

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA PARA LA CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIA  
Y REMOCIÓN DE COLIFORMES EN UN SISTEMA URBANO DE DRENAJE  
SOSTENIBLE EMPLEANDO PAVIMENTOS POROSOS**

**DANIELA CAMARGO GARCÍA  
JULIANA ANDREA GRANADOS RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTA D.C.  
2015**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA PARA LA CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIA  
Y REMOCIÓN DE COLIFORMES EN UN SISTEMA URBANO DE DRENAJE  
SOSTENIBLE EMPLEANDO PAVIMENTOS POROSOS**

**DANIELA CAMARGO GARCÍA  
JULIANA ANDREA GRANADOS RODRÍGUEZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERAS  
AMBIENTALES**

**DIRECTOR  
CARLOS ANDRÉS PEÑA GUZMÁN Ms.C.  
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO**

**CO-DIRECTOR  
ANDRES TORRES  
I.C, Ms.C Ph.D**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS  
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL  
BOGOTA D.C.  
2015**

**NOTA DE ACEPTACIÓN.**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma Director**

Carlos Andrés Peña Guzmán Ms.C.  
Ingeniero Ambiental y Sanitario

---

**Firma Co-Director**

Andrés Torres  
Ingeniero Civil / Msc PhD

---

**Firma Jurado**

---

**Firma Jurado**

**Bogotá D.C. Octubre de 2015**

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	¡Error! Marcador no definido.
INTRODUCCIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
PROBLEMÁTICA.....	¡Error! Marcador no definido.
1. OBJETIVOS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.1. Objetivo general.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2. Objetivos Específicos .....	¡Error! Marcador no definido.
2. MARCO DE REFERENCIA.....	¡Error! Marcador no definido.
2.1. MARCO CONTEXTUAL .....	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1. Ubicación.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2. MARCO TEÓRICO .....	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1. Ciclo Hidrológico.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2.2. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) .....	¡Error! Marcador no definido.
2.3. MARCO LEGAL .....	¡Error! Marcador no definido.
3. METODOLOGÍA.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1. Elección del diseño experimental.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1.1. Metodología de diseño estructural.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2. Evaluación en Campo de Diseño Experimental .....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.1. Materiales .....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.2. Construcción de los montajes.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.3. Determinación de coliformes totales y parámetros in-situ.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.4. Determinación de parámetros in-situ .....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.5. Determinación porcentaje de colmatación.....	¡Error! Marcador no definido.
4. RESULTADOS .....	66
4.1. Resultados Coliformes Totales .....	66
4.1.1. Resultado coliformes totales montaje A (Antracita).....	66
4.1.2. Resultados coliformes totales montaje C (Carbón Activado).....	66
4.2. Resultado parámetros in-situ.....	68
4.2.1. Resultados parámetros in-situ Montaje A (Antracita).....	68
4.2.2. Resultados parámetros in-situ Montaje C (Carbón Activado).....	69
4.3. Resultados Porcentaje de Colmatación.....	75

4.3.1. Resultados porcentaje de colmatación Montaje A (Antracita).....	75
4.3.2. Resultados porcentaje de colmatación Montaje C (Carbón activado)...	81
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	86
6. CONCLUSIONES.....	88
7. RECOMENDACIONES .....	89
BIBLIOGRAFÍA.....	90

## TABLA DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Ubicación montaje pavimento poroso Campus Universidad Santo Tomas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 2.</b> Ciclo del Agua .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 3.</b> Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno natural... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 4.</b> Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno urbano... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 5.</b> Clasificación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 6.</b> Textura del asfalto poroso .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 7.</b> Adoquines de Bloques Montserrat con ranuras libres, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 8.</b> Concreto permeable empleado para la construcción de una parte del Legacy Trail en Coldstream Park en Lexington, Ky .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 9.</b> Estructura del pavimento permeable de infiltración total... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 10.</b> Estructura del pavimento permeable de infiltración parcial <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 11.</b> Estructura del pavimento permeable de infiltración nula <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 12.</b> Contraste de los efectos hidrológicos en los (a) pavimentos convencionales y (b) pavimentos porosos .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 13.</b> Grosos capas del pavimento poroso .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 14.</b> Primer ensayo mezcla concreto poroso..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 15.</b> Segunda mezcla de concreto poroso .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 16.</b> Segundo ensayo mezcla concreto poroso .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 17.</b> Montajes de pavimentos porosos .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 18.</b> Lavado de la grava previo a su montaje .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 19.</b> Montaje capa de grava .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 20.</b> Montaje capa de material filtrante..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 21.</b> Elaboración capa de concreto poroso..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 22.</b> Montaje final Carbón Activado..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 23.</b> Montaje final sistema con antracita .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 24.</b> Mezcla para la determinación de coliformes totales y parámetros in-situ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 25.</b> Muestras para la determinación de coliformes totales .... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 26.</b> Peso inicial del crisol..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 27.</b> Muestras recolectadas en crisoles..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Ilustración 28.</b> Filtros de tela para la determinación de sólidos suspendidos .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

**Ilustración 29.** Muestras recolectadas para ser conducidas al primer horno..... ¡Error!  
**Marcador no definido.**  
**Ilustración 30.** Filtros de tela luego del primer secado ..... ¡Error! **Marcador no definido.**

### **LISTA DE GRÁFICAS**

<b>Gráfica 1.</b> Resultados Coliformes Totales Montaje C (Carbón Activado).....	67
<b>Gráfica 2.</b> Resultados de pH Montaje A.....	69
<b>Gráfica 3.</b> Resultado pH Montaje C.....	70
<b>Gráfica 4.</b> Resultados Conductividad Montaje A.....	71
<b>Gráfica 5.</b> Resultados Conductividad Montaje C.....	72
<b>Gráfica 6.</b> Resultados Sólidos Totales Disueltos Montaje A.....	72
<b>Gráfica 7.</b> Resultados Sólidos Totales Disueltos Montaje C.....	73
<b>Gráfica 8.</b> Resultados Turbidez Montaje A.....	74
<b>Gráfica 9.</b> Resultados Turbidez Montaje C.....	74
<b>Gráfica 10.</b> Masa capturada Montaje A (Antracita).....	78
<b>Gráfica 11.</b> Resultados masa acumulada de entrada, salida y retenida.....	80
<b>Gráfica 12.</b> Resultado masa de entrada, salida y retenida montaje C (Carbón Activado)	83
<b>Gráfica 13.</b> Masa acumulada retenida Montaje C (Carbón Activado).....	85

## LISTA DE TABLAS

- Tabla 1.** Concentraciones Promedio de Aguas Lluvia ..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 2.** Sólidos encontrados en las aguas lluvias..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 3.** Rangos de reducción de contaminantes mediante el uso de pavimentos porosos ..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 4.** Granulometría capa de transición..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 5.** Granulometría sub – base permeable..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 6.** Resultados de las concentraciones de contaminantes de calidad general en diferentes tipos de pavimentos..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 7.** Resultados de las concentraciones de nutrientes en diferentes tipos de pavimentos ..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 8.** Resultados de las concentraciones de metales en diferentes tipos de pavimentos ..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 9.** Resultados de la durabilidad de las capacidades filtrantes del pavimento poroso ..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 10.** Valores promedio de los parámetros de calidad para agua de escorrentía tomada en la Calle 40 con Cra. 7 en Bogotá durante cuatro eventos lluviosos..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 11.** Valores promedio de los parámetros de calidad para cuatro eventos lluviosos luego de atravesar el concreto poroso..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 12.** Marco Legal Pavimentos..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 13.** Categorías de carga para elección del diseño en pavimentos porosos ... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 14.** Diseño de mezcla óptimo para concretos porosos .... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 15.** Diseño de mezcla final ..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 16.** Caracterización de los materiales filtrantes ..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 17.** Materiales para la construcción del pavimento poroso ..... ¡Error! Marcador no definido.
- Tabla 18.** Composición de la mezcla para determinación de coliformes totales por ensayo ..... ¡Error! Marcador no definido.

<b>Tabla 19.</b> Descripción de las muestras para determinación de coliformes ..	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla 20.</b> Rótulo de las muestras de coliformes totales Montaje A .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla 21.</b> Rótulos de las muestras Montaje C .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla 22.</b> Resultados Coliformes Totales Montaje A (Antracita).....	66
<b>Tabla 23.</b> Resultados Coliformes Totales Montaje C (Carbón Activado).....	67
<b>Tabla 24.</b> Resultados Parámetros in-situ Montaje A (Antracita).....	68
<b>Tabla 25.</b> Resultados parámetros in-situ montaje C .....	69
<b>Tabla 26.</b> Resultados de colmatación Montaje A.....	76
<b>Tabla 27.</b> Resultados masa de entrada, salida y capturada Montaje A (Antracita) .....	77
<b>Tabla 28.</b> Resultado masa acumulada de entrada, salida y retenida Montaje A (Antracita) .....	79
<b>Tabla 29.</b> Resultados ensayos de colmatación Montaje C .....	81
<b>Tabla 30.</b> Resultados masa de entrada, salida y capturada Montaje C (Carbón Activado) .....	82
<b>Tabla 31.</b> Resultado masa acumulada de entrada, salida y retenida Montaje C (Carbón Activado) .....	84

## RESUMEN

En la actualidad, la gestión del agua lluvia en entornos urbanos se ha reconocido como uno de los temas de mayor interés, puesto que no es suficiente con las medidas adoptadas para evitar las inundaciones en las ciudades durante las épocas de lluvia intensa. Por otro lado, el efecto de la escorrentía generada sobre el medio ambiente transportada aguas abajo, las cuales se encargan de arrastrar consigo varios contaminantes. Las consecuencias del cambio climático sobre el planeta comienzan a ser visibles cada día con mayor frecuencia, lo que ha generado la necesidad de darle usos alternativos al agua lluvia y comenzar a tener en cuenta éste recurso natural dentro de la gestión hídrica.

De esta manera, se plantean estrategias de desarrollo sostenible y formas de aplicación en diferentes campos de la construcción, especialmente en el sector de la infraestructura vial. Dentro de estas estrategias los sistemas de drenajes sostenibles son de gran importancia, ya que su aplicación trae consigo mejoras en la gestión del agua teniendo en cuenta que es un recurso indispensable para el desarrollo humano.

Por lo tanto el presente proyecto tiene como objetivo determinar la capacidad de captación y remoción de coliformes de un sistema urbano de drenaje sostenible mediante el uso de pavimentos porosos. Para esto se realizó dos montajes de pavimentos porosos empleando carbón activado y antracita como materiales filtrantes. Se evaluó la metodología adecuada para la construcción del pavimento, estructurando las capas de acuerdo al grosor y los materiales indicados en la bibliografía. Una vez montados los pavimentos se realizó una mezcla de heces,

aguas lluvia y agua de la llave, la cual fue vertida en cada uno de los sistemas donde se tomaron las muestras correspondientes para la determinación de coliformes totales y parámetros in-situ. De ésta manera se obtuvieron muestras de la entrada, salida, 10, 20 y 30 minutos, de las que se lograron reducciones del 99.7% de coliformes en el montaje con antracita y 7% con el carbón activado.

Con respecto a los parámetros in-situ, se obtuvieron relaciones directas del comportamiento de los resultados de los sólidos disueltos totales, conductividad y turbidez, ya que en los dos sistemas se observaron reducciones desde el 40% para la antracita y el 10% para el carbón.

Finalmente, se determinó que la capacidad de retención de la antracita es proporcional a su proceso de colmatación, lo que indicaría la implementación de un protocolo de mantenimiento más estricto y adecuado que permita el uso de este material filtrante y que impida que se formen biopelículas al final de la capa, acelerando el proceso de colmatación del pavimento.

## **INTRODUCCIÓN**

Los procesos de desarrollo urbano implican de igual manera un avance en la implementación de vías, las cuales requieren la construcción de pavimentos que cuenten con las condiciones de resistencia adecuadas para soportar las cargas constantes de tránsito durante el periodo para el cual fueron diseñadas [1]. Sin embargo estos pavimentos traen consigo problemas en la evacuación de aguas lluvias, disminuyendo así la capacidad de recarga natural del agua, e incrementando de forma considerable el volumen y caudal de escorrentía superficial, aumentando el riesgo de provocar inundaciones.

Sumado a lo anterior, la escorrentía producto de las aguas lluvias arrastra consigo materiales sólidos y varios contaminantes depositados en calles y estacionamientos, aumentando la carga contaminante de las aguas que en varias ocasiones no son conducidas a las redes de alcantarillado [2].

Como alternativa, para la disminución de estas problemáticas, desde la década de los setenta se han iniciado estudios para la evaluación de diseños que permitan la implementación de pavimentos porosos, construyendo estructuras que faciliten el paso del agua en su superficie y la escorrentía superficial aguas abajo. Además, posibilitar el aprovechamiento del agua infiltrada mediante sistemas de almacenamiento implementados en el diseño del pavimento poroso [2].

Esta clase de pavimentos ha adquirido una gran atención en la última década debido a los efectos del calentamiento global, obligando a impulsar medidas de conservación del agua y de esta manera implementando sistemas sostenibles en las ciudades; permitiendo así la captación, almacenamiento y posible tratamiento

de las aguas lluvias para que posteriormente sean utilizadas en parques, inodoros de viviendas, aguas industriales, entre otros [3].

## **PROBLEMÁTICA**

El desarrollo urbano trae consigo una serie de impactos negativos sobre las fuentes hídricas receptoras. Adicionalmente, el crecimiento de las zonas impermeables (pavimentación vial) modifica los flujos naturales del ciclo hidrológico, lo que a su vez reduce la infiltración de las aguas lluvias debido a que la mayor parte de las precipitaciones se transforma en escorrentía superficial, acumulándose de manera rápida, dando origen a la formación de grandes caudales que colmatan la capacidad de captación de la red y terminan por rebosarse, acelerando los tiempos de respuesta y el aumento del riesgo por inundaciones [4].

De esta manera, la problemática de la contaminación provocada por la escorrentía urbana y su vertido directo al medio natural, es un impacto de grandes magnitudes debido a la alteración en la calidad del agua produciendo la caída del oxígeno disuelto, el incremento de las concentraciones de nutrientes y la contaminación con agentes patógenos (coliformes) [5], los cuales son conducidos a la red de alcantarillados, superficie del suelo, aguas superficiales e incluso a zonas de recarga para los acuíferos subyacentes.

Este impacto se puede aumentar debido a que el tipo de sistema de saneamiento puede generar las transformaciones fisicoquímicas y biológicas que se presentan a lo largo de la red [6].

Por otra parte, no solo el tipo de suelo afecta la calidad del agua lluvia de escorrentía. También el agua lluvia puede entrar en contacto con múltiples agentes a medida que pasa por la atmósfera hasta el cuerpo receptor. En el

fenómeno del primer lavado (los primeros instantes de un evento de lluvia que ocurre luego de un periodo de tiempo seco), donde el agua que aún no ha entrado al sistema de drenaje urbano transporta contaminantes que se han acumulado en las calles a lo largo de ese periodo de tiempo. Por otra parte, el agua que entra puede generar una re-suspensión de los sedimentos que se encuentran a lo largo de la red. En las tuberías de alcantarillado los contaminantes pueden ser producto de procesos industriales, emisiones vehiculares o incineración de basuras, las cuales pueden estar en fase sólida o gaseosa y que al tener contacto con el agua lluvia puede reaccionar produciendo distintos compuestos que a largo plazo tienen un efecto contaminante o generan desgaste del sistema. [6] [7]

En la Tabla 1 se relacionan las concentraciones promedio de los contaminantes de las aguas lluvias provenientes de escorrentía, tomadas del libro Stormwater Management de Martin P. Wanielista y Yousef A.

**Tabla 1.** Concentraciones Promedio de Aguas Lluvia

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN (mg/L)	
	PROMEDIO	RANGO
pH		6.5 – 8.1
ST	1147	145 – 21640
SST	261	4 – 1156
SSV	77	1 – 837
STV	242	26 – 1522
DBO <sub>5</sub>	24	2 – 133
COT	41	5 – 290
DQO	147	5 – 1058
NTK	2.99	0.1- 14
NO <sub>2</sub> + NO <sub>3</sub>	1.14	0.01 – 8.4
Fósforo Total	0.79	0.05 – 3.55
Plomo	0.96	0.02 – 13.1
Zinc	0.41	0.01 – 3.4
Hierro	10.3	0.1 – 4.5
Cobre	0.103	0.01 – 0.88
Cadmio	0.04	0.01 – 0.14
Cromo	0.04	0.01 – 0.14
Hg x 10 <sup>-3</sup>	3.22	0.19 – 67
Nickel	9.92	0.1 – 49

**Fuente:** [8]

Los sólidos que transporta el agua lluvia se dividen en cuatro clases de acuerdo a su tamaño (Tabla 2)

**Tabla 2. Sólidos encontrados en las aguas lluvias**

<b>Clase de sólidos</b>	<b>Tamaño (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Gravedad específica</b>
<b>Gruesos</b>	>6000	0.9 – 1.2
<b>Arenas</b>	>150	2.6
<b>Suspendidos</b>	>0.45	1.4 – 2.0
<b>Disueltos</b>	<0.45	-

**Fuente:** [6]

Los sólidos gruesos y las arenas tienden a sedimentarse y generar bloqueos, lo cual produce disminución en la capacidad hidráulica de las tuberías y otros sistemas del drenaje urbano. Sin embargo, los sólidos que generan mayor impacto son los suspendidos y los disueltos, ya que su tratamiento es más complejo y tienden a transportar alta carga contaminante, como en el caso de los coliformes fecales, ya que un estudio técnico realizado en el 2008 por Felx A. Ocasio donde se evaluó la calidad del agua por posibles fuentes de contaminación en un segmento del Río Piedra en Puerto Rico, demuestra que las escorrentías urbanas indican que los primeros impactos de desagüe son los más significativos y que los impactos mayores sobre la calidad del agua provienen de las cargas de coliformes fecales.

La presencia de bacterias coliformes indica la cantidad de materia orgánica y contaminación presente en el agua, lo que implicaría la posibilidad de que existan bacterias patógenas, las cuales representan un peligro de propagación de enfermedades infecciosas de transmisión hídrica.

Adicionalmente no existen estudios a nivel nacional que permitan determinar la retención de estos contaminantes en medios porosos, los cuales serían la base de estudio para tecnificar este sistema y adecuar un medio que permita que el tratamiento del agua llegue a ser tan exitoso que pueda eliminar la contaminación bacteriológica y finalmente reutilizar el agua lluvia de escorrentía para su posterior uso y consumo humano.

## **JUSTIFICACIÓN**

Como alternativa para el control de la problemática planteada anteriormente, se da origen a los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los cuales tiene como objetivo reproducir el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización, obteniendo de manera paralela a la mitigación de los problemas de cantidad y calidad de las escorrentías urbanas [4].

Dentro de los múltiples tipos de SUDS, se destacan los pavimentos porosos, los cuales buscan la introducción de una nueva conceptualización en la forma como tradicionalmente se hace el manejo de la escorrentía pluvial, predominando los criterios de captación a través de medidas estructurales como sumideros, colectores y canales sin involucrar como una variable significativa la calidad de agua de la escorrentía, siendo precisamente éste último factor el principal objetivo a cumplir a través de la adopción de éstos mecanismos de drenaje sostenible [4], trayendo consigo mejoras en las condiciones de calidad de agua a través de la remoción de la mayor parte de la carga de sólidos suspendidos, así como el aprovechamiento del tránsito de la escorrentía por medios granulares para la remoción de la mayor cantidad posible de contaminantes solubles e insolubles, principalmente de aquellos presentes en las aguas de primer lavado en las superficies impermeables. Además de reducir los gastos en obras de drenaje y aumentando la seguridad de los vehículos que se encuentran en circulación [9].

Sumado a los beneficios de seguridad vial e hidráulicos ligados a los pavimentos porosos, se han encontrado mejoras a nivel ambiental, puesto que estos SUDS son capaces de disminuir la contaminación propia de las aguas lluvias de escorrentía urbana como metales pesados, aceites, sólidos suspendidos, sustancias consumidoras de oxígeno, etc. Entre los resultados reportados en la literatura se encuentran reducciones de sólidos totales, fósforo, demanda química de oxígeno y plomo relacionados en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Rangos de reducción de contaminantes mediante el uso de pavimentos porosos

PARÁMETRO	RANGOS DE REDUCCIÓN (%)
Sólidos Totales (ST)	36 – 95
Fósforo	71
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	54 – 89
Plomo (Pb)	50 – 93
Cobre (Cu)	42
Cadmio (Cd)	30
Zinc (Zn)	47 – 62

**Fuente:** Adaptado de [10], [11], [12]

Debido a esto, el presente trabajo de investigación pretende realizar la construcción de un prototipo de pavimento poroso y evaluar la capacidad de captación de aguas lluvia y remoción de coliformes presentes en las mismas.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de captación de aguas lluvias y remoción de coliformes en un sistema urbano de drenaje sostenible empleando pavimentos porosos.

