

**MODELACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO URBANO EN LA LOCALIDAD DE
FONTIBÓN CON I-TREE HYDRO**

DAVID SANTIAGO BAUTISTA ÁVILA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÀ D.C.
2018**

**MODELACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO URBANO EN LA LOCALIDAD DE
FONTIBÓN CON I-TREE HYDRO**

DAVID SANTIAGO BAUTISTA ÁVILA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

**DIRECTOR: CARLOS ANDRES PEÑA GUZMAN
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO
MAGISTER EN INDROSISTEMAS
DOCTOR EN AGUA Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
BOGOTÀ D.C.
2018**

“Dios no manda cosas imposibles, sino que, al mandar lo que manda, te invita a hacer lo que puedas y pedir lo que no puedas y te ayuda para que puedas”

Agustín de Hipona

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ILUSTRACIONES	6
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	8
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN.....	13
3. OBJETIVOS.....	15
3.1. OBJETIVO GENERAL	15
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	15
4. PERTINENCIA SOCIAL.....	16
5. ANTECEDENTES	17
6. MARCO TEORICO	19
6.1. URBANIZACIÓN, CONTEXTO MUNDIAL Y LATINO AMERICANO.	19
6.2. IMPLICACIONES AMBIENTALES Y SOCIALES DE LA URBANIZACIÓN.	19
6.2.1. <i>Impactos hidrológicos</i>	20
6.2.2. <i>Calidad del aire en grandes ciudades</i>	20
6.2.3. <i>Aumento de la temperatura en zonas urbanas</i>	21
6.2.4. <i>Impactos en la superficie terrestre</i>	21
6.3. INUNDACIONES EN BOGOTÁ.....	21
6.4. LOCALIDAD DE FONTIBÓN.....	22
6.5. ZONAS VERDES URBANAS.....	23
6.6. HERRAMIENTA I-TREE HYDRO	24
7. ALCANCE.....	26
8. METODOLOGÍA	27
8.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN Y DATOS NECESARIOS PARA ALIMENTAR EL MODELO.	28
8.2. SIMULACIÓN CUENCA DEL RÍO FUCHA Y LOCALIDAD DE FONTIBÓN.....	30
8.3. ESCENARIOS FUTUROS	31
9. DESCRIPCION DEL MODELO Y DESARROLLO CENTRAL	33
9.1. CLIMATOLOGÍA E HIDROLOGÍA ZONA DE ESTUDIO	33
9.2. SIMULACIÓN CUENCA DEL RÍO FUCHA.....	34

9.2.1.	<i>Características básicas cuenca río Fucha.....</i>	<i>34</i>
9.2.2.	<i>Calibración simulación cuenca del río Fucha.....</i>	<i>39</i>
9.3.	SIMULACIÓN LOCALIDAD DE FONTIBÓN	41
10.	ESCENARIOS FUTUROS	46
10.1.	ESCENARIO 2 AUMENTO DE ZONAS VERDES	50
10.2.	ESCENARIO 3 AUMENTO DE ZONAS VERDES	53
10.3.	ESCENARIO 4 LOCALIDAD DE FONTIBÓN SIN ZONAS VERDES	58
10.4.	ESCENARIO 5 AUMENTO DEL PORCENTAJE DE COBERTURA DEBAJO DE ÁRBOLES. 62	
10.5.	ESCENARIO 6 AUMENTO DEL PORCENTAJE DE COBERTURA DEBAJO DE ÁRBOLES. 66	
11.	IMPACTO SOCIAL	69
12.	CONCLUSIONES	70
13.	RECOMENDACIONES.....	71
14.	BIBLIOGRAFÍA	72

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Línea desarrollo computacional i-Tree Hydro, elaboración propia. .	25
Ilustración 2. Metodología propuesta, elaboración propia.	27
Ilustración 3. Salidas generadas i-Tree Hydro, elaboración propia.	32
Ilustración 4. Caudales medios diarios del río Fucha, elaboración propia.	33
Ilustración 5. Temperatura media estación APTO El Dorado, elaboración propia.	34
Ilustración 6. Precipitación total reportada en 1 hora, estación APTO El Dorado, elaboración propia.	34
Ilustración 7. Modelo de Elevación Digital Cuenca Río Fucha, elaboración propia.	35
Ilustración 8. Cobertura permeable cuenca del río Fucha, elaboración propia. ..	36
Ilustración 9. Cobertura impermeable cuenca del río Fucha, elaboración propia.	37
Ilustración 10. Parámetros de calibración	41
Ilustración 11. Modelo de Elevación Digital, localidad de Fontibón, elaboración propia.	42
Ilustración 12. Zonas permeables localidad de Fontibón, elaboración propia.	44
Ilustración 13. Zonas impermeables localidad de Fontibón, elaboración propia.	45
Ilustración 14. Zonas verdes localidad de Fontibón, elaboración propia.	47
Ilustración 15. Zonas permeables UPZ localidad de Fontibón, elaboración propia.	48
Ilustración 16. Zonas impermeables UPZ localidad de Fontibón, elaboración propia.	49
Ilustración 17. AUMENTO DE ZONAS VERDES ESCENARIO 2.	51
Ilustración 18. AUMENTO DE ZONAS VERDES ESCENARIO 3.	55
Ilustración 19. Caso alternativo escenario 3 menos caso base, fuente i-Tree Hydro.	58
Ilustración 20. Flujo total, caso base vs caso alternativo, escenario 4, fuente i-Tree Hydro.	61
Ilustración 21. Componentes de flujo escenario base vs escenario alternativo, escenario 4, fuente i-Tree Hydro.	61
Ilustración 22. Caso alternativo escenario 4 menos caso base, fuente i-Tree Hydro.	62
Ilustración 23. Caso alternativo escenario 5 menos caso base, fuente i-Tree Hydro.	65
Ilustración 24. Caso alternativo escenario 6 menos caso base, fuente i-Tree Hydro.	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes trabajos e investigaciones realizadas con i-Tree Hydro, elaboración propia.	18
Tabla 2. Parámetros de calibración i-Tree Hydro.	30
Tabla 3. Porcentaje de coberturas uso del suelo cuenca del río Fucha, elaboración propia.	37
Tabla 4. Variables no disponibles, elaboración propia.	39
Tabla 5. Parámetros de calibración cuenca del río Fucha, elaboración propia.	40
Tabla 6. Uso del suelo actual localidad de Fontibón, elaboración propia.	42
Tabla 7. Uso del suelo escenario 2 localidad de Fontibón, elaboración propia.	50
Tabla 8. Predicciones de flujo, escorrentía total escenario 2, elaboración propia.	52
Tabla 9. Predicciones de flujo subterráneo, escenario 2, elaboración propia.	52
Tabla 10. Predicciones de flujo zona permeable, escenario 2, elaboración propia.	53
Tabla 11. Predicciones de flujo impermeable, escenario 2, elaboración propia.	53
Tabla 12. Uso del suelo escenario 3 localidad de Fontibón, elaboración propia.	54
Tabla 13. Predicciones de flujo, escorrentía total escenario 3, elaboración propia.	56
Tabla 14. Predicciones de flujo subterráneo, escenario 3, elaboración propia.	56
Tabla 15. Predicciones de flujo permeable, escenario 3, elaboración propia.	57
Tabla 16. Predicciones de flujo impermeable, escenario 3, elaboración propia.	57
Tabla 17. Uso del suelo escenario 4 localidad de Fontibón, elaboración propia.	59
Tabla 18. Predicciones de flujo, escorrentía total escenario 4, elaboración propia.	60
Tabla 19. Predicciones de flujo impermeable, escenario 4, elaboración propia.	60
Tabla 20. Predicciones de flujo, escorrentía total escenario 5, elaboración propia.	63
Tabla 21. Predicciones de flujo subterráneo, escenario 5, elaboración propia.	63
Tabla 22. Predicciones de flujo permeable, escenario 5, elaboración propia.	64
Tabla 23. Predicciones de flujo impermeable, escenario 5, elaboración propia.	64
Tabla 24. Predicciones de flujo, escorrentía total, escenario 6, elaboración propia.	66
Tabla 25. Predicciones de flujo subterráneo, escenario 6, elaboración propia.	66
Tabla 26. Predicciones de flujo permeable, escenario 6, elaboración propia.	67
Tabla 27. Predicciones de flujo impermeable, escenario 6, elaboración propia.	67

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

%	Porcentaje
UPZ	Unidades de Planeación Zonal
m ² /hab	Metro cuadrado por habitante
CPI	Cuantificación de la precipitación Interceptada en el Área de Interés
BCH	Balance del ciclo hidrológico urbano para el manejo de aguas lluvia
MPAV	Modelo para la Planificación de Áreas Verdes
CC	Cambio en la Calidad de aguas lluvias en Ambientes Urbanos
CHU	Contaminantes Ciclo Hidrológico Urbano
IASH	Impactos ambientales en superficies hídricas
CAL	Contaminación de aguas lluvia
BPP	Buenas Prácticas para la Planeación Urbana
SQA	Simulación Química del Agua
EEAU	Evaluación de los Efectos de Áreas Urbanas
EEV	Evaluación de estructuras verdes
CIAA	Cuantificación Interacción Agua-Árbol
SPT	Simulación de picos en la tasa de descarga de tormentas
SC	Simulación de caudales
PNUD	Programa de las naciones unidas para el desarrollo
SO ₂	Dióxido de azufre
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
MP	Material particulado
MP _{2.5}	Material particulado menor a 2.5 micras
ICU	Islas de calor urbanas
Km ²	Kilómetros cuadrados
°	Grados
C	Celsius
Mm	Milímetros
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
m ²	Metros cuadrados
DAPED	Departamento administrativo de defensoría del espacio público
IAF	El índice de área foliar
USDA	Departamento de agricultura de los Estados Unidos
EAAB	Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá E.S.P
'	Minutos
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
DEM	Modelo de Elevación Digital
SIG	Sistema de Información Geográfico
WMS	Web Map Service

IDECA	Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital
NCDC	National Climate Data Center
USGS	United States Geological Survey
m	Metros
n	Parámetro escala de función de poder
T_0	Transmisividad de saturación
T_d	Retardo de tiempo de zona no saturada
B	Enrutamiento de flujo subsuperficial
m^3	Metro cubico
s	Segundo
DCP	Digital cover photography
P_{mb}	Presión en milibares
h_m	Altura estación observada en metros
SLP	Presión atmosférica al nivel del mar
GUS	Ráfaga del viento.
L	Tipo de nube (baja)
M	Tipo de nube (media)
H	Tipo de nube (alta)
w	Descripciones subjetivas del observador, en mediciones anteriores distintas a la que se realizó la medición.
OMS	Organización Mundial de la Salud
μm	Micrómetro

RESUMEN

La urbanización, especialmente en América Latina, ha llevado consigo diferentes tipos de impactos sociales y ambientales en los últimos 50 años, actualmente 72% de la población en América Central, del Sur y el Caribe es urbana [1]; una acelerada y mala planificación ha producido numerosos impactos ambientales, como la reducción de la diversidad biológica, la degradación de los ecosistemas metropolitanos, los problemas de contaminación del aire y del agua, la eliminación de la vegetación y el potencial incremento de suelos inestables los cuales son tan solo algunos ejemplos de impactos derivados [2]. El presente trabajo investigativo se enfocó en simular las cantidades de flujo y los impactos observados tras el aumento o la reducción de las zonas impermeables en el recurso hídrico en la localidad de Fontibón Bogotá, con el fin de evaluar el software i-Tree hydro como una herramienta técnica y de planificación urbana, que sea de uso accesible y pertinente, dando una mirada inicial al uso del mismo en la ciudad de Bogotá. Se utilizaron datos topográficos, climatológicos e hidrológicos de la zona de estudio y bibliografía específica, con el fin de definir el escenario real en el programa (cantidades de flujo tanto en las zonas permeables, impermeables y subterráneas), para posteriormente realizar la calibración del modelo y desarrollar el planteamiento de cinco escenarios futuros, como una metodología de planificación urbana, en donde se priorizó en aumentar el porcentaje de las zonas verdes en la localidad de Fontibón, teniendo en cuenta aspectos de disponibilidad de espacio y pertinencia de los mismos, para finalmente obtener una comparación con respecto a la alteración en los volúmenes de flujo tras el aumento o la reducción de dichas zonas en la localidad. Se observó que la localidad de Fontibón es bastante susceptible a la reducción de las zonas verdes, como se observó en escenario 4 donde se redujeron totalmente las zonas permeables; por otro lado en los escenarios 2 y 3, se aumentaron las zonas permeables mediante la implementación de techos verdes como una medida que ayude a mitigar los impactos producidos por la urbanización y finalmente para el escenario 5 y 6 el aumento de la cobertura permeable debajo de los árboles resultó la mejor estrategia de mitigación del impacto de la urbanización, debido a que aumenta considerablemente el caudal de aguas subterráneas y disminuye el caudal de zonas impermeables.

Palabras claves: Ciclo urbano, flujo (dinámicas), i-Tree Hydro

ABSTRACT

The urbanization of largest cities, especially in Latin America, has produced different social and environmental impacts in the last 50 years, currently 72% of the population in Central America is urban, the reduction of biological diversity, the degradation of metropolitan ecosystems, the problems of air and water pollution, biochemical and physical changes in hydrological systems, reduction of evapotranspiration, changes in water supply, affectation to groundwater recharge, increase in peak runoff in precipitation events, the elimination of vegetation and the potential increase of unstable soils, are derived impacts. This paper focused on the moderate of flow and impact of impervious areas in the water resource in Bogotá, to evaluate the i-Tree hydro software as urban planning tool, which is accessible and pertinent, giving an initial look at the use of it in the national territory. Topographical, climatological and hydrological data of the study area and specific bibliography were used, with the end of modeling the real scenario in the program, and observe the natural dynamics of the hydric resource, and development five future scenario , as a methodology of urban planning, where priority was given to increasing the percentage of green areas in Fontibón, taking into account aspects of space availability and relevance of the same, to finally obtain a comparison with respect to the alteration in the flow volumes after the increase or reduction of green areas. Where it was observed that Fontibón is very susceptible to the reduction of the green zones, scenario 4, for scenario 2 and 3, the reduction of impervious areas was implemented as a strategy through the implementation of green roofs, as a measure that helps mitigate the impacts produced by urbanization, finally for scenario 5 and 6, permeable coverage beneath the trees resulted the best mitigation strategy of the urbanization impact, due to the fact that the water flow increases considerably underground and decreases the flow of impermeable areas.

Keywords: Urban Cycle, flow quantities, Flow (dynamics), i-Tree Hydro.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia el crecimiento urbano ha estado ligado a la pobreza, al desarrollo urbano informal y escasos de recursos económicos, creando ciudades vulnerables tanto a desastres como ha generación de emergencias [3]. Grandes concentraciones de poblaciones en pequeñas áreas reducen la calidad de vida en espacios urbanos [4], la cual se ve atada a las condiciones de confort asociadas a aspectos ecológicos, biológicos, económicos productivos, socio-culturales, tipológicos, tecnológicos y estéticos en sus dimensiones espaciales, además del producto de la interacción entre estas variables [5]. Por otro lado la Organización Mundial de la Salud establece como objetivo que cada habitante debe disponer de por lo menos 9 metros cuadrados de espacio verde, actualmente en ciudades de América Latina solo se dispone en promedio de 3.5 metros cuadrados de área verde por habitante [6], además de esto se sugiere un diseño de ciudad que incorpore una red de zonas verdes las cuales sean accesibles mínimo a 15 minutos desde cualquier tipo de vivienda [7] [8], las cuales pueden ser áreas privadas o de acceso restringido y públicas o de libre acceso [9]. Otro factor importante que se tiene en cuenta es la mala gestión del recurso hídrico en áreas urbanas y la afectación a sus dinámicas naturales, la sobre-explotación del recurso afecta de manera negativa la seguridad del mismo [10], la urbanización aumenta la vulnerabilidad de que se produzcan inundaciones e impactos en la salud relacionados con el agua [4], se debe tener en cuenta que la lluvia es el factor amenazante más importante en la generación de inundaciones, en diferentes ocasiones producen daños económicos, de bienes, tanto públicos como privados y hasta la pérdida de vidas humanas, este caso se presentó en Colombia en el año 2010 con el fenómeno de la niña y se repitió con la misma intensidad en 2011 [3], sin embargo en ocasiones el riesgo proviene del inadecuado desarrollo de asentamientos humanos y de la mala planificación urbana, una tendencia hacia el crecimiento acelerado potencializa estos problemas, esto se observa en Bogotá donde en 1973 cubría tan solo 13.985 hectáreas, pasando a 22.775 en 1985 y 32.000 hectáreas para el año 2003 [11], donde principalmente se debe a personas que buscan mejores oportunidades laborales y una mejor calidad de vida. Las estructuras urbanas como las edificaciones y la red de transporte, intervienen y en ocasiones modifican los cursos naturales del agua, afectando la geometría natural de la red de drenaje que existe en estos espacios [12], por lo tanto implementar estrategias técnicas que ayuden a planificar adecuadamente espacios urbanos son de vital importancia, tanto para prevenir algún tipo de emergencia como para mejorar la calidad de vida asociada al recurso hídrico dentro de estos espacios. Dichas estrategias en este trabajo están enfocadas en la viabilidad de aumentar zonas verdes en la localidad de Fontibón como una estrategia para mitigar los impactos ambientales producidos por la urbanización y más específicamente por las zonas impermeables.

2. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta que los modelos hidrológicos son herramientas importantes para la planificación del uso sostenible de los recursos hídricos con el fin de satisfacer demandas [13], actualmente se observa la necesidad de implementar y utilizar modelos y herramientas geoespaciales y estadísticos que integren escalas regionales, metropolitanas y urbanas hasta polígonos de observación más detallados [14], donde se muestra la necesidad de utilizar modelos climatológicos de alta resolución con representaciones heterogéneas de la superficie terrestre los cuales puedan representar los efectos de la superficie urbana con relativa precisión, [15]. Según Allen, las iniciativas de planificación y gestión ambiental a nivel urbano deben estar enfocadas en abordar cuestiones sobre la adecuada gestión de la relación entre sistemas urbanos internos y la calidad de vida de sus habitantes [16].

Con el fin de abordar en la complejidad asociada con la planificación a largo plazo, es necesario utilizar modelos urbanos integrados, los cuales sean confiables y sofisticados [17], dichos modelos integrados realizan una unión entre las corrientes de suministro y el drenaje de flujo en la gestión urbana del agua, la cual resulta en modelos enfocados en evaluar estrategias de reciclaje de agua usando una distribución más compleja de los recursos hídricos [18], los primeros trabajos sobre la estimación de los recursos hídricos en un contexto mundial, se publicaron en 1970 [19], modelos como SAWT (Soil And Water Assessment Tool), tienen en cuenta aspectos hidrológicos muy específicos, ayudando a gestionar el recurso y evaluar impactos [20], pero se ve limitado con procesos como la infiltración, ya que solo tiene en cuenta el número de curva, sin considerar la interceptación de la vegetación y la contribución de la evapotranspiración [21], otros modelos como TR-55, presenta procedimientos muy simplificados para estimar la escorrentía y la descarga máxima en pequeñas cuencas urbanas[22] [23].

Por otro lado programas como FORTRAN, desarrollado a finales de 1970 [24] y SWMM una herramienta que permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos [25], requieren numerosos parámetros de entrada, pero no proporciona una simulación adecuada de la influencia de la vegetación [26], cada modelo se diferencia por una serie de atributos únicos, principalmente en el uso potencial del modelo, resolución temporal, escala, representación de la red de captación y drenaje, generación de escorrentía, enrutamiento del flujo, gama de contaminantes, generación, transporte y tratamiento, interfaz de usuario e integración de modelos [27]. A finales del siglo XX se empezaron a desarrollar estudios para unificar los diferentes componentes de un sistema hidrológico urbano [28], estos son definidos como modelos que integren dos o más sistemas físicos [29]. Por lo tanto para este

estudio se seleccionó el programa i-tree hydro como una herramienta sofisticada que permite estimar los beneficios hidrológicos de las zonas verdes y el cual tiene en cuenta tanto parámetros hidrológicos como climatológicos.

Este trabajo se enfoca en analizar y verificar como la impermeabilización del suelo afecta la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico, por medio una modelación hidrológica con i-Tree Hydro como modelo de estudio; en Colombia factores como el desplazamiento forzado ha incrementado las tasas de migración a zonas urbanas, el 93% de la población desplazada en Colombia lo ha hecho hacia estas zonas del país; para el año 2010 se registraron 270.000 personas que son declaradas desplazadas en Bogotá [30], es por esto que, surge la necesidad de planificar adecuadamente las áreas urbanas dentro de la ciudad. Según indicadores del espacio público, en Bogotá el 4,39% del suelo urbano, corresponde a la estructura ecológica principal, con respecto a la localidad de Fontibón, esta cuenta con 8.8 metros cuadrados de espacio público verde por habitante [31], una tasa muy superior con respecto a las demás localidades de la ciudad, pero que sin embargo no alcanza lo establecido por la organización mundial de la salud, la cual establece que mínimo cada zona urbana debe disponer de por lo menos 9 metros cuadrados por habitante [6], teniendo en cuenta esto, las Unidades de Planeación Zonal UPZ, Aeropuerto El dorado, Fontibón y Fontibón San Pablo, presentan los indicadores más bajos de parques y zonas verdes por habitante con 0,25 m²/hab, 1,65 m²/hab, y 2,16 m²/hab, respectivamente, dichos problemas ambientales se ven relacionados con las actividades industriales o comerciales en áreas residenciales [32] por lo anterior i-Tree hydro representa una importante herramienta para la planificación urbana, sin embargo es necesario tener en cuenta que se debe evaluar su viabilidad técnica y su potencial aplicación.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Realizar una modelación del ciclo hidrológico urbano en la localidad de Fontibón Bogotá mediante el software i-Tree hydro como una herramienta técnica y de planificación de zonas verdes urbanas.

3.2. Objetivos específicos:

- 1.** Determinar las condiciones actuales de los componentes del ciclo hidrológico urbano en la localidad de Fontibón.
- 2.** Simular el ciclo hidrológico urbano en la localidad de Fontibón con el software I-Tree hydro.
- 3.** Plantear y desarrollar cinco escenarios futuros de cobertura del suelo para la gestión urbana en la localidad de Fontibón utilizando el software i-Tree hydro.

4. PERTINENCIA SOCIAL

Utilizar softwares computacionales que modelen las dinámicas hídricas dentro de ambientes urbanos son actualmente una de las herramientas más utilizadas en el mundo, disponer de i-Tree Hydro como un modelo que ayude a observar las dinámicas actuales del ciclo hidrológico urbano en la localidad de Fontibón Bogotá, ayudará a observar como las áreas impermeables afectan el ciclo hidrológico natural dentro de esta zona de la ciudad, teniendo en cuenta poder analizar como se ve afectada la infiltración y la escorrentía superficial, con el fin de dar respuesta a problemas de planificación y posibles escenarios futuros en donde se observen los beneficios de las zonas verdes en la localidad de Fontibón. Todo esto enfocado en prevenir situaciones de emergencia como los daños derivados de inundaciones, y aprovechar los beneficios de estas áreas verdes en ambientes urbanos, dichos beneficios se ven reflejados en diferentes retribuciones como lo es la reducción de la temperatura media del aire representada en islas de calor, donde en Bogotá se ha logrado identificar que en los últimos años las temperaturas más altas de la ciudad se condensan en las zonas predominantemente industriales ubicadas principalmente en la localidad de Fontibón y Puente Aranda [33], otro potencial beneficio es la mejora en la calidad del aire, la localidad de Fontibón según su plan ambiental local, representa la mayor problemática de emisiones de fuentes móviles en la ciudad, esto por sus principales avenidas (avenida variante, avenida calle 13, avenida calle 17 o antigua calle 22, carrera 99, carrera 100, avenida ciudad de Cali, avenida Ferrocarril de Occidente, calle 26 y avenida la esperanza) y está catalogada como una de las tres localidades del distrito con mayores índices de contaminación atmosférica [34].

