suelo donde hay escorrentía.



8. RECOMENDACIONES

El campo de investigación de la escorrentía superficial es muy amplio e involucra muchas variables, por lo que se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Investigar sobre los usos del suelo en la cuenca, y su potencial urbanístico para futuras variaciones de estos.
- Tener en cuenta la variación del uso del suelo y el coeficiente de escorrentía para la generación de caudales al momento de diseños de obras hidráulicas para mitigar problemas futuros de inundación.
- Considerar que la estimación del coeficiente de escorrentía no solo depende de la extensión de los diferentes usos del suelo, sino que también depende de las pendientes del terreno, la infiltración del suelo, la evapotranspiración del agua, etc., por lo que se recomienda estimar este valor por medio de estudios experimentales in situ, como aforos en el caudal de salida.
- Realizar proyectos de investigación similares donde se realicen estudios con condiciones de zonas potencialmente urbanizables, donde se esté aspirando a la expansión y crecimiento de la ciudad, en donde se considere de manera importante y fundamental la variación del coeficiente de escorrentía y los usos del suelo en la generación de caudales picos de estudio.



9. BIBLIOGRAFÍA

- ArcGIS Resource Center. (2020). ¿Qué es ArcGIS? Retrieved February 4, 2020, from <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Arrieta, A. (2010). Hidrología Práctica para Ingenieros, 1–100.
- Chen, J., Theller, L., Gitau, M. W., Engel, B. A., & Harbor, J. M. (2017). Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States. *Elsevier*, 187, 470–481. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.017>
- Chiarito, E., Zimmermann, E., & Méndez Zacarías, S. (2019). Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección. *Cuadernos Del CURIHAM*, 24, 25–36. <https://doi.org/10.35305/curiham.v24i0.126>
- Chow, V. T., Ways, L., & Maidment, D. (1994). *Hidrología Aplicada*. Mc-Graw Hill.
- Chunlin, L., Miao, L., Yuanman, H., Tuo, S., Xiuqi, Q., & M. Todd, W. (2018). Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones. *Science of the Total Environment*, 643, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.211>
- Daza, M. J., & Pérez, P. A. (2013). *Estudio para determinar la variación del coeficiente de escorrentía y su impacto en la capacidad de la red de alcantarillado en los colectores de las calles Arirumba e Imbabura*. Universidad de Cuenca. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/4540>
- Du, J., Qian, L., Rui, H., Zuo, T., Zheng, D., Xu, Y., & Xu, C. (2012). Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin , China, 465, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.057>
- El Universal. (2019, May 16). Continúan las inundaciones y emergencias durante fuertes



lluvias en Cartagena. Retrieved from <https://www.eluniversal.com.co/cartagena/inundaciones-y-emergencias-durante-fuertes-lluvias-IX1145578>

Henao, J. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas* (Universida).

IDEAM. (2017). *CURVA IDF ESTACIÓN APTO RAFAEL NÚÑEZ CARTAGENA DE INDIAS*. Bogotá, Colombia. Retrieved from http://www.ideam.gov.co/documents/10182/24541172/IDF_14015020_APTO_RAFAEL_NUNEZ.pdf/39e540c6-e799-4e4e-8271-a248932740cd?version=1.0

IHSA. (2017). *Revisión, Ajustes y Complementación de los Diseños Existentes y Realización de Estudios, Diseños, Especificaciones Técnicas Definitivas y los Planos de Construcción de los Canales del Sistema de Alcantarillado Pluvial de la Zona Urbana del Distrito de Car*. Cartagena, Colombia.

Martin, E., & Reyes, M. (2004). *Determinación en el campo del coeficiente de escorrentía de la microcuenca Socorro, Blas de Lezo, Los Alpes, Las Gaviotas*. Universidad de Cartagena.

Merz, R., Blöschl, G., & Parajka, J. (2006). Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. *Elsevier*, 331, 591–604. Retrieved from https://unicartagena.basesdedatosezproxy.com:2450/S0022169406003192/1-s2.0-S0022169406003192-main.pdf?_tid=219a4489-7ea4-42a4-b764-774ce25359a4&acdnt=1536769624_70fa4b6c47e31daa812583416209c2e4

Meunier, M. (1996). La cubierta forestal y la crecida en las pequeñas cuencas de montaña. *Unasyuva*, 47(185), 29–37.

Ministerio de Vivienda. (2016). RAS - TÍTULO D - Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias - 2da. Ed. In *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS* (p. 282). Bogotá, Colombia.



- Retrieved from
http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf
- Ministerio de Vivienda. Resolución 0330 - 08 de Junio de 2017, Pub. L. No. 0330, 182 (2017). Colombia. Retrieved from
<http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330 - 2017.pdf>
- Monsalve Saenz, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Otero Brito, E. (2012). Canal ricaurte roba tranquilidad a moradores de San Pedro., 1. Retrieved from <https://www.eluniversal.com.co/cartagena/canal-ricaurte-roba-tranquilidad-moradores-de-san-pedro-88237-CWEU172473>
- Pérez, M., & Quispe, P. (2017). *Estimación de volumen de agua superficial en las cuencas de los Ríos Totaré, Coello y Totaré-Coello en el Municipio de Ibagué, Departamento de Tolima aplicando el modelo hidrológico DISAPRO I*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Samie, M., Ghazavi, R., Vali, A., & Pakparvar, M. (2019). Evaluation of the effect of land use change on runoff using supervised classified satellite data. *Global Nest Journal*, 21(2), 245–252. <https://doi.org/10.30955/gnj.002631>
- Sriwongsitanon, N., & Taesombat, W. (2011). Effects of land cover on runoff coefficient. *Elsevier*, 410(3–4), 226–238. Retrieved from
https://unicartagena.basesdedatosezproxy.com:2450/S0022169411006561/1-s2.0-S0022169411006561-main.pdf?_tid=190e79cb-0d64-4c56-914b-efebf022aa70&acdnt=1536770273_1758cb1db014f3dacb73bcccec228b57
- Universidad Nacional de San Luis. (2011a). Apuntes para Trabajos Prácticos - Fotointerpretación. Retrieved from
http://www0.unsl.edu.ar/~geo/materias/Elementos_de_Geologia/documentos/contenid



os/apoyo_teorico/APU-2011-Fotointerpret.pdf

Universidad Nacional de San Luis. (2011b). Apuntes para Trabajos Prácticos - Fotointerpretación.

USGS. (2020). Landsat Mission. Retrieved January 16, 2020, from www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat

Ya, L., Youpeng, X., & Yi, S. (2012). Procedia Engineering Hydrological Effects of Urbanization in the Qinhuai River Basin , China, 00(2011). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.806>