### 1.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar la metodología más apropiada para el diseño de pavimentos porosos.
- Construir un pavimento poroso a escala de laboratorio.
- Evaluar el comportamiento del pavimento poroso en campo mediante un experimento bajo condiciones controladas.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1. MARCO CONTEXTUAL**

#### **2.1.1. Ubicación**

El diseño experimental fue llevado a cabo en el Campus San Alberto Magno de la Universidad Santo Tomás ubicado en el kilómetro 1.6 Autopista norte Vía Arrayanes, ya que éste lugar cuenta con el espacio suficiente para el montaje del pavimento poroso. En la Ilustración 1 se observa la ubicación geográfica donde se ubicó el prototipo.

El Campus de la Universidad Santo Tomás se encuentra ubicado en la Autopista Norte Avenida los Arrayanes, Kilómetro 16, jurisdicción de la localidad de Usaquén, está ubicado en el extremo nororiental de Bogotá. Limita al norte con los municipios de Chía y Sopó, y al oriente con el municipio de La Calera, al occidente con la localidad de Suba y al sur con la localidad de Chapinero.

Cuenta con una extensión total de 6.534 hectáreas, de las cuales 5.800 se encuentran catalogadas como suelo de uso urbano y 734 hectáreas como áreas de reserva natural. Su altura va desde los 2600 hasta los 3000 m.s.n.m. con una temperatura promedio anual de 14°C y una precipitación media anual en un rango próximo de 790 mm. La humedad relativa en seco está entre 68%-74% y una

velocidad del viento clasificada como baja de 22 m/seg con variaciones de 1-3.9 m/seg. [13] [14]

### **Ilustración 1.** Ubicación montaje pavimento poroso Campus Universidad Santo Tomás



**Fuente:** Google Earth

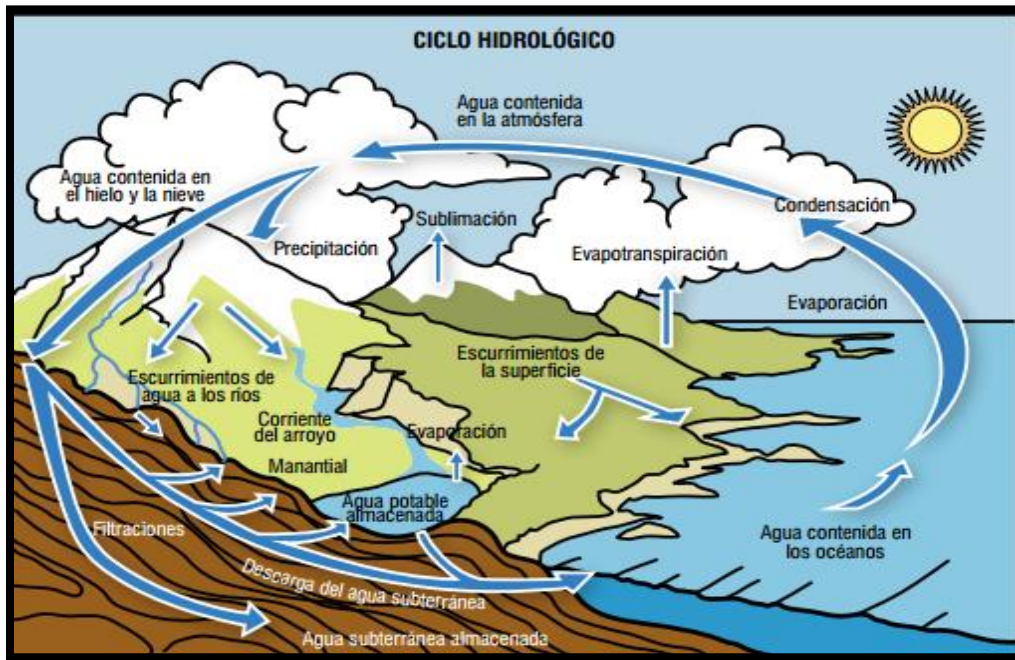
El montaje se ubica al noroeste del campus, al costado izquierdo de las canchas de voleibol, diagonal a los tanques de almacenamiento de aguas lluvia, como se observa en la Ilustración 1.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Ciclo Hidrológico**

El ciclo hidrológico se define como la sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmosfera a la tierra y de su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, mar y aguas continentales, condensación del agua en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y re-evaporación (Ilustración 2). [15]

## Ilustración 2. Ciclo del Agua



Fuente: [16]

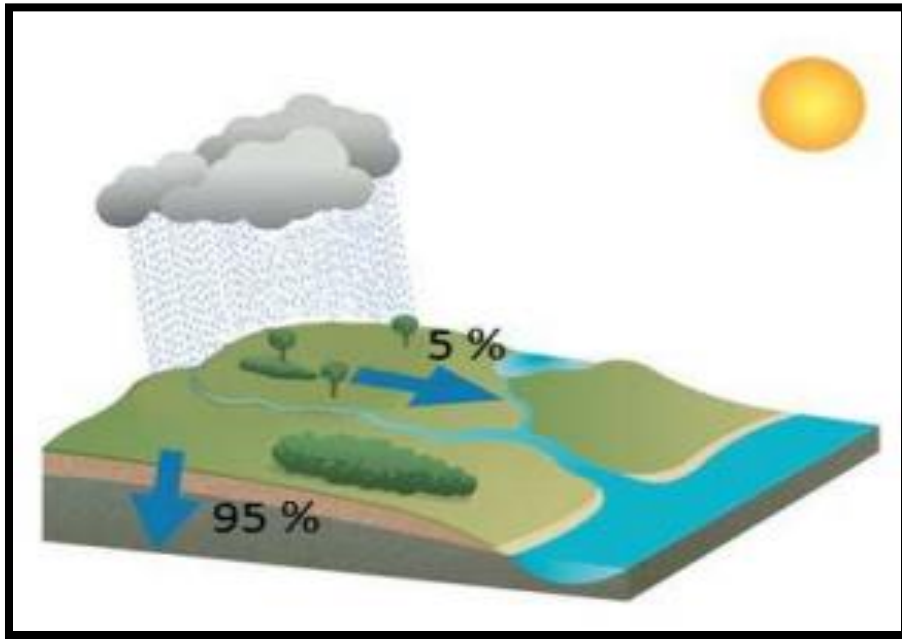
Los componentes del ciclo hidrológico se relacionan directamente con la disponibilidad de agua, entre ellos la precipitación la cual es responsable del depósito de agua dulce en el planeta y, por ende, de la vida tanto de animales como de vegetales que requieren el agua para vivir. [16]

El ciclo hidrológico se presenta en dos entornos: natural y urbano. A continuación se ilustran cada uno de ellos.

### 2.2.1.1. Ciclo hidrológico Natural

El comportamiento del ciclo hidrológico es diferente en entornos naturales y en entornos urbanos. El ciclo hidrológico natural (Ilustración 3) es un proceso en el cual una parte de la precipitación es interceptada por la vegetación antes de tocar el suelo. El agua restante satura el terreno antes de producir escorrentía superficial. Posteriormente el agua es transportada a ríos, lagos y humedales o se infiltra con el fin de alimentar acuíferos naturales. De este modo se logra estimar que en una zona natural sin urbanizar, el porcentaje de agua que se infiltra sin producir escorrentía es de un 95%. [17]

### Ilustración 3. Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno natural

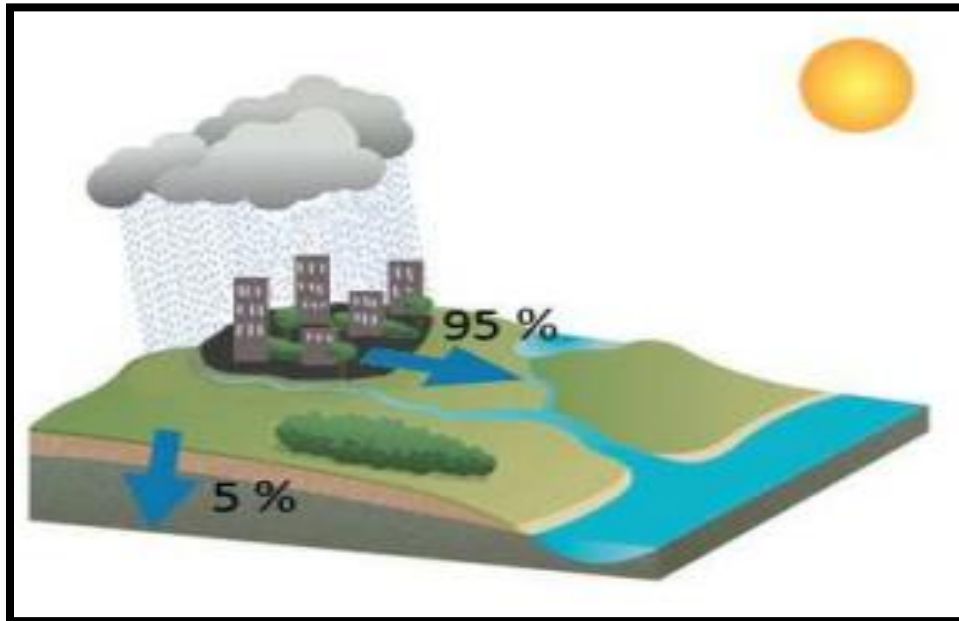


Fuente: [17]

#### 2.2.1.1. Ciclo Hidrológico Urbano

Por otro lado, en el ciclo hidrológico urbano (Ilustración 4), el agua antes de llegar al suelo, purifica la atmosfera recogiendo partículas contaminantes, que son arrastradas posteriormente; puesto que en los entornos urbanos no se cuenta con interceptación vegetal, así que la precipitación es recibida por tejados y superficies asfálticas en su mayoría impermeables, generando un lavado de los mismos arrastrando cargas contaminantes de sólidos en suspensión, materia orgánica y metales pesados. Sumado a esto, las grandes cantidades de agua y la permeabilidad del pavimento convencional, produce una reducción en la infiltración, correspondiente al 5% en zonas de alta densidad y el 95% restante a escorrentía superficial. [17]

#### Ilustración 4. Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno urbano



Fuente: [17]

El 95% del agua pluvial que es conducida como escorrentía finaliza su recorrido en las redes de alcantarillado, aumentando la probabilidad de rebose de las mismas. [17]

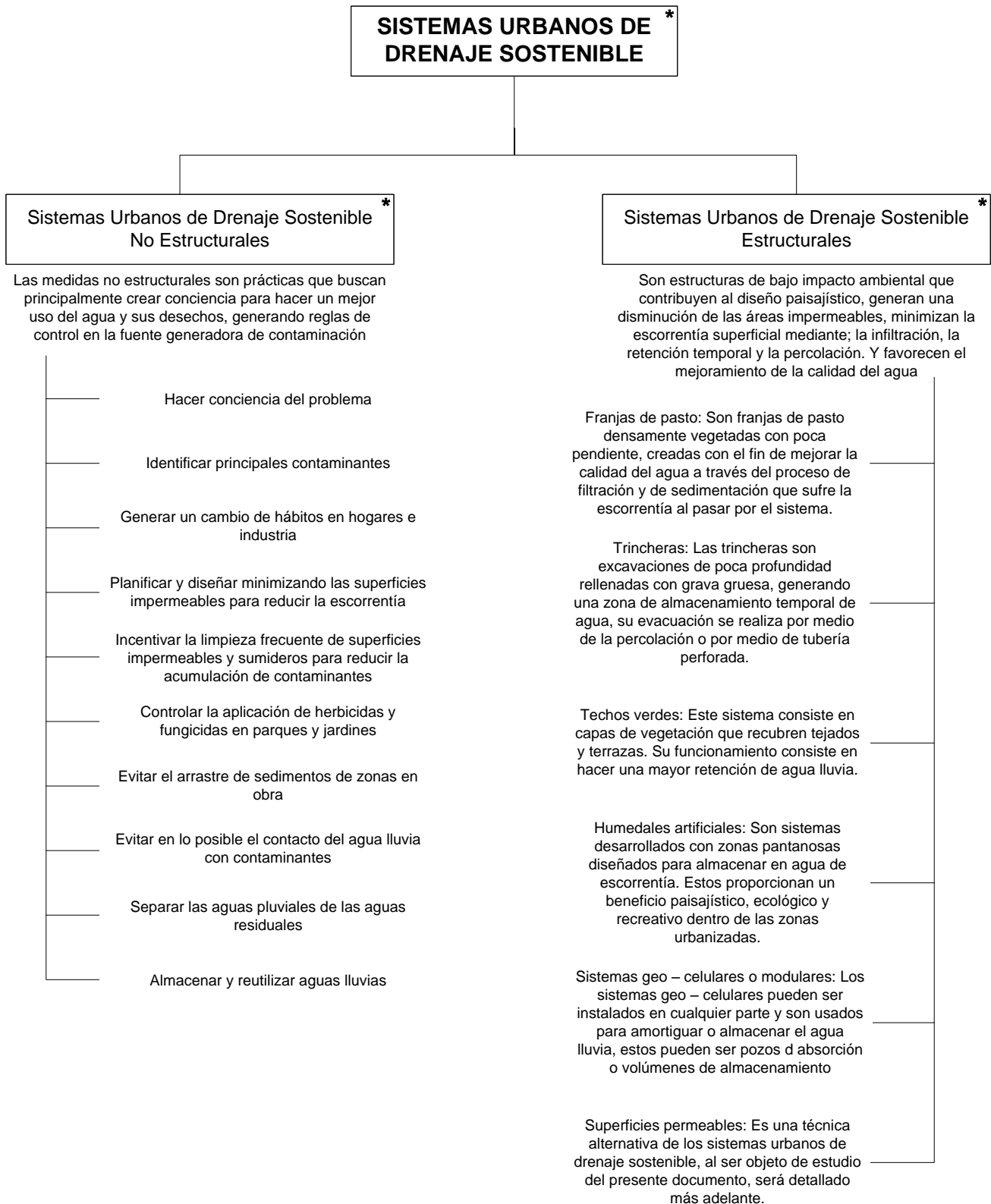
#### 2.2.2. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible son conocidos como SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) en el Reino Unido, BMPs (Best Management Practices) en Estados Unidos o Mejores Prácticas de Control (MPC) en los países hispano parlantes. Surgen como medida frente a los problemas en las infraestructuras de saneamiento convencionales. Todos estos sistemas son una alternativa y complemento al tratamiento convencional de las aguas pluviales en las ciudades, pudiendo aplicarse también en carreteras, puertos, aeropuertos y cualquier otra zona urbanizada que requiera de dicho sistema. [5] [18] [17]

La necesidad de aplicar los principios de los SUDS se debe a los impactos que se generan asociados a los cambios del ciclo hidrológico urbano, que a su vez se ve modificado por el crecimiento de la población y por tanto, de las zonas urbanas en los últimos años. En un principio, el sistema se concibe para resolver problemas en tiempo húmedo, pero hay que destacar, que además es útil para gestionar otros tipos de escorrentía superficial en tiempo seco, como la producida por sobrantes de riego, baldeo de calles etc. [19] [5]

Los SUDS se clasifican en sistemas convencionales estructurales y no estructurales, relacionados en la Ilustración 5.

## Ilustración 5. Clasificación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible



**Fuente:** Adaptado de [20] [21] [22]

### **2.2.2.1. SUPERFICIES PERMEABLES**

Las superficies permeables consisten en una variedad de tipos de pavimento, adoquines y otros dispositivos que permiten la infiltración de aguas pluviales a través suyo, al mismo tiempo que ofrecen una función estructural, al contar con una base y sub-base que permite la circulación de las aguas pluviales a través de la superficie sostenible, pudiendo ser resistentes al tráfico o no. Las aplicaciones de las superficies permeables tienden a ser zonas sin vehículos pesados, como aparcamientos, calles residenciales, aceras, zonas de recreo etc. [17]

El objetivo de las superficies permeables consiste fundamentalmente en almacenar el agua lluvia que se percola temporalmente disminuyendo así la cantidad de escorrentía que de otra manera quedaría en la superficie. [23]

El agua atraviesa la superficie permeable, que actúa a modo de filtro, hasta la capa inferior que sirve de reserva, de manera que se atenúan las puntas del flujo. Esta reserva puede ser transportada a otro lugar o infiltrada, si el terreno lo permite. El exceso de agua se controla mediante un desagüe superior o un drenaje superficial diseñado a tal efecto. [22]

En cualquier caso todas las capas de la estructura deben tener permeabilidades crecientes, desde la superficie hasta la sub-base, incluyendo los geo-textiles con la intención de que el agua fluya y no se quede retenida en su interior. [23]

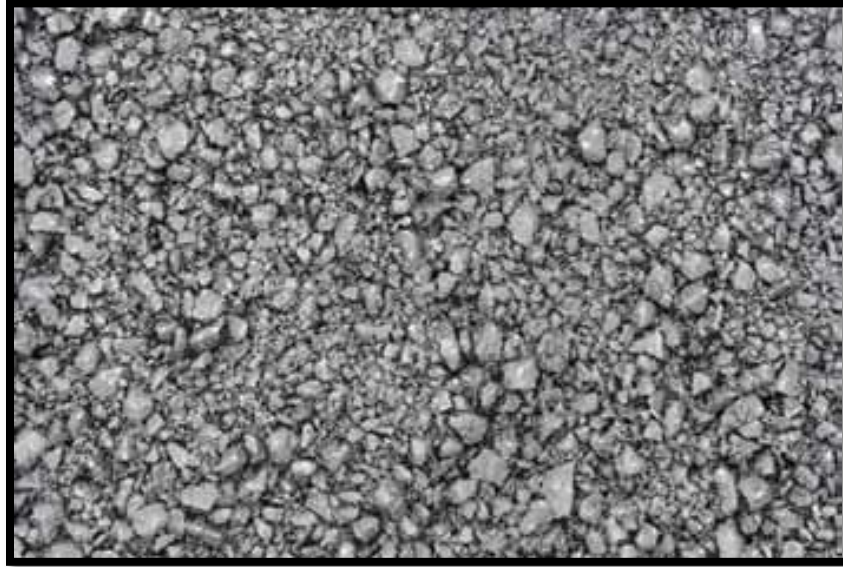
A continuación se nombrarán los diferentes tipos de superficies permeables con su respectiva descripción:

#### **2.2.2.1.1. Asfalto Poroso**

El asfalto poroso es una mezcla de asfalto estándar tanto de agregados finos y gruesos unidos por un ligante bituminoso, excepto que utiliza menos agregados finos que el asfalto convencional. El índice de vacíos en el asfalto poroso es similar al de 15 a 35 por ciento de concreto permeable. El aspecto de la superficie de asfalto poroso es similar al asfalto convencional, aunque asfalto poroso tiene una textura más áspera. La capa superficial de asfalto es generalmente más delgada comparada con la del concreto permeable.

El asfalto poroso se puede utilizar para aplicaciones peatonales tales como vías verdes y bajo volumen, bajas cargas de tráfico vehicular como en aparcamientos, carriles de estacionamiento en la acera en las carreteras y viviendas o calles laterales (Ilustración 6).

### **Ilustración 6.** Textura del asfalto poroso



**Fuente:** [24]

#### **2.2.2.1.2. Adoquines**

Los pavimentos permeables de adoquín permiten la infiltración del agua por medio de las juntas creadas entre los adoquines. Estas son llenadas o emboquilladas con grava fina o arena de río. Este tipo de pavimento permeable suele ser utilizado con mayor frecuencia en andenes y jardines debido a su baja resistencia (Ilustración 7).

**Ilustración 7.** Adoquines de Bloques Montserrat con ranuras libres, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander



**Fuente:** [5]

La capa de rodadura de los sistemas modulares pueden estar conformadas por rejillas de plástico de alta resistencia o por módulos en concreto, estos se rellenan de grava o tierra para sembrar pasto. [25]

### **2.2.2.1.3. Concreto Permeable**

El concreto permeable es una mezcla de cemento Portland, agregado grueso o grava, y agua (Ilustración 8). A diferencia del hormigón convencional, el concreto permeable contiene un índice de vacíos de 15 a 35 por ciento, el cual se logra mediante la eliminación de las partículas más finas, tal como arena de la mezcla de hormigón. Este espacio vacío permite que el agua se infiltre en el suelo, evitando de este modo la escorrentía y potencializando la reutilización de aguas lluvias. La aplicación del concreto permeable se hace principalmente en aceras y estacionamientos.