Para dar respuesta a cómo utilizar i-Tree Hydro como una herramienta de planificación urbana y más específicamente de zonas verdes en ambientes urbanos se realizan dos escenarios futuros, los cuales se centran en analizar las zonas con mejor viabilidad de incorporar e incrementar zonas verdes en la localidad de Fontibón, y finalmente observar los beneficios que se derivan de las mismas. Estudios en Chicago muestran que al incrementar el arbolado de la ciudad en un 10%, se reduce el uso de energía para calefacción y refrigeración entre un 5 y 10% [35]. Una de las principales funciones de las estructuras verdes, ha sido controlar la erosión y proteger las cuencas hidrográficas, casos como el que se observa en São Paulo, donde una iniciativa gubernamental patrocinó el proyecto "SOS Manançais" el cual está trabajando con residentes pobres de la ciudad que viven a las orillas de los ríos, para proteger sus cuencas suburbanas [7], como este muchos proyectos se observan actualmente en Latino América que tienen como fin la protección del medio ambiente, el aumento en la calidad de vida de los ciudadanos residentes y la innovación de proyectos que conlleven a las llamadas "ciudades sustentables".

5. ANTECEDENTES

En la tabla 1, se observan los trabajos realizadas anteriormente usando i-tree hydro, teniendo en cuenta el autor y el país en que se desarrolló la investigación, así como los resultados directos e indirectos obtenidos usando este software, entre los que se destacan, realización del balance del ciclo hidrológico urbano para el manejo de aguas lluvia, cambio en la calidad de aguas lluvias en ambientes urbanos, contaminantes del ciclo hidrológico urbano, evaluación de los efectos de áreas urbanas, cuantificación interacción agua-árbol, simulación de picos en la tasa de descarga de tormentas, simulación de caudales, entre otros. Se observa que la mayoría de trabajos encontrados fueron realizados en Estados Unidos debido a la facilidad de disponer información hidrológica y climatológica con el formato adecuado de entrada, esto se observa como el mayor problema a la hora de utilizar el software en zonas o países internacionales, posteriormente para las demás investigaciones encontradas en la literatura, las cuales fueron realizadas en Italia y Países Bajos, estas fueron desarrolladas por autores o coautores del programa, lo que facilitaba encontrar errores en el procesador de datos que utiliza i-Tree Hydro. No se encontraron investigaciones realizadas en Latino América, por lo que utilizar este modelo en Bogotá resulta una investigación enfocada en dar una mirada preliminar a la utilidad pertinente del mismo en el contexto nacional, teniendo en cuenta disponibilidad y facilidad de formatear adecuadamente los datos de entrada. Posteriormente se observa que la mayoría de investigaciones encontradas se utilizó la herramienta con el fin de cuantificar la precipitación interceptada en el área de interés por la cobertura permeable, lo cual resulta en la principal aplicación del modelo como una herramienta de planificación, que para una ciudad como Bogotá esto facilitaría en gran medida a la toma de decisiones, por parte de entidades públicas o privadas en cuanto a la ejecución ya sea de proyectos enfocados en aumentar zonas verdes o el desarrollo de infraestructura la cual reduzca dichas zonas en la ciudad. Como una segunda aplicación se utilizó la herramienta en las investigaciones descritas en la tabla 1, para evaluar diferentes estructuras verdes, lo cual ayudaría en el contexto nacional nuevamente a la toma de decisiones por parte de entidades gubernamentales o privadas, para la ejecución de proyectos que estén a favor de implementar estructuras como los techos verdes o la agricultura urbana, comparando diferentes parámetros como el Índice de Área Foliar de diferentes especies o el porcentaje de área permeable que se encuentra debajo de los árboles.

Tabla 1. Antecedentes trabajos e investigaciones realizadas con i-Tree Hydro, elaboración propia.

Autor	País	Tipo de aplicación														
		CPI	BCH	MPAV	CC	CHU	IASH	CAL	BPP	SQA	EEAU	EEV	CIAA	SPT	SC	
[36]	Estados Unidos	X														
[37]	Italia	X	X				X									
[38]	Estados Unidos				X	X	X			X						
[39]	Estados Unidos			X									X			
[26]	Estados Unidos	X		X										X		
[40]	Estados Unidos	X					X			X	X					
[41]	Países Bajos	X	X	X					X							
[42]	Estados Unidos	X				X						X			X	
[43]	Estados Unidos	X	X	X					X			X				
[44]	Estados Unidos	X		X					X			X				

CPI: Cuantificación de la precipitación Interceptada en el Área de Interés, **BCH:** Balance del ciclo hidrológico urbano para el manejo de aguas lluvia, **MPAV:** Modelo para la Planificación de Áreas Verdes, **CC:** Cambio en la Calidad de aguas lluvias en Ambientes Urbanos, **CHU:** Contaminantes Ciclo Hidrológico Urbano, **IASH:** Impactos ambientales en superficies hídricas, **CAL:** Contaminación de aguas lluvia, **BPP:** Buenas Prácticas para la Planeación Urbana, **SQA:** Simulación Química del Agua, **EEAU:** Evaluación de los Efectos de Áreas Urbanas, **EEV:** Evaluación de estructuras verdes, **CIAA:** Cuantificación Interacción Agua-Árbol, **SPT:** Simulación de picos en la tasa de descarga de tormentas, **SC:** Simulación de caudales.

6. MARCO TEORICO

6.1. Urbanización, contexto mundial y latino americano.

Las dinámicas de los recursos naturales y las áreas urbanas, la urbanización definida como un largo proceso de reagrupación de residentes permanentes en moderadamente pequeñas áreas, que como resultado en el tiempo forman grandes metrópolis [45], mundialmente más personas viven en áreas urbanas que en áreas rurales, en las ultimas 6 décadas se ha presentado un crecimiento sumamente acelerado [46], para el año 2014, 54% de la población mundial eran residente en áreas urbanas, a diferencia de 1950, que tan solo el 30% de la población mundial era urbana, actualmente se proyecta que para 2050, 66% de la población mundial viva en este tipo de zonas, [47], desde los años 60, las grandes ciudades de América Latina se caracterizaban por un proceso de industrialización, implementando empresas en las más grandes ciudades [48], este factor influye de manera significativa en el crecimiento de la población urbana [49], además la planificación y las legislaciones aplicables, se han centrado en esta faceta del crecimiento [50], sin embargo en la medida en que las zonas urbanas se intensifican, es necesario la sostenibilidad, teniendo en cuenta una tendencia de desarrollo para las presentes y futuras generaciones [51], en los últimos 40 años se han creado organizaciones y programas enfocados en, asentamientos urbanos, ciudades que ofrezcan mejores oportunidades, que sean más seguras, con mejores sistemas de saneamiento, como las principales metas para los países en desarrollo [52], promover modelos urbanos que logren un uso eficiente de los recursos, limitando la dispersión y el uso indiscriminado del suelo, como el nuevo camino para el desarrollo urbano sostenible [53], el objetivo 11 del programa de las naciones unidas para el desarrollo PNUD, describe que este modelo incluyen también inversiones en transporte público, áreas verdes y mejorar la planificación y gestión urbana [54].

6.2. Implicaciones ambientales y sociales de la urbanización.

La urbanización es una de las acciones humanas que más altera los sistemas naturales [55], principalmente por el cambio de uso del suelo (cobertura permeable a impermeable), reemplazar la cobertura vegetal por zonas impermeables altera considerablemente los recursos naturales [56], se entiende como superficie impermeable, un tipo de material que no permite que el agua penetre a través de él [57], ejemplos claros de zonas impermeables en áreas urbanas son, caminos de asfalto, carreteras, aceras, estacionamientos, tejados de edificios, entre otros. [58].

6.2.1. Impactos hidrológicos

La fragmentación del hábitat y cambios bioquímicos y físicos en sistemas hidrológicos genera demasiados impactos ambientales importantes [59], la precipitación en forma de lluvia que cae sobre la superficie del suelo está sujeta a la evaporación y a la pérdida inicial debida a la intercepción con la vegetación [60]. En los últimos años se han desarrollado estudios hidrológicos para examinar cómo el cambio de uso del suelo, pasando de una cobertura rural a urbana (impermeable) afecta los procesos hidrológicos [61], el cual modifica considerablemente el balance hídrico [62], reduce irreversiblemente la evapotranspiración [63], presenta cambios en el suministro de agua [64], afecta la recarga de agua subterránea [65], altera los procesos hidráulicos de escorrentía [66], produce degradación de la calidad del agua [67], cambios en la demanda [68] y aumento en el pico de escorrentía en los eventos de precipitación [69] que causan desbordamiento de alcantarillados [70]. Los caudales máximos en cuencas urbanas superan entre un 30% y más de un 100% los que se reportan en cuencas menos urbanizadas o no urbanizadas [71], asimismo otro factor importante a analizar, es el transporte de contaminantes urbanos, superficies impermeables con un material de rugosidad bajo y asociado a intensas precipitaciones, favorecen considerablemente el aumento de la tasa de transporte de contaminantes [72], esto tiene un impacto perjudicial en la calidad del agua de escorrentía, debido a fuentes no puntuales, contaminantes como sólidos, metales y nutrientes son arrastrados [73].

6.2.2. Calidad del aire en grandes ciudades

La urbanización desmejora considerablemente la calidad del aire [74], en las grandes urbes la estructura energética está dominada por el enorme consumo de energía fósil, en el cual, el proceso de urbanización lleva consigo una alta demanda de transporte y construcción de infraestructura, produciendo diferentes contaminantes, como el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el material particulado (MP) [75], por otro lado la acumulación de la población y la incorporación de industrias, producen importantes riesgos ambientales [76], las emisiones atmosféricas de las principales áreas urbanas e industriales, influyen tanto en la calidad del aire como en el cambio climático en escalas locales, regionales y globales [77], diferentes estudios realizados en China muestran una relación positiva entre indicadores de urbanización y concentraciones de MP menor a $2.5 \mu\text{m}$ [78]. Una investigación realizado por Petry, Linden y Schmitt en el sur de Brasil, registro concentraciones significativamente más altas de cadmio, plomo y zinc en árboles pertenecientes a las áreas con mayor urbanización, las cuales estaban fuertemente relacionadas con la flota de vehículos y la densidad demográfica de dichos sitios [79].

6.2.3. Aumento de la temperatura en zonas urbanas

Por otro lado, se han realizado numerosas investigaciones, que corroboran que la urbanización puede tener efectos significativos sobre el clima local, los problemas más significativos en las áreas urbanas son el aumento de la temperatura del aire debido a la transformación y modificación de áreas naturales con vegetación y áreas abiertas en superficies impermeables [80], y este problema es más común en las ciudades no planificadas, se han registrado en los últimos años observaciones de temperatura más altas en ciudades, que en áreas rurales y circundantes, las cuales se han denominado como el efecto de las islas de calor urbanas ICU [81], se ha demostrado que las ICU, se producen como resultado de la introducción de superficies artificiales, como edificios, aceras, carreteras y otras infraestructuras que absorben una gran cantidad de radiación solar entrante, construidas con materiales secos e impermeables, a la par de actividades humanas que alteran radicalmente el equilibrio energético en las ciudades, como el calor liberado por vehículos, industrias, fabricas, aire acondicionado, entre otros. [82] [80], dicho aumento de la temperatura sumado con altos niveles de contaminación atmosférica asociadas a las ICU, pueden afectar la salud humana, especialmente en la incomodidad general, dificultades respiratorias, calambre de calor, agotamiento, insolación no mortal y mortalidad relacionadas con el calor [83].

6.2.4. Impactos en la superficie terrestre

Las dinámicas socio económicas actuales favorecen la conversión de tierras previamente de administración agrícola a usos urbanos y sub urbanos [84], en 2010 el total de las zonas impermeables urbanas a nivel mundial eran aproximadamente 0.6 millones de Km² (0,45% de la superficie terrestre global, sin la Antártida y Groenlandia) y ha seguido aumentando rápidamente [85] en la zonas urbanas se observa el aumento de la erosión producto del cambio de energía en el flujo, pasando de energía potencia a cinética, alterando con esto la forma del canal y los paisajes circundantes [86], la urbanización cambia los sistemas fluviales de manera más drástica que cualquier otra actividad humana individual [87]. Es por esto la necesidad de desarrollar mejores técnicas de gestión, las cuales modelen física y matemáticamente las dinámicas ambientales, con el objetivo de planificar y predecir el rendimiento de los sistemas hídricos e hidráulicos [88].

6.3. Inundaciones en Bogotá

Diferentes variables socio económicas han generado un aumento de migración de la población colombiana a la capital del país, lo que ha llevado a la ocupación acelerada y desordenada, de áreas de ladera en los cerros y en las rondas

hídricas de Bogotá. Sucesos como el ocurrido en mayo de 1996, donde se vieron afectados por las inundaciones del río Tunjuelo 300 viviendas y 1.500 habitantes de los barrios San Benito, Isla del Sol, Meissen y Abraham Lincoln [89], o en noviembre de 2011 donde se desborda el Río Bogotá, afectando la vía Chía-Bogotá restringiendo casi la totalidad de sus carriles y la salida de la ciudad en sentido norte, evidencia las debilidades al momento de afrontar inundaciones donde se resalta, la falta de cobertura de alertas tempranas, escasas inversiones en infraestructura para arreglos correctivos y de mantenimiento para afrontar otro tipo de crisis, ocupación de zonas destinadas para la protección (un ejemplo es la construcción progresiva en los cerros orientales) y deterioro paulatino de humedales existentes en la ciudad, se tiene previsto que en 10 años Bogotá no tendrá humedales [3], es por esto que se han generado diferentes estrategias conducidas a mitigar el riesgo por inundación en la capital del país, desde el punto de vista normativo, la ley 1523 de 2012, en donde se adoptó la política nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, acompañado de más de 15 decretos y leyes enfocados en gestión del riesgo, desarrollo y ordenamiento territorial y medio ambiente [3], y desde el punto de vista técnico, el diseño de cartografía enfocada en las zonas con alta amenaza de inundación, implementación de instrumentos de vigilancia como las redes de monitoreo (red hidrometeorológica de Bogotá y red de acelerógrafos de Bogotá) [89], desarrollo de modelos basados en sistemas de alerta temprana, entre otros.

6.4. Localidad de Fontibón

Fontibón como zona de estudio seleccionada se encuentra localizada en la parte noroccidental de Bogotá, en su población predomina mayor número de mujeres (52,6%) que de hombres (47,4%), el mayor porcentaje de la población de la localidad es aquella que se encuentra en el ciclo vital Adulto con el 51%, seguido por el de Juventud con el 25%, Niñez con el 15% y en último, la población de Adultos Mayores con el 9% [90] tiene una extensión total de 3.325,88 hectáreas, lo que corresponde al 3,9% de la extensión total del distrito de Bogotá y donde el 91,78% de esta corresponde a suelos urbanos, el 8,22% a suelos en expansión y el 6,8% a suelos protegidos, la localidad no tiene suelo rural, presenta una temperatura promedio anual de 14,5 °C y una precipitación promedio anual de 794 mm, con periodos lluviosos entre abril-junio y octubre-noviembre, una tendencia bimodal donde los periodos con menos lluvia y predominancia de tiempo seco son los meses de diciembre-enero y julio-agosto [34].

En Fontibón predomina la clase socioeconómica de estrato medio, donde el 47,7% de predios son de estrato 3, el 36,8% de los predios son estrato 4 y el 12,4% estrato 2. Según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Bogotá, el uso del

suelo urbano de Fontibón se divide en seis áreas de actividad, el 24,7% es dotacional (Aeropuerto el Dorado), el 20,5% corresponde a residencial, 20,9% a un suelo urbano integral, 19% es industrial, 10,3% son zonas de comercio y servicios y por último el 4,6% corresponde a suelo protegido [91].

Fontibón se ubica principalmente en una zona geomorfológica caracterizada por ser completamente plana, con inclusión de la llanura aluvial y zonas propensas a ser inundadas por desbordes, principalmente del Río Fucha, es por esto y por la presencia de lluvias en épocas de invierno que se registran una zona de inundación que abarca un área de entre el 20% y el 30% de la localidad, en donde se presenta una amenaza media (desborde del cauce calculado para el caudal de creciente de periodos de retorno entre 10 a 100 años) y alta (desborde del cauce calculado para el caudal de creciente de un periodo de retorno mayor o igual a 100 años) [90]. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial POT, en el año 2000 la ciudad contaba con 2.87 m² de área verde por habitante, del año 2001 al 2003, la oferta aumento a 3.41 m² por habitante, y para el 2005 se disponía de 4.12 m²/hab según el Departamento Administrativo de Defensoría del Espacio Público (DAPED). A pesar de los importantes avances en la capital Colombiana, ésta sigue estando por debajo del estándar internacional establecido por la Organización mundial de la salud para las ciudades en vía de desarrollo, que es 9 m² de área verde disponible por habitante.

6.5. Zonas Verdes Urbanas

Las estructuras verdes son una pieza fundamental en el diseño y planificación de ciudades sustentables, diferentes investigaciones se han encaminado a determinar el papel que juegan dichas estructuras en la mitigación de los efectos de las islas de calor, remoción de contaminantes en el aire, su influencia en el ciclo del carbono y reducción de gases de efecto invernadero [92]. La cobertura vegetal es necesaria para no sobresaturar los procesos dentro de un sistema hídrico (infiltración, escorrentía, evapotranspiración, etcétera), teniendo en cuenta que las áreas verdes urbanas son usadas como estrategias para prevenir inundaciones, debido a que aumentan la superficie permeable en una cuenca hidrológica y por lo tanto reducen las tasas de escorrentía y disminuyen los niveles máximos de las corrientes hídricas [7], además de esto, otros beneficios se han determinado por la adecuación e implementación de áreas verdes en espacios urbanos, como una mejor condición física, mejorando la salud y el bienestar de las personas que viven y trabajan en estos espacios, purificación de aire y del agua, captura del carbono, filtración del viento y el ruido y estabilización del microclima, las áreas naturales proporcionan servicios sociales y psicológicos, que son de importancia crucial para la habitabilidad de las ciudades modernas y el bienestar de los habitantes de las ciudades urbanas, entre otros [93], [94].

El índice de área foliar (IAF), es una variable utilizada para caracterizar la dinámica y productividad de los ecosistemas forestales, permite determinar la eficiencia fotosintética que la planta posee en su etapa adulta, así como la estimación del crecimiento celular de la misma [95], dicha variable se define como el área de las hojas por unidad de área de superficie del suelo [96], la capacidad de estimar el índice de área foliar, es esencial para modelar con precisión procesos fisiológicos. La cantidad de área foliar está directamente relacionada con la interceptación de contaminantes y las tasas de emisión de especies arbóreas individuales [97], además de influir en el almacenamiento de lluvia y su efecto en la reducción de la escorrentía de agua [98], también el índice de área foliar es utilizado como variable de entrada principal en las simulaciones de balance de energía en edificaciones [99].

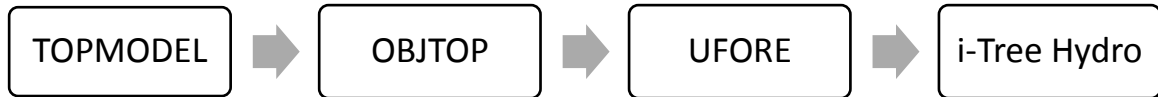
6.6. Herramienta i-Tree Hydro

El servicio forestal del departamento de agricultura de los Estados Unidos (*USDA* por sus siglas en inglés), ha desarrollado modelos computacionales, con el fin de ayudar en análisis urbanísticos, silvicultura y evaluación de beneficios, un paquete computacional llamado “*i-Tree*”, el cual ofrece diferentes softwares y herramientas que ayudan a cualquier tipo de comunidad a fortalecer esfuerzos para el manejo y defensa de los bosques urbanos, cuantificando los servicios ambientales que proporciona la cobertura vegetal y evaluando las estructuras de los bosques urbanos [100], modelos como *i-Tree Eco*, *i-Tree Streets*, *i-Tree Hydro* y *i-Tree Vue* ayudan a entender los servicios ecosistémicos locales y tangibles que proporcionan los árboles, con el fin de integrar las actividades de planificación y el manejo forestal con la calidad ambiental y la habitabilidad de la comunidad, *i-Tree* utiliza información forestal urbana, datos específicos de la zona de estudio, datos meteorológicos y mediciones de contaminantes atmosféricos, con el fin de cuantificar y valorar la estructura de los bosques urbanos y los efectos asociados a estos, como la remoción de la contaminación, la captura del dióxido de carbono, las emisiones de gases de efecto invernadero las cuales son evitadas por la implementación de estructuras verdes o cobertura de árboles, el ahorro de energía y la estimación de la reducción del agua de escorrentía pluvial [101].

Teniendo en cuenta lo anterior *i-Tree Hydro* se centra en análisis comparativos de diferentes escenarios de cobertura de suelo, y sus impactos hidrológicos a diversas escalas, utilizando una combinación de dos módulos, uno diseñado para simular cambios de flujo horario debido a fluctuaciones en la cobertura urbana (áreas impermeables vs arboles urbanos) y otro modulo enfocado en la calidad del recurso, el cual utiliza los resultados del programa base para determinar cambios en la calidad del agua, los resultados son presentados en resúmenes tabulares, así como a través de gráficos (hidrogramas o gráficos de barras) que muestran los

cambios entre el caso base, condiciones actuales según los datos de entrada y un caso alternativo especificado por el modelador [100], el modelo utiliza varios conjuntos de datos pero se resaltan principalmente los siguientes: porcentajes de cobertura de tierra, modelo de elevación digital, datos meteorológicos y de flujo, los cuales se utilizan para calibrar el modelo, comparando el flujo simulado de la corriente de la cuenca con datos de flujo real [102]. I-Tree Hydro fue desarrollado con el fin de reemplazar los modelos de escorrentía basados en número de curva con procesos basados en modelos hidrológicos, debido a esto i-Tree Hydro sigue la siguiente línea de desarrollo computacional [103]:

Ilustración 1. Línea desarrollo computacional i-Tree Hydro, elaboración propia.



Esta herramienta simula los procesos hidrológicos de precipitación, interceptación, evaporación, infiltración y escorrentía, utilizando datos climatológicos, modelos digitales de elevación, cobertura terrestre y parámetros del suelo y vegetación como datos de entrada [39], i-Tree hydro es un modelo físico semi-distribuido basado en lluvia-escorrentía, que combina conceptos de hidrología urbana y forestal basado en OBJTOP [104], el balance hídrico es simulado con ecuaciones mecánicas y el índice topográfico [105], la evaporación potencial es calculada por medio de la ecuación Penman-Monteith modificada [106], además los resultados del modelo se pueden utilizar como un informe sobre el manejo forestal urbano, la planificación urbana y el diseño para mejorar la calidad del agua y reducir el riesgo de inundación. Los resultados pueden ser utilizados para estudiar cómo varias prácticas de manejo afectan la calidad del agua, además se pueden alterar los datos de entrada de precipitación con el fin de simular tormentas de varias intensidades, el modelo se puede usar para evaluar cómo las prácticas de manejo pueden afectar las respuestas de las corrientes locales a las tormentas. Los resultados del modelo pueden utilizarse para informar a la comunidad y más específicamente a los entes encargados de la planificación y el diseño urbanísticos para ayudar a mejorar la calidad del agua y reducir el riesgo de inundaciones. [107].