**Ilustración 8.** Concreto permeable empleado para la construcción de una parte del Legacy Trail en Coldstream Park en Lexington, Ky



**Fuente:** [24]

### **2.2.2.2. PARÁMETROS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS PAVIMENTOS POROSOS**

Los parámetros mostrados a continuación son específicos para la construcción de concreto poroso, el cual será empleado en el presente caso de estudio.

El espesor mínimo para soportar el tránsito vehicular ligero en una losa de concreto poroso debe ser de seis pulgadas; a medida que las cargas de tráfico son más pesadas, se requieren losas de mayor espesor. El espesor de la sub-base se puede aumentar para compensar la carga de tráfico alto, cuando se presenta una sub-base blanda o cuando se requiere proporcionar mayor almacenamiento de aguas lluvias [1] [26].

El pavimento permeable debe tener un perfil relativamente plano, es decir pendientes menores o iguales a 5%. Si se aplica sobre una pendiente pronunciada, las aguas lluvias absorbidas por la capa de concreto poroso comenzarán a escurrir en la sub-base, generando sub-presiones que pueden dañar las losas. Si las pendientes requeridas son mayores al 1%, se deben construir barreras impermeables perpendiculares al escurrimiento de las aguas [1] [27].

Al igual que el concreto convencional se emplea cemento portland, y se emplea la composición química, la resistencia y los tiempos de fraguado establecidos por la norma escogida.

Los agregados son la mayor parte del volumen del concreto poroso y los responsables de resistir las cargas aplicadas. La granulometría de los agregados cambia con respecto a la del concreto convencional, respecto a la eliminación de partículas más finas [26]

Una relación agua cemento dentro del rango de 0.27 a 0.34 es común para la fabricación de concreto poroso. El control de la relación agua: cemento en las mezclas para concreto poroso no garantiza del todo un concreto más resistente como en el caso de los concretos convencionales [28]

De ser posible es recomendable reforzar el concreto con fibras de polímero de entre 2.5 y 5 cm de largo, lo que mejora significativamente su resistencia a la tracción y disminuye la deformación. La incorporación de las fibras al concreto hidráulico poroso, se hace como si estas fueran un volumen de agregado (generalmente dicho volumen corresponde a no más del 0.1 por ciento), y se mezclan en conjunto con todos los demás componentes [26]

Se recomienda el uso de aditivos retardantes que aumenten los tiempos de colocación y fraguado, y los reductores de agua que aporten mayor manejabilidad. Ambos a su vez mejoran los resultados en cuanto a la resistencia. Los aditivos son incluidos en la mezcla húmeda como volumen de agua y de acuerdo a las especificaciones del fabricante [26]

#### 2.2.2.2.1. Capa de Transición

La granulometría de la capa de transición debe permitir el flujo vertical del agua y a la vez garantizar la estabilidad del pavimento, debe buscarse un material granular fino que este dentro del rango de 2 a 6 mm, y que cumpla con los parámetros establecidos como se muestra en la Tabla 4. [25]

**Tabla 4.** Granulometría capa de transición

Tamaño del tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)
14	100
10	98 – 100
6.3	80 – 99
2.0	0 – 20
1.0	0 – 5

**Fuente:** Adaptado de [25]

### 2.2.2.2. Sub-Base Permeable

La granulometría de la sub-base debe garantizar la estabilidad del pavimento mediante la relación de agregados, tanto en estado seco como en condición húmeda total, se recomiendan los agregados triturados con formas angulares e irregulares, no los redondeados. Debido a que este material también será usado para el almacenamiento, este debe ser resistente ante la presencia de agentes químicos que puedan venir disueltos en el agua y así evitar su meteorización y la pérdida de cohesión al interior de los pavimentos. Se recomienda el uso de granito, basalto o gabro [21]. Además debe cumplir con la especificación y con la granulometría que se muestra en la Tabla 5.

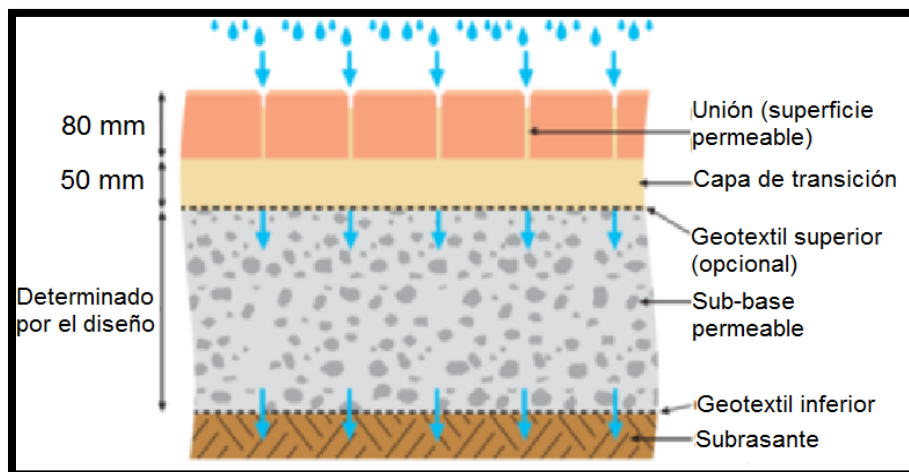
**Tabla 5.** Granulometría sub-base permeable

Tamaño del matiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)
40	100
31.5	98 – 100
20	90 -99
10	25 – 70
4	0 – 15
2	0 – 5

Fuente: [25]

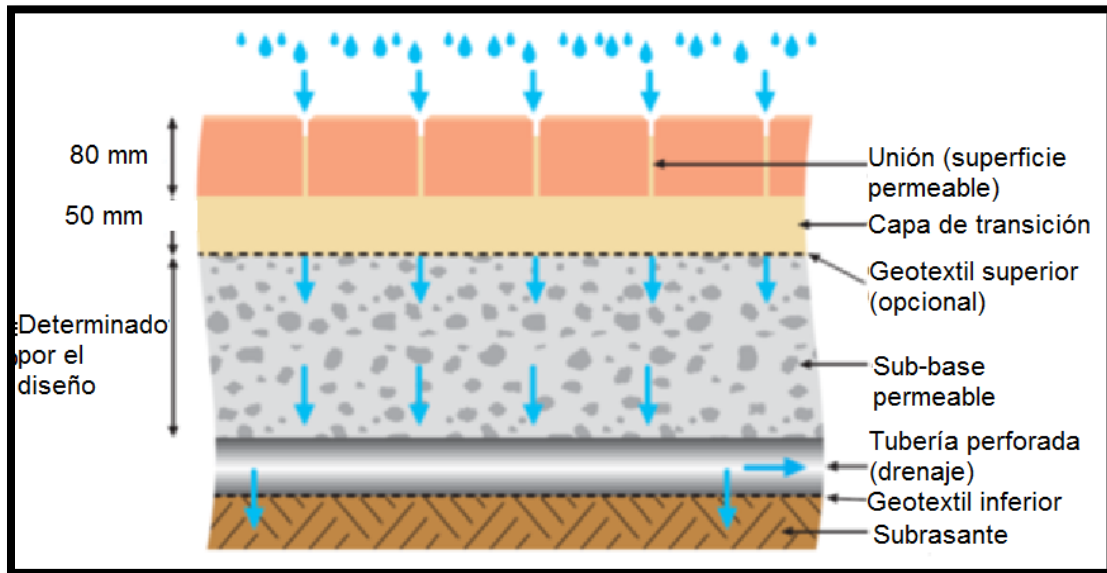
La sub-base puede utilizarse para infiltrar y retener el agua total (Ilustración 9), parcial (Ilustración 10), o no presentar infiltración (Ilustración 11) al sub-rasante (suelo natural). En el caso de la infiltración total o parcial, el sub-rasante debe tener la capacidad para recibir estas aguas (recarga de acuíferos), y en el caso de retención se utiliza cuando el suelo tiende a ser impermeable o cuando se quiere realizar aprovechamiento de esta agua [1] [25]

**Ilustración 9.** Estructura del pavimento permeable de infiltración total



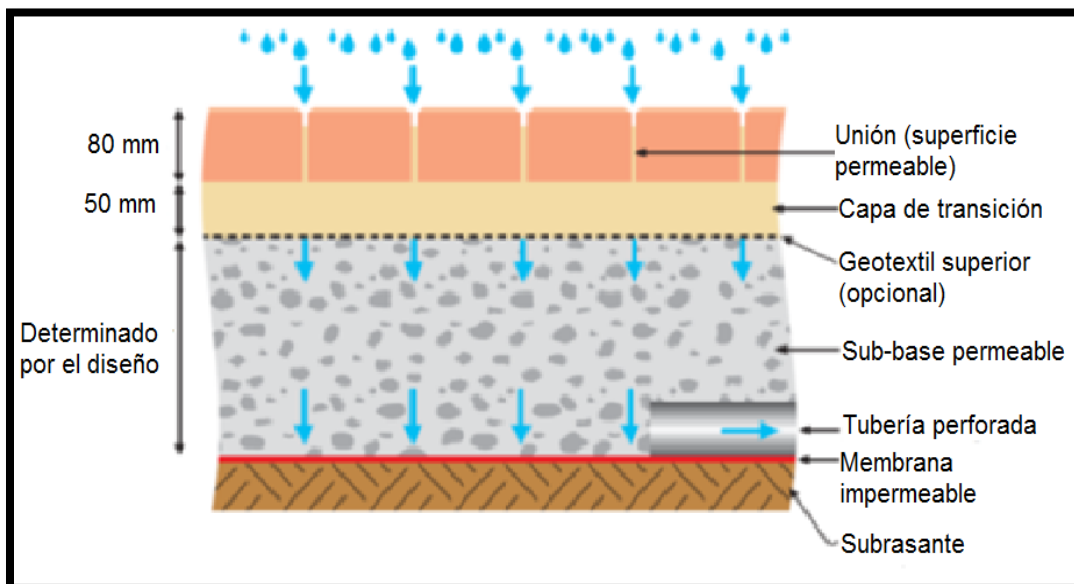
Fuente: [1] [25]

**Ilustración 10.** Estructura del pavimento permeable de infiltración parcial



Fuente: [1] [25]

**Ilustración 11.** Estructura del pavimento permeable de infiltración nula



Fuente: [1] [25]

### 2.2.2.2.3. Geotextil

El geotextil es el filtro que evita la migración de materiales finos a las capas de agregados gruesos, y contribuye a la estabilidad del pavimento. Este puede ser tejido o no tejido, capaz de resistir tanto a agentes químicos como bacterianos

### **2.2.2.3. BENEFICIOS DE LOS PAVIMENTOS POROSOS**

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los pavimentos porosos corresponden a una de las técnicas alternativas de los sistemas de drenaje urbano sostenible. A continuación se muestran las ventajas de carácter técnico, social, ambiental y económico. [1] [17]

#### **2.2.2.3.1. Beneficios de Carácter Técnico**

Los pavimentos porosos tienen una relación directa con el control de la cantidad de escorrentía urbana. La gestión de la escorrentía a través de la infiltración deriva en una reducción del volumen de escorrentía, o una reducción de caudales en la red de saneamiento convencional. De este modo se logra disminuir la carga hidráulica en el sistema en tiempo de lluvia [17].

Al diseñar adecuadamente los pavimentos porosos, se obtiene como resultado una resistencia y una duración similar a un pavimento convencional. Además, su facilidad de manipulación permite una puesta en obra sencilla, no requiere grandes espacios adicionales para su instalación y es apropiado para pendientes suaves, por lo que puede implantarse en zonas urbanas consolidadas [17].

Los pavimentos porosos son de rápida y fácil colocación, ya que solo es necesario extender el material y compactarlo evitando así el vibrado. Además, para el proceso de curado, es suficiente cubrir el pavimento permeable con un recubrimiento de polietileno [1].

Otra gran ventaja es que los pavimentos permeables pueden considerarse como una cadena de drenaje sostenible completa, ya que integran los procesos de infiltración, captación, transporte y almacenamiento [5]

En el caso de los adoquines se presentan ventajas como la restitución sencilla, debido a que es un pavimento permeable de carácter modular, permite la fácil restitución de los elementos dañados y su puesta en obra es rápida y cómoda para las superficies de gran extensión [5]

#### **2.2.2.3.2. Beneficios de Carácter Ambiental**

La principal ventaja por la cual se impulsa la utilización de pavimentos porosos permeables es la posibilidad de reutilización de las aguas pluviales [17]

Otra de las ventajas de carácter ambiental, es que permiten que los suelos retengan la humedad por más tiempo, favoreciendo así las áreas verdes, además de permitir la recarga de los mantos freáticos [1]

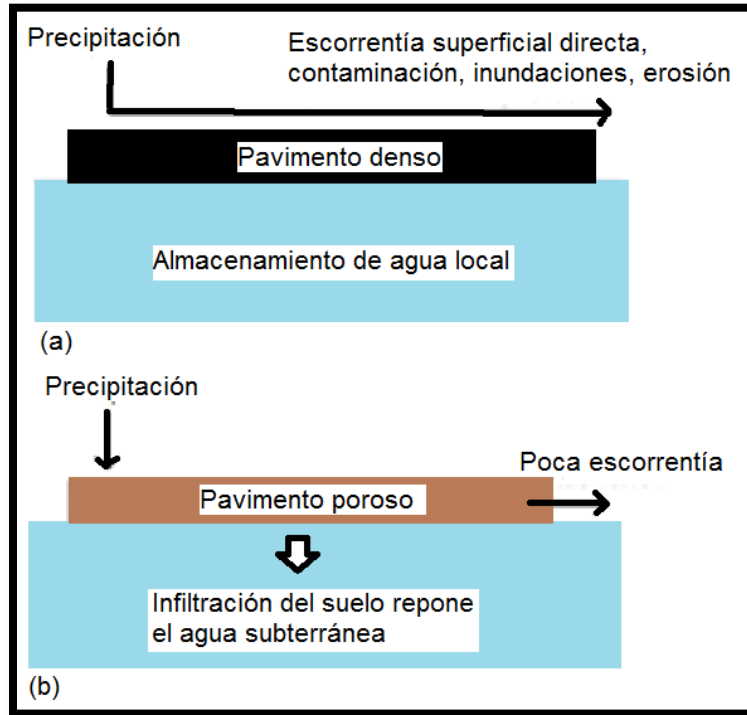
Este tipo de pavimentos ayuda a reducir el riesgo de inundaciones. Por otro lado, permite un mejor aprovechamiento del agua lluvia, la cual generalmente se contamina al mezclarse con el agua del drenaje sanitario, además de evitar el transporte de residuos o desechos del agua reduciendo el riesgo de obstrucción de alcantarillas [1].

En los pavimentos porosos se producen procesos físicos, químicos y biológicos los cuales producen mejoras en la calidad del agua de escorrentía urbana. Otra ventaja desde el punto de vista del control de la calidad de la escorrentía y en

relación al carácter técnico, es la disminución de las descargas de sistemas unitarios al reducirse la carga hidráulica en las conducciones [17].

Los pavimentos porosos permiten el crecimiento de la vegetación, ya que ayudan a que el agua lluvia se filtre rápidamente en el suelo, por lo que los recursos de agua subterránea se renuevan rápidamente en el tiempo, a diferencia de los pavimentos convencionales (Ilustración 12). [26]

**Ilustración 12.** Contraste de los efectos hidrológicos en los (a) pavimentos convencionales y (b) pavimentos porosos



**Fuente:** [1] [26]

Otra ventaja de los pavimentos porosos, es que proporcionan ventilación al suelo, ya que la cantidad de vacíos hace que su densidad y la conductividad térmica sean mejores que la de un pavimento convencional. Además, por su color claro refleja la luz solar y artificial absorbiendo menor cantidad de calor a diferencia de los pavimentos de asfalto convencional. Estas características del pavimento permiten adaptar la temperatura y la humedad y así eliminar el fenómeno "islas de calor" en las ciudades, que es producida por un gran volumen de concreto u otros materiales absorbentes que hacen que el calor se acumule [1] [17].

En el caso de los adoquines, al presentar vegetación en sus celdas, pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> [17].

### **2.2.2.3.3. Beneficios de Carácter Social**

Desde el punto de vista de la seguridad, los poros del pavimento tienen la ventaja de ayudar a eliminar el agua y el aceite de la superficie directamente, haciendo así que incrementen los coeficientes de fricción del pavimento poroso (comparado con los pavimentos tradicionales) [26]

Una gran ventaja de los pavimentos porosos, es que estos reducen el ruido del tráfico, particularmente el ruido producido por los neumáticos de los carros, ya que permite que parte del aire que se encuentra alrededor de éstos sea presionado dentro de los poros del pavimento, disipando así la presión de aire antes de que se genere algún ruido [26]

### **2.2.2.3.4. Beneficios de Carácter Económico**

La reducción de los volúmenes de agua en la red convencional implica una reducción de los costos asociados a otros sistemas, por ejemplo, plantas de tratamiento [17]

Además, el mantenimiento necesario para su buen funcionamiento es muy bajo en comparación con otras técnicas de drenaje urbano sostenible, y además ofrecen menor costo de ejecución por metro cuadrado, los materiales empleados son económicos y basta con poca mano de obra [1] [5]

## **2.2.2.4. ESTADO DEL ARTE**

### **2.2.2.4.1. Antecedentes**

Los pavimentos permeables se presentan hoy en día como la técnica de SUDS más estudiada e investigada. Las primeras aplicaciones de este tipo de soluciones para el drenaje urbano se remontan a la década de 1970. [5] [17]

Los pioneros en abrir el camino hacia el estudio y elaboración de guías de diseño de superficies permeables fueron los Estados Unidos. Fue a partir de los años 80 cuando se trataron aspectos de calidad del agua en los pavimentos permeables. Al emplear superficies permeables se buscaba aliviar la contaminación generada por los vertidos de los sistemas de saneamiento unitarios en tiempos de lluvia, reduciendo además los parámetros de diseño de las infraestructuras de drenaje urbano. Algunos manuales empleados hoy en día, en el estado de Virginia son “Virginia DCR Stormwater Design Specification N° 7”, O EN Nueva York el “NYC Green Infraestructura Plan”. [5] [17] [29]

En países como Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) publicó la guía de diseño “Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos”. El trabajo fue desarrollado por la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICTUC) a través del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, e incluye a los pavimentos permeables entre otras técnicas de SUDS. [5] [27]

Recientemente, en Australia y Nueva Zelanda destacan los trabajos de investigación desarrollados por las Universidades de South Australia y de Auckland, en los que se estudia la funcionalidad de los pavimentos permeables.

Como manuales o guías de diseño cabe citar el “Urban Stormwater: Best Practice Environmental Management Guidelines” y el “Water Sensitive Urban Design Technical Guidelines for Western Sydney”. [5]

En Europa y concretamente en el Reino Unido, es donde se concentra el mayor número de publicaciones referentes a los pavimentos porosos, destacando a las Universidades de Coventry (Inglaterra) y Abertay – Dundee (Escocia) como los primeros exponentes. Para la asociación de la construcción CIRIA se elaboró un manual, enfocando el diseño tanto estructural como hidráulico de los pavimentos permeables; “The SUDS manual”, es muy empleado incluso fuera de las fronteras británicas. [5] [22]

En Irlanda, McBride and Knapton en su artículo “The Design of Permeable Pavements for Retail Development in Ireland”, defienden el uso de firmes permeables para cumplir con los requerimientos de las autoridades locales de que cualquier Nuevo desarrollo no añada caudales adicionales al Sistema de drenaje urbano, manteniendo los niveles de permeabilidad previos al desarrollo [17]. La publicación referente a las reglas, políticas o estándares aplicables en materia de los pavimentos permeables destaca a “Greater Dublin Strategic Drainage Study. Regional Drainage Policies” [5] [30]

En Alemania, los pavimentos permeables han venido empleándose desde los años 70. Hoy en día, el control de la contaminación del agua es el principal aspecto estudiado y su construcción se encuentra regulada [17]. Como reglas, políticas o estándares aplicables destaca el “Planning, Construction and Operation of Facilities for the Percolation of the Precipitation Water”. [5]

En España, los grupos de investigación de algunas universidades españolas, como el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria, han sido las principales fuentes de aportación de artículos y trabajos científicos con los pavimentos permeables [5]. Entre ellos podemos encontrar documentos como “Estudio, Análisis y Diseño de Secciones Permeables de Firmes para Vías Urbanas con un Comportamiento Adecuado Frente a la Colmatación y con la Capacidad Portante Necesaria Para Soportar Tráficos Ligeros.”