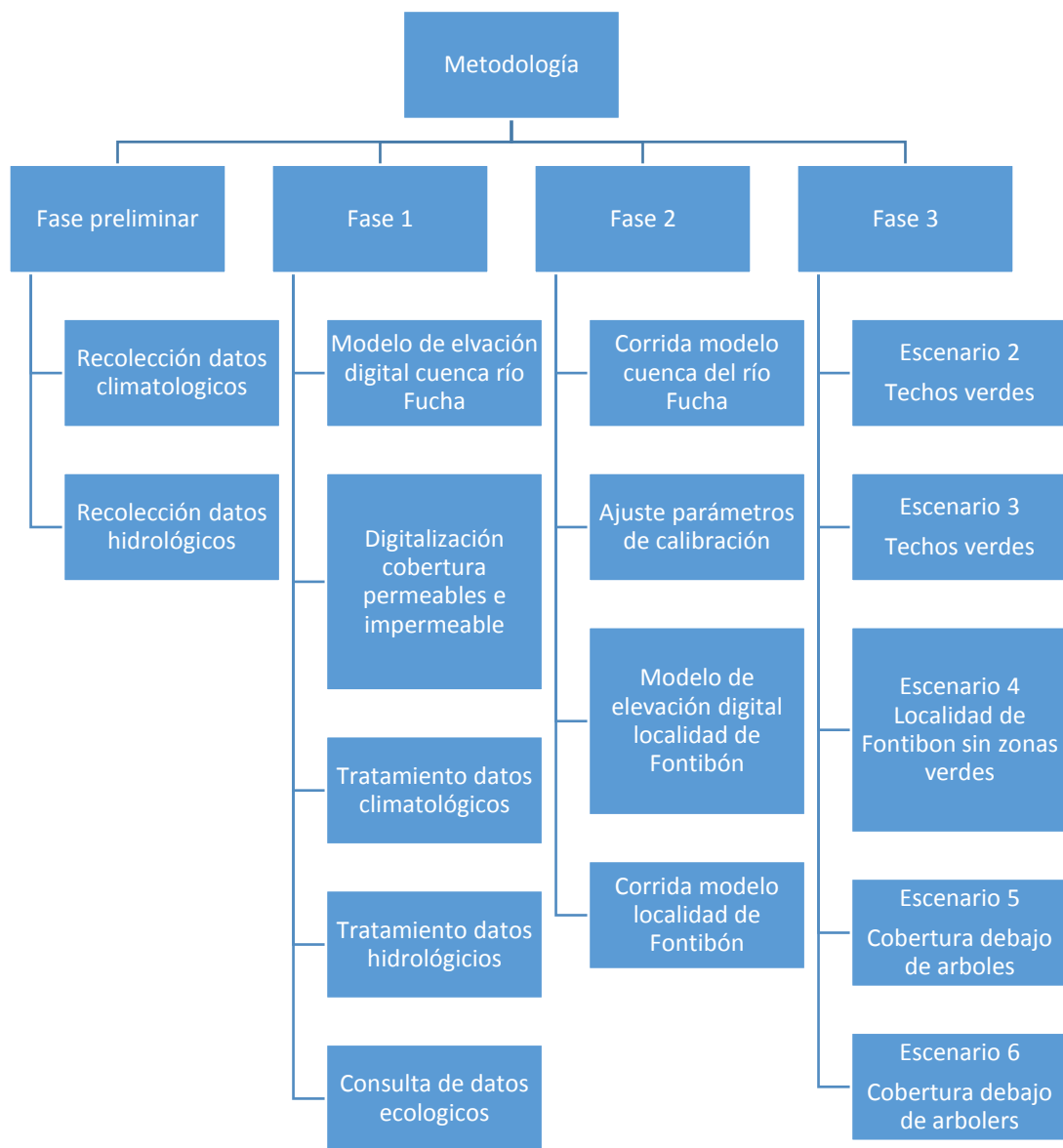
7. ALCANCE

El presente trabajo investigativo tiene un alcance de realizar la simulación del ciclo hidrológico urbano en la localidad de Fontibón como zona de estudio, esta se encuentra localizada en la parte noroccidental de Bogotá, al norte limita con la localidad de Engativá; al oriente con las localidades de Puente Aranda y Teusaquillo; al occidente con la ribera del río Bogotá y los municipios de Funza y Mosquera y al sur con la localidad de Kennedy [108], donde los datos de entrada y de salida estuvieron limitados a la extensión geográfica que se delimitó en el programa (localidad de Fontibón), teniendo una escala urbana de 3.325,88 hectáreas, lo que corresponde al 3,9% de la extensión total del distrito de Bogotá [34], posteriormente para la calibración del modelo fue necesario utilizar la cuenca del río Fucha con el fin de comparar los caudales observados a la salida de la cuenca con los modelos por el programa, se plantearon cinco escenarios futuros los cuales estuvieron limitados por la extensión de la zona de estudio y consecuentemente los resultados arrojados se reflejan solamente en la localidad de Fontibón.

8. METODOLOGÍA

Para la realización de esta investigación, fue necesario dividir el proyecto en cuatro fases antes de obtener los resultados esperados, dichas fases se muestra a continuación en la ilustración 2 y se explican detalladamente en los siguientes numerales.

Ilustración 2. Metodología propuesta, elaboración propia.



Como un paso preliminar, fue necesario en la zona de estudio seleccionar una estación climatológica e hidrológica la cual fuese representativa en cuanto a las características de la cuenca del río Fucha, de la cual la localidad de Fontibón hace parte, se solicitó información de caudales diarios desde el año 2000 hasta 2007, por medio de un oficio derecho de petición para la estación hidrológica de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá E.S.P en adelante EAAB., de la estación Fontibón – río Fucha, elemento 20822 (L-017), latitud 4°40′, longitud 74°09′ con una elevación de 2585 m.s.n.m. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento ante el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales en adelante IDEAM para la estación APTO El Dorado código 21205790, latitud 4° 42′, longitud 74° 09′, elevación 2547 m.s.n.m., donde se solicitaron datos con la misma temporalidad de tiempo y con la mayor cantidad de variables meteorológicas disponibles. Con la información suministrada se procedió a organizar y obtener las variables de entrada del modelo.

8.1. Recolección de información y datos necesarios para alimentar el modelo.

Con el fin de simular el primer escenario (escenario actual) de la zona de estudio (ciclo hidrológico urbano en la localidad de Fontibón), las variables de entrada que se obtuvieron fueron las siguientes:

➤ Topografía de lugar

Fue necesario ingresar un Modelo de Elevación Digital (DEM), el cual se obtuvo por medio del satélite ALOS PALSAR, con una resolución de 30 m, donde se descargó una imagen satelital, para posteriormente delimitar la zona de estudio (cuenca del río Fucha) bajo la herramienta SIG ArcGIS, y en donde se incorpora al modelo por medio de un archivo ASCII, cambiando la extensión de .TXT a .DAT.

➤ Uso del suelo

Posteriormente se calculó el porcentaje de cobertura de árboles, arbustos, pastizales, cuerpos de agua, zonas de suelo y zonas impermeables de la cuenca del río Fucha, por medio del SIG ArcGIS y una imagen satelital de alta resolución como un dato WMS (web map service por sus siglas en ingles), ortofoto Bogotá año 2014, la cual se obtuvo de la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital IDECA.

➤ Climatología

Se obtuvieron datos horarios de las siguientes variables suministrados por el IDEAM:

- | | |
|----------------------------|---|
| ✓ Dirección del viento | ✓ Temperatura |
| ✓ Velocidad del viento | ✓ Temperatura del punto de rocío |
| ✓ Nubosidad | ✓ Presión atmosférica al nivel del mar |
| ✓ Altura del techo de nube | ✓ presión atmosférica del lugar de la zona de estudio |
| ✓ Visibilidad | ✓ Temperatura máxima |
| ✓ Tiempo actual | ✓ Temperatura mínima |
| | ✓ Precipitación (1, 6 y 24 horas) |

Posteriormente se procedió a formatear los datos, donde se corrigieron unidades (pasando del sistema internacional a unidades inglesas) y se formatearon según el estándar de archivos del National Climate Data Center (NCDC) de los Estados Unidos. No se realizó ningún tratamiento preliminar de los datos al momento de ingresarlos, teniendo en cuenta que el procesador meteorológico que utiliza i-Tree Hydro, pide que se ingrese la serie de datos horarios en los cuales pueden existir datos faltantes de cualquier variable meteorológica.

Donde para las variables de velocidad del viento, altura del techo de nube, nubosidad, temperatura del punto de rocío, ajuste de altímetría y presión atmosférica de la estación, los valores encontrados en la última marca de tiempo se usan en los procesos posteriores. Teniendo en cuenta esto, los datos faltantes se rellenan con un valor existente que se encuentre más cercano a dicho valor, por otro lado en cuanto a la precipitación total registrada en 1 hora, se usa el valor cercano más grande registrado. Se busca un valor existente en orden ascendente para los primeros registros, mientras que en orden descendente para los últimos registros. Los valores faltantes en el medio de los registros se interpolan linealmente a partir de valores registrados existentes inmediatamente antes y después del registro con el valor faltante [101].

➤ Hidrología

Respecto a la hidrología de la zona de estudio, los caudales observados en el cauce principal de la cuenca del río Fucha, fueron suministrados por parte del EAAB. Se ingresaron datos diarios desde el año 2000 hasta el año 2007, donde se acomodó el formato y se corrigieron unidades para ingresar al modelo según el estándar manejado por United States Geological Survey (USGS).

➤ Ecología

Finalmente es necesario ingresar datos específicos de la ecología del lugar, como el periodo de transición foliar en días, almacenamiento foliar específico en mm e índice de área foliar IAF para árboles, arbustos y pastizales, dichos parámetros fueron consultados en bibliografía específica y calculados por medio del modelo PEST al momento de realizar la calibración. Con respecto al IAF, se ingresaron datos de mediciones realizadas en investigaciones anteriores, para especies de árboles, arbustos y pastizales en zonas urbanas.

8.2. Simulación cuenca del río Fucha y localidad de Fontibón

Como una breve descripción de la metodología que utiliza i-Tree Hydro para realizar la simulación, este se divide en 4 pasos preliminares antes de arrojar los resultados. Inicialmente, cuando se crea un proyecto en i-Tree Hydro es necesario seleccionar si se va a trabajar una cuenca hidrográfica o una no cuenca, en caso de ser una ciudad, barrio, campus, etcétera. Se selecciona la localización del proyecto y se ingresan las características básicas de la cuenca (área en kilómetros cuadrados, porcentaje de cobertura de árboles, índice de área foliar, porcentaje cobertura de árboles y arbustos perennes y la hora y fecha en que comienza y finaliza el proyecto).

Posteriormente se ingresan los demás porcentajes de cobertura de uso del suelo (zonas impermeables, arbusto, pastizales, suelo sin vegetación y cuerpos de agua), con respecto a la cobertura impermeable se utilizó el mapa de referencia para Bogotá de diciembre de 2017 proporcionado por el IDECA, en donde se unificaron las capas de, andenes, calzadas, ciclorrutas, construcción y puentes. La calibración del modelo, se realizó ajustando 22 parámetros de calibración específicos de la zona de estudio, utilizando rutinas del modelo PEST, dichos parámetros de calibración se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de calibración i-Tree Hydro.

Parámetro	Rango	Valor por defecto
Succión humectante [m]	-	-
Contenido de humedad [m]	0.1 – 0.7	0.48
Conductividad hidráulica superficial	-	-
Profundidad de la zona de la raíz	-	-
Saturación inicial del suelo	-	-
Período de transición de hoja	0 – 30	28
Leaf on day	0 – 365	127

Leaf off day	0 – 365	280
Parámetro escala de función de poder (n)	-	2
Índice de área corteza de árbol	-	1.7
Índice de área corteza de arbusto	-	0.5
Almacenamiento en hojas [mm]	-	0.2
Almacenamiento de depresión permeable [mm]	0.1 – 3.0	1.0
Almacenamiento de depresión impermeable [mm]	0.1 – 3.0	2.5
Parámetro escala de transmisividad del suelo [m]	0.001 – 0.25	0.03
Transmisividad de saturación (T_0) $\left[\frac{m^2}{h}\right]$	0.001 – 100	0.2
Retardo de tiempo de zona no saturada (T_d) [h]	0.01 – 200	10
Porcentaje macroporo del suelo	0 – 1	0.0000001
Enrutamiento de flujo subsuperficial (B)	-	1.0
Contante de tiempo para flujo superficial (Alpha h)	-	1.0
Contante de tiempo para flujo superficial (beta h)	-	2.0
Porcentaje de la cuenca que genera exceso de infiltración de flujo superficial	0 – 100	30

Fuente: [100]

8.3. Escenarios futuros

Se definieron dos escenarios futuros en donde se aumentó (para el escenario 2 y el escenario 3) y disminuyó (para el escenario 4) la cantidad de cobertura verde en la localidad de Fontibón, teniendo en cuenta la planificación urbana de la localidad, las áreas potenciales para aumentar zonas verdes y la reducción total de dichas zonas, con el fin de poder observar los cambios que se generen si se llegan a aumentar las zonas impermeables en la localidad sin tener en cuenta las zonas permeables. Posteriormente se plantearon otros dos escenarios donde se aumentó el área permeable debajo de los árboles, con el fin de observar otra estrategia para mitigar los impactos de la urbanización (zonas impermeables). Respecto a las salidas generadas estas se muestran en la ilustración 3.

Ilustración 3. Salidas generadas i-Tree Hydro, elaboración propia.

Volumen de agua

- Flujo Total
- Componentes de flujo caso base simulado
- Flujo total caso base vs caso alternativo
- Componentes de flujo caso base vs caso alternativo

Estimación contaminantes

- Caso base
- Caso base vs caso alternativo

Flujo de agua

- Caso base
- Caso alternativo
- Caso base vs caso alternativo
- Caso alternativo - caso base

Contaminación del agua

- Caso base
- Caso alternativo
- Caso alternativo - caso base

9. DESCRIPCION DEL MODELO Y DESARROLLO CENTRAL

Al utilizar esta herramienta y al ser desarrollada por el departamento de agricultura de los estados unidos USDA por sus siglas en inglés, se identificaron características propias del programa en cuanto a los datos de entrada y de salida, teniendo en cuenta que no se disponen de datos pre-cargados por ser una zona distinta al territorio estadounidense, fue necesario disponer de datos locales y formatearlos según los criterios de entrada, como se mencionó anteriormente. Se tiene en cuenta que la modelación se divide en 2 partes, como primer lugar se debe simular la cuenca del río Fucha, con el único fin de obtener parámetros hidrológicos de calibración para posteriormente utilizarlos en la simulación de la localidad de Fontibón.

9.1. Climatología e hidrología zona de estudio

Respecto a la hidrología de la cuenca, en la ilustración 4, se puede observar un histórico de los caudales medios diarios registrados desde el año 2000 hasta 2007, en la ilustración 5 se muestran los valores registrados de temperatura en grados Centígrados. Posteriormente en la ilustración 6, se observa la precipitación horaria reportada desde el año 2000 hasta el año 2016 en la estación climatológica APTO El Dorado.

Ilustración 4. Caudales medios diarios del río Fucha, elaboración propia.

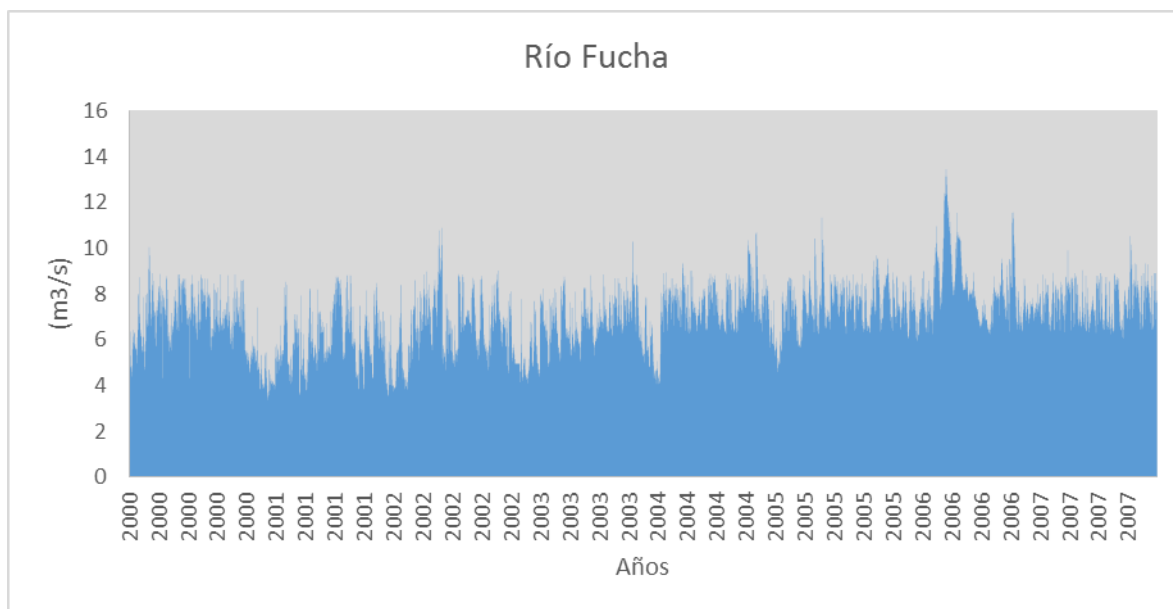


Ilustración 5. Temperatura media estación APTO El Dorado, elaboración propia.

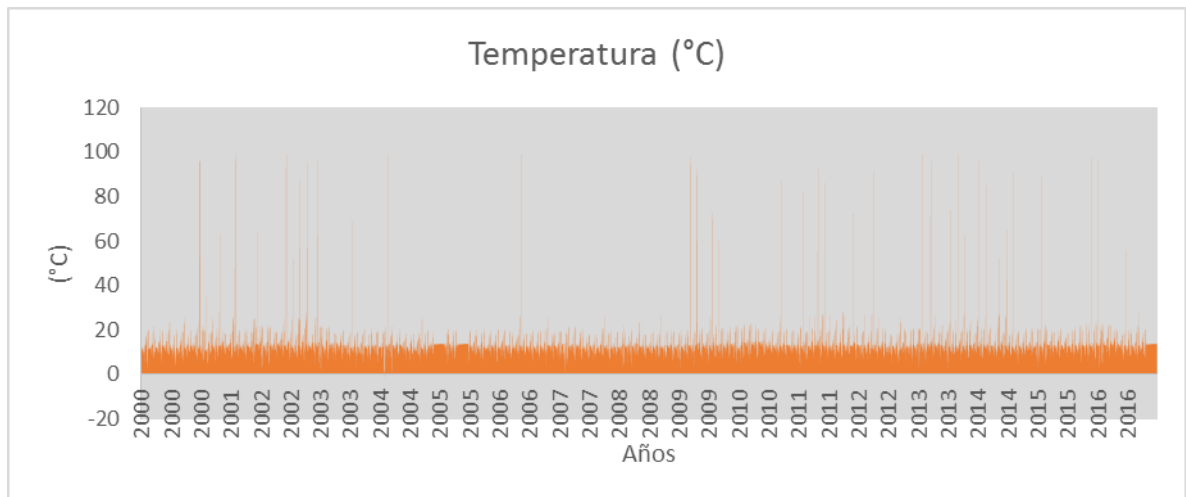
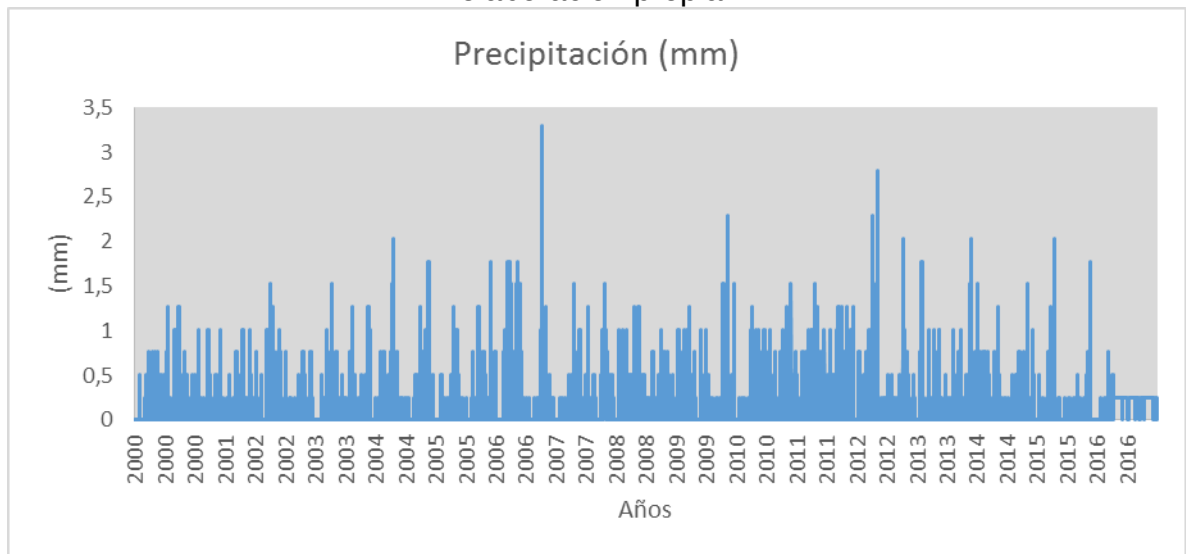


Ilustración 6. Precipitación total reportada en 1 hora, estación APTO El Dorado, elaboración propia.

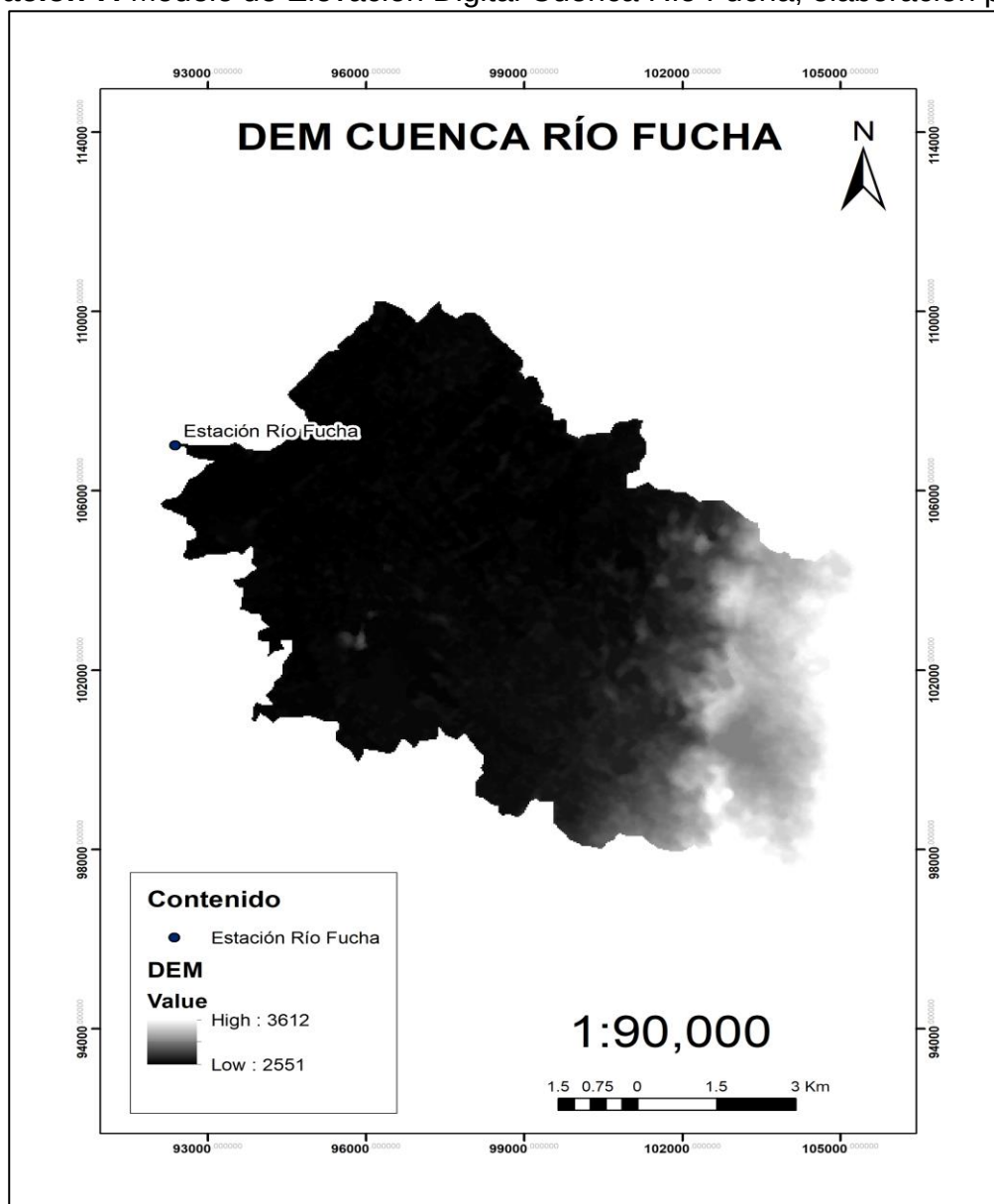


9.2. Simulación cuenca del río Fucha

9.2.1. Características físicas y ecológicas de la cuenca río Fucha

Se realizó un modelo de elevación digital de la cuenca, por medio de una imagen satelital descargada del satélite ALOS PALSAR, con resolución de 30 metros y en donde se incorpora al modelo por medio de un archivo ASCII, el cual se puede observar en la Ilustración 7.

Ilustración 7. Modelo de Elevación Digital Cuenca Río Fucha, elaboración propia.



Con respecto a las características físicas, el área de la cuenca se calcula por medio del SIG ArcGis (97.08 kilómetros cuadrados de superficie). Con relación al uso del suelo, se establece el porcentaje de árboles, arbustos, pastizales, cuerpos de agua, zonas de suelo y zonas impermeables (como se observa en la tabla 3), dichos valores de zonas permeables se obtuvieron realizando una digitalización completa de la cuenca, Ilustración 8, por otra parte para las zonas impermeables se unen datos espaciales proporcionados por el IDECA, capas de; andenes, calzadas, ciclorrutas, construcción y puentes, ilustración 9.

Ilustración 8. Cobertura permeable cuenca del río Fucha, elaboración propia.

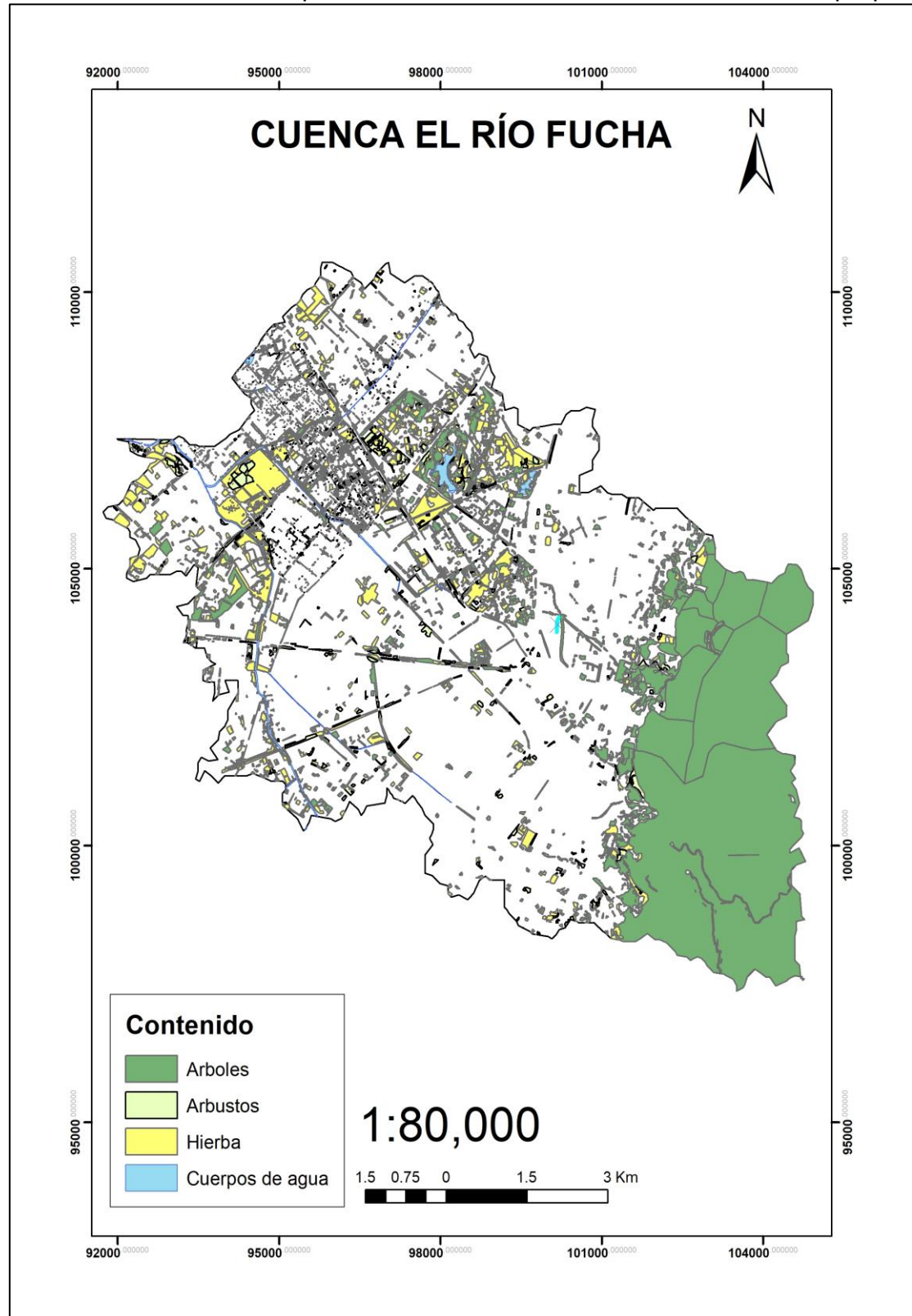
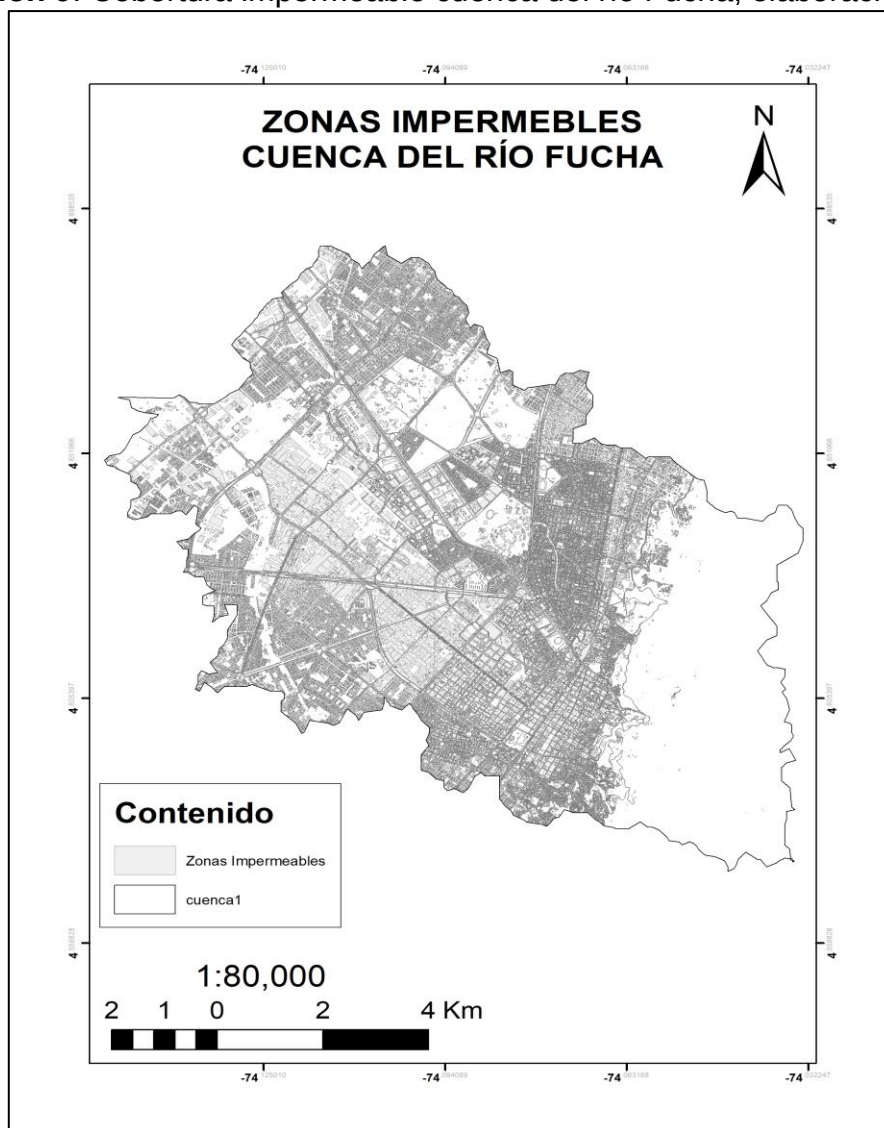


Tabla 3. Porcentaje de coberturas uso del suelo cuenca del río Fucha, elaboración propia.

Uso del suelo cuenca	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Cobertura arboles	24.93	25.6
Cobertura arbustos	1.46	1.5
Cobertura hierba	5.94	6.1
Cobertura cuerpos de aguas	0.66	0.7
Cobertura de suelo	25.50	26.3
Cobertura impermeable	38.60	39.8
Área total	97.08	100

Ilustración 9. Cobertura impermeable cuenca del río Fucha, elaboración propia.



Posteriormente con respecto a la ecología de la zona, Kimm y Ryu establecieron una serie de valores del IAF, para 10 especies de árboles urbanos que variaba de 3.1 y 4.4 en el parque forestal de Seúl, por medio de una Digital Cover Photography (DCP) [109], por lo que se establece un valor medio de IAF para árboles de 3.8. Con respecto a la vegetación más corta, arbustos y pastizales, se toma un valor de 2 y 1.2 respectivamente, teniendo en cuenta la investigación realizado por Wang, Endreny y Nowak en Baltimore, ciudad de Maryland en 2008, un estudio enfocado en evaluar los efectos de los árboles en el balance hídrico urbano utilizando UFORE-Hydro [26]. Ya para el porcentaje de árboles y arbustos perennes se tiene en cuenta que en Bogotá por ser una zona intertropical, no se presentan estaciones anuales, se observan periodos con oscilaciones de precipitaciones y temperatura (meses cálidos y meses menos cálidos) [110], por lo tanto se tomó que el 100 % de la cobertura de árboles y arbustos de la cuenca eran especies perennes, se entiende como un árbol perenne aquel que tiene hojas que persisten durante todo el año e incluyen la mayoría de las coníferas y algunos árboles de hoja ancha [111].

Por último se realizó el ajuste de altimetría por presión y altitud de la estación climatológica observada, ecuación 1, proporcionada por el National Weather Service de los Estados Unidos, donde P_{mb} es la presión en milibares de la estación APTO EL DORADO y h_m es la altura de la estación en metros.

$$(1) \text{ ALT} = (P_{mb} - 0.3) \times \left(\left(\left(1 + \left(\frac{1013.25^{0.190284} \times 0.0065}{288} \right) \times \left(\frac{h_m}{(P_{mb} - 0.3)^{0.190284}} \right) \right) \right) \right)^{\frac{1}{0.190284}}$$

Se observaron algunas dificultades con los datos proporcionados por el IDEAM, especialmente con la disponibilidad de todas las variables de la estación APTO EL DORADO; para la dirección y velocidad del viento no se tiene registro de datos desde marzo de 2005 hasta enero de 2007, con respecto a la temperatura media del aire esta no cuenta con datos desde diciembre de 2004 hasta enero de 2005 y desde mayo de 2005 hasta junio del mismo año, posteriormente para las descripciones subjetivas del observador, solo se registraron datos desde enero de 2006.

Por otro lado es necesario ingresar datos de la presión atmosférica al nivel del mar, por lo tanto se solicitó información de la estación APTO SIMON BOLIVAR código 15015050, latitud 11°07', longitud 74°13', a una elevación de 4 m.s.n.m. ciudad de Santa Marta, para dicha variable climatológica desde el año 2000 hasta

el año 2007. Por ultimo en la tabla 4 se relacionan las variables de las cuales no se tiene información horaria, para la estación APTO EL DORADO.

Tabla 4. Variables no disponibles, elaboración propia.

Variables	Descripción
GUS	Ráfaga del viento.
L	Tipo de nube (baja)
M	Tipo de nube (media)
H	Tipo de nube (alta)
w	Descripciones subjetivas del observador, en mediciones anteriores distintas a la que se realizó la medición.

Sin embargo para las variables relacionadas anteriormente en la tabla 4, a excepción de los datos de ráfaga del viento, en el archivo climatológico ejemplo que proporciona i-Tree en su página web y posteriormente en un archivo que fue solicitado al servicio técnico por correo electrónico para comparar la extensión y algunos parámetros de forma, dichas variables tampoco fueron relacionadas en los dos archivos mencionados.

9.2.2. Calibración simulación cuenca del río Fucha

Con respecto a la calibración del modelo, teniendo en cuenta que se ingresaron datos hidrológicos de la cuenca, i-Tree Hydro proporciona una opción para calibración automatizada, comparando la descarga observada con la simulación de la misma, dicha calibración se realiza por medio de un modelo independiente para la estimación de parámetros PEST, el cual es el software más avanzado disponible para la calibración de modelos ambientales y para el análisis de incertidumbre posterior a la calibración [112], PEST puede ajustar los parámetros del modelo y / o los datos de excitación para que las discrepancias entre los números generados por el modelo sean pertinentes y las mediciones correspondientes se reduzcan al mínimo [113], dicho modelo fue acoplado a i-Tree Hydro en 2005 por Doherty [26].

PEST adopta el hecho de que los sistemas ambientales son complejos, y que los parámetros y predicciones de un modelo son inciertos, el cual permite agregar individualmente limites tanto superior como inferior de cada valor para cada parámetro que se desea calibrar a lo largo del proceso de estimación de parámetros, la metodología por la cual se imponen dichos limites se basa en un algoritmo único que proporciona estabilidad al proceso de estimación de

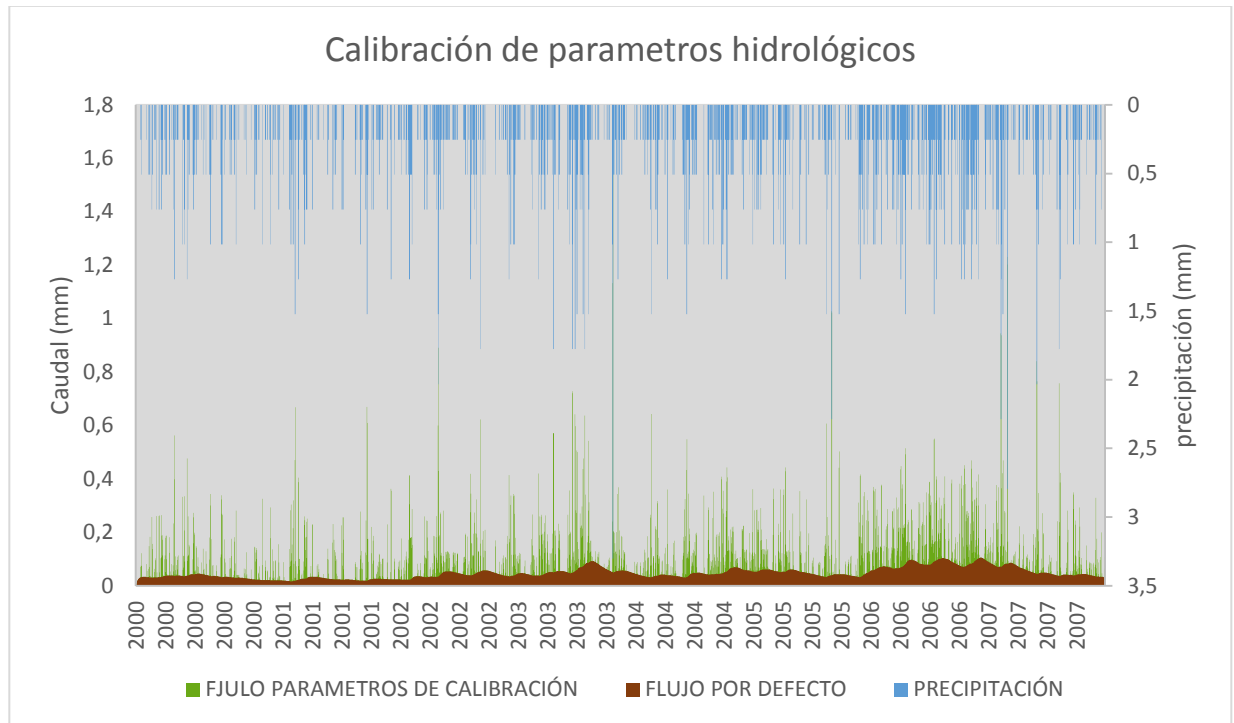
parámetros a medida que se aplican los límites [112], a diferencia de otros modelos utilizados para la estimación de parámetros, PEST opera de manera independiente con los datos de entrada y de salida, por lo tanto no se requiere programación para usar PEST al momento de calibrar el modelo [112], dicha calibración se realiza encontrando un conjunto de parámetros que represente un buen ajuste entre la descarga observada (datos hidrológicos estación río Fucha) y los datos modelados. Después de 11 series de 30 corridas de calibración cada una, se ajustan los parámetros hidrológicos, los cuales se muestran en la tabla 5, que posteriormente van a ser utilizados para simular la zona de no cuenca localidad de Fontibón.

Tabla 5. Parámetros de calibración cuenca del río Fucha, elaboración propia.

Parámetro	Valor
Succión humectante [m]	0.0305520
Contenido de humedad [m]	0.7
Conductividad hidráulica superficial	0.0454
Profundidad de la zona de la raíz	0.008015
Condición de saturación inicial del suelo (%)	100
Período de transición de hoja	28
Leaf on day	127
Leaf off day	280
Parámetro escala de función de poder (n)	2
Índice de área corteza de árbol	1.7
Índice de área corteza de arbusto	0.5
Almacenamiento en hojas [mm]	0.2
Almacenamiento de depresión permeable [mm]	0.1
Almacenamiento de depresión impermeable [mm]	0.1
Parámetro escala de transmisividad del suelo [m]	0.2561
Transmisividad de saturación (T_0) $\left[\frac{m^2}{h}\right]$	16.79221
Retardo de tiempo de zona no saturada (T_d) [h]	90
Porcentaje macroporo del suelo	0.0000001073
Enrutamiento de flujo sub superficial (B)	68.179
Contante de tiempo para flujo superficial (Alpha h)	7.55191582
Contante de tiempo para flujo superficial (beta h)	1.7527125
Porcentaje de la cuenca que genera exceso de infiltración de flujo superficial	65

En la ilustración 10, se puede observar el comportamiento del flujo con los parámetros de calibración por defecto y posteriores a la calibración realizada por PEST.

Ilustración 10. Parámetros de calibración



Con respecto a la ilustración 10, se observa como el flujo corregido por los parámetros hidrológicos calibrados (color verde), sigue una tendencia al comportamiento de la precipitación ingresada (color azul), dando una respuesta a los diferentes eventos de precipitación presentados en la cuenca, como se observa en los picos observados en la serie de tiempo, donde para intensas precipitaciones se registra un aumento del caudal, lo que no pasa con el flujo con los parámetros por defecto (color anaranjado oscuro).

9.3. Simulación localidad de Fontibón

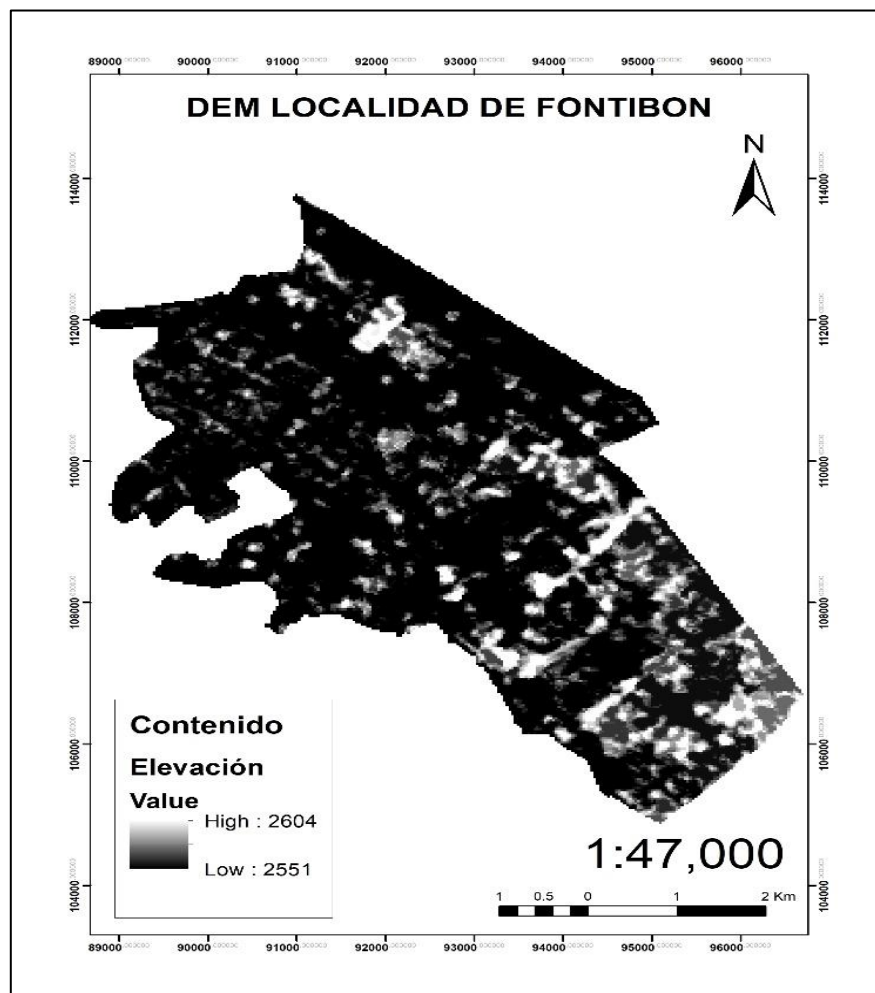
Con los parámetros de calibración obtenidos anteriormente, se procedió a realizar la simulación de la Localidad de Fontibón. Se realizó un DEM de la zona de estudio, por medio de una imagen satelital descargada del satélite ALOS PALSAR con resolución de 30 m, y en donde se incorpora al programa como un archivo

ASCII, Ilustración 11. Con respecto al área de la zona del proyecto se determinó con ayuda del SIG ArcGis, 32.281 Kilómetros cuadrados, teniendo en cuenta que la localidad de Fontibón hace parte de la cuenca baja del río Fucha, la cual había sido digitalizada anteriormente, en la tabla 6 se muestran los porcentajes del usos de suelo.