#### **2.2.2.4.2. Casos de Estudio**

A continuación se mencionarán distintos casos a nivel internacional y nacional, en los cuales se evaluó la calidad de agua (entre otros factores), al pasar por distintos pavimentos permeables en diferentes condiciones.

- ***Stormwater quality of spring – summer - fall effluent from three partial - infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement.*** Jennifer Drake, Andrea Bradford, Tim Van Seters.

Este estudio examinó la calidad de agua de tres pavimentos permeables con sistema de infiltración parcial, y un pavimento de asfalto convencional, en las épocas de primavera, verano y otoño en Ontario. El estudio, realizado entre 2010

y 2012, comparó la calidad del agua de los efluentes de tres pavimentos permeables (AquaPave® (AP), Eco – Optiloc® (EO) y Concreto Permeable (PC)) con los efluentes del Asfalto convencional (ASH). El uso de los pavimentos permeables puede mitigar el impacto de la urbanización sobre la recepción de los sistemas de agua de superficie a través de control de la cantidad y el tratamiento de las aguas pluviales. Los pavimentos permeables (PP) proporcionan un excelente sistema de tratamiento de aguas lluvia para hidrocarburos de petróleo, sólidos suspendidos totales, metales (cobre, hierro, manganeso y zinc) y nutrientes (nitrógeno total y fosforó Total) mediante la reducción de las concentraciones medias, así como las cargas totales de contaminantes. En las Tablas 6, 7 y 8 se observan los resultados obtenidos para el estudio mencionado anteriormente. [31]

**Tabla 6.** Resultados de las concentraciones de contaminantes de calidad general en diferentes tipos de pavimentos

	CONCENTRACIÓN	CALIDAD GENERAL (mg/l)				
	CONTAMINANTE	SÓLIDOS DISUELTOS	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	CLORO	SODIO	pH
PAVIMENTO	ASH	76	54	3,4	2,1	7,6
	AP	250	11	6,7	28	8,3
	EO	266	7,2	9,8	33	8,3
	PC	459	11	8,1	41	9,1

Fuente: Adaptado de [31]

**Tabla 7.** Resultados de las concentraciones de nutrientes en diferentes tipos de pavimentos

	CONCENTRACIÓN	NUTRIENTES (mg/l)						
	CONTAMINANTE	AMONIACO Y AMONIO	NITRITO	NITRATO	NITRÓGENO ORGÁNICO	NITRÓGENO TOTAL	FOSFATO	FOSFATO TOTAL
PAVIMENTO	ASH	0,27	0,067	0,38	1	1,7	0,11	0,25
	AP	0,031	0,0091	0,92	0,16	1,1	0,019	0,03
	EO	0,031	0,0092	0,82	0,16	1	0,019	0,035
	PC	0,034	0,032	0,58	0,3	0,95	0,1	0,13

Fuente: Adaptado de [31]

**Tabla 8.** Resultados de las concentraciones de metales en diferentes tipos de pavimentos

	CONCENTRACIÓN	METALES (µg/l)								
	CONTAMINANTE	Al	B	Cu	Fe	Pb	Mn	K	Sr	Zn
PAVIMENTO	ASH	404	20	16	653	3,2	103	1,8	147	85
	AP	261	53	6,3	221	5,2	16	30	3645	19
	EO	215	65	5,8	174	3,7	12	21	4022	14
	PC	564	42	9,4	381	5,7	26	133	1210	13

Fuente: Adaptado de [31]

De acuerdo con lo relacionado en las Tablas 6, 7 y 8 se puede observar que el pavimento poroso (PP) redujo significativamente la concentración y la carga de amoníaco y amonio ( $\text{NH}_3$  y  $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrógeno orgánico (Org-N), pero aumentó la concentración y la carga de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Los sistemas de PP tenían resultados mixtos para el tratamiento de fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Los sistemas PP aumentaron la concentración de sodio (Na) y cloruro (Cl), pero se mantuvo muy por debajo de los niveles recomendados para la calidad del agua potable. Las concentraciones de contaminantes fueron mayores durante los primeros meses después de la construcción y disminuyeron rápidamente en el transcurso del estudio. [31]

- ***Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems.*** Benjamin O. Brattebo, Derek B. Booth

Este estudio examinó la eficacia a largo plazo del pavimento permeable como una alternativa al tradicional pavimento asfáltico impermeable en una zona de aparcamiento. Cuatro sistemas de pavimentos permeables disponibles comercialmente fueron evaluados después de 6 años de uso con el fin de evaluar la durabilidad estructural, capacidad de infiltración, y los impactos en la calidad del agua infiltrada. Los cuatro sistemas de pavimentos permeables no mostraron mayores signos de desgaste. Prácticamente toda el agua de lluvia se infiltró a través de los pavimentos porosos. El agua infiltrada tenía niveles significativamente más bajos de cobre y zinc que la escorrentía superficial directa desde la zona de asfalto. El aceite de motor se detectó en el 89% de las muestras de la escorrentía asfalto pero no en todas las muestras de agua infiltrada a través del pavimento permeable. [32]

Se tomaron muestras de nueve tormentas. Los límites mínimos de detección para cada muestra fueron los siguientes: aceite de motor, 0.10 mg/l; combustible diésel, 0.05 mg/l; cobre, 1.0  $\mu\text{g/l}$ ; zinc, 5.0  $\mu\text{g/l}$ . La dureza y la conductividad presentaban concentraciones significativamente más altas en el agua infiltrada, que en las muestras de escorrentía del asfalto. Las concentraciones de zinc y cobre fueron significativamente más bajas en las muestras del agua infiltrada. En todos los casos, las muestras de asfalto tenían concentraciones de cobre y zinc, las concentraciones más altas fueron 12,1 y 34  $\mu\text{g/l}$  respectivamente. En contraste, el 72% de las muestras de cobre, y el 22% de las muestras de zinc, estaban por debajo del límite de detección mínimo.

- ***Efficiency of Permeable Pavement Systems for the Removal of Urban Runoff Pollutants Under Varying Environmental Conditions.*** Kiran Tota-Maharaj and Miklas Scholz

La escorrentía de las aguas superficiales urbanas normalmente contiene un número alto pero variable de patógenos, nutrientes y sedimentos que requieren de su eliminación antes de la reutilización. Los pavimentos permeables pueden mejorar la calidad del agua a través de la interceptación, filtración, sedimentación, la transformación de nutrientes, y la eliminación microbiana. En la actualidad

existe suficiente información científica disponible sobre la eficacia del tratamiento de pavimentos permeables combinados con sistemas de energía de la Tierra con respecto a la eliminación de contaminantes de aguas pluviales, como nutrientes, sedimentos y contaminantes microbianos. [33]

Este estudio evalúa la eficiencia de 12 tanques con sistemas combinados en un medio. La investigación evaluó semanalmente la eliminación de los indicadores microbianos de coliformes totales, *Escherichia coli* y estreptococos fecales, así como los nutrientes clave de nitrógeno, amoníaco-nitrógeno, y orto fosfatos, y variables físicas, tales como sólidos en suspensión y la turbidez. Los Coliformes totales, *E. coli*, y estreptococos fecales se eliminaron en un 98 a 99%. Las eficiencias de eliminación de amoníaco-nitrógeno y ortofosfato fueron 84,6% y 77,5%, respectivamente [33].

Un análisis de varianza indica que la presencia o ausencia de un geotextil da como resultado una muy alta diferencia ( $P < 0,001$ ) con respecto a la eliminación de ambos amoníaco-nitrógeno y ortofosfato. Los sólidos en suspensión, turbidez, y la demanda bioquímica de oxígeno se redujeron en un 91%, 82% y 88%, respectivamente. Estos resultados indican el potencial del nuevo sistema propuesto en la remoción de contaminantes urbanos escorrentía y la posterior reutilización del agua tratada. [33]

- ***Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete.*** Liv Haselbach, Cara Poor, Jerin Tilson

El presente estudio investigó si el concreto permeable es eficaz en la eliminación de contaminantes como zinc y cobre disueltos en las aguas pluviales. Se cargaron cilindros de concreto permeable en el laboratorio con escorrentía simulada. En una serie de pruebas, las aguas pluviales se prepararon con concentraciones típicas (100 µg/l Zn y 20 µg/l Cu) que simulan diez tormentas consecutivas de 12 mm (0,5 pulg.) para probar el rendimiento inicial de eliminación. Otro conjunto de cilindros se cargó a cuarenta veces la concentración típica para simular a largo plazo la carga de metal indicativo de varios años de uso típico. Los resultados de carga de metal indican promedios de 93% y 91%, y la concentración Zn y Cu disminuye en un 90% y 87% respectivamente. [34]

A nivel nacional también se han realizado avances en materia de investigación sobre el diseño, evaluación y aplicabilidad de los pavimentos porosos. A continuación se enuncian algunos de los trabajos realizados a nivel Colombia.

- **Durabilidad de las Capacidades Filtrantes de la Capa de Rodadura de un Pavimento Poroso Rígido.** Gómez González G.A., Rodríguez Benavides A.F. y Torres A.

El objetivo de este trabajo consistió en estimar la durabilidad de las capacidades filtrantes de una capa de concreto poroso, mediante la representación de series de lluvia en laboratorio. [35]

Este trabajo se desarrolló recolectando agua de escorrentía mediante dispositivos ubicados en sumideros seleccionados sobre la carrera 7ª entre calles 39 y 45 en la ciudad de Bogotá, y determinando concentraciones de contaminantes asociados (Sólidos Suspendidos Totales – SST y Demanda Química de Oxígeno – DQO) antes y después de atravesar la muestra de pavimento poroso. Lo anterior permitió estimar las capacidades de retención de contaminantes asociados a dicha estructura y los periodos de funcionamiento antes de la colmatación. Se halló que el modelo de pavimento ensayado retiene aproximadamente el 55% en SST y 15% en DQO. [35]

La durabilidad de las capacidades filtrantes del pavimento en cuestión es de 8 meses aproximadamente debido a la alta carga de contaminantes presentes en el agua de escorrentía muestreada. A continuación se relacionan algunos de los resultados obtenidos en el presente trabajo:

**Tabla 9.** Resultados de la durabilidad de las capacidades filtrantes del pavimento poroso

		SST	DQO
Antes pp	Muestra 1	482 mg/l	336 mg/l
Después pp		84 mg/l	13 mg/l
Antes pp	Muestra 2	2273 mg/l	541 mg/l
Después pp		1658 mg/l	208 mg/l

Fuente: [35]

- **Propiedades filtrantes de los pavimentos porosos rígidos.** Andrés Torres, Diana Ortega, Eddy Herrera.

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar las propiedades de remoción de contaminantes que pueden brindar los pavimentos porosos rígidos utilizados como base. Para cuatro eventos lluviosos muestreados en la Calle 40 con Cra. 7 en Bogotá se determinaron los valores de Turbiedad y pH y las concentraciones de ST y DQO y sus respectivas incertidumbres antes y después de atravesar un pavimento poroso. [36]

Los principales resultados son: (i) los valores promedio de las concentraciones de contaminantes presentes en el agua de escorrentía presentaron el mismo orden

de magnitud que aquellos reportados en la literatura; (ii) al atravesar el pavimento poroso se observaron reducciones entre 26% y 45% para la turbiedad, de 78% para los ST y de 48% para la DQO con niveles aceptables de incertidumbre; (iii) al atravesar el pavimento poroso se observó un aumento en el pH: entre 11 y 12 unidades. Estos resultados parciales muestran que los pavimentos porosos pueden presentar beneficios ambientales interesantes que pueden llegar a contribuir en un desarrollo urbano sostenible. [36] Los datos obtenidos por el estudio realizado son los siguientes:

**Tabla 10.** Valores promedio de los parámetros de calidad para agua de escorrentía tomada en la Calle 40 con Cra. 7 en Bogotá durante cuatro eventos lluviosos.

Evento No.	Turbiedad (NTU)	Ph	ST (mg/l)	DQO (mg/l)
1	235	9	360	135
2	184	7	426	83
3	185	7	374	76
4	245	8	431	120

Fuente: [36]

**Tabla 11.** Valores promedio de los parámetros de calidad para cuatro eventos lluviosos luego de atravesar el concreto poroso

Evento No.	Turbiedad (NTU)	Ph	ST (mg/l)	DQO (mg/l)
1	173	11	80	70
2	149	11	135	63
3	158	11	102	52
4	136	12	200	41

Fuente: [36]

Los múltiples ejemplos sobre las investigaciones realizadas con los pavimentos porosos mencionadas anteriormente, demuestran amplia experiencia, generando confiabilidad al momento de realizar el presente trabajo de grado, puesto que se cuenta con una base sólida de información.

### 2.3. MARCO LEGAL

La legislación establece la normativa para la adaptación de diferentes manuales de técnicas para el diseño de pavimentos, las cuales se encuentran relacionadas en la Tabla 12.

**Tabla 12. Marco Legal Pavimentos**

<b>NORMA</b>	<b>AÑO</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>ENTE REGULADOR</b>
Resolución 1376	2014	Por el cual se actualizan las Especificaciones Generales de Construcción para Carreteras.	MINISTERIO DE TRANSPORTE
Resolución 1375	2014	Por el cual se actualizan las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras	MINISTERIO DE TRANSPORTE
Resolución 1049	2013	Por el cual se adopta el Manual de Diseño de Cimentadores Superficiales y Profundas para Carreteras.	MINISTERIO DE TRANSPORTE
Resolución 024	2011	Adoptar como Norma Técnica para los proyectos de la Red Vial Nacional, el MANUAL DE DRENAJE PARA CARRETERAS, elaborado en el año 2009 por el instituto Nacional de Vías (INVIAS)	MINISTERIO DE TRANSPORTE
Resolución 2576	2010	Por el cual se adopta el Manual de Interventoría en el Instituto Nacional de Vías como herramienta para realizar la supervisión en la ejecución de los contratos de obra e interventoría de obra.	MINISTERIO DE TRANSPORTE / INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS
Resolución 0803	2009	Por el cual adopta el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.	MINISTERIO DE TRANSPORTE
Resolución 0744	2009	Por el cual se actualiza el Manual de Diseño Geométrico para Carreteras	MINISTERIO DE TRANSPORTE
Resolución 0743	2009	Por el cual se actualiza la Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras.	MINISTERIO DE TRANSPORTE
Resolución 7106	2009	Por el cual se adopta la Guía de Manejo de Proyectos de Infraestructura-Subsector Vial- como instrumento de autogestión y autorregulación.	MINISTERIO DE TRANSPORTE / INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS)
Resolución 3482	2007	Por el cual se adopta el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en vías con Bajos Volúmenes de Tránsito.	MINISTERIO DE TRANSPORTE

**Fuente:** Los Autores

### 3. METODOLOGÍA

De acuerdo a los objetivos planteados al inicio de la investigación, el desarrollo central del presente proyecto se encuentra enmarcado por la revisión bibliográfica para la elección de la metodología de diseño más adecuada y la construcción del prototipo de pavimento poroso con el fin de evaluar la capacidad de captación de aguas lluvias y retención de contaminantes.

Lo anterior con el fin de sentar las bases a emplear en el montaje experimental y contar con las herramientas teóricas necesarias para la estructuración del pavimento poroso en campo.

Una vez elegida la metodología de diseño, se evaluarán cada una de las capas, el grosor de las mismas y los materiales a utilizar. A continuación se describen cada uno de los pasos que se llevaron a cabo a lo largo del desarrollo de la investigación.

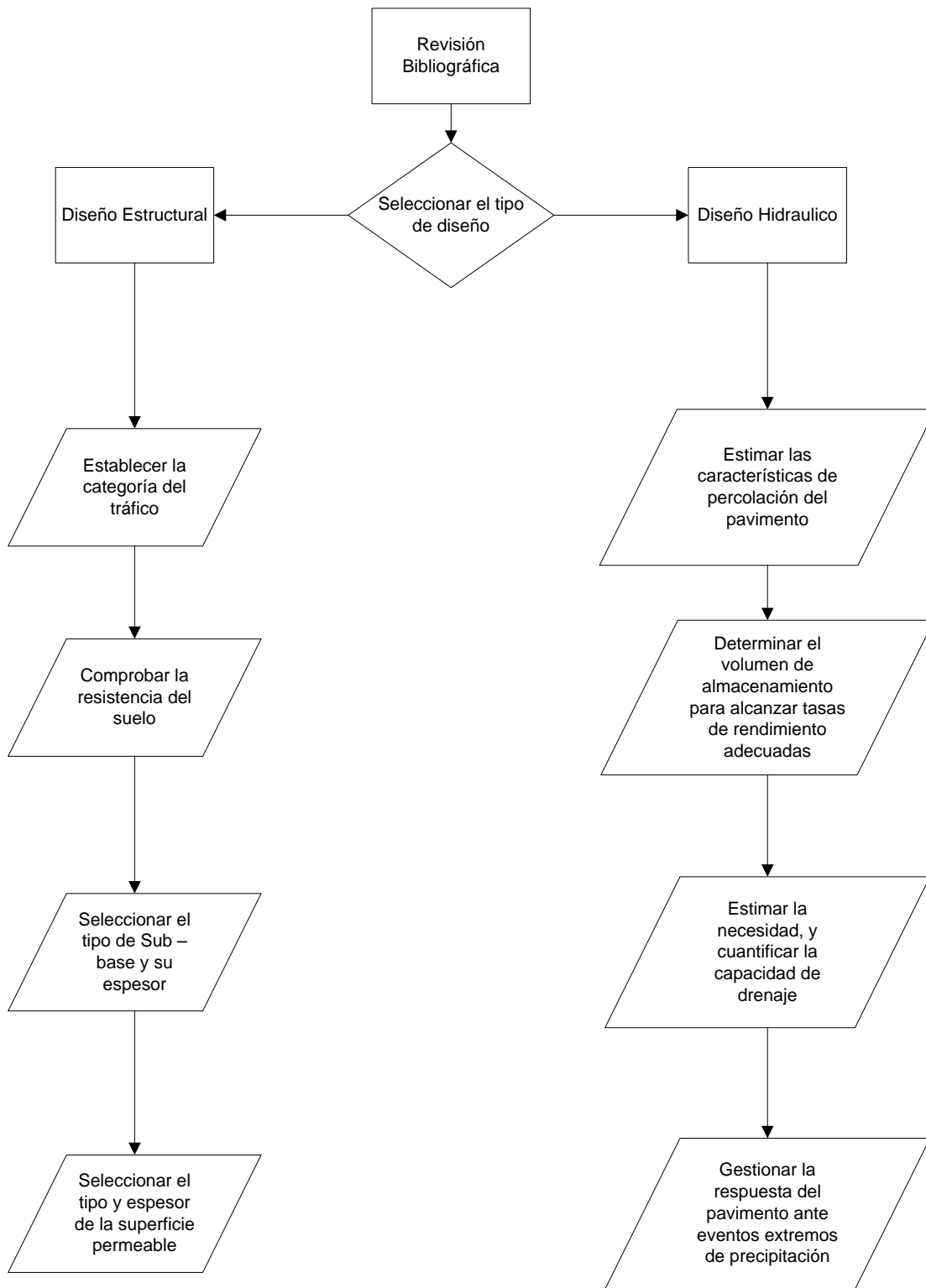
#### 3.1. Elección del diseño experimental

Al momento de diseñar el pavimento poroso se debe tener en cuenta, que éste, se puede evaluar de acuerdo a las metodologías de diseño: Diseño hidráulico y diseño estructural.

- **Diseño Hidráulico:** Se emplea con el fin de evaluar distintas características del pavimento para el almacenamiento del agua, relacionado principalmente con la intensidad de precipitación.
- **Diseño Estructural:** Se emplea con el fin de evaluar las características físicas que otorgan resistencia al pavimento y del mismo modo permiten el flujo vertical del agua.

A continuación se observa en la Ilustración 13 el diagrama de flujo con las características a considerar en cada uno de los diseños, lo anterior basado en la revisión bibliográfica realizada.

**Diagrama 1. Elección diseño experimental**



**Fuente: [1]**

Una vez analizada cada una de las técnicas, se decidió emplear la metodología estructural como base principal del diseño del pavimento poroso, ya que cuenta con las especificaciones de las características tanto del grosor de las capas como de los materiales para la construcción de las mismas, los cuales se utilizan para generar estabilidad del pavimento, retener los contaminantes a evaluar y permiten el paso del flujo vertical del agua, generando la infiltración total de la misma para su recolección y posterior análisis.