Tabla 6. Uso del suelo actual localidad de Fontibón, elaboración propia.

Uso del suelo localidad	Área Km²	Porcentaje (%)
Cobertura arboles	1.57	4.72
Cobertura arbustos	0.22	0.66
Cobertura hierba	0.24	0.71
Cobertura aguas	0.69	2.06
Cobertura de suelo	14.84	44.60
Cobertura impermeable	15.72	47.24
Área total localidad Fontibón	33.28	100

Ilustración 11. Modelo de Elevación Digital, localidad de Fontibón, elaboración propia.



En la ilustración 12 y 13, se muestra la distribución de las zonas permeables e impermeables de la localidad de Fontibón. Con respecto a los valores de la ecología de la zona de estudio, se toman los valores mencionados anteriormente, lo cuales fueron seleccionados en literatura específica. La meteorología del lugar sigue siendo la misma que se utilizó en la simulación de la cuenca del río Fucha.

Ilustración 12. Zonas permeables localidad de Fontibón, elaboración propia.

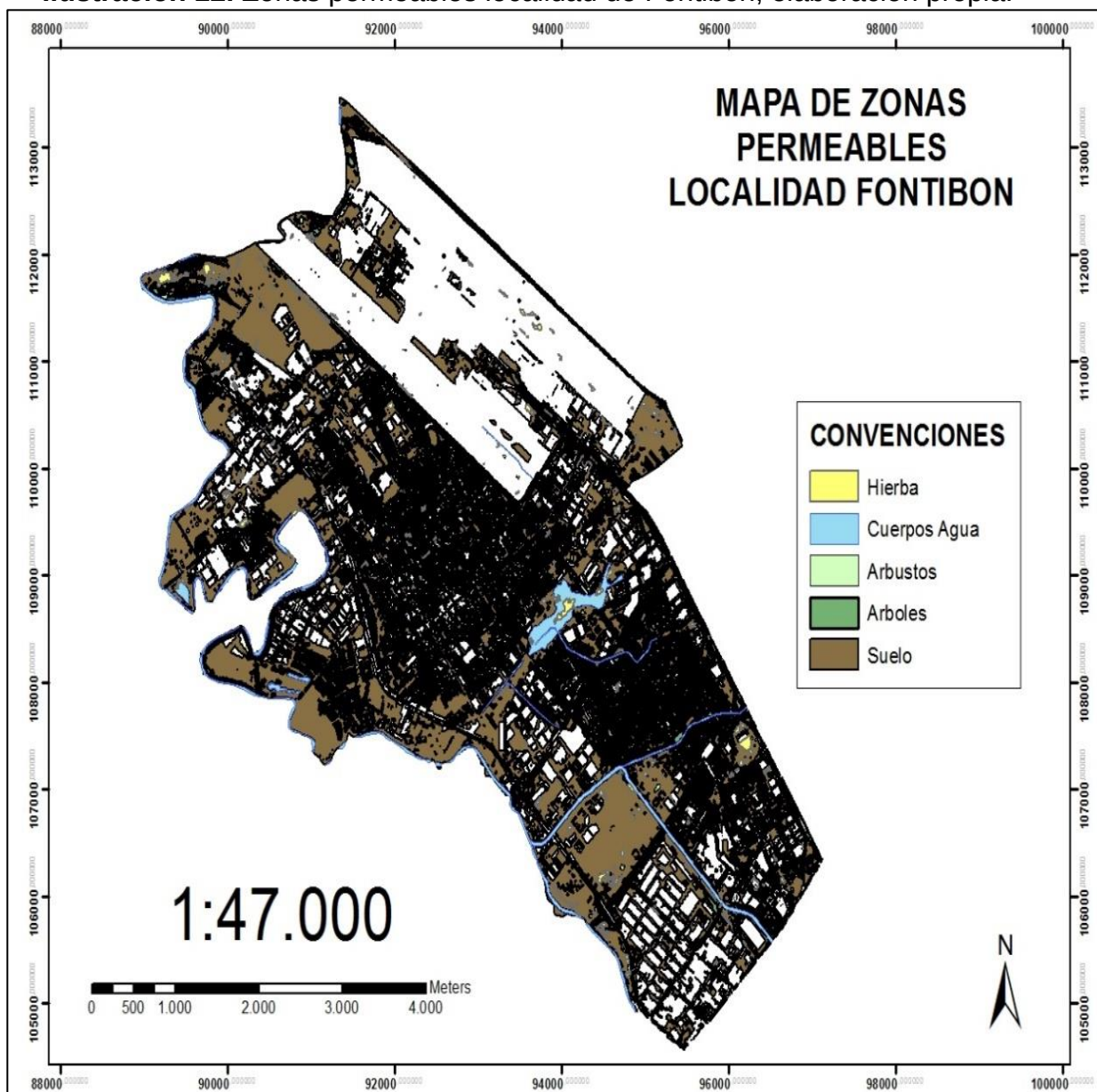
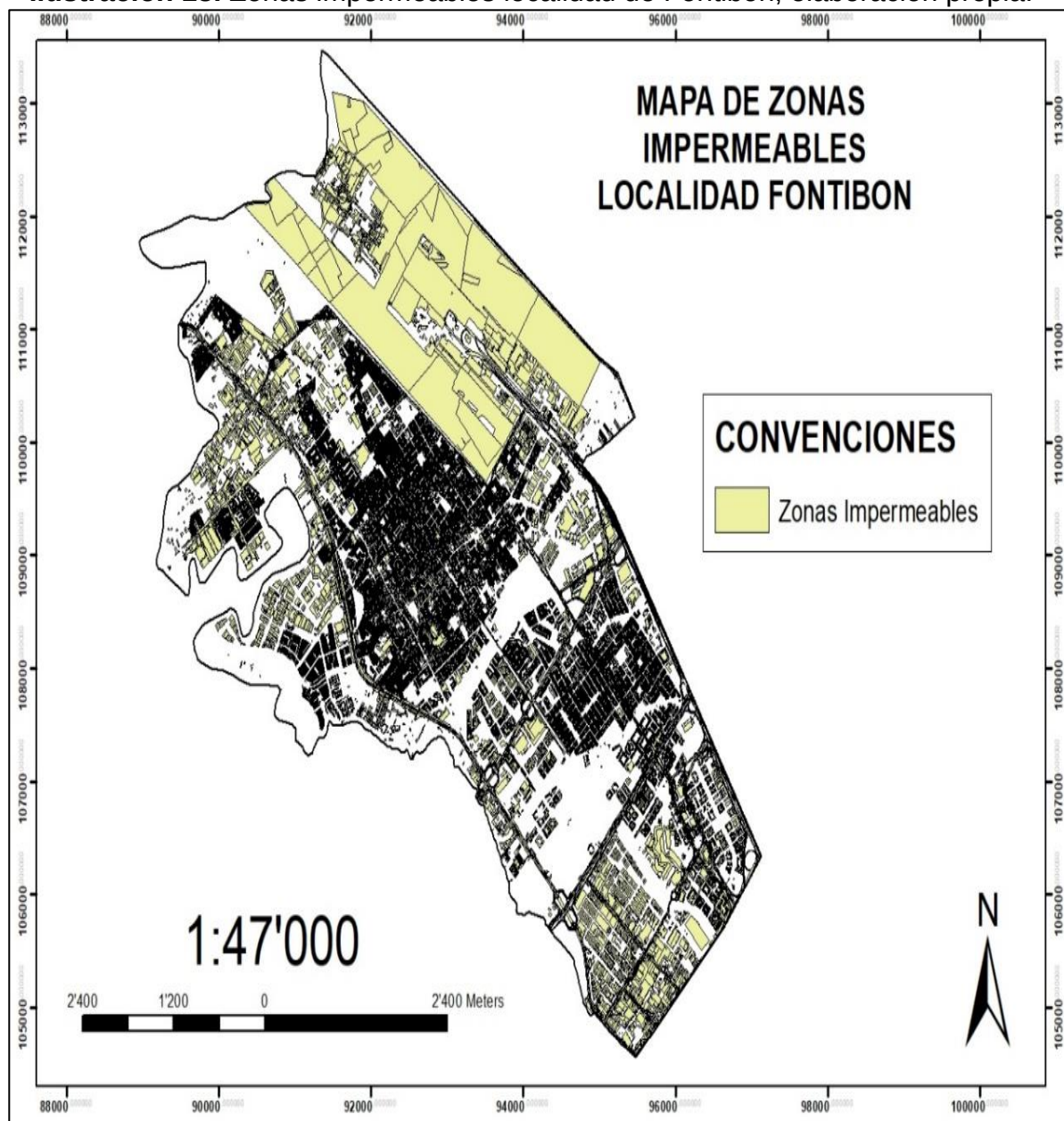


Ilustración 13. Zonas impermeables localidad de Fontibón, elaboración propia.

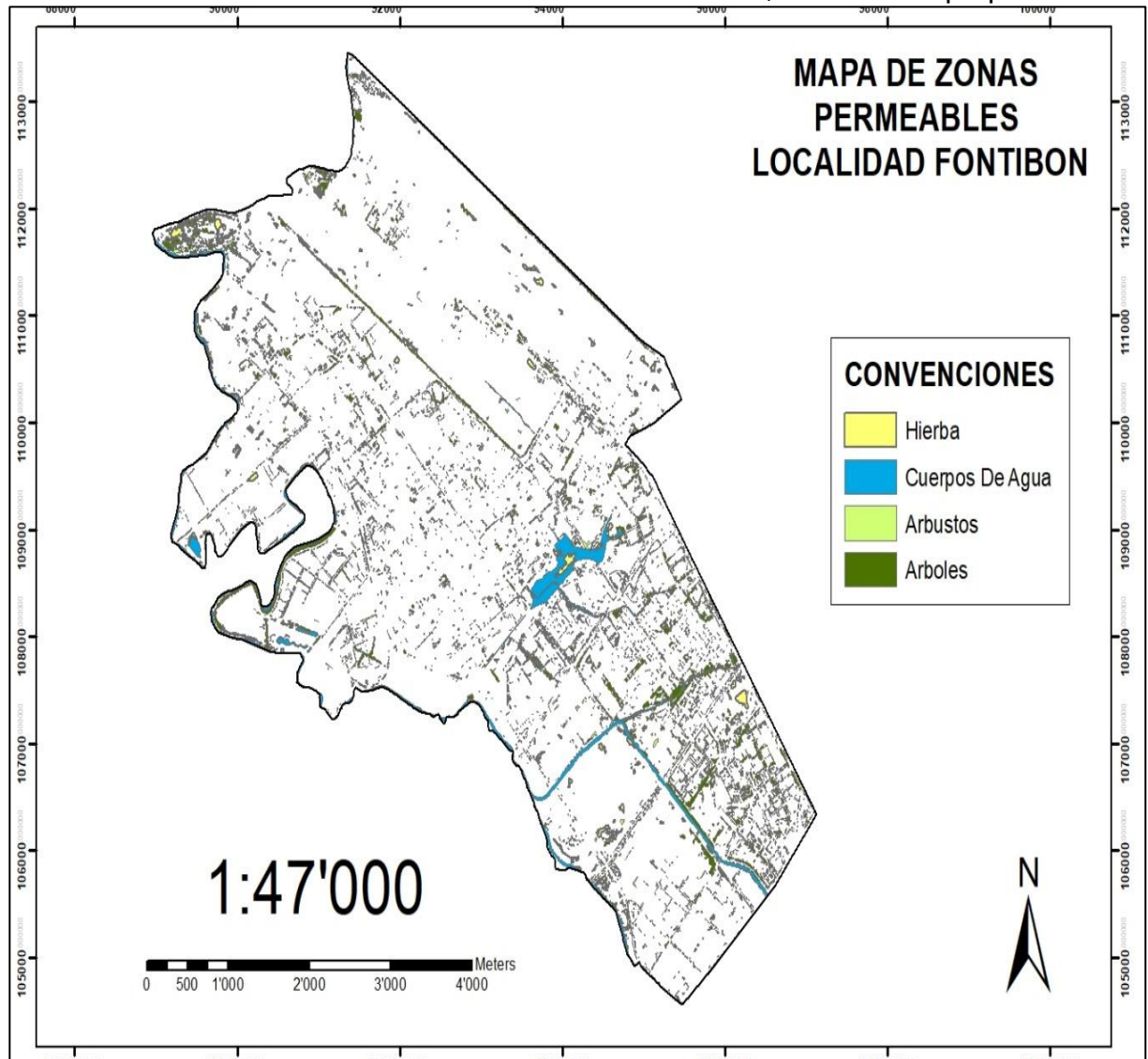


10. ESCENARIOS FUTUROS

Ya con los datos necesarios para alimentar el modelo en cuanto a las condiciones existentes (escenario 1), se procedió a formular 5 escenarios futuros en la localidad de Fontibón. El objetivo de i-Tree Hydro es mostrar como los cambios en la cantidad de cobertura de la superficie (transformar una superficie impermeable en una cubierta de árboles o cubierta de herbáceos, por ejemplo) afectan la hidrología del área de estudio, en otras palabras modelar como los diferentes escenarios de manejo afectan la hidrología de una cuenca [107]. Actualmente las ciudades van desarrollando problemas ambientales como la pérdida de áreas verdes, situación que favoreció el origen y aplicación de indicadores de calidad de vida urbana, relacionados con estas áreas, como los 9 m² de superficie verde por habitante propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [6], las cuales pueden ser áreas privadas o de acceso restringido y públicas o de libre acceso [9], por esto planificar la manera más adecuada de incorporar zonas verdes en la localidad sugiere una serie de estrategias de planificación que involucren en gran medida a la comunidad.

Según el Plan Ambiental Local de Fontibón del año 2017, la localidad contaba con 149 zonas verdes y parques, que sumaban 2 447.401,33 m², con una densidad de 8,22 m²/hab; valor muy superior al promedio distrital que es de 4,73 m²/hab, además se debe tener en cuenta que estas zonas verdes se dividen en parques diseñados para recreación activa, como las zonas verdes y de reserva ecológica para recreación pasiva, entre los que se encuentran las rondas de los ríos y los humedales. Los parques de la ciudad de Bogotá, se clasifican en siete tipos: de bolsillo, vecinales, zonales, urbanos, metropolitanos, ecológicos y regionales. Los parques de tipo ecológico representan el 45,58% de las áreas totales de parques y zonas verdes y aportan 3,71 m²/hab al indicador, los parques de tipo zonal representan el 24,07% sobre el área total y aportan 1,96 m²/hab al indicador, los parques de bolsillo y urbanos son escasos, representando sólo el 0,42% al indicador y el 11,87% sobre el total de estas áreas [32]. En la imagen 14 se puede observar la distribución de zonas verdes y los cuerpos de agua en la localidad.

Ilustración 14. Zonas verdes localidad de Fontibón, elaboración propia.



Teniendo en cuenta esto se deben seleccionar las zonas de mayor interés de incorporar zonas verdes, las Unidades de Planeación Zonal UPZ, Aeropuerto El dorado, Fontibón y Fontibón San Pablo presentan los indicadores más bajos de parques y zonas verdes por habitante con $0,25 \text{ m}^2/\text{hab}$, $1,65 \text{ m}^2/\text{hab}$, y $2,16 \text{ m}^2/\text{hab}$, respectivamente, Imagen 15 y 16, dichos indicadores tan bajos se ven relacionados con las actividades industriales o comerciales en áreas residenciales [32], es por esto que se plantearon 2 escenarios futuros enfocados en el establecimiento de zonas verdes, en dichas zonas de la localidad.

Ilustración 15. Zonas permeables UPZ localidad de Fontibón, elaboración propia.

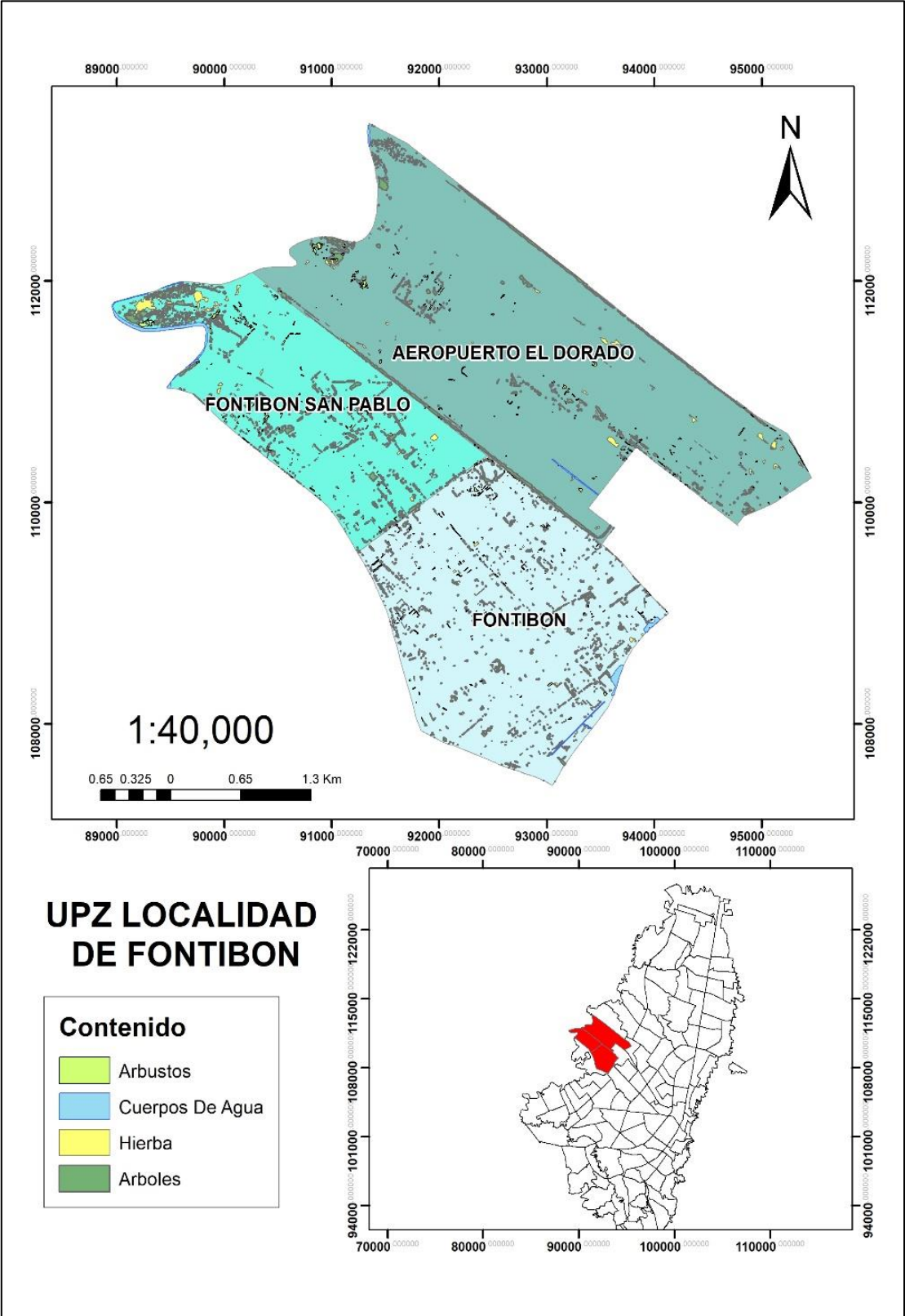
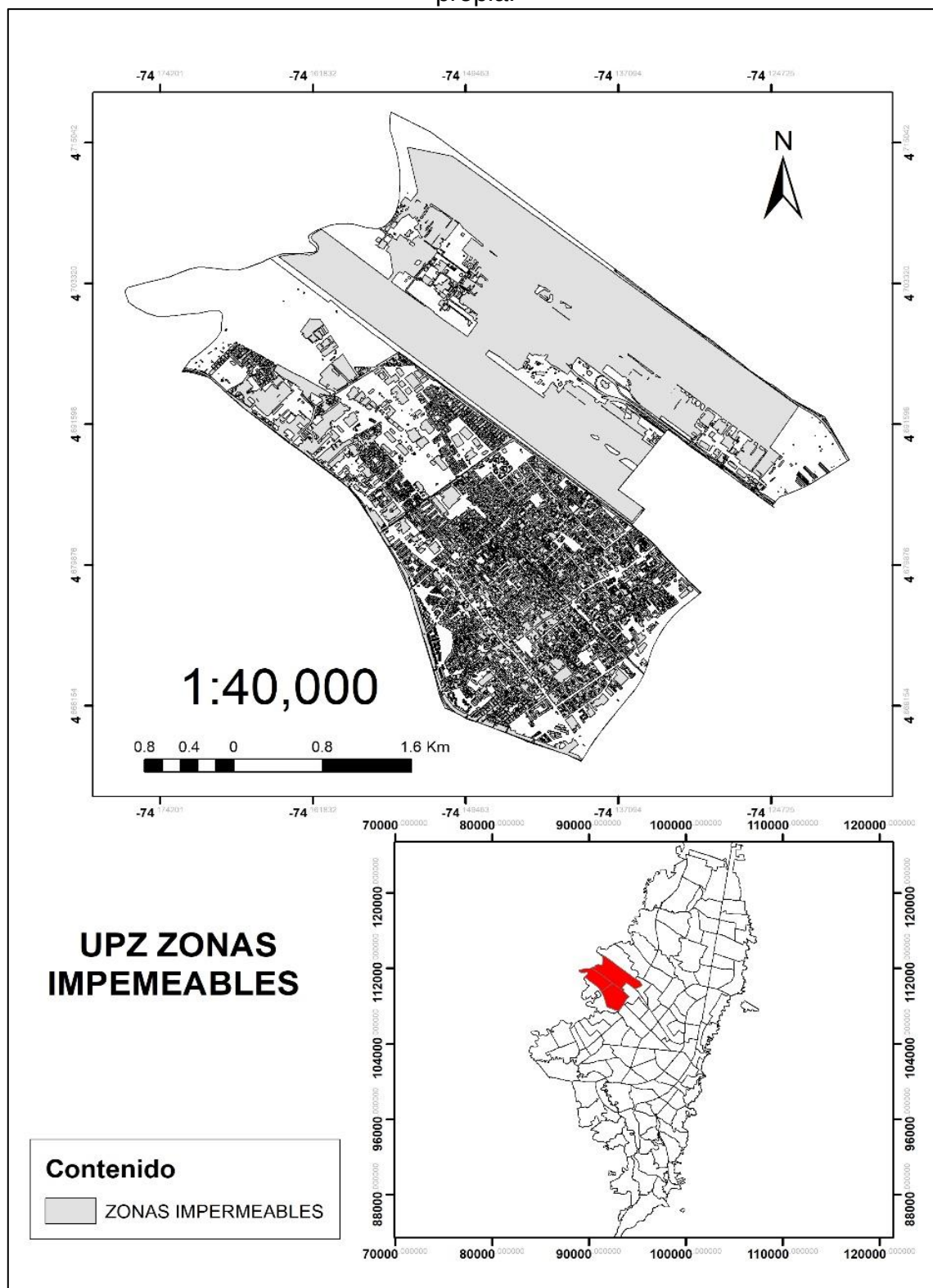


Ilustración 16. Zonas impermeables UPZ localidad de Fontibón, elaboración propia.