### 3.1.1. Metodología de diseño estructural

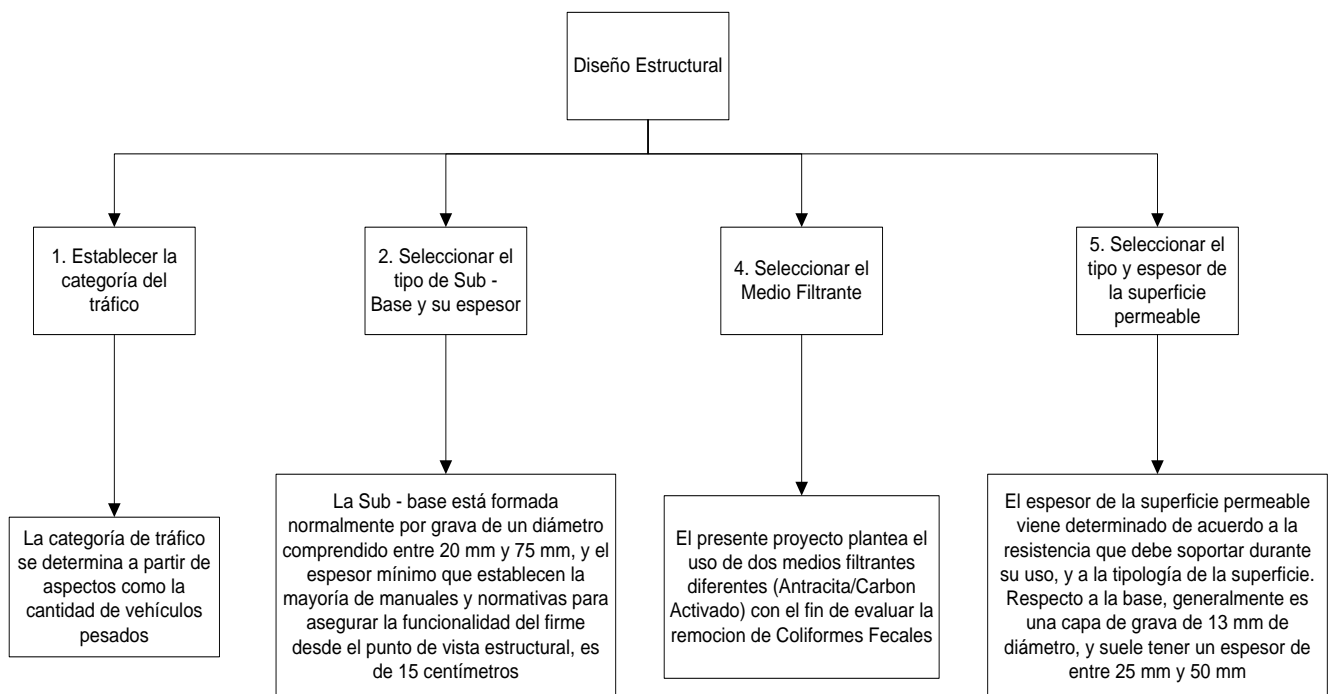
Los criterios de este diseño determinan que las condiciones del sistema cuenten con una resistencia estructural lo suficientemente adecuada para soportar ciertas cargas de tráfico de vehículos y del mismo modo generar almacenamiento de aguas lluvias.

Para realizar el diseño estructural (Diagrama 1), se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Establecer la categoría del tráfico
2. Comprobar la resistencia del suelo
3. Seleccionar el tipo de sub-base y su espesor
4. Seleccionar el tipo y espesor de la superficie permeable

Los cuales se encuentran descritos en el Diagrama 2.

**Diagrama 2. Metodología diseño estructural**



Fuente: [1]

A continuación se profundizará sobre cada una de las variables que se tuvieron en cuenta para el diseño del pavimento poroso.

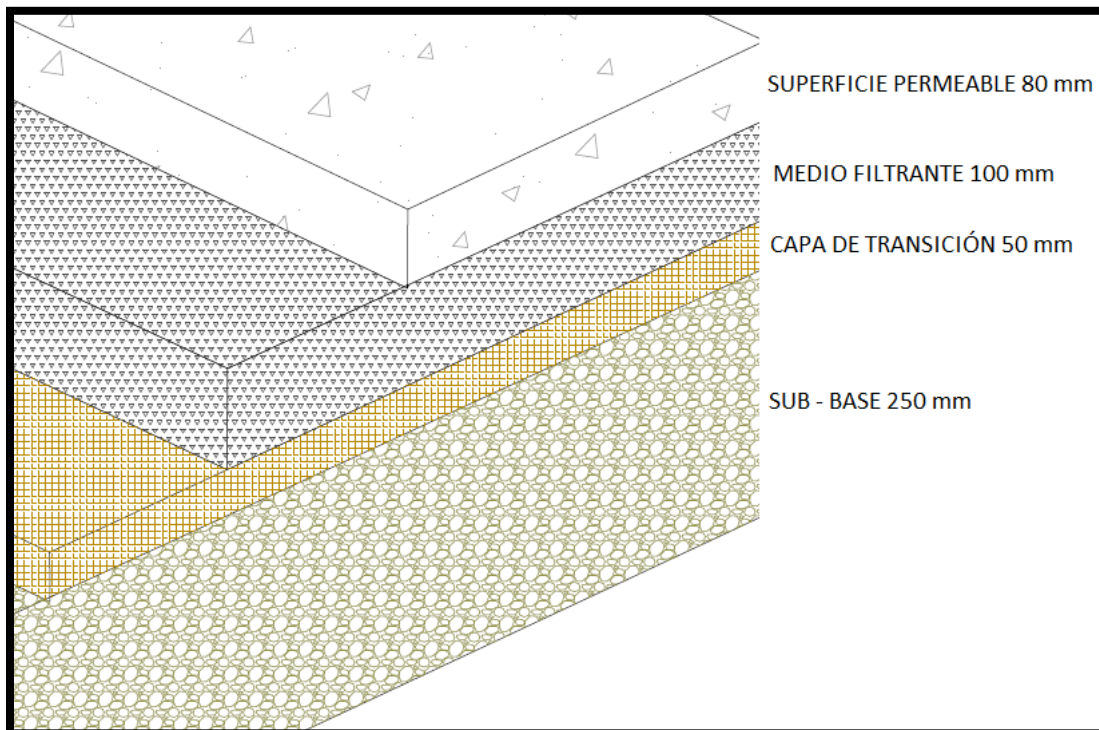
### 3.1.1.1. Establecer la categoría de tráfico

La categoría de tráfico se determina a partir de aspectos como la cantidad de vehículos pesados que transitan por semana, y la cantidad de ejes estándar, determinando así, sus respectivos usos como lo son: caminos, estacionamientos, calles de acceso, zonas comerciales e incluso calles principales. (Tabla 13)

De acuerdo a lo establecido en la Tabla 13, se determinó el uso de las especificaciones descritas en la categoría de carga 1, correspondiente a senderos peatonales, parques infantiles y parqueaderos domésticos, debido a la ventaja que representaría la implementación de éste pavimento en zonas que cuenten con el área superficial suficiente, bajo tráfico de vehículos pesados y que además cuenten con índices elevados de escases hídrica, lo que permitiría captación de las aguas lluvias para su almacenamiento, tratamiento y posterior uso.

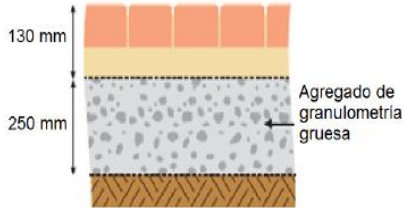
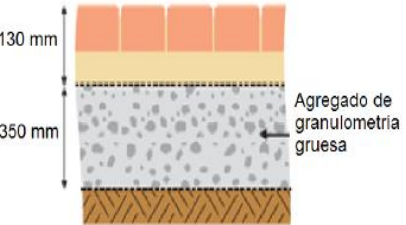
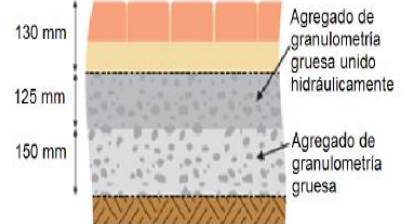
Además de definir el lugar de aplicabilidad del pavimento, la categoría de tráfico determina el grosor de cada uno de los elementos que conforman las capas, en la ilustración 13 se observa el diseño de las capas empleadas en este proyecto.

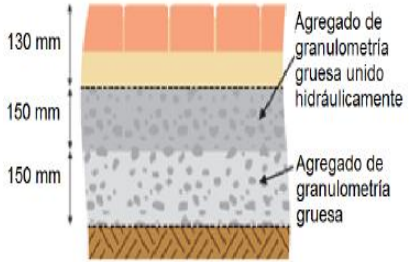
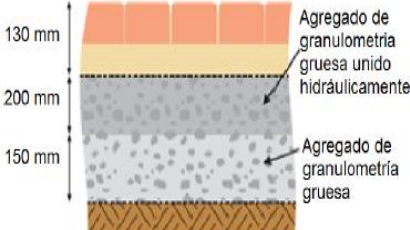
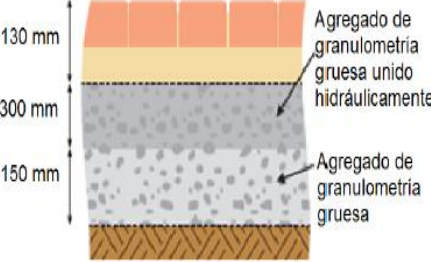
**Ilustración 13.** Grosos capas del pavimento poroso



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 13.** Categorías de carga para elección del diseño en pavimentos porosos.

CATEGORÍA DE CARGA	CANTIDAD DE VEHÍCULOS PESADOS POR SEMANA	MILLONES DE EJES ESTÁNDAR (msa)	EJEMPLOS	IMAGEN
<b>1</b> <b>(Parqueadero Doméstico)</b>	No se permiten vehículos pesados por semana	Cero ejes estándar	Patio, caminos privados, elementos decorativos, parque cerrado y aceras sin invasión de vehículos.	 <p>130 mm</p> <p>250 mm</p> <p>Agregado de granulometría gruesa</p>
<b>2</b> <b>(Carros)</b>	Emergencias (Sólo vehículos pesados)	100 ejes estándar	Bahías y pasillos de aparcamiento, plataforma de carga de una estación del ferrocarril, exposición externa de carros, estadio deportivo-ruta peatonal, aceras ocasionalmente invadida por vehículos y calles privadas/cruces.	 <p>130 mm</p> <p>350 mm</p> <p>Agregado de granulometría gruesa</p>
<b>3</b> <b>(Peatonal)</b>	Un vehículo pesado por semana	0.015 msa	Calles peatonales en ciudades y pueblos, accesos infantiles, zonas de aparcamiento para un desarrollo residencial, jardines – áreas externas, cementerios-crematorios, parqueaderos de hoteles, parqueaderos de aeropuertos sin paradas o recogida de buses y centros deportivos.	 <p>130 mm</p> <p>125 mm</p> <p>150 mm</p> <p>Agregado de granulometría gruesa unido hidráulicamente</p> <p>Agregado de granulometría gruesa</p>

<p><b>4</b> <b>(Tiendas)</b></p>	<p>Diez vehículos pesados por semana</p>	<p>0.15 msa</p>	<p>Vías de acceso de entrega en desarrollos comerciales, calles de acceso a escuelas y colegios, vía de entrega a oficinas, entrega a desarrollos residenciales pequeños, vías de entrega a ajardines o huertos, patio de estación de bomberos, parqueadero de aeropuertos con buses hacia el terminal, ruta de acceso a estadios deportivos.</p>	
<p><b>5</b> <b>(Comercial)</b></p>	<p>100 vehículos pesados por semana</p>	<p>1.5 msa</p>	<p>Locales comerciales, vía pública de tráfico ligero, desarrollo ligero de industrias, mixtos al por menos/desarrollos industriales, plaza de la ciudad, aceras con invasión regular de vehículos, carreteras públicas de aeropuertos.</p>	
<p><b>6</b> <b>(Tráfico pesado)</b></p>	<p>1000 vehículos pesados por semana</p>	<p>15 msa</p>	<p>Calles principales, centros de distribución, estación de buses (buses cada 5 minutos), autopistas, paradas de camiones, parada de buses, glorietas, carriles de buses.</p>	

Fuente: [1]

En seguida se describen las características de cada una de las capas que se tuvieron en cuenta para su posterior elaboración y montaje.

### 3.1.1.2. Seleccionar el tipo y espesor de la superficie permeable

La superficie permeable, en este caso, concreto poroso contó con un espesor de aproximadamente 80 mm, el cual presentaba las siguientes características:

- **Mezcla de concreto**

La mezcla del concreto, está constituida por cemento, agua y agregado grueso cuyo diámetro es de  $\frac{1}{4}$ " -  $\frac{1}{8}$ ". De ésta manera los vacíos que deberían ser llenados por la arena quedan uniformemente distribuidos aligerando el material. Las características finales de la mezcla corresponden a un producto muy maleable, fácil de usar y colocar, de muy alta resistencia a la compresión y muy buena resistencia a la flexión. [37]

Su peso unitario es sensiblemente más bajo que el de un concreto convencional hecho con el mismo agregado. La pasta de cemento no debe constituir un relleno, sino la liga entre los puntos de contacto de las partículas de agregado. Su resistencia es media y la contracción por secado es baja. [38]

Según lo establecido por Reyes y Torres en su artículo *EFECTO DE LAS FIBRAS PLÁSTICAS EN LA FLEXIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS DRENANTES* y teniendo en cuenta las recomendaciones de diseño y resistencia mencionados con anterioridad, el diseño óptimo del concreto poroso, ubicado en la superficie del pavimento, debe contar con las especificaciones relacionadas en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Diseño de mezcla óptimo para concretos porosos

DISEÑO MEZCLA CON 0.1% DE TIRA TIPO 1				
Producto	Cantidad (Kg)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Cantidad (m <sup>3</sup> )	Porcentajes
Cemento	500.00	3.01	0.17	16.59
Agregado 1/2" – 3/8"	835.72	2.54	0.33	32.86
Agregado 3/8" - #4	568.17	2.54	0.22	22.34
Agregado #4 - #8	182.26	2.54	0.07	7.17
Agregado #8 – Fondo	90.35	2.54	0.04	3.55
Agua	175.00	1.00	0.18	17.48
Plástico	2.35	-	-	-
Relación Agua/Cemento	0.35	-	-	-
<b>TOTAL Kg</b>	2351.50	<b>TOTAL M<sup>3</sup></b>	1.00	100.00

**Fuente:** Modificado de [44]

Se realizó un primer ensayo tomando en consideración las especificaciones descritas en la Tabla 14, obteniendo como resultado una loza de concreto con infiltración nula. En la Ilustración 14 se observa el primer ensayo realizado.

#### **Ilustración 14.** Primer ensayo mezcla concreto poroso



**Fuente:** Elaboración propia

Debido a esto se realizaron ensayos reduciendo cada vez más la cantidad de agua y cemento y aumentando el diámetro y la cantidad de grava. La mezcla se realizó en un balde agregando cantidades pequeñas de cemento y grava, mezclándolas entre sí, agregando poco a poco la cantidad de materiales que sea necesario y adicionando el agua mientras se continúan mezclando entre sí.

Una vez terminada la mezcla se dejó secar por un día, donde finalmente se obtuvo la lámina de concreto como se observa en la ilustración 15.

**Ilustración 15.** Segundo ensayo mezcla concreto poroso



**Fuente:** Elaboración Propia

Finalmente, se obtuvo una loza de concreto con la capacidad de infiltración requerida para éste proyecto, obteniendo un diseño de mezcla nuevo, relacionado en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Diseño de mezcla final

<b>Producto</b>	<b>Cantidad</b>
Cemento	1 Kg
Grava $\frac{1}{4}$ " - $\frac{1}{8}$ "	7 Kg
Agua	1 L

**Fuente:** Elaboración Propia

Se logró determinar una relación cemento/grava de 0.125, lo que indica que por cada kilogramo de cemento se deben emplear 8 kilogramos de grava, que debe contar con un diámetro de  $\frac{1}{4}$ " -  $\frac{1}{8}$ "; con respecto al agua utilizada se encontró que la cantidad óptima es de 1 litro.

### **3.1.1.3. Seleccionar el tipo de Sub-base y su espesor**

La granulometría de la sub-base debe garantizar la estabilidad del pavimento mediante la relación de agregados. Debido a que este material también será usado para el almacenamiento, debe ser resistente a la presencia de agentes químicos que puedan venir disueltos en el agua y así evitar su meteorización y la pérdida de cohesión al interior de los pavimentos.

El tipo de grava empleada en el prototipo fue de aproximadamente 50 mm de diámetro, y esta capa contó con un espesor de 250 mm con el fin de generar soporte; también se simuló una infiltración total del agua con el fin de analizar la retención y posible aprovechamiento de la misma.

### **3.1.1.4. Seleccionar el tipo de Base (o capa de transición) y su espesor**

La granulometría de la capa de transición debe permitir el flujo vertical del agua y a la vez garantizar la estabilidad del pavimento, permitiendo así que además de generar un soporte, prevenga que el medio filtrante se escape y tape la salida del filtro. Además, la grava ayuda a distribuir el fluido en los retro-lavados para que estos sean más eficientes.

La grava consta de un material donde una gran porción de las partículas son redondeadas, las cuales deben poseer gran dureza y resistencia a la degradación durante su manejo y uso. Teniendo en cuenta éstas especificaciones, se empleó grava de aproximadamente 6 mm, y el espesor de esta capa fue de 50 mm con el fin de que también se obtuviera retención de sólidos.

### **3.1.1.5. Seleccionar el medio filtrante**

Con el fin de buscar la remoción de coliformes fecales y en mayor número la cantidad de sólidos totales se plantearon dos montajes: Montaje A, el cual empleó como medio filtrante antracita y el Montaje C, que empleó carbón activado. Cada una de las capas contó con un espesor de 100 mm.

- **Montaje A (Antracita)**

Se escoge la antracita como medio filtrante, ya que su uso en procesos de clarificación es muy efectivos a nivel industrial. Presenta un 95% de carbono en su contenido y debido a la forma especial de sus granos, permite que el material que se encuentra en suspensión sea retenido en la profundidad del lecho filtrante.

- **Montaje C (Carbón Activado)**

Se escogió el carbón activado, debido a que es un material que cuenta con gran superficie interna, por lo cual tiene la posibilidad de retener moléculas en su interior, y es empleado en diversos procesos de purificación y tratamiento de efluentes.

En el tratamiento de aguas superficiales, se adiciona carbón activado para mejorar la eficacia de la eliminación de materia orgánica por adsorción. Por lo tanto al

implementar el carbón activado como medio filtrante se espera una alta remoción de coliformes fecales debido a las propiedades de retención que este posee.

Tanto la antracita como el carbón activado fueron evaluados en un laboratorio de suelos (Agrilab Servicios Ambiental y Agrícolas), con el fin de realizar una caracterización básica del material. Los resultados se encuentran consignados en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Caracterización de los materiales filtrantes

	PARÁMETRO	RESULTADOS	UNIDADES	METODO ANALÍTICO
<b>ANTRACITA</b>	Humedad	1.50	%	Gravimétrico
	Carbono Orgánico Oxidable Total	11.2	%	Walkley Black
	Densidad (Base Seca - 20°C)	0.83	g/c.c.	Gravimétrico
	Solubilidad en KOH 4%	0.12	g/100 ml	
<b>CARBÓN ACTIVADO</b>	Humedad	18.5	%	Gravimétrico
	Carbono Orgánico Oxidable Total	23.6	%	Walkley Black
	Densidad (Base Seca - 20°C)	0.68	g/c.c.	Gravimétrico
	Solubilidad en KOH 4%	1.36	g/100 ml	

Según lo recopilado en la Tabla 16, se observa que el carbón activado presenta mayores porcentajes de humedad y carbono orgánico oxidable total, es decir que su superficie se adhiere con mayor facilidad a la materia orgánica, lo que confirmaría las propiedades de retención de contaminantes descritas anteriormente.

Una vez determinadas las características de cada una de las capas, las funciones y el grosor de las mismas se procede a realizar el diseño experimental descrito a continuación.

### 3.2. Evaluación en Campo De Diseño Experimental

Cómo ya se mencionó en el marco conceptual, los montajes fueron construidos en el Campus de la Universidad Santo Tomás, llevando a cabo los pasos descritos a continuación:

- Elección y compra de materiales.
- Construcción de los montajes
- Determinación de coliformes totales y parámetros in-situ

#### 3.2.1. Materiales

La evaluación en campo comienza con la construcción de diseño experimental del pavimento poroso. Para esto se requieren de los materiales relacionados en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Materiales para la construcción del pavimento poroso

MATERIAL	UNIDADES	CANTIDAD	VALOR UNIDAD	VALOR TOTAL
CEMENTO	Kilogramos		N/A	\$ 26.000
AGUA	Litros		N/A	
GRAVA 1/4" - 1/8"	Kilogramos		N/A	\$ 18.000
GRAVA 2"	Kilogramos		N/A	\$ 18.000
ANTRACITA	kilogramos		N/A	\$ 42.000
CARBÓN ACTIVADO	kilogramos		\$ 8.000	\$ 64.000
GEOTEXTIL	Metros		N/A	\$ 17.000
AGUA DESTILADA	Litros		N/A	\$ 5.000
TUBOS DE PVC	N/A		N/A	\$ 3.500
LLAVE DE SALIDA DEL AGUA	Litros		N/A	\$ 1.500
CANECAS PARA EL MONTAJE	N/A	2	\$ 50.000	\$ 100.000
<b>TOTAL</b>				\$ 295.000

**Fuente:** Elaboración Propia

### 3.2.2. Construcción de los montajes

El proceso de construcción de los montajes comienza con la adecuación de dos canecas de plástico con un volumen de 120 litros cada una, en las cuales se adiciona una llave de salida al final de las canecas y son colocadas encima de dos ladrillos, permitiendo de ésta manera una mayor facilidad al momento de la toma de muestras y generando un soporte a los montajes.

### Ilustración 16. Montajes de pavimentos porosos



**Fuente:** Elaboración Propia

Una vez colocadas las canecas en los soportes se realiza un lavado de la grava a utilizar, con el fin de retirar las impurezas y los residuos que puedan tener y así llenar las canecas hasta completar el grosor requerido de dichas capas.

**Ilustración 17.** Lavado de la grava previo a su montaje



**Fuente:** Elaboración Propia

### Ilustración 18. Montaje capa de grava



**Fuente:** Elaboración Propia

Para evitar que el material filtrante se sedimente hasta la salida del montaje, se colocó una capa de geotextil y se adicionó antracita (para el montaje A) y carbón activado (para el montaje C).

**Ilustración 19.** Montaje capa de material filtrante



Nuevamente se adiciona una segunda capa de geotextil y finalmente se realiza la mezcla del cemento con las proporciones ya mencionadas anteriormente.

**Ilustración 20.** Elaboración capa de concreto poroso



**Fuente:** Elaboración Propia

Finalmente se deja secar el sistema por tres días, teniendo en cuenta que el segundo día se adiciona un poco de agua con el fin de hidratar el montaje e impedir que el cemento se compacte demasiado, impidiendo la infiltración del agua.

**Ilustración 21.** Montaje final Carbón Activado



**Fuente:** Elaboración Propia

**Ilustración 22.** Montaje final sistema con antracita



Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.3. Determinación de coliformes totales y parámetros in-situ

Una vez contruidos los montajes, se decide que para efecto de este proyecto se analizaría únicamente la remoción de coliformes ya que se espera que el agua lluvia que pase por el sistema salga con las condiciones adecuadas para su posible reutilización; para esto se emplea agua sintética, la cual cuenta con heces de vacas, perros y gatos, proporcionando una fuente de contaminación de coliformes significativa para la investigación (Tabla 18). Además de permitir el análisis de otros parámetros in-situ como pH, conductividad, sólidos totales disueltos y turbidez.

Para la determinación de coliformes totales se tuvieron en cuenta los siguientes pasos:

- Ensayos de capacidad de infiltración del pavimento.
- Preparación de la mezcla.
- Toma de muestras

Los pasos mencionados anteriormente se realizaron de igual manera para los dos montajes y se encuentran descritos a continuación.

#### 1.2.3.1. Ensayos de capacidad de infiltración del pavimento

Debido a que cada uno de los materiales tiene una capacidad diferente de infiltración, se realizó una prueba empleando 6 litros de agua de la llave, vertiéndolos de manera constante al pavimento, esperando hasta que la totalidad del agua se infiltrara y saliera del sistema por completo. Desde el momento exacto en que el agua abandona el sistema se contabilizó el tiempo obteniendo un total de 6.38 minutos para el montaje con carbón activado y 2.85 minutos para el montaje con antracita.

#### 1.2.3.2. Preparación de la mezcla

La preparación de la mezcla se realizó con base al artículo *Efficiency of Permeable Pavement Systems for the Removal of Urban Runoff Pollutants Under Varying Environmental Conditions* de Kiran Tota-Maharaj y Miklas Scholz donde se indicó una mezcla que consistía en 3.1 g de heces fresca por cada 2.2 L de agua. Se realizaron los cálculos y conversiones correspondientes y se determinó la cantidad de heces, agua de la llave y agua lluvia a emplear en cada uno de los montajes en un lapso de 30 min; obteniendo como resultado los datos consignados en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Composición de la mezcla para determinación de coliformes totales por ensayo

MONTAJE	CANTIDAD DE AGUAS LLUVIA	CANTIDAD DE AGUA DE LA LLAVE	CANTIDAD DE HECES
Montaje A (Antracita)	7.3 Litros	73 Litros	102 gramos
Montaje C (Carbón)	2.8 Litros	28 Litros	39.2 gramos

Activado)			
-----------	--	--	--

**Fuente:** Elaboración Propia

Una vez obtenida la cantidad de cada elemento a utilizar, se mezclan las heces con un poco de agua para pasarlas de un estado sólido a líquido, lo que permitió incorporar todos los elementos en una sola mezcla de manera más sencilla y así garantizar que por el gran tamaño de las heces éstas quedaran en la superficie del pavimento.

**Ilustración 23.** Mezcla para la determinación de coliformes totales y parámetros in-situ



**Fuente:** Elaboración Propia

### 1.2.3.3. Toma de muestras

Se determinó un total de 5 muestras a tomar, las cuales se encuentran descritas en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Descripción de las muestras para determinación de coliformes

NUMÉRO DE MUESTRA	DESCRIPCIÓN
Muestra 1	Tomada a la entrada del sistema
Muestra 2	Tomada a la salida del sistema
Muestra 3	Tomada a los 10 min posteriores a la salida
Muestra 4	Tomada a los 20 min posteriores a la salida
Muestra 5	Tomada a los 30 min posteriores a la salida

**Fuente:** Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 19, se empleó la toma de un total de 5 muestras en intervalos de tiempo de 10 minutos, esto con el fin de obtener resultados que permitan analizar el fenómeno del primer lavado. Adicionalmente se tomó la

muestra antes de ingresar al sistema permitiendo la comparación entre los resultados de la entrada y salida de cada uno de los montajes.

Para que los resultados sean significativos en esta investigación se realizaron un total de 3 ensayos por sistema y un triplicado de cada una de las muestras tomadas, obteniendo 30 muestras por montaje.

Conociendo la cantidad de muestras, se rotularon cada una de las botellas de plástico de 600 ml empleando las convenciones relacionadas a continuación.

**Tabla 20.** Rótulo de las muestras de coliformes totales Montaje A

<b>NÚMERO DE MUESTRA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>1A1</b>	Ensayo 1 – Antracita – Muestra 1
<b>1A2</b>	Ensayo 1 – Antracita – Muestra 2
<b>1A3</b>	Ensayo 1 – Antracita – Muestra 3
<b>1A4</b>	Ensayo 1 – Antracita – Muestra 4
<b>1A5</b>	Ensayo 1 – Antracita – Muestra 5
<b>2A1</b>	Ensayo 2 – Antracita – Muestra 1
<b>2A2</b>	Ensayo 2 – Antracita – Muestra 2
<b>2A3</b>	Ensayo 2 – Antracita – Muestra 3
<b>2A4</b>	Ensayo 2 – Antracita – Muestra 4
<b>2A5</b>	Ensayo 2 – Antracita – Muestra 5
<b>3A1</b>	Ensayo 3 – Antracita – Muestra 1
<b>3A2</b>	Ensayo 3 – Antracita – Muestra 2
<b>3A3</b>	Ensayo 3 – Antracita – Muestra 3
<b>3A4</b>	Ensayo 3 – Antracita – Muestra 4
<b>3A5</b>	Ensayo 3 – Antracita – Muestra 5

**Fuente:** Elaboración Propia

**Tabla 21.** Rótulos de las muestras Montaje C

<b>NÚMERO DE MUESTRA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>1C1</b>	Ensayo 1 – Carbón Activado– Muestra 1
<b>1C2</b>	Ensayo 1 – Carbón Activado – Muestra 2
<b>1C3</b>	Ensayo 1 – Carbón Activado – Muestra 3
<b>1C4</b>	Ensayo 1 – Carbón Activado – Muestra 4
<b>1C5</b>	Ensayo 1 – Carbón Activado – Muestra 5
<b>2C1</b>	Ensayo 2 – Carbón Activado – Muestra 1
<b>2C2</b>	Ensayo 2 – Carbón Activado – Muestra 2
<b>2C3</b>	Ensayo 2 – Carbón Activado – Muestra 3
<b>2C4</b>	Ensayo 2 – Carbón Activado – Muestra 4
<b>2C5</b>	Ensayo 2 – Carbón Activado – Muestra 5
<b>3C1</b>	Ensayo 3 – Carbón Activado – Muestra 1
<b>3C2</b>	Ensayo 3 – Carbón Activado – Muestra 2
<b>3C3</b>	Ensayo 3 – Carbón Activado – Muestra 3
<b>3C4</b>	Ensayo 3 – Carbón Activado – Muestra 4
<b>3C5</b>	Ensayo 3 – Carbón Activado – Muestra 5

**Fuente:** Elaboración propia

Una vez rotuladas las botellas, se tomó la muestra 1 (Antes del ingreso del sistema) y se vació la mezcla al montaje de manera constante a una velocidad promedio de 0.94 l/s para el montaje con carbón activado y 2.44 l/s para el montaje con antracita. Inmediatamente empezó a salir el agua del sistema se toma la segunda muestra, a los 10 minutos la tercera, a los 20 minutos la cuarta y a los 30 min la quinta y última muestra.

Las botellas se llenan un poco más de la mitad, dejando un espacio vacío el cual permitió que los microorganismos contaran con el oxígeno suficiente para su desarrollo. Tomadas las muestras fueron almacenadas en una nevera de icopor con hielo suficiente que permitiera la preservación de las mismas y finalmente fueron conducidas al laboratorio para su análisis.

## Ilustración 24. Muestras para la determinación de coliformes totales



**Fuente:** Elaboración Propia

### 1.2.3.4. Análisis de muestras de coliformes totales

Los análisis de coliformes totales fueron realizados en el laboratorio de análisis microbiológico, en donde se empleó la metodología de recuento en placa profunda, en donde se cuentan las células de una muestra que son capaces de formar colonias cuando se inoculan en un medio de cultivo sólido adecuado. La muestra se mezcla con el medio de cultivo y se vierte en la placa estéril, lo cual permite inocular volúmenes mayores de la muestra

### 1.2.4. Determinación de parámetros in-situ

Se determinaron parámetros como pH, conductividad, turbidez y sólidos disueltos totales. Estas mediciones se realizaron bajo las mismas condiciones que las empleadas en la determinación de coliformes totales. Por lo tanto la mezcla, la rotulación y la cantidad de muestras son las mismas. Para tal fin se empleó el multiparámetro, proporcionado por la Universidad Santo Tomás

### 1.2.5. Determinación porcentaje de colmatación

Con el fin de estimar un porcentaje promedio que permitiera tener una idea de la vida útil del pavimento, se realizaron los análisis gravimétricos para cada uno de los montajes.

La mezcla utilizada para éste ensayo estaba compuesta de 5 gramos de arena disueltos en 100 ml de agua para los ensayos con antracita y 10 gramos de arena en 200 ml de agua para el carbón activado. Lo anterior debido a que el sistema con carbón activado retiene más la humedad y no permite el paso de pequeñas cantidades de agua, impidiendo la toma de muestra de las mismas. Se decide recolectar un total de 21 muestras por ensayo, una a la entrada y 20 a la salida.

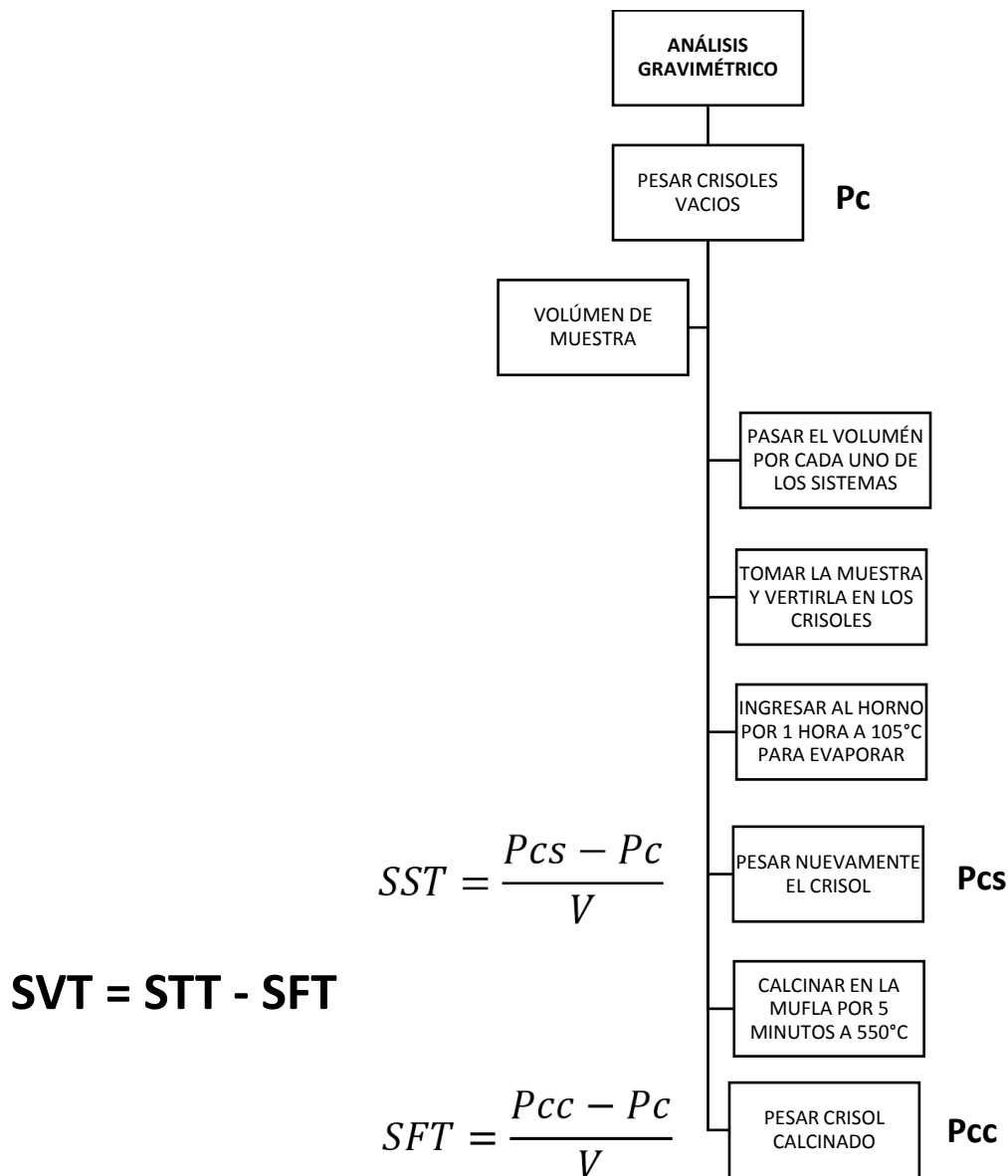
Una vez mezclados los materiales son vertidos en el pavimento y se recolectan dos muestras: Una para la determinación de Sólidos disueltos y otra para sólidos suspendidos.

El procedimiento llevado a cabo para el análisis de muestras se encuentra descrito a continuación.

### 1.2.5.1. Determinación de Sólidos Volátiles

Para la determinación de sólidos volátiles se realizaron los análisis gravimétricos correspondientes, para esto se llevó a cabo el proceso descrito en el Diagrama 3.

**Diagrama 3.** Metodología para la determinación de sólidos disueltos



**Fuente:** Elaboración Propia

Donde:

**Pc:** Peso inicial del crisol.

**Pcs:** Peso del crisol seco.

**Pcc:** Peso del crisol calcinado:

**V:** Volumen de muestra.

**SVT:** Sólidos Volátiles Totales.

**SST:** Sólidos suspendidos totales.

**SFT:** Sólidos fijos totales.

Para la determinación de sólidos volátiles se requiere el uso de crisoles, los cuales son pesados antes de la toma de muestras (Pc), cómo se observa en la ilustración

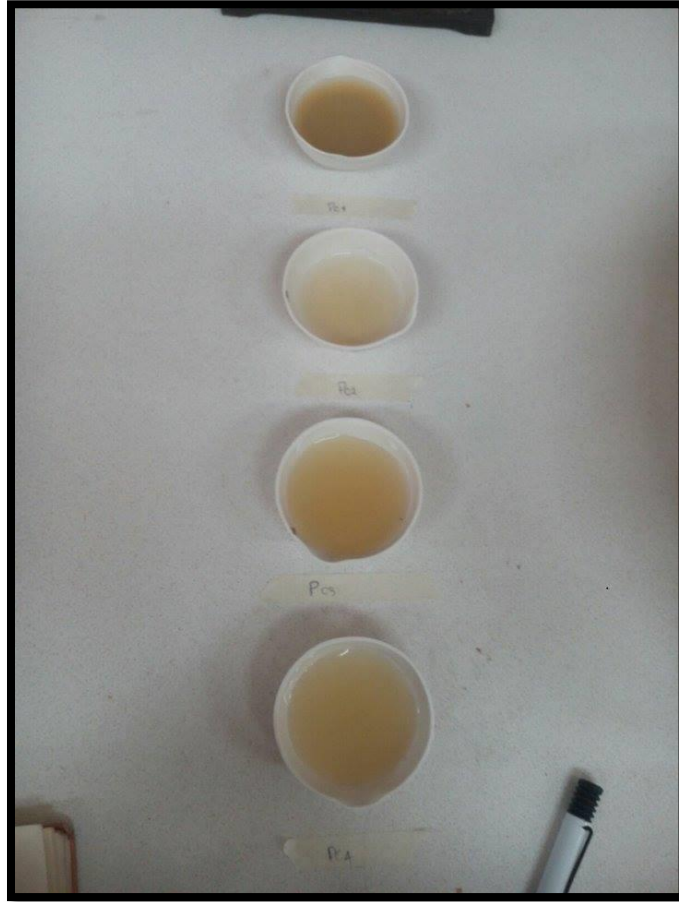
**Ilustración 25.** Peso inicial del crisol



**Fuente:** Elaboración Propia

Una vez pasada la mezcla por el sistema, se recolectó en cada uno de los crisoles, cómo se observa en la ilustración 26.