10.1. Escenario 2 aumento en un 20 % de zonas verdes

Como segundo escenario se planteó el aumento en un 20% de las zonas verdes existentes, más específicamente en la cobertura de arbustos como estrategia para el fomento de techos verdes, dando como resultado la codificación de la cobertura del suelo pasando de un área de 0.22 km² a 0.26 km² para la cobertura de arbustos, y de 15.72 km² a 15.68 km² de cobertura impermeable, tabla 7, dicha información se puede contrastar en la tabla 6, posteriormente se puede observar como sería la distribución de dichas zonas en la localidad en la ilustración 17.

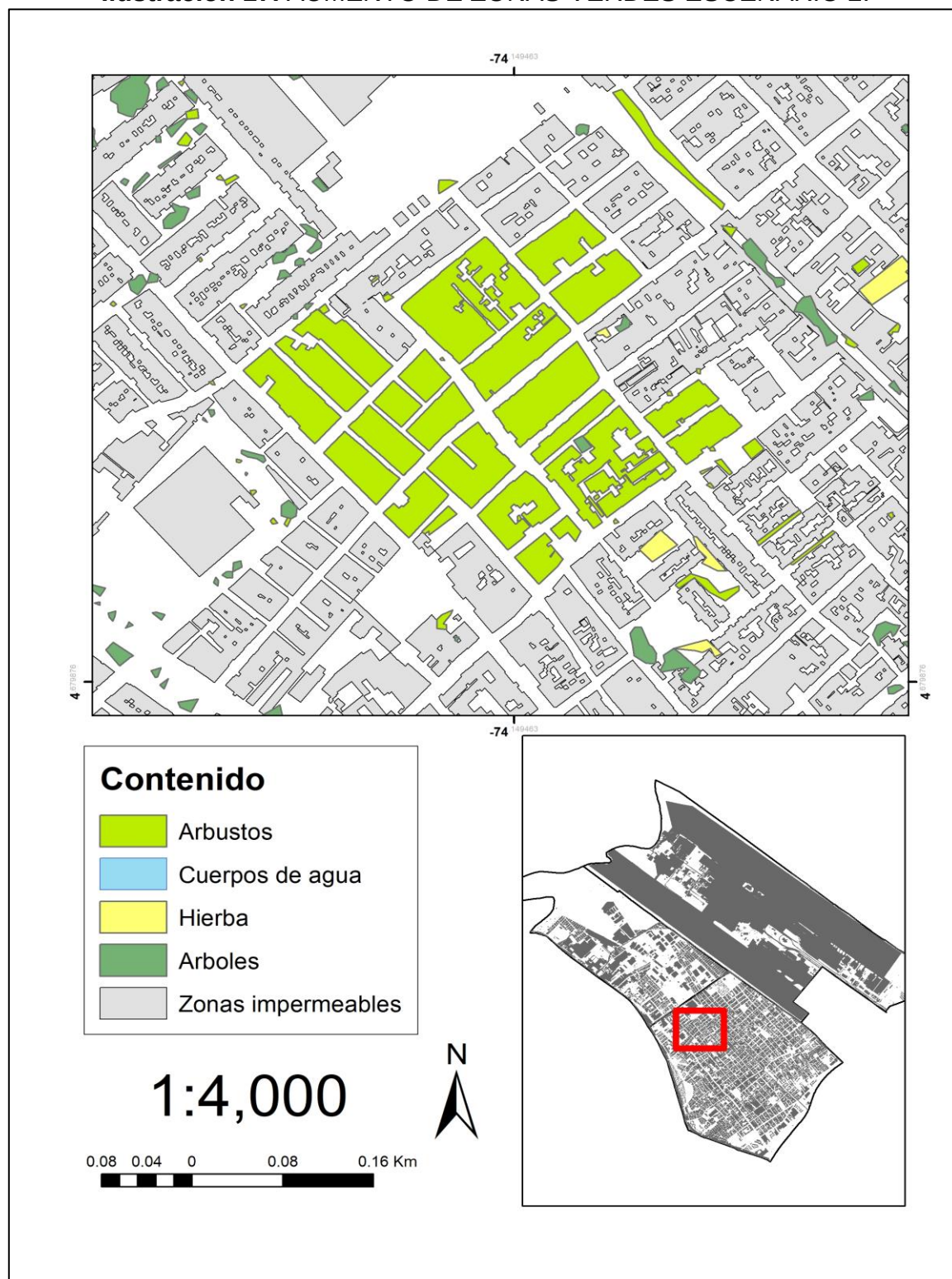
Tabla 6. Uso del suelo actual localidad de Fontibón, elaboración propia.

Uso del suelo localidad	Área Km ²	Porcentaje (%)
Cobertura arboles	1.57	4.7
Cobertura arbustos	0.22	0.7
Cobertura hierba	0.24	0.7
Cobertura aguas	0.69	2.1
Cobertura de suelo	14.84	44.6
Cobertura impermeable	15.72	47.2
Área total localidad Fontibón	33.28	100

Tabla 7. Uso del suelo escenario 2 localidad de Fontibón, elaboración propia.

Uso del suelo localidad	Área Km ²	Porcentaje (%)
Cobertura arboles	1.57	4.7
Cobertura arbustos	0.26	0.8
Cobertura hierba	0.24	0.7
Cobertura aguas	0.69	2.1
Cobertura de suelo	14.84	44.6
Cobertura impermeable	15.68	47.1
Área total localidad Fontibón	33.28	100

Ilustración 17. AUMENTO DE ZONAS VERDES ESCENARIO 2.



Realizada la simulación del ciclo urbano de agua con i-Tree Hydro en el escenario propuesto, se observó una disminución en la predicción del flujo total de 0.0192% en los 7 años con respecto al escenario base. Pese a que el cambio no es tan significativo se observaron importantes diferencias en la predicción del flujo observado en las zonas permeables, tabla 10. De la tabla 8 a la 11 se muestran las diferencias de flujo con el aumento en un 20% de las zonas verdes correspondientes a arbustos, para este escenario se tuvo en cuenta que el porcentaje de cobertura permeable e impermeable debajo de árboles correspondía a un 50% para cada uno.

Tabla 8. Predicciones de flujo, escorrentía total escenario 2, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Escorrentía total	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	52 ,770,228	52 ,760,080
Flujo máximo (m ³ /h)	68,736	68,710
Flujo medio (m ³ /h)	634	635
Número de eventos por encima del flujo medio	376	376
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	31.1	31.1
Número de eventos por debajo del flujo medio	376	376
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	31.1	31.1

Tabla 9. Predicciones de flujo subterráneo, escenario 2, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo subterráneo	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	14 ,081,680	14 ,107,924
Flujo máximo (m ³ /h)	637	639
Flujo medio (m ³ /h)	616	617
Número de eventos por encima del flujo medio	13	13
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	899.1	898.9
Número de eventos por debajo del flujo medio	14	14
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	873	873

Tabla 10. Predicciones de flujo zona permeable, escenario 2, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo permeable	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	22 ,096,595	22 ,092,694
Flujo máximo (m ³ /h)	47,585	47,598
Flujo medio (m ³ /h)	0.1	0.1
Número de eventos por encima del flujo medio	252	249
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	46.5	47.1
Número de eventos por debajo del flujo medio	252	249
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	46.4	46.9

Tabla 11. Predicciones de flujo impermeable, escenario 2, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo impermeable	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	16 ,591,953	16 ,559,462
Flujo máximo (m ³ /h)	21,352	21,311
Flujo medio (m ³ /h)	1.3	1.3
Número de eventos por encima del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	30	30
Número de eventos por debajo del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	30	30

10.2. Escenario 3 aumento en un 50% de zonas verdes

Para el tercer escenario, siguiendo con el análisis de incorporar techos verdes como medida para la reducción de zonas impermeables en la localidad de

Fontibón, se propuso el aumento de la cobertura de arbustos en un 50%, como se observa en la tabla 8, pasando de 0.22 km² a 0.33 km², y de 15.72 km² a 15.61 km² para las zonas impermeables, dicha información se puede contrastar con la tabla 6 y en la ilustración 18 donde se muestra la localización de dichas zonas en la localidad. Se tiene en cuenta que el porcentaje de cobertura impermeable y permeable debajo de los árboles se dejó con un valor de 50% para cada una.

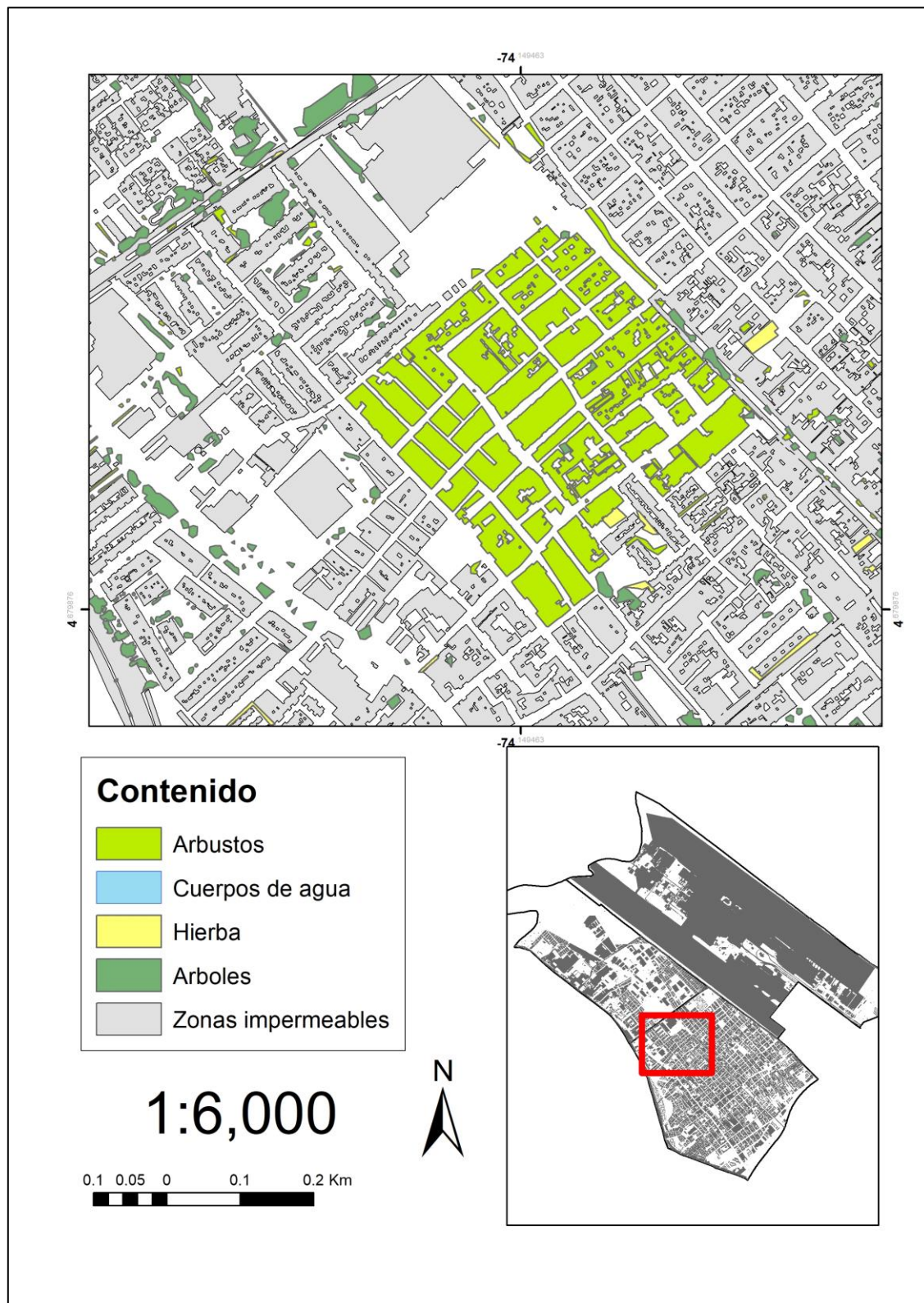
Tabla 6. Uso del suelo actual localidad de Fontibón, elaboración propia.

Uso del suelo localidad	Área Km²	Porcentaje (%)
Cobertura arboles	1.57	4.7
Cobertura arbustos	0.22	0.7
Cobertura hierba	0.24	0.7
Cobertura aguas	0.69	2.1
Cobertura de suelo	14.84	44.6
Cobertura impermeable	15.72	47.2
Área total localidad Fontibón	33.28	100

Tabla 12. Uso del suelo escenario 3 localidad de Fontibón, elaboración propia.

Uso del suelo localidad	Área Km²	Porcentaje (%)
Cobertura arboles	1.57	4.7
Cobertura arbustos	0.33	1.0
Cobertura hierba	0.24	0.7
Cobertura aguas	0.69	2.1
Cobertura de suelo	14.84	44.6
Cobertura impermeable	15.61	46.9
Área total localidad Fontibón	33.28	100

Ilustración 18. AUMENTO DE ZONAS VERDES ESCENARIO 3.



Realizada la simulación para el tercer escenario, se observó una reducción en el flujo total de 30,082 m³ (0.057%) durante el periodo de estudio, posteriormente se observó una disminución de 124,2 m³/h en la predicción del flujo máximo con la implementación de techos verdes equivalentes al aumento en un 50% de las zonas permeables correspondientes a arbustos, lo que ayudaría a amortiguar el caudal presentado en fuertes eventos de precipitación. Las predicciones de flujo observadas tanto en el escenario base como en el propuesto anteriormente se pueden observar de la tabla 13 a la 16.

Tabla 13. Predicciones de flujo, escorrentía total escenario 3, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Escorrentía total	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	52 ,770,229	52 ,740,146
Flujo máximo (m ³ /h)	68,736	68,660
Flujo medio (m ³ /h)	633	638
Número de eventos por encima del flujo medio	376	376
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	31.1	31.1
Número de eventos por debajo del flujo medio	376	376
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	31.1	31.1

Tabla 14. Predicciones de flujo subterráneo, escenario 3, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo subterráneo	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	14 ,081,680	14 ,160,462
Flujo máximo (m ³ /h)	637	641
Flujo medio (m ³ /h)	616	620
Número de eventos por encima del flujo medio	13	13
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	899	899
Número de eventos por debajo del flujo medio	14	14
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	873.1	873.2

Tabla 15. Predicciones de flujo permeable, escenario 3, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo permeable	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	22 ,096,595	22 ,085,204
Flujo máximo (m ³ /h)	47,585	47,625
Flujo medio (m ³ /h)	0.1	0.1
Número de eventos por encima del flujo medio	252	249
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	46.5	47.1
Número de eventos por debajo del flujo medio	252	249
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	46.4	46.9

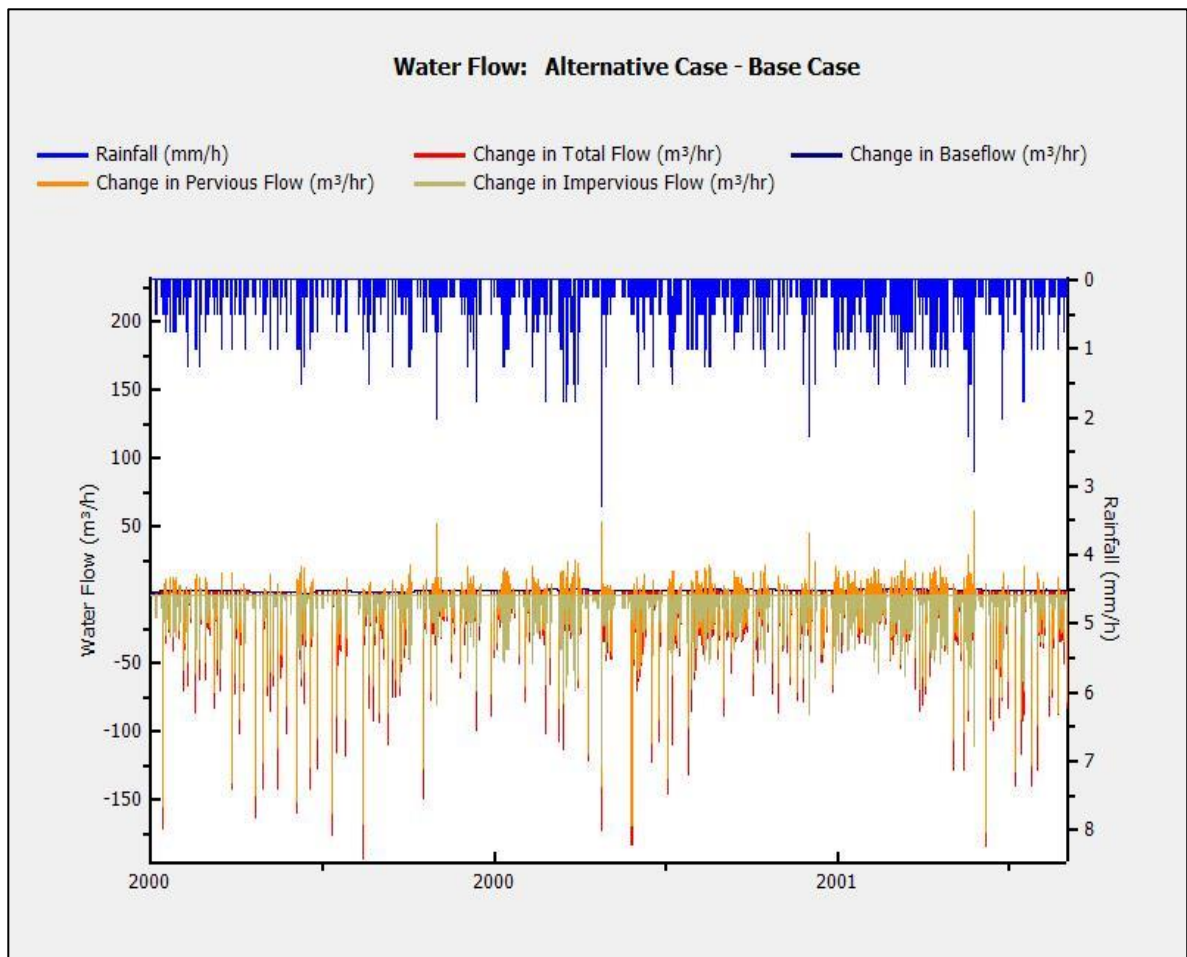
Tabla 16. Predicciones de flujo impermeable, escenario 3, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo impermeable	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	16 ,591,953	16 ,494,482
Flujo máximo (m ³ /h)	21,352	21,228
Flujo medio (m ³ /h)	1.3	1.3
Número de eventos por encima del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	30	30
Número de eventos por debajo del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	30	30

Posteriormente en la ilustración 19 se muestra la resta de los diferentes componentes del flujo (alternativo menos escenario base), donde se observan la reducción en la mayoría de los picos observados, los flujos negativos representan un contraste en la predicción de flujo con la implementación de zonas verdes escenario 3, donde la mayoría de los picos en el caso actual superan los picos simulados en el escenario 3. En color rojo, se denota una disminución en la totalidad de los picos simulados correspondientes al flujo total con el aumento en un 50% de la cobertura de arbustos, lo mismo pasa con el flujo impermeable con

una disminución en la cantidad de flujo que sobrepasa los 150 m³/h. Los picos positivos representan un aumento en el flujo simulado para las zonas permeables, lo que era de esperarse debido a que se están aumentando dichas zonas.

Ilustración 19. Caso alternativo escenario 3 menos caso base, fuente i-Tree Hydro.



10.3. Escenario 4 localidad de Fontibón sin zonas verdes

Como un cuarto escenario se propuso analizar las dinámicas del recurso hídrico en la localidad de Fontibón si se reduce totalmente las zonas verdes, como se muestra en la tabla 17, proponiendo un caso hipotético en donde la urbanización creciese de forma descontrolada cubriendo totalmente las zonas permeables de la localidad, en la tabla 6 se puede contrastar el escenario actual, posteriormente se

realizó la simulación con los parámetros hidrológicos de calibración obtenidos anteriormente en el escenario 1.

Tabla 6. Uso del suelo actual localidad de Fontibón, elaboración propia.

Uso del suelo localidad	Área Km ²	Porcentaje (%)
Cobertura arboles	1.57	4.7
Cobertura arbustos	0.22	0.7
Cobertura hierba	0.24	0.7
Cobertura aguas	0.69	2.1
Cobertura de suelo	14.84	44.6
Cobertura impermeable	15.72	47.2
Área total localidad Fontibón	33.28	100

Tabla 17. Uso del suelo escenario 4 localidad de Fontibón, elaboración propia.

Uso del suelo localidad	Área Km ²	Porcentaje (%)
Cobertura arboles	0	0.0
Cobertura arbustos	0	0.0
Cobertura hierba	0	0.0
Cobertura aguas	0.69	2.1
Cobertura de suelo	0	0.0
Cobertura impermeable	32.59	97.9
Área total localidad Fontibón	33.28	100

Realizada la simulación de las cantidades y componentes del flujo para el escenario base y el cuarto escenario (reducción de la totalidad de zonas permeables), se obtuvo un aumento del flujo total de 28, 456,934 m³ equivalente al aumento en un 54% con el escenario actual, lo que denota la vulnerabilidad de la localidad a la reducción de sus zonas verdes, pese a que el aumento de zonas verdes no es tan significativo la disminución de las mismas resulta en un impacto bastante importante. Con respecto a la predicción del flujo máximo se obtuvo un aumento en un 51% con la reducción de las zonas permeables, tabla 18. Las predicciones de las cantidades de flujo para los diferentes componentes del mismo se pueden observar en la tabla 18 y 19, se tiene en cuenta que por la reducción en la totalidad de las zonas verdes, no se obtienen predicciones de flujo para el componente subterráneo ni para el flujo permeable.

Tabla 18. Predicciones de flujo, escorrentía total escenario 4, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Escorrentía total	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	52 ,770,229	81 ,227,163
Flujo máximo (m ³ /h)	68,736	103,518
Número de eventos por encima del flujo medio	376	390
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	31.1	30
Número de eventos por debajo del flujo medio	376	390
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	31.1	30

Tabla 19. Predicciones de flujo impermeable, escenario 4, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo impermeable	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	16 ,591,953	81 ,227,163
Flujo máximo (m ³ /h)	21,352	103,518
Flujo medio (m ³ /h)	1.3	6.3
Número de eventos por encima del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	30	30
Número de eventos por debajo del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	30	30

En la ilustración 20 se observa el comportamiento del flujo total para cada uno de los escenarios (escenario 1 y escenario 4), donde se obtuvo un aumento significativo en cada una de las magnitudes del escenario 4 con respecto al escenario actual, posteriormente en la ilustración 21 se observa que el comportamiento del flujo es aportado en su totalidad por el flujo procedente de las zonas impermeables. En la ilustración 22, se muestra la resta de los diferentes componentes del flujo, caso alternativo menos el caso base, donde la totalidad de los picos correspondientes a las zonas impermeables, son positivos, esto debido a que se aumenta considerablemente dichas zonas en el escenario 4 y posteriormente los picos del flujo de zonas permeables color amarillo son negativos ya que no existen dichas zonas en este escenario y por lo tanto tampoco predicciones de flujo.

Ilustración 20. Flujo total, caso base vs caso alternativo, escenario 4, fuente i-Tree Hydro.

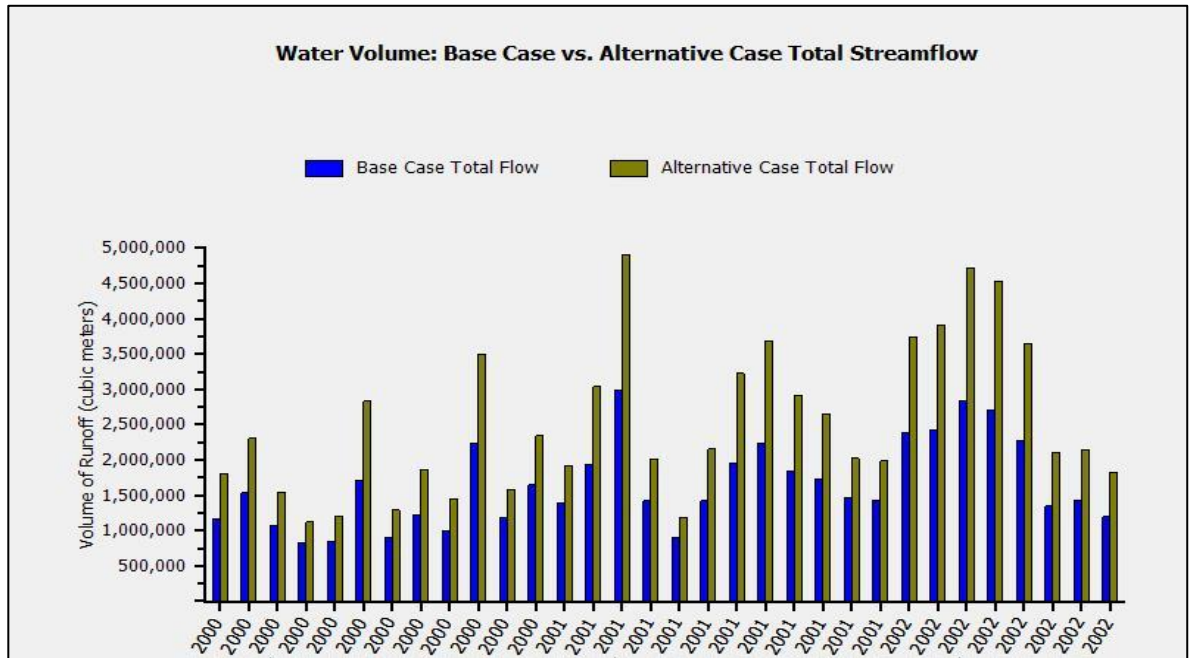


Ilustración 21. Componentes de flujo escenario base vs escenario alternativo, escenario 4, fuente i-Tree Hydro.

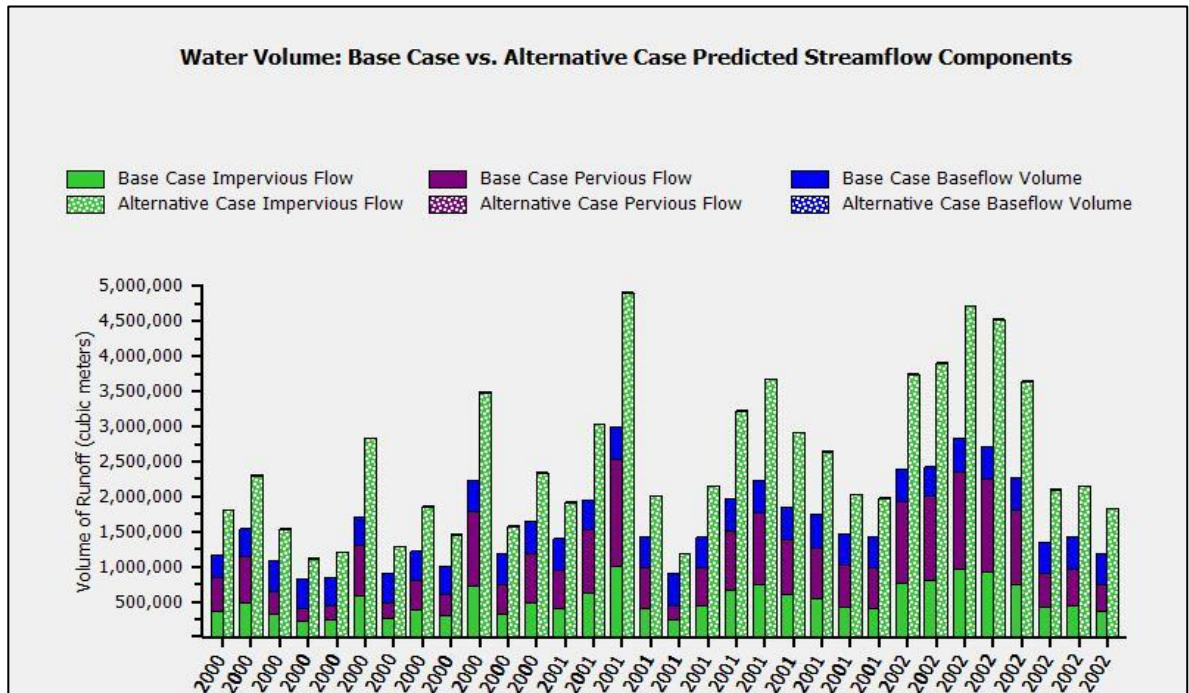
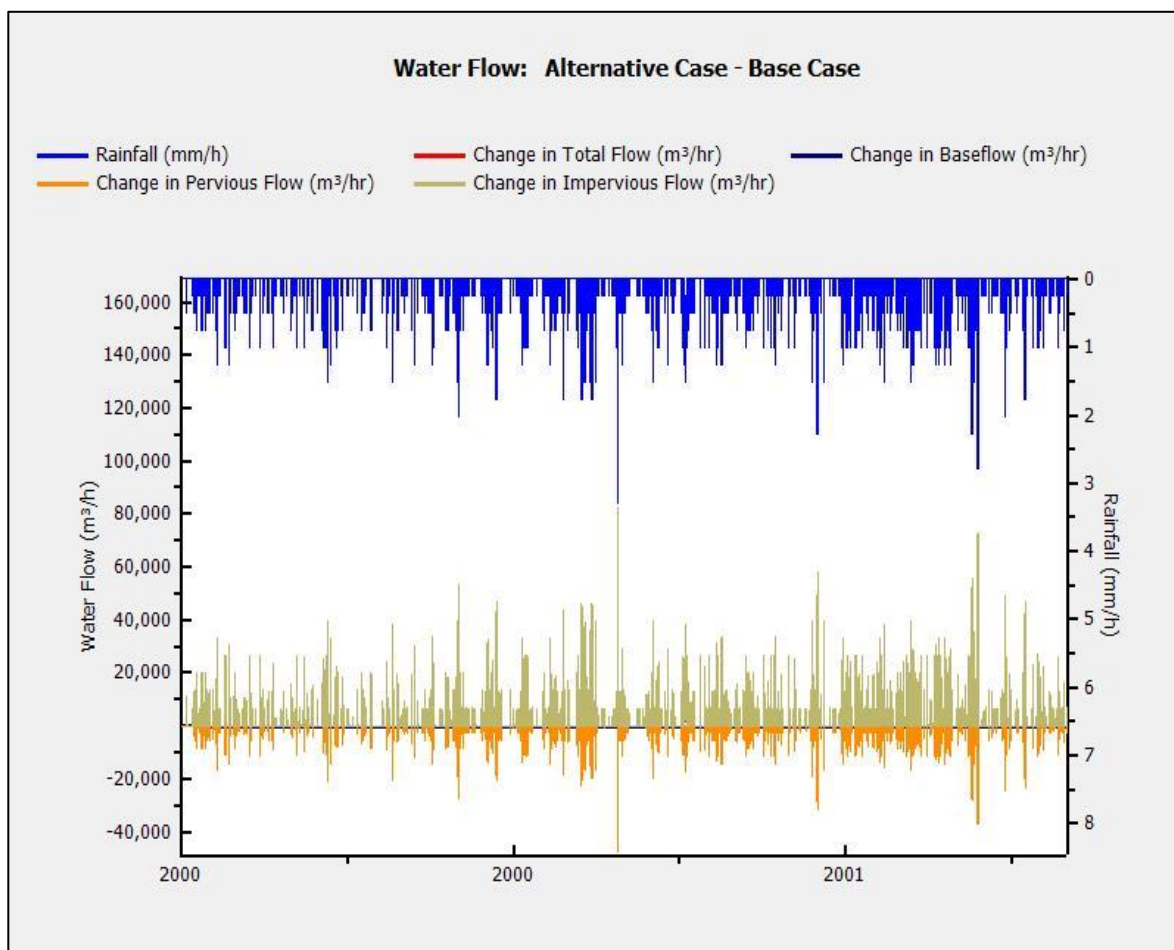


Ilustración 22. Caso alternativo escenario 4 menos caso base, fuente i-Tree Hydro.



10.4. Escenario 5 aumento del porcentaje de cobertura debajo de árboles.

Como la última parte de la investigación, se mostró como el porcentaje de cobertura debajo de los arboles afecta el ciclo hidrológico urbano, para este escenario se aumentó en un 50% la cobertura permeable, dando como resultado la codificación en un 75% área permeable debajo de árboles y un 25% área impermeable, se tiene en cuenta que no se alteró la codificación actual de las zonas verdes existentes en la localidad de Fontibón (solamente el área debajo de los arboles). Los resultados obtenidos en las predicciones de flujo se pueden observar de la tabla 20 a la 23.

Tabla 20. Predicciones de flujo, escorrentía total escenario 5, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Escorrentía total	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	52 ,770,229	52, 774,189
Flujo máximo (m ³ /h)	68,736	68,460
Flujo medio (m ³ /h)	634	649
Número de eventos por encima del flujo medio	376	375
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	31.1	31.2
Número de eventos por debajo del flujo medio	376	375
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	31.1	31.2

Tabla 21. Predicciones de flujo subterráneo, escenario 5, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo subterráneo	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	14 ,081,680	14 ,391,692
Flujo máximo (m ³ /h)	637	653
Flujo medio (m ³ /h)	616	630
Número de eventos por encima del flujo medio	13	13
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	899.1	899.1
Número de eventos por debajo del flujo medio	14	14
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	873.1	873.1

Tabla 22. Predicciones de flujo permeable, escenario 5, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo permeable	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	22 ,096,595	22 ,077,546
Flujo máximo (m ³ /h)	47,584.7	47,755.5
Flujo medio (m ³ /h)	0.1	0.0
Número de eventos por encima del flujo medio	252	245
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	46.5	47.9
Número de eventos por debajo del flujo medio	252	245
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	46.4	47.7

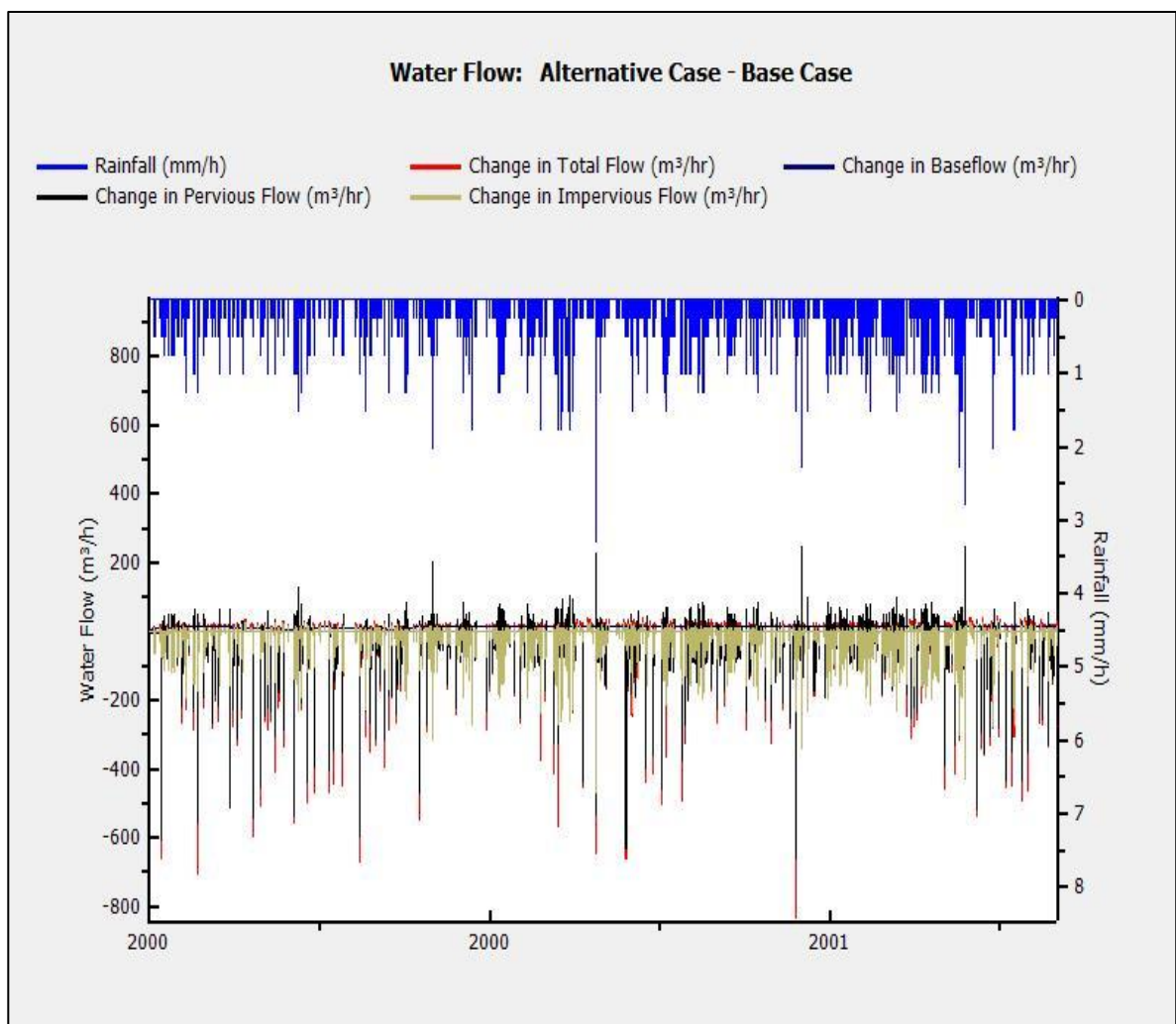
Tabla 23. Predicciones de flujo impermeable, escenario 5, elaboración propia

Predicciones de flujo	Flujo impermeable	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	16 ,591,953	16 ,304,951
Flujo máximo (m ³ /h)	21,352	20,883
Flujo medio (m ³ /h)	1.3	1.3
Número de eventos por encima del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	30	30
Número de eventos por debajo del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	30	30

Se observó una reducción en el flujo total de 3,960 m³ lo que equivale al 0.008% del flujo total observado en el escenario actual y una disminución en el flujo máximo de 275.2 m³/h. Posteriormente con respecto al flujo subterráneo el impacto fue más significativo con un aumento de 310,013 m³ (aumento del 2.2 %

con respecto al escenario actual), lo que deriva en un aumento significativo en la recarga de aguas subterráneas y procesos de infiltración dentro de la localidad. Otro resultado importante a destacar es el cambio en el flujo impermeable con la reducción de $287,002 \text{ m}^3$, lo que deriva en una alternativa para mitigar el impacto de la urbanización en la localidad de Fontibón con excelentes resultados, en la ilustración 23 se observa como la mayoría de los picos de flujo en el escenario 5 son superados por el escenario base, se muestra que la totalidad de los picos simulados en las zonas impermeables son mayores en el escenario base, con una reducción de la cantidad de flujo por la implementación de dicha estrategia de más de $700 \text{ m}^3/\text{h}$, al igual que en el escenario 3, los flujos permeables son mayores en el escenario alternativo, esto porque se está aumentando el área de dichas zonas.

Ilustración 23. Caso alternativo escenario 5 menos caso base, fuente i-Tree Hydro.



10.5. Escenario 6 aumento del porcentaje de cobertura debajo de árboles.

Buscando indagar más al respecto, sobre los beneficios de aumentar las zonas permeables debajo de los árboles, en este escenario se planteó el aumento en un 100% de la cobertura permeable, de la tabla 24 a la 27 se observan los resultados arrojados con respecto a las predicciones de flujo.

Tabla 24. Predicciones de flujo, escorrentía total, escenario 6, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Escorrentía total	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	52 ,684,253	52 ,682,949
Flujo máximo (m ³ /h)	68,729	68,200
Flujo medio (m ³ /h)	630	660
Número de eventos por encima del flujo medio	374	376
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	31.3	31.1
Número de eventos por debajo del flujo medio	374	376
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	31.2	31.1

Tabla 25. Predicciones de flujo subterráneo, escenario 6, elaboración propia

Predicciones de flujo	Flujo subterráneo	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	13 ,995,703	14 ,606,655
Flujo máximo (m ³ /h)	636	667
Flujo medio (m ³ /h)	612	640
Número de eventos por encima del flujo medio	14	13
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	835	899
Número de eventos por debajo del flujo medio	14	15
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	873	874

Tabla 26. Predicciones de flujo permeable, escenario 6, elaboración propia.

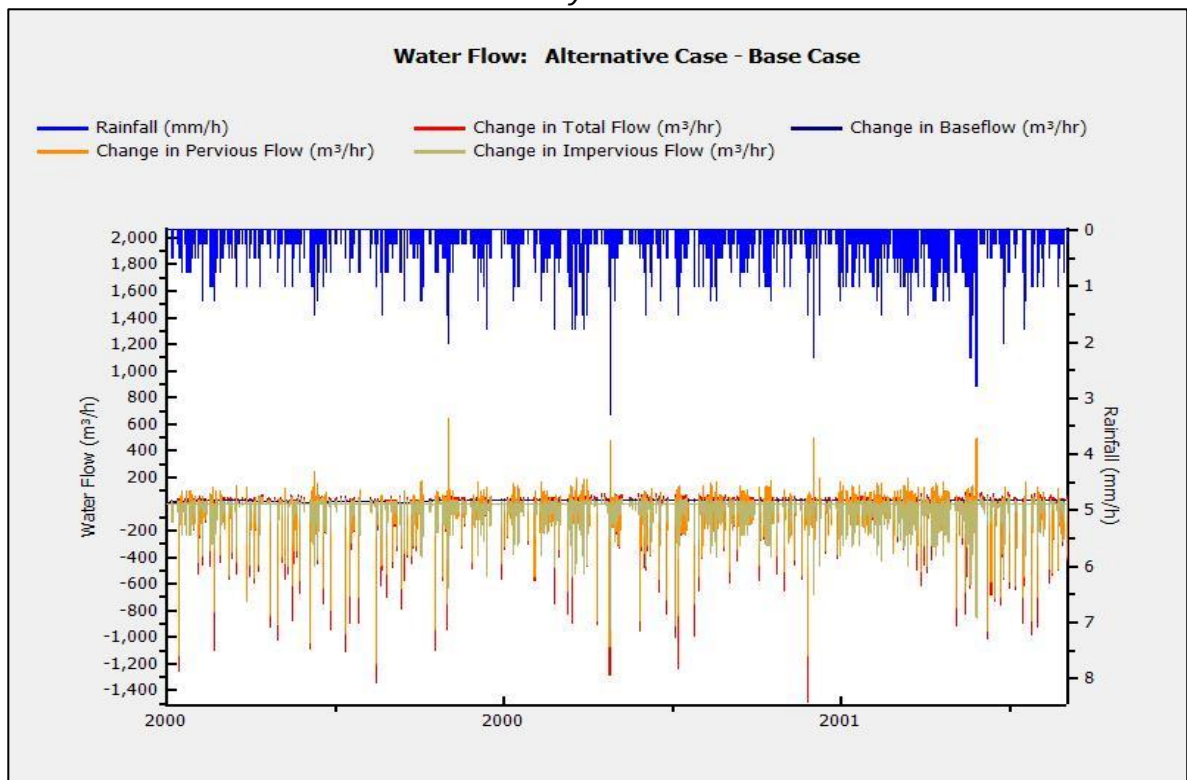
Predicciones de flujo	Flujo permeable	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	22 ,096,595	22 ,058,297
Flujo máximo (m ³ /h)	47,585	47,948
Flujo medio (m ³ /h)	0.1	0.0
Número de eventos por encima del flujo medio	252	241
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	46.5	48.7
Número de eventos por debajo del flujo medio	252	241
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	46.4	48.5

Tabla 27. Predicciones de flujo impermeable, escenario 6, elaboración propia.

Predicciones de flujo	Flujo impermeable	
	Base	Alternativo
Flujo total (m ³)	16 ,591,953	16 ,017,996
Flujo máximo (m ³ /h)	21,352	20,414
Flujo medio (m ³ /h)	1.3	1.2
Número de eventos por encima del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por encima del flujo medio (h)	30	30
Número de eventos por debajo del flujo medio	390	390
Duración promedio de eventos por debajo del flujo medio (h)	30	30

Se observó una reducción en la predicción del flujo máximo total reportado de 528.5 m³/h. Con respecto a los componentes de flujo, el flujo subterráneo aumento 610,951 m³ (flujo total con respecto al escenario base), el flujo medio y flujo máximo subterráneo también aumentaron con respecto al escenario 1. Para el flujo impermeable se observaron las reducciones de flujo más significativos tanto en el flujo total como en el máximo y en el medio, con una reducción del 3, 4 y 8% respectivamente. En la ilustración 24 se muestra la resta de los diferentes componentes de flujo (escenario 6 menos escenario base), se observa que la mayoría de los picos resultaron negativos, lo que quiere decir una reducción de flujo por el aumento de las zonas permeables existentes debajo de los árboles, los picos positivos indican que en el escenario 6 fueron mayores las predicciones de flujo con respecto al escenario base, se observa que dichos picos positivos se ajustan con los observados en los eventos de precipitaciones máximas y los cuales corresponde al flujo permeable, lo que puede inferir que la presencia de las precipitaciones máximas, las zonas permeables se pueden ver afectadas por la colmatación del suelo lo que aumentaría los picos modelados, además que se está aumentando el área de las zonas permeables, lo que deriva en un aumento en la predicción de flujo para dichas zonas.

Ilustración 24. Caso alternativo escenario 6 menos caso base, fuente i-Tree Hydro.



11. IMPACTO SOCIAL

Utilizar softwares computacionales que modelen las dinámicas hídricas dentro de ambientes urbanos son actualmente una de las herramientas más utilizadas en el mundo, utilizar i-Tree Hydro como una herramienta que ayude a observar las dinámicas actuales del ciclo hidrológico urbano en la localidad de Fontibón Bogotá, ayudo a observar como las áreas impermeables afectan el ciclo hidrológico natural dentro de esta zona de la ciudad, teniendo en cuenta que se analizó como se ve afectada la infiltración y la escorrentía superficial, con el fin de dar repuesta a problemas de planificación y posibles escenarios futuros en donde se observen los beneficios de las zonas verdes en la localidad de Fontibón. Todo esto enfocado en prevenir situaciones de emergencia como los daños derivados de inundaciones, y aprovechar los beneficios de estas áreas verdes en ambientes urbanos, dichos beneficios se ven reflejados en diferentes retribuciones como lo es la reducción de la temperatura media del aire representada en islas de calor, donde en Bogotá se ha logrado identificar que en los últimos años las temperaturas más altas de la ciudad se condensan en las zonas predominantemente industriales ubicadas principalmente en la localidad de Fontibón y Puente Aranda [33], otro potencial beneficio es la mejora en la calidad del aire, la localidad de Fontibón según su plan ambiental local, representa la mayor problemática de emisiones de fuentes móviles en la ciudad, esto por sus principales avenidas (avenida variante, avenida calle 13, avenida calle 17 o antigua calle 22, carrera 99, carrera 100, avenida ciudad de Cali, avenida Ferrocarril de Occidente, calle 26 y avenida la esperanza) y está catalogada como una de las tres localidades del distrito con mayores índices de contaminación atmosférica [34].