**Ilustración 26.** Muestras recolectadas en crisoles



**Fuente:** Elaboración Propia

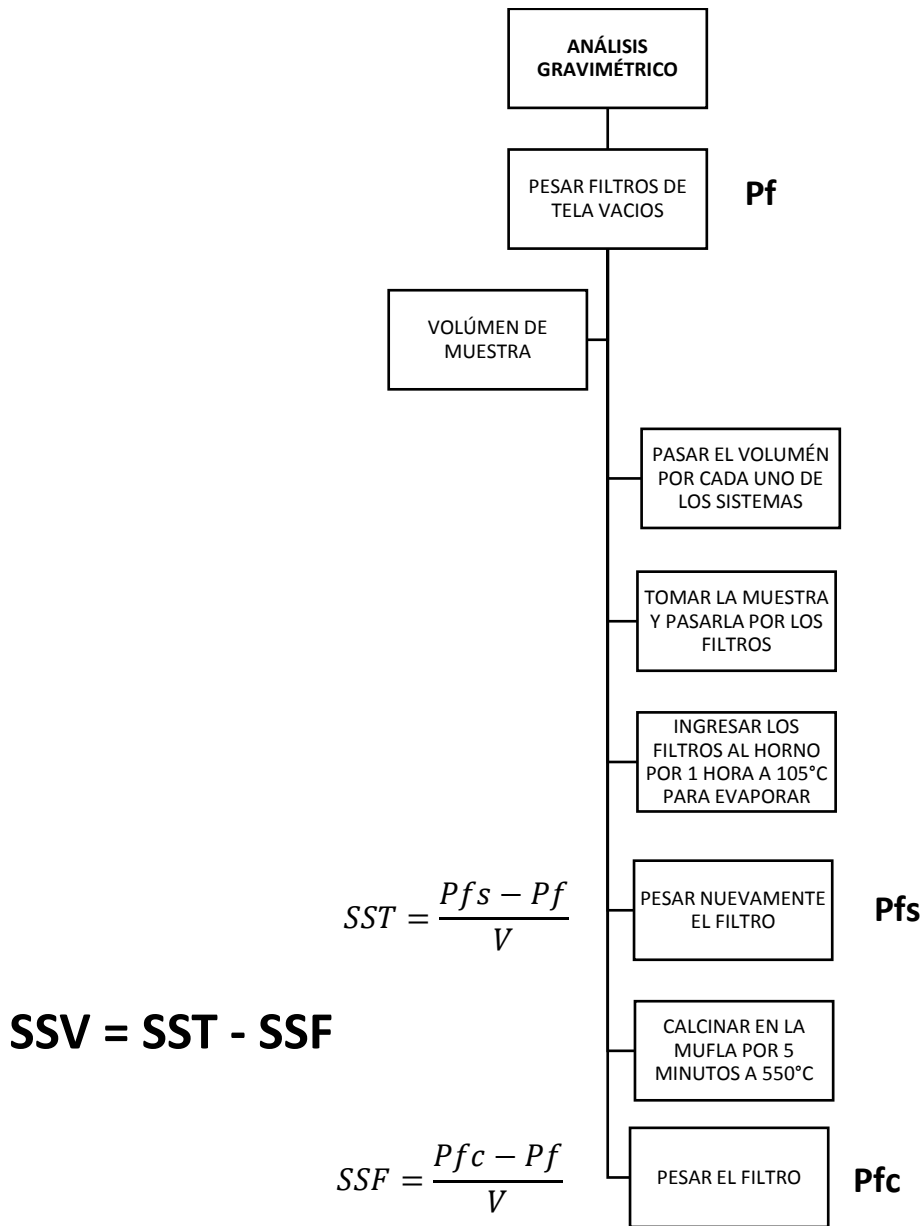
Posterior a esto, los crisoles fueron llevados a un horno donde se dejaron por una hora a una temperatura de 105°C y ser pesados nuevamente, con el fin de retirar toda la humedad y obtener el peso seco del crisol.

Obtenido el peso del crisol en seco (Pcs), las muestras se llevan a una mufla para ser calcinadas a una temperatura de 550°C en un tiempo de 5 minutos, para finalmente ser pesadas de nuevo.

### 1.2.5.2. Determinación de sólidos disueltos

Se realiza el mismo proceso y la misma cantidad de muestras que las utilizadas en la determinación de sólidos disueltos. La metodología llevada a cabo se observa en el Diagrama 4.

**Diagrama 4.** Metodología determinación de sólidos disueltos



**Fuente:** Elaboración Propia

Donde:

**Pf:** Peso inicial del filtro de tela.

**Pfs:** Peso del filtro de tela seco.

**Pfc:** Peso del filtro de tela calcinado:

**V:** Volumen de muestra.

**SSV:** Sólidos Suspendidos Volátiles.

**SST:** Sólidos suspendidos totales.

**SSF:** Sólidos Suspendidos fijos.

Como se observa en el diagrama 4, la metodología de análisis de sólidos suspendidos es el mismo proceso que se llevó a cabo en la determinación de sólidos volátiles; la diferencia se encuentra en el material utilizado, ya que para éste caso se reemplazan los crisoles por filtros de tela, los cuales fueron pesados para determinar el peso inicial.

Se tomaron las muestras, pasándolas por el filtro de tela y esperando hasta que toda la mezcla se infiltrara.

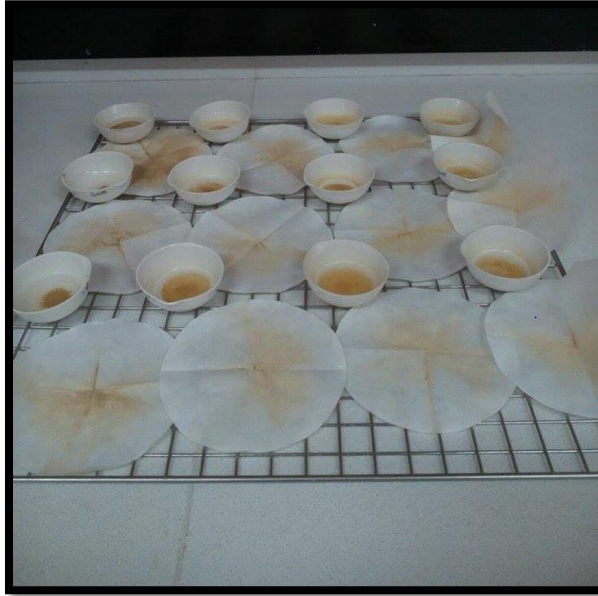
**Ilustración 27.** Filtros de tela para la determinación de sólidos suspendidos



**Fuente:** Elaboración propia

Cuando la mezcla se infiltró en su totalidad, los filtros fueron transportados a un horno, junto con los crisoles por una hora a una temperatura de 105°C.

**Ilustración 28.** Muestras recolectadas para ser transportadas al primer horno



**Fuente:** Elaboración Propia

Pasada la hora de secado, las muestras fueron pesadas nuevamente y conducidas a una mufla donde se calcinaron por 5 minutos a 550°C. Debido a las altas temperaturas a las que fueron sometidos los filtros, éstos se calcinaron en su totalidad obteniendo como resultado para los sólidos suspendidos fijos un valor total de cero.

**Ilustración 29.** Filtros de tela luego del primer secado



**Fuente:** Elaboración propia

## 4. RESULTADOS

A continuación se relacionan los resultados obtenidos en el análisis para la determinación de coliformes totales, parámetros in-situ y porcentaje de calcinación de cada uno de los montajes realizados a lo largo del desarrollo de éste proyecto.

### 4.1. Resultados Coliformes Totales

#### 4.1.1. Resultado coliformes totales montaje A (Antracita)

Se obtienen como resultados para el montaje A (Antracita) los relacionados a continuación:

**Tabla 22.** Resultados Coliformes Totales Montaje A (Antracita)

NÚMERO DE MUESTRA	UNIDADES FORMADORAS DE COLONIAS (UFC/mL)
1A1	58666,67
1A2	174,00
1A3	0,00
1A4	0,00
1A5	0,00
2A1	34000,00
2A2	0,00
2A3	0,00
2A4	0,00
2A5	0,00
3A1	48333,33
3A2	0,00
3A3	0,00
3A4	0,00
3A5	0,00

**Fuente:** Elaboración Propia

La muestra de la entrada presenta una variación significativa en su comportamiento, puesto que la reducción obtenida en el primer ensayo es de 99.7%. Con respecto a la segunda muestra se observa una reducción aún más significativa de los coliformes totales presentes en la mezcla, la cual corresponde al 100%, lo que se mantuvo a lo largo del análisis.

#### 4.1.2. Resultados coliformes totales montaje C (Carbón Activado)

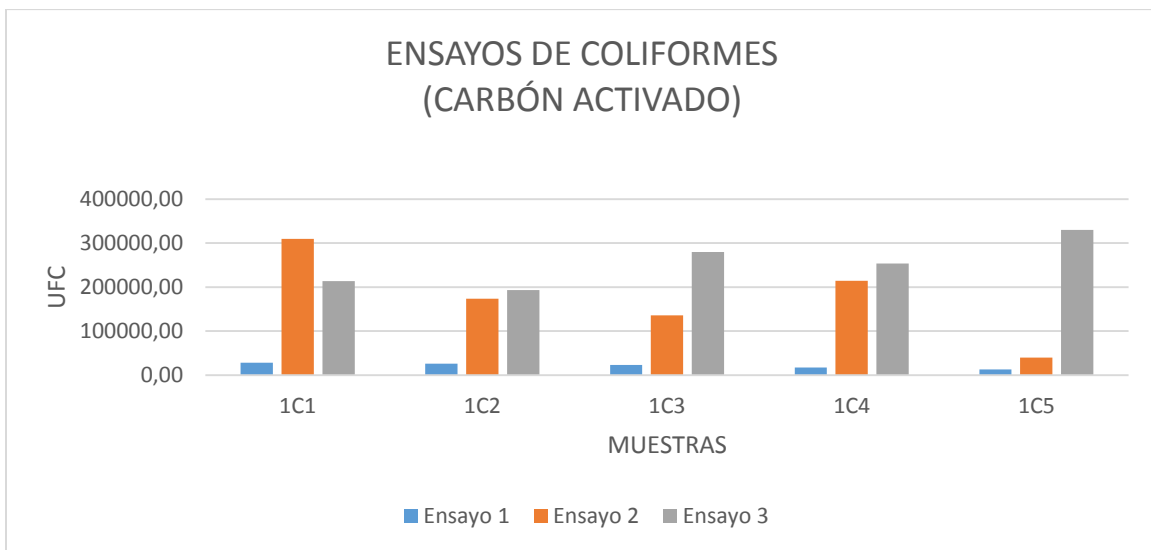
Con respecto a los ensayos realizados con el montaje C, el cual empleó carbón activado se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 23.** Resultados Coliformes Totales Montaje C (Carbón Activado)

NÚMERO DE MUESTRA	UNIDADES FORMADORAS DE COLONIAS (UFC/mL)
1C1	27666,67
1C2	25666,67
1C3	23000,00
1C4	17333,33
1C5	13000,00
2C1	310000,00
2C2	173333,33
2C3	136000,00
2C4	214000,00
2C5	39333,33
3C1	213333,33
3C2	193333,33
3C3	280000,00
3C4	253333,33
3C5	330000,00

**Fuente:** Elaboración Propia

**Gráfica 1.** Resultados Coliformes Totales Montaje C (Carbón Activado)



**Fuente:** Elaboración Propia

En la Gráfica 1 se logra observar, que en el primer ensayo la muestra 1C1 (Entrada al sistema), posee una cantidad de coliformes promedio de 27666,67 UFC, y que en el momento de pasar por el pavimento, se presenta una reducción

del 7% en la muestra 1C2 (Salida del sistema). Así pues, se logra observar que en la muestra 1C5 (Salida, minuto 30), hay una reducción del 53%.

En el segundo ensayo, se observa que la muestra 2C1 (Entrada al sistema), posee una cantidad de coliformes promedio de 310000,00 UFC, y que en el momento de pasar por el pavimento, se presenta una reducción del 44% en la muestra 2C2 (Salida del sistema). De esta manera se logra observar que en la muestra 2C5 (Salida, minuto 30), hay una reducción del 12%.

En el tercer ensayo, se observa que la muestra 3C1 (Entrada al sistema), posee una cantidad de coliformes promedio de 213333,33 UFC, y que en el momento de pasar por el pavimento, se presenta una reducción del 9% en la muestra 3C2 (Salida del sistema). Sin embargo, se después de esta muestra empieza a aumentar la cantidad de coliformes hasta un 45%.

#### 4.2. Resultado parámetros in-situ

Los parámetros in-situ evaluados para éste proyecto fueron pH, conductividad, sólidos totales disueltos y turbidez, los cuales se encuentran descritos a continuación.

##### 4.2.1. Resultados parámetros in-situ Montaje A (Antracita)

**Tabla 24.** Resultados Parámetros in-situ Montaje A (Antracita)

NÚMERO DE MUESTRA	pH	CONDUCTIVIDAD $\mu\text{s}/\text{cm}$	SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS ppm	TURBIDEZ UNT
1A1	7,48	215,33	107,67	121,33
1A2	11,20	698,00	348,67	77,13
1A3	10,91	418,67	209,67	40,10
1A4	11,05	504,00	252,00	31,33
1A5	11,06	501,33	251,00	55,13
2A1	7,28	217,67	107,00	120,67
2A2	10,91	439,00	219,67	58,77
2A3	10,93	432,33	216,33	52,93
2A4	10,72	355,67	177,67	57,83
2A5	10,39	287,33	143,33	58,13
3A1	7,44	216,00	107,00	121,33
3A2	10,44	294,00	147,00	59,87
3A3	10,51	304,67	152,67	61,87
3A4	10,59	320,67	160,33	49,53
3A5	10,40	292,00	146,00	47,53

**Fuente:** Elaboración Propia

#### 4.2.2. Resultados parámetros in-situ Montaje C (Carbón Activado)

Con respecto a los ensayos realizados con el montaje C, el cual empleó carbón activado obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 25.** Resultados parámetros in-situ montaje C

NÚMERO DE MUESTRA	pH	CONDUCTIVIDAD $\mu\text{s}/\text{cm}$	SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS ppm	TURBIDEZ UNT
1C1	7,86	219,33	110,00	176,33
1C2	7,10	240,67	120,33	85,63
1C3	7,02	215,33	108,00	138,00
1C4	7,06	217,33	108,67	147,67
1C5	7,06	211,67	105,67	131,00
2C1	7,97	218,67	109,33	175,33
2C2	7,06	215,33	108,00	150,00
2C3	7,14	216,67	108,00	151,00
2C4	7,01	209,33	104,67	127,67
2C5	7,25	216,67	108,00	158,67
3C1	7,97	219,00	109,33	176,33
3C2	7,04	214,00	106,00	147,33
3C3	7,10	214,67	105,33	148,00
3C4	7,01	207,00	104,67	127,00
3C5	7,22	213,33	105,33	125,00

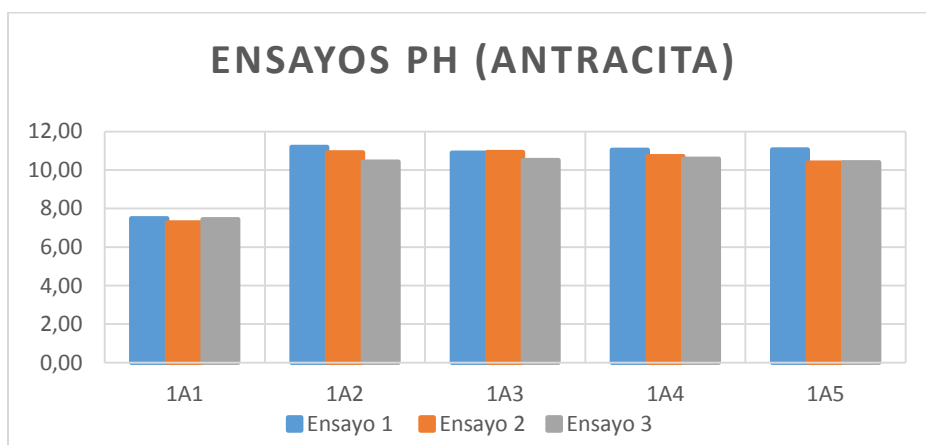
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.2.1. Resultados pH

##### 4.2.2.1.1. Resultados pH Montaje A (Antracita)

Los resultados de pH para el montaje A (Antracita) se encuentran relacionados a continuación

**Gráfica 2.** Resultados de pH Montaje A



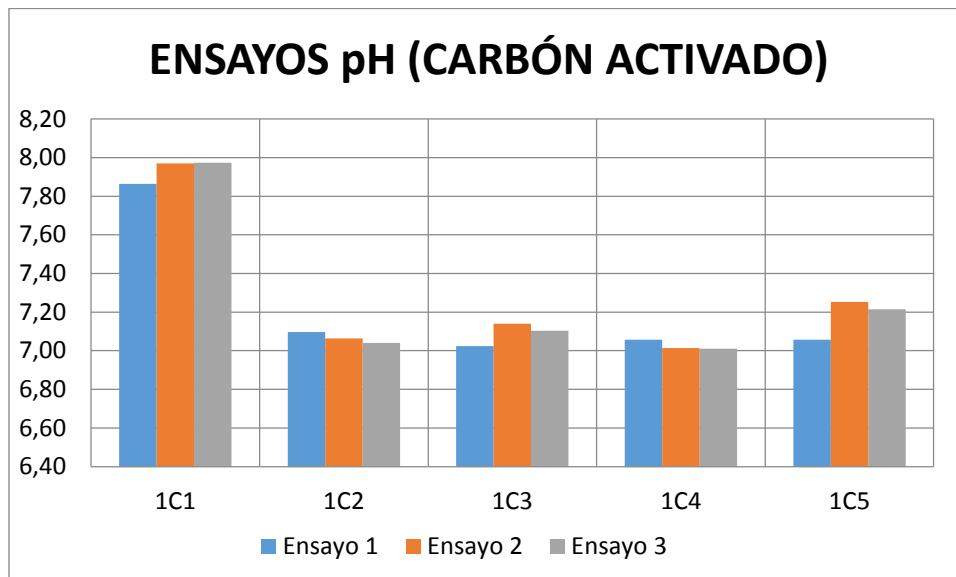
Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a lo ilustrado en la Gráfica 2 se puede observar un aumento leve del pH durante el transcurso de la toma de muestras, ya que antes de ingresar al sistema la mezcla presenta un pH de 8, indicando alcalinidad en su composición, la cual se mantiene en aumento con leves variaciones entre 10 y 12 en las repeticiones de la salida a los 10, 20 y 30 minutos posteriores a la entrada de la mezcla al sistema.

El anterior comportamiento, posiblemente se debe a un aumento en las impurezas durante el primer lavado, ya que se pudo presentar un arrastre de los sedimentos presentes en el pavimento que pudieron haber quedado represados en la superficie del mismo, aumentando la alcalinidad del agua al salir.

#### 4.2.2.1.2. Resultados pH Montaje C (Carbón Activado)

Gráfica 3. Resultado pH Montaje C



Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica anterior se logra observar, que en el primer ensayo la muestra 1C1 (Entrada al sistema), posee un pH promedio de 7.86, y que en el momento de pasar por el pavimento, se presenta una pequeña reducción en la muestra 1C2 (Salida del sistema). Sin embargo el pH se mantiene neutro a través de los 30 minutos.

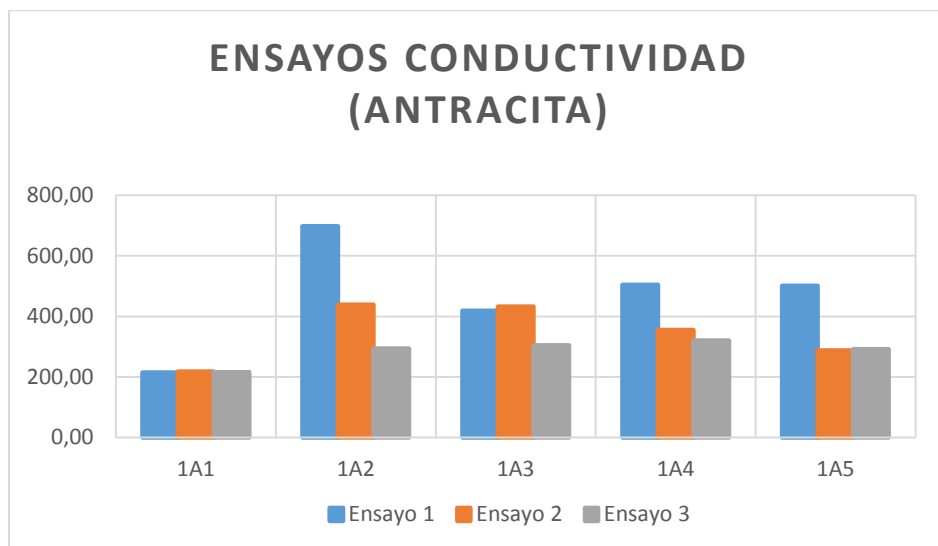
Del mismo modo en los 3 ensayos el pH se mantienen neutros los valores localizados entre 7.02 hasta 7.97, valores que podrían llegar a ser ligeramente básicos.

Asociada a la adsorción del carbón activado, es posible deducir que generalmente la adsorción aumenta al reducir el pH.