12. CONCLUSIONES

La implementación de estrategias que ayuden a reducir los impactos producidos por la urbanización a gran escala, principalmente por la impermeabilización del suelo, la cual afecta de manera considerable las dinámicas naturales del ciclo hidrológico, es de vital importancia para mejorar la calidad de vida de las personas que habitan en dichos lugares, teniendo en cuenta que reducen los caudales picos producidos en intensas precipitaciones, tanto en el flujo máximo como en el flujo total reportado, además de aumentar el caudal de zonas subterráneas debido al aumento de la infiltración y el flujo de las zonas permeables como los descritos en el escenario 2 y 3, por otro lado según la literatura investigada dichas estrategias también mejoran la calidad del aire, reduce la temperatura del aire que se produce por el almacenamiento de la radiación en zonas impermeables y mejora la calidad del agua de escorrentía. Posteriormente se observa la vulnerabilidad que presenta la localidad de Fontibón por la reducción de sus zonas verdes existentes (escenario 4), donde se presentó un aumento de más del 50 % tanto para el flujo total como para el caudal máximo de escorrentía, pese a que el aumento de zonas verdes no es tan significativo la disminución de las mismas resulta en un impacto bastante importante. En cuanto a la cobertura permeable debajo de los árboles resulto la mejor estrategia de mitigación del impacto de la urbanización, debido a que aumenta considerablemente el caudal de aguas subterráneas y disminuye el caudal de zonas impermeables (escenario 6), por lo tanto para fomentar estrategias de planeación de zonas verdes en la localidad se debe tener en cuenta que la incorporación de dichas zonas especialmente de zonas arbóreas se debe realizar con el 100% de cobertura permeable debajo de los mismos para optimizar los beneficios hidrológicos.

Por último el software i-Tree hydro, presenta un potencial muy alto para futuras investigaciones con respecto a estimar y cuantificar los beneficios hidrológicos de las estructuras y zonas verdes en ambientes urbanos, es una herramienta bastante útil para planificar zonas urbanas y especialmente para cuantificar los beneficios de los árboles y las zonas permeables, finalmente se observa la facilidad de indagar en diferentes escenarios, como la implementación de proyectos que reduzcan considerablemente porcentajes de zonas permeables en ambientes urbanos o la respuesta de una zona específica a intensas precipitaciones, modificando los datos de entrada del modelo. Por otro lado i-Tree Hydro se muestra como una herramienta compleja en cuanto a los datos de entrada pero que sintetiza de forma muy sencilla la aplicación de diferentes escenarios alternativos, sin embargo es necesario profundizar en la mayor disponibilidad de datos, lo cual para esta investigación existieron discrepancias entre los datos de flujo proporcionados por la EAAB y los datos climatológicos proporcionados por el IDEAM.

13.RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones se debe seleccionar cuidadosamente tanto la estación climatológica como hidrológica a utilizar, se recomiendan estaciones automáticas las cuales dispongan de datos horarios con la mayor cantidad de variables climatológicas.
- Disponer de la mayor cantidad de datos tomados en campo para la entrada del modelo disminuye considerablemente la incertidumbre de los datos de salida, se sugiere fomentar los estudios respecto a la estimación del índice de área foliar para árboles, arbusto y pastizales en zonas urbanas del país.
- Con respecto a los datos climatológicos e hidrológicos de entrada, se recomienda revisar cuidadosamente la temporalidad de los mismos, ya que la ausencia de días, hace que el software no reconozca dichos archivos, posteriormente si existen problemas al momento de ingresar los datos revisar rigurosamente el formato de entrada.

14. Bibliografía

- [1] S. Murray, Silvicultura Urbana y Periurbana en Quito, Ecuador: Estudio de Caso, Roma: Departamento de Montes, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1998.
- [2] R. Sanchez Rodriguez, Urbanización, Cambios Globales en el Ambiente y Desarrollo Sustentable en América Latina, São José dos Campos, Brasil, 2007.
- [3] K. N. Niño Fierro, «Análisis para la gestión del riesgo de inundaciones en Bogotá: Un enfoque desde la construcción social del riesgo.,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2012.
- [4] C. . E. Morelli Tucci , Gestión de Inundaciones Urbanas, Porto Alegre: World Meteorological Organization Extranet, 2007.
- [5] G. Leva , INDICADORES DE CALIDAD DE VIDA URBANA Teoría y metodología, Quilmes: Universidad Nacional de Quilmes, 2005.
- [6] World Health Organization , «Health Indicators of sustainable cities,» *Rio+20 UN Conference on Sustainable Development*, 2011.
- [7] M. Sorensen, V. Barzetti, K. Keipi y J. Williams, «Manejo de las áreas verdes urbanas,» Banco Interamericano de Desarrollo , Washington, D.C, 1998.
- [8] Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONOMA), «Areas verdes en el Gran Santiago,» Santiago, Chile, Área Ordenamiento Territoial y Recursos Naturales , 2002, p. 11.
- [9] A. Falcón, Espacios verdes para una ciudad sostenible, Barcelona: Gustavo Gilli, 2007.
- [10] World Bank, «Gestión Integral de Aguas Urbanas síntesis,» Washington DC, 2012.
- [11] J. Preciado Beltrán, «Bogotá región: crecimiento urbano en la consolidación del territorio metropolitano,» Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2010.
- [12] C. May, R. Horner, J. Karr, B. Mar y Welch, Effects of urbanization on small streams in the Puget soun ecoregion, Washington: University of Washington, 1998.
- [13] K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang y B. Kløve, «A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large scale SWAT model,» *Journal of Hydrology*, pp. 733-752, 2015.

- [14] SEDATU, HERRAMIENTAS PARA UN NUEVO MODELO DE PLANIFICACIÓN URBANA Y REGIONAL, México, D. F.: Latin American Geospatial Forum 2014, 2014.
- [15] G. . F. Garuma, «Review of urban surface parameterizations for numerical climate models,» *Urban Climate*, 2017.
- [16] A. Allen, «Environmental planning and management of the peri-urban interface: perspectives on an emerging field,» *ENVIRONMENTAL PLANNING AND MANAGEMENT*, pp. 135 - 147, 2003.
- [17] W. Rauch, C. Urich, P. M. Bach, B. C. Rogers, F. J. Haan, R. R. Brown, M. Mair, D. T. McCarthy, M. Kleidorfer, R. Sitzenfrei y A. Deletic, «Modelling transitions in urban water systems,» *Water Research*, pp. 501-514, 2017.
- [18] P. M. Bach , W. Rauch, P. S. Mikkelsen, D. T. McCarthy y A. Deletic, «A critical review of integrated urban water modelling – Urban drainage and beyond,» *Environmental Modelling & Software*, pp. 88-107, 2014.
- [19] M. Lvovitch, «The global water balance,» pp. 28-42, 1973.
- [20] J. Arnold, R. Srinivasan, R. S. Muttiah y P. M. Allen, «Continental scale simulation of the hydrologic balance,» *Water Resour*, pp. 1037-1051, 1999.
- [21] J. G. Arnold, R. Srinivasan, R. Muttiah y J. R. Williams, «Large Area Hydrologic Modelling and Assessment, Part I: Model Development,» *Journal of the American Water Resources Association*, pp. 34-73, 1998.
- [22] USDA, Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release 55, Conservation Engineering Division, 1986.
- [23] K. Schneider, An Introduction to TR-55, University of Texas at Austin , 2001.
- [24] V. P. Singh y D. K. Frevert, Watershed Models, CRC Press, 2010.
- [25] L. A. Rossman y EPA, Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1, Office of Research and Development, 2015.
- [26] T. Endreny, J. Wang y D. Nowak, «MECHANISTIC SIMULATION OF TREE EFFECTS IN AN URBAN WATER BALANCE MODEL,» *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION*, pp. 75-85, 2008.
- [27] A. H. Elliott y S. A. Trowsdale, «A review of models for low impact urban stormwater drainage,» *Environmental Modelling & Software*, pp. 394-405, 2007.
- [28] W. Gujer, V. Krejci, R. Schwarzenbach y J. Zobrist, «Von der Kanalisation ins Grundwasser - Charakterisierung eines Regenerereignisses im Glattal,» *Gas-Wasser-*

Abwasser, pp. 298-311, 1982.

- [29] W. Rauch, J. Bertrand-Krajewski, P. Krebs, O. Mark, W. Schilling, M. Schütze y P. Vanrolleghem, «Deterministic modelling of integrated urban drainage systems,» *Water Science and Technology*, pp. 81-94, 2002.
- [30] S. Albuja y M. Ceballos, «Desplazamiento urbano y migración en Colombia,» *Forced Migration Review*, pp. 10 - 11, 2010.
- [31] Observatorio Ambiental de Bogotá , «Indicadores del espacio público en Bogotá,» Alcaldía mayor de Bogotá, Bogotá, 2009.
- [32] Alcaldia Mayor de Bogotá D.C., Plan Ambiental Local de Fontibón, Bogotá, 2017-2020.
- [33] L. V. Gómez Forero y C. C. Castañeda Rodríguez, «Estudio del Crecimiento Urbano con respecto al Efecto Isla de Calor para establecer Lineamientos de Gestión Energético Ambiental en Bogotá,» *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* , pp. 14 - 16, 2013.
- [34] Alcaldía Mayor de Bogotá, Plan Ambiental Local de Fontibon, Bogotá: Bogotá Humana, 2012.
- [35] E. G. McPherson, D. Nowak, G. Heisler, S. Grimmond, C. Souch, R. Grant y R. Rowntree, «Results of the Chicago Urban Forest Climate Project,» *Proceedings of the 7th National Urban Forest Conference, New York*, pp. 12-16, 1995.
- [36] H. Satoshi, I-tree eco precipitation interception model descriptions, New York, 2013.
- [37] M. Lega y T. Endreny, «Quantifying the environmental impact of pollutant plumes from coastal rivers with remote sensing and river basin modellingQuantifying the environmental impact of pollutant plumes from coastal rivers with remote sensing and river basin modelling,» *International Journal of Sustainable Development and Planning* 11(5), pp. 651-662. doi:10.2495/SDP-V11-N5-651-662, 2016.
- [38] S. Endreny y Nowak, «Development of nutrient model for i-tree hydro using sampling results from the mianus river watershed,» 2013.
- [39] Yang Yang, T. . A. Endreny y D. J. Nowak, «ITREE-HYDRO: SNOW HYDROLOGY UPDATE FOR THE URBAN FOREST HYDROLOGY MODEL,» *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION*, pp. 1211-1218, 2011.
- [40] K. Dooley, A. Kpachavi y E. Skinner , «The impact of land use change on lake phosphorus concentrations in dakota,» *Carleton College*, 2015.
- [41] Kirnbauer, Baetz y Kenney, «Estimating the stormwater attenuation benefits derived from planting four monoculture species of deciduous trees on vacant and

underutilized urban land parcels,» *Urban Forestry & Urban Greening*, pp. 401-407, 2013.

- [42] D. J. Nowak, A. Bodine , R. Hoehn III, Crane, Daniel, Ellis Alexis, T. Endreny y K. Shelton , «Assessing urban forest effects and values: The greater kansas city region. Newtown Square,» *United States Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station*, 2013.
- [43] E. W. Bodnaruk, C. N. Kroll, Y. Yang, S. Hirabatashi, D. J. Nowak y T. A. Endreny, «Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs,» *Landscape and Urban Planning*, pp. 157, 457-467, 2017.
- [44] T. P. Taggart , T. A. Endreny y D. Nowak, «Modeling the effect of urban infrastructure on hydrologic processes within i-tree hydro, a statistically and spatially distributed model,» *American Geophysical Union*, 2014.
- [45] M. Shahbaz, N. Loganathan, R. Sbia y T. Afza, «The effect of urbanisation , affluence and trade openness on energy consumption: a time series analysis in Malaysia.,» *Renewable and sustainable Energy* , pp. 683-693, 2015.
- [46] S. Angel, S. Sheppard, D. Civco, R. Buckley, A. Chabaeva y L. Gitlin, The dynamics of global urban expansion, Washington D.C: Department of Transport and Urban Development, 2005.
- [47] United Nations, World urbanization prospects, New York: Department of Economic and Social Affairs, 2014.
- [48] L. Herrera, W. Pecht y F. Olivares, CRECIMIENTO URBANO DE AMERICA LATINA, Santiago: Centro Latinoamericano de Demografia , 1976.
- [49] P. A. Cifuentes Ruiz y J. P. Londoño Linares, «Análisis del crecimiento urbano,» *Gestion y Ambiente*, pp. 53-64, 2010.
- [50] R. Garcia Catalá, «CRECIMIENTO URBANO Y EL MODELO DE CIUDAD,» *Universidad Politécnica de Catalunya*, pp. 51-58, 2009.
- [51] Banco Interamericano de desarrollo, Sostenibilidad urbana en america latina y el carbe, Oficina de Relaciones Externas del BID, 2011.
- [52] ONU HABITAT, Por un mejor futuro urbano, Nairobi, 2008.
- [53] Gobierno Vasco , Criterios de sosteibilidad aplicables al laneamiento urbano, Vasco: Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente , 2003.
- [54] ONU HABITAT, Los objetivos de desarrollo sostenible y la iniciativa de ciudades prósperas, Nueva York, 2015.

- [55] P. A. Sarricolea Espinoza, «ANÁLISIS DE LA SUSTENTABILIDAD DEL CRECIMIENTO URBANO DE LA CIUDAD DE SANTIAGO Y SUS EFECTOS SOBRE LA CONFIGURACIÓN DE LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES,» *Universidad de Chile*, pp. 8-15, 2008.
- [56] P. Parikh, M. A. Taylor, T. Hoagland, H. Thurston y W. Shuster, «Application of market mechanisms and incentives to reduce stormwater runoff: An integrated hydrologic, economic and legal approach,» *Environmental Science & Policy*, pp. 133-144, 2005.
- [57] A. Schneider, M. A. Friedl y D. Potere, «A new map of global urban extent from MODIS satellite data,» *Environmental Research Letters*, 2009.
- [58] Q. Weng, «Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends,» *Remote sens*, pp. 34-49, 2012.
- [59] S. Faulkner, «Urbanization impacts on the structure and function of forested,» *Urban Ecosystems*, pp. 89-106, 2004.
- [60] C. Zoppou, «Review of urban storm water models,» *Environmental Modelling & Software*, pp. 195-231, 2001.
- [61] P. D. Wagner, M. S. Bhallamudi, B. Narasimhan, L. N. Kantakumar, K. P. Sudheer, S. Kumar, K. Schneider y P. Fiener, «Dynamic integration of land use changes in a hydrologic assessment of a rapidly developing Indian catchment,» *Science of The Total Environment*, pp. 153-164, 2016.
- [62] F. Yuan y Bauer, «Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery,» *Remote Sensing of Environment*, pp. 375-386, 2007.
- [63] H. Wouters, M. Demuzere, K. D. Ridder y N. P. Van Lipzig, «The impact of impervious water-storage parametrization on urban climate modelling,» *Urban Climate*, pp. 24-50, 2015.
- [64] A. M. Ali, M. E. Shafiee y E. Z. Berglund, «Agent-based modeling to simulate the dynamics of urban water supply: Climate, population growth, and water shortages,» *Sustainable Cities and Society*, pp. 420-434, 2017.
- [65] P. Rahardjo, D. M. Hartono, E. Suganda y H. S. Arifin, «Conservation of Underground Water with the Ecosystem approach to the Development of the New Towns in Bogor, Tangerang, Bekasi (Botabek) Region,» *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pp. 720-727, 2016.
- [66] T. A. Endreny , «Land Use and Land Cover Effects on Runoff Processes: Urban and Suburban Development,» *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, pp. 110-122,

2006.

- [67] M. W. Gitau, J. Chen y Z. Ma, «Water Quality Indices as Tools for Decision Making and Management,» *Water Resources Management*, pp. 2591-2610, 2016.
- [68] G. H. Parandvash y H. Chang, «Analysis of long-term climate change on per capita water demand in urban versus suburban areas in the Portland metropolitan area, USA,» *Journal of Hydrology*, pp. 574-586, 2016.
- [69] A. Riley, *Restoring Streams in Cities: A Guide for Planners Policymakers and Citizens*, Washington, D.C: Island Press, 1998.
- [70] M. Burns, T. Fletcher, C. Walsh, A. Ladson y B. Hatt, «Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform,» *Landscape and Urban Planning*, pp. 230-240, 2012.
- [71] S. Rose y N. E. Peters, «Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach,» *Hydrological Processes*, pp. 1441-1457, 2001.
- [72] Y. Xiao , T.-t. Zhang , D. Liang y J. Chen , «Experimental study of water and dissolved pollutant runoffs on impervious surfaces,» *Journal of Hydrodynamics*, pp. 162-165, 2016.
- [73] D. Butler y J. W. Davies, « Urban Drainage,» *E & FN Spon*, p. 489, 2000.
- [74] D. J. Nowak y E. J. Greenfield , «Tree and impervious cover in the United States,» *Landscape and Urban Planning*, pp. 21-30, 2012.
- [75] L. Boqiang y Z. Junpeng, «Changes in urban air quality during urbanization in China,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 312 - 321, 2018.
- [76] Y. Li, Y. Li, Y. Zhou, Y. Shi y X. Zhu, «Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment,» *Journal of Environmental Management*, pp. 127 - 133, 2012.
- [77] M. J. Molina y L. T. Molina, «Critical review: megacities and atmospheric pollution,» 2004.
- [78] L. Han, W. Zhou, W. Li y L. Li, «Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities,» *Environmental Pollution*, pp. 163 - 170, 2014.
- [79] D. . F. Petry Becker, R. Linden y J. L. Schmitt, «Richness, coverage and concentration of heavy metals in vascular epiphytes along an urbanization gradient,» *Science of The Total Environment*, pp. 48 - 54, 2017.

- [80] P. Singh, N. Kikon y P. Verma, «Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate,» *Sustainable Cities and Society*, pp. 100 - 114, 2017.
- [81] R. Kotharkar, A. Ramesh y A. Bagade, «Urban Heat Island studies in South Asia: A critical review,» *Urban Climate*, 2018.
- [82] E. Erell, D. Pearlmutter, T. J. Williamson y J. Terr, «Urban microclimate: Designing the Spaces between Buildings,» 2011.
- [83] United States Environmental Protection Agency EPA, «Heat Island Impacts,» Washington D. C., Estados Unidos, 2017.
- [84] E. A. Pappas, D. R. Smith, C. Huang, W. D. Shuster y J. V. Bonta, «Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation,» *CATENA*, pp. 146 - 152, 2008.
- [85] Q. Ma, J. Wu, C. He y G. Hu, «Spatial scaling of urban impervious surfaces across evolving landscapes: From cities to urban regions,» *Landscape and Urban Planning*, pp. 50 - 61, 2018.
- [86] . R. Carol y Jacobson, «Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review,» *Journal of Environmental Management*, pp. 1438-1448, 2011.
- [87] A. Chin, A. P. O'Dowd y K. J. Gregory, «Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences,» de 9.39 *Urbanization and River Channels*, San Diego, Academic Press, 2013, pp. 809 - 827.
- [88] B. J. Adams y F. Papa, *Urban Stormwater Management Planning With Analytical Probabilistic Models*, New York : John Wiley, 2000.
- [89] DPAE, «Instrumentos para la gestión del riesgo en Bogotá,» de *REDES DE MONITOREO DE AMENAZAS: RED HIDROMETEOROLÓGICA DE BOGOTÁ – RHB. RED DE ACELERÓGRAFOS DE BOGOTÁ – RAB.* , Bogotá, 2008, pp. 66-67.
- [90] Secretaría Distrital de Salud, «Diagnostico Local con Participacion Social,» de *Localidad de Fontibón*, Bogotá, Alcaldia Mayor de Bogotá, 2010, pp. 29 - 45.
- [91] Camara de Comercio de Bogotá, «Perfil económico y empresarial Localidad Fontibón,» de *Factores asociados al entorno económico*, Bogotá, 2007, pp. 17-28.
- [92] F. Chianucci, N. Puletti, E. Giacomello, A. Cutini y P. Corona, «Estimation of leaf area index in isolated trees with digital photography and its application to urban forestry,» *Urban Forestry & Urban Greening*, pp. 377 - 382, 2015.
- [93] United Bank of Carbon, *A BRIEF GUIDE TO THE BENEFITS OF URBAN GREEN*

SPACES, University of Leeds , 2015.

- [94] A. Chiesura, «The role of urban parks for the sustainable city,» *Landscape and Urban Planning*, pp. 129 - 138, 2004.
- [95] B. W. Carrasco Cruz, S. Cruzalegui Delgado, B. A. Cueva Vásquez y J. C. Tueros Fernandez, «Area foliar, índice de area foliar, metodos para su estimación,» Zacualtipán, 2015.
- [96] C. Mendoza Pérez, C. Ramírez Ayala, W. Ojeda Bustamante, J. Flores Velásquez, H. Flores Magdaleno y E. Sifuentes Ibarra, «COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS PARA MEDIR EL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR DE CHILE POBLANO EN INVERNADERO,» *TERCER CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONOMICAS, UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHAPINGO*, 2014.
- [97] D. J. Nowak, «Air pollution removal by Chicago's urban forest,» pp. 63 - 81, 1994.
- [98] Q. XIAO, E. G. MCPHERSON, S. L. USTING y E. M. GRISMER, «A New approach to modelling tree rainfall interception,» *Journal of Geophysical research*, p. 188, 2000.
- [99] D. J. Sailor, «A green roof model for building energy simulation programs,» *Energy and Buildings*, pp. 1466 - 1478, 2008.
- [100] USDA Forest Service , i-Tree Hydro Users Manual, 2006.
- [101] S. Hirabayashi y T. A. Endreny, «Surface and Upper Weather Pre-processor for i-Tree Eco and Hydro,» *State University of New York*, 2016.
- [102] E. Kuehler y P. Erwin, «Rock Creek Watershed Stormwater Runoff Analysis: i-Tree Hydro Report,» *Urban Forestry South*, 2015.
- [103] E. Stephan, T. Taggart y T. Endreny, «i-Tree Hydro: Training Workshop,» SUNY College of Environmental Science and Forestry, Atlanta, 2010.
- [104] J. Wang, J. M. Hassett y T. A. Endreny, «An object oriented approach to the description and simulation of watershed scale hydrologic processes,» *Computers & Geosciences*, pp. 425-435, 2005.
- [105] K. Beven y J. Kirkby, «A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology,» *Hydrological Sciences Bulletin*, pp. 43-69, 1979.
- [106] W. J. Shuttleworth, *Evaporation models in hydrology*, New York: McGraw-Hill, 1992.
- [107] i-Tree, «i-Tree Hydro,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.itreetools.org/hydro/>.

- [108] Secretaría Distrital de Planeación, «Conociendo la localidad de Fontibón,» de *Diagnóstico de los aspectos físicos, demográficos y socioeconómicos*, Bogota, Alcaldía mayor de Bogotá, 2009, pp. 12-18.
- [109] H. Kimm y Y. Ryu, «Seasonal variations in photosynthetic parameters and leaf area index in an urban park,» *Urban Forestry & Urban Greening*, pp. 1059 - 1067, 2015.
- [110] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, «Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo,» Alcaldia mayor de Bogotá, Bogotá, 2005.
- [111] S. C. French y B. L. Appleton, «A Guide to Successful Pruning Pruning Evergreen Trees,» Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2009.
- [112] J. Doherty, «PEST-ASP User's Manual,» de *Watermark Numerical*, Brisbane, Australia., 2001.
- [113] J. Doherty, «Model-Independent Parameter Estimation User Manual: 5th Edition,» Australia, 2004.
- [114] Cámara de Comercio de Bogotá, Observatorio del espacio público, Bogota, 2005.
- [115] S. Galarza-Molina, P. Rengifo, A. Puentes, E. Cárcamo-Hernández, A. Torres, S. Méndez-Fajardo y C. Devia, «The benefits of an eco-productive green roof in Bogota, Colombia,» *Indoor and Built Environment*, 2016.