#### 4.2.2.2. Resultados Conductividad

##### 4.2.2.2.1. Resultados conductividad Montaje A (Antracita)

**Gráfica 4.** Resultados Conductividad Montaje A



**Fuente:** Elaboración Propia

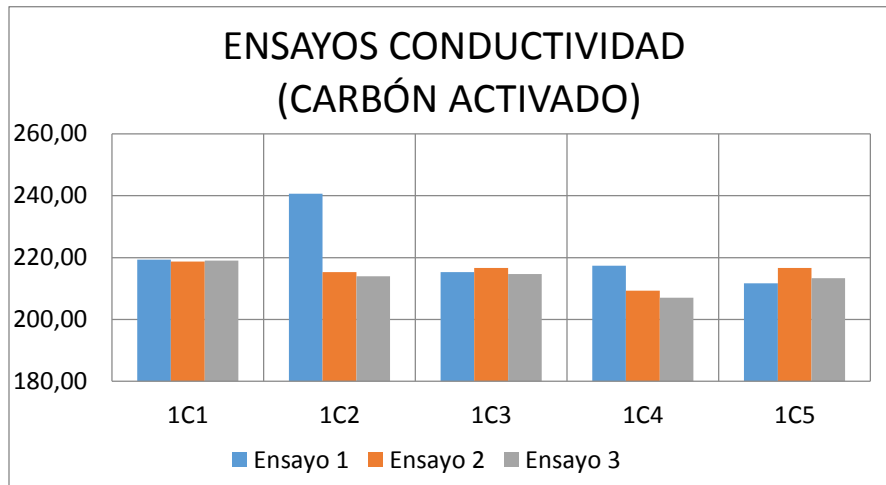
Con respecto a los resultados de conductividad para el montaje A, se observa un aumento significativo para el ensayo 1 hasta de 450  $\mu\text{s}/\text{cm}$  desde la entrada del sistema hasta el momento en que comienza a salir la mezcla. Después se evidencia una disminución correspondiente al 47% desde el momento de la salida hasta que cumple los 10 minutos de paso por el sistema.

Por lo tanto, según lo observado en la gráfica 4 se observa que inmediatamente el agua sale del montaje se evidencia un aumento en los niveles de conductividad llegando a los 700  $\mu\text{s}/\text{cm}$  y siendo a su vez el mayor valor obtenido de las muestras; esto puede originarse debido al fenómeno del primer lavado, en donde los sólidos que se encuentran en el pavimento son arrastrados por escorrentía durante los primeros 10 min de ingreso del agua constante al sistema.

El comportamiento de la conductividad se debe a la carga de sales presentes en las heces empleadas en la mezcla, las cuales aumentaron en el primer tiempo realizando los 10 primeros minutos de lavado, para posteriormente tener un comportamiento constante ya que las partículas presentes en las heces y en el pavimentos fueron retenidas en el primer ensayo.

#### 4.2.2.2. Resultados conductividad Montaje C (Carbón activado)

**Gráfica 5.** Resultados Conductividad Montaje C



**Fuente:** Elaboración Propia

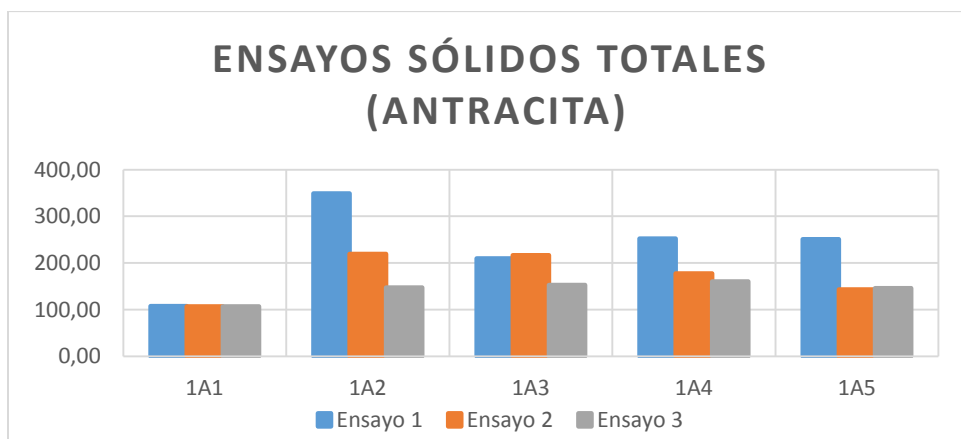
En la Gráfica 5 se observa que en el primer ensayo, en la muestra 1C1 (Entrada al sistema) se presenta un valor de 219,33  $\mu\text{s/cm}$ , el cual en la muestra 1C2 aumenta aproximadamente un 10%, y después se presenta nuevamente una disminución hasta el rango de 211,33  $\mu\text{s/cm}$ .

A lo largo de los ensayos la conductividad se muestra en un rango desde 207,00  $\mu\text{s/cm}$  hasta 240,00  $\mu\text{s/cm}$ .

#### 4.2.2.3. Resultados Sólidos Totales Disueltos

##### 4.2.2.3.1. Resultados sólidos totales disueltos Montaje A (Antracita)

**Gráfica 6.** Resultados Sólidos Totales Disueltos Montaje A

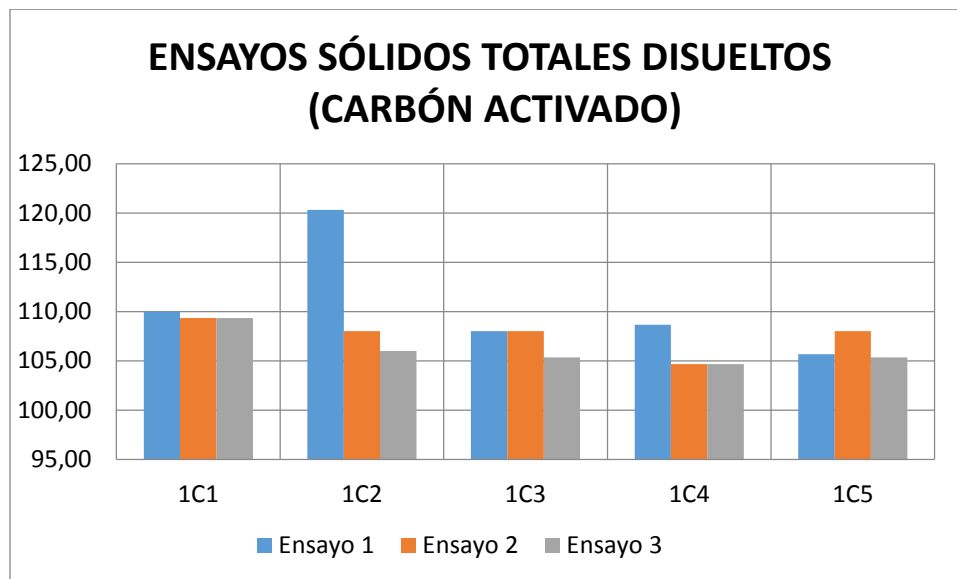


**Fuente:** Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados recopilados en la Gráfica 6 se puede afirmar que como se mencionaba anteriormente, los sólidos totales disueltos presentan relación directa con la conductividad; ya que el comportamiento de las dos gráficas es muy similares entre sí. Allí se observa un aumento significativo en la salida de la mezcla del sistema, desde las 100 ppm hasta 350 ppm, presentado un posterior descenso hasta 200 ppm y finalmente un leve aumento que se mantiene constante de 250 ppm.

#### 4.2.2.3.2. Resultados Sólidos Totales Disueltos Montaje C (Carbón activado)

**Gráfica 7.** Resultados Sólidos Totales Disueltos Montaje C



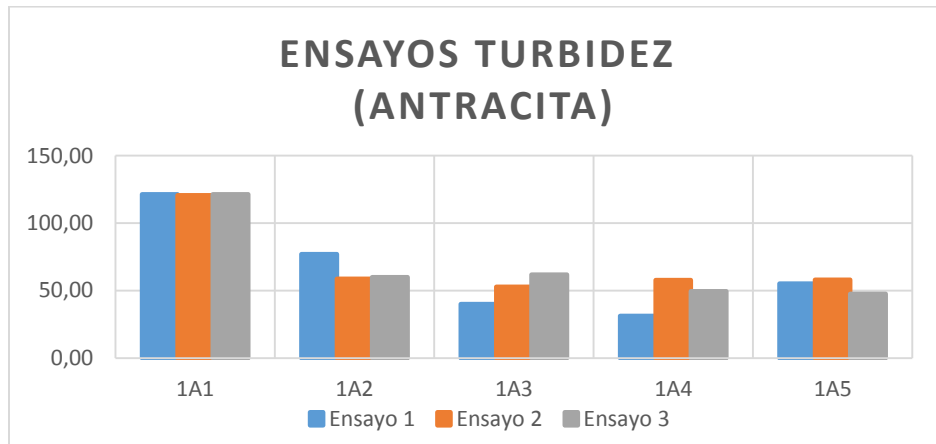
**Fuente:** Elaboración Propia

Los sólidos disueltos totales están estrechamente relacionados con la conductividad, puesto que la mayoría de los sólidos resultantes tras una filtración son los sólidos disueltos, que pueden ser de origen tanto orgánico como inorgánico. Para este estudio en especial la carga contaminante es orgánica lo que a su vez aumentaba los niveles de sólidos, obteniendo finalmente un comportamiento de variaciones constantes en el sistema.

#### 4.2.2.4. Resultados Turbidez

##### 4.2.2.4.1. Resultados turbidez Montaje A (Antracita)

**Gráfica 8. Resultados Turbidez Montaje A**



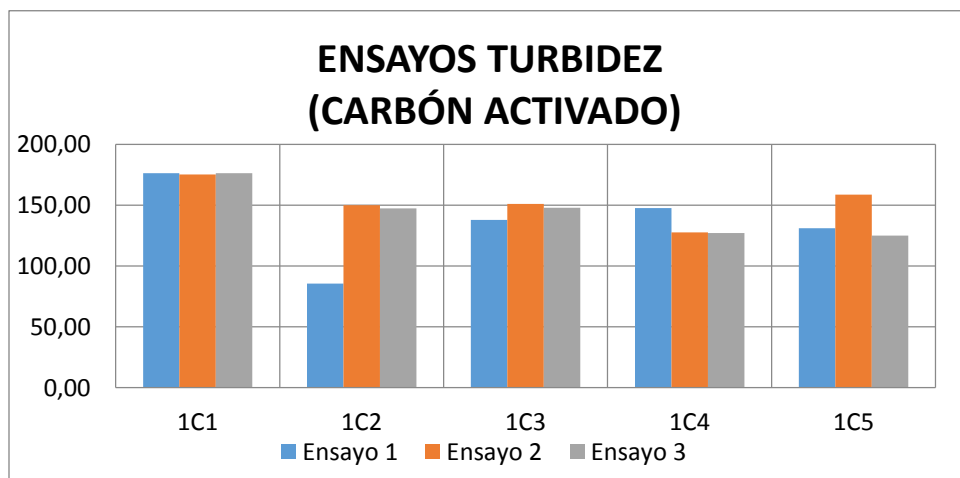
**Fuente:** Elaboración Propia

La Gráfica 8 relaciona los resultados obtenidos de turbidez en el montaje A. Se puede evidenciar una reducción del 36.4% entre la muestra de entrada y la de salida. Esta reducción se mantiene, puesto que para la muestra 3 la cual se toma a los 10 minutos es del 30% sobre el total de la muestra, continuando en descenso y presentando un leve aumento al finalizar la muestra 5.

Puesto que la turbidez se encuentra asociada a las partículas en suspensión se puede afirmar que el sistema disminuye significativamente la turbidez del agua, ya que al observar las muestras se puede evidenciar un cambio representativo en el color del agua que ingresa al sistema en comparación al que sale, por ejemplo es más claro.

#### 4.2.2.4.2. Resultados turbidez Montaje C (Carbón activado)

**Gráfica 9. Resultados Turbidez Montaje C**



**Fuente:** Elaboración Propia

La turbidez está relacionada principalmente con los sólidos en suspensión. De ésta manera, entre más sólidos se encuentren presentes, mas turbidez presentará el agua.

En la Gráfica 10, se puede observar que en el primer ensayo se presenta una turbidez de 176,33 UNT en la muestra 1C1 (Entrada al sistema), al salir del sistema se muestra una reducción del 51.43% aproximadamente, sin embargo en la muestra 1C3 (Salida 10 minutos), el valor de la turbidez aumenta.

A lo largo de los ensayos, el valor de la turbidez disminuye en menor cantidad, a diferencia del primer ensayo. Sin embargo nunca supera el valor de la turbidez inicial.

El carbón activado presenta de tal manera cierta retención de sólidos en suspensión, además de la remoción de materia orgánica aportada por los coliformes.

### **4.3. Resultados Porcentaje de Colmatación**

#### **4.3.1. Resultados porcentaje de colmatación Montaje A (Antracita)**

Una vez realizados los ensayos descritos en la metodología se obtienen los resultados consignados en la Tabla 26

**Tabla 26.** Resultados de colmatación Montaje A

MONTAJE A ( ANTRACITA)													
Muestra	Pc (g)	Pcs (g)	Pcc (g)	Pf (g)	Pfs (g)	Pfc (g)	STT (g/ml)	SFT (g/ml)	SVT (g/ml)	SST (g/ml)	SSF (g/ml)	SSV (g/ml)	SDT (g/ml)
1	20,64	33,12	24,21	0,88	1,03	0	0,156	0,044625	0,111375	0,001875	-0,012875	0,01475	0,154125
2	20,64	21,84	20,7	0,84	0,85	0	0,015	0,00075	0,01425	0,000125	-0,010625	0,01075	0,014875
3	22,11	30,21	22,14	0,77	0,79	0	0,10125	0,000375	0,100875	0,00025	-0,009875	0,010125	0,101
4	21,05	23,63	21,07	0,76	0,86	0	0,03225	0,00025	0,032	0,00125	-0,01075	0,012	0,031
5	21,19	25,34	21,21	0,87	0,78	0	0,051875	0,00025	0,051625	-0,001125	-0,00975	0,008625	0,053
6	20,27	24,56	20,31	0,78	0,87	0	0,053625	0,0005	0,053125	0,001125	-0,010875	0,012	0,0525
7	20,39	24,05	20,41	0,76	0,76	0	0,04575	0,00025	0,0455	0	-0,0095	0,0095	0,04575
8	21,35	22,59	21,37	0,78	0,78	0	0,0155	0,00025	0,01525	0	-0,00975	0,00975	0,0155
9	19,74	25,07	19,6	0,86	0,87	0	0,066625	-0,00175	0,068375	0,000125	-0,010875	0,011	0,0665
10	21,68	24,53	21,69	0,79	0,79	0	0,035625	0,000125	0,0355	0	-0,009875	0,009875	0,035625
11	20,54	23,34	20,55	0,85	0,85	0	0,035	0,000125	0,034875	0	-0,010625	0,010625	0,035
12	21,72	25,18	21,74	0,77	0,77	0	0,04325	0,00025	0,043	0	-0,009625	0,009625	0,04325
13	21,7	23,66	21,71	0,77	0,78	0	0,0245	0,000125	0,024375	0,000125	-0,00975	0,009875	0,024375
14	21,2	22,66	21,21	0,84	0,83	0	0,01825	0,000125	0,018125	-0,000125	-0,010375	0,01025	0,018375
15	22,45	24,63	22,46	0,76	0,76	0	0,02725	0,000125	0,027125	0	-0,0095	0,0095	0,02725
16	21,86	21,87	21,87	0,78	0,78	0	0,000125	0,000125	0	0	-0,00975	0,00975	0,000125
17	21,23	24,49	21,24	0,82	0,8	0	0,04075	0,000125	0,040625	-0,00025	-0,01	0,00975	0,041
18	21,09	21,63	21,1	0,81	0,82	0	0,00675	0,000125	0,006625	0,000125	-0,01025	0,010375	0,006625
19	20,82	20,84	20,83	0,76	0,76	0	0,00025	0,000125	0,000125	0	-0,0095	0,0095	0,00025
20	21,96	22,89	21,97	0,78	0,79	0	0,011625	0,000125	0,0115	0,000125	-0,009875	0,01	0,0115
21	35,65	39,8	35	0,86	0,8	0	0,051875	0,008125	0,06	-0,00075	-0,01	0,00925	0,052625

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los datos obtenidos en los ensayos de colmatación se procede a realizar los cálculos de las masas con los valores de concentración (Tabla 26).

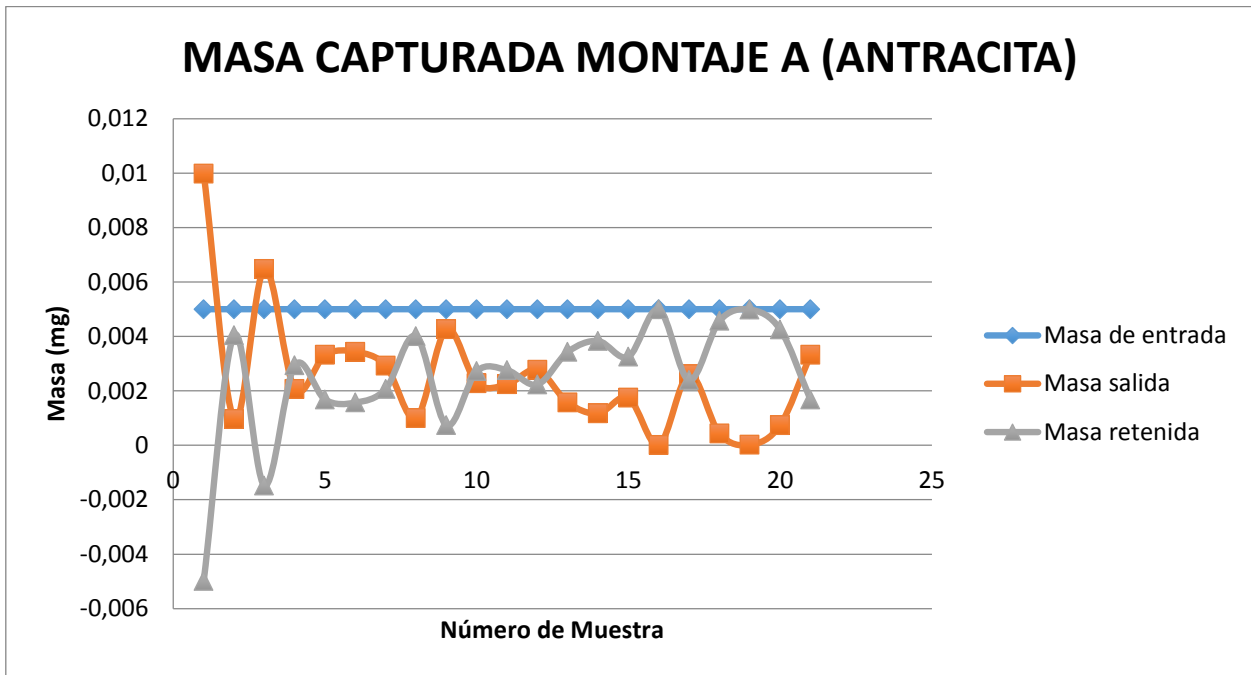
La masa de entrada se calcula multiplicando la concentración de entrada (0.05 mg) por el volumen (0.1 L) y la masa de salida corresponde a la multiplicación de las concentraciones obtenidas en los ensayos por el volumen de salida (0.08 L). Finalmente se calcula la masa capturada en el sistema con la diferencia de la masa de salida y entrada, obteniendo los resultados relacionados en la Tabla 27 y Gráfica 10.

**Tabla 27.** Resultados masa de entrada, salida y capturada Montaje A (Antracita)

NÚMERO DE MUESTRA	CONCENTRACIÓN DE LA ENTRADA (mg/L)	MASA DE ENTRADA	CONCENTRACIÓN DE SALIDA (mg/L)	MASA DE SALIDA	MASA CAPTURADA
1	0,05	0,005	0,1248	0,009984	-0,004984
2	0,05	0,005	0,012	0,00096	0,00404
3	0,05	0,005	0,081	0,00648	-0,00148
4	0,05	0,005	0,0258	0,002064	0,002936
5	0,05	0,005	0,0415	0,00332	0,00168
6	0,05	0,005	0,0429	0,003432	0,001568
7	0,05	0,005	0,0366	0,002928	0,002072
8	0,05	0,005	0,0124	0,000992	0,004008
9	0,05	0,005	0,0533	0,004264	0,000736
10	0,05	0,005	0,0285	0,00228	0,00272
11	0,05	0,005	0,028	0,00224	0,00276
12	0,05	0,005	0,0346	0,002768	0,002232
13	0,05	0,005	0,0196	0,001568	0,003432
14	0,05	0,005	0,0146	0,001168	0,003832
15	0,05	0,005	0,0218	0,001744	0,003256
16	0,05	0,005	0,0001	8E-06	0,004992
17	0,05	0,005	0,0326	0,002608	0,002392
18	0,05	0,005	0,0054	0,000432	0,004568
19	0,05	0,005	0,0002	1,6E-05	0,004984
20	0,05	0,005	0,0093	0,000744	0,004256
21	0,05	0,005	0,0415	0,00332	0,00168

**Fuente:** Elaboración Propi

**Gráfica 10. Masa capturada Montaje A (Antracita)**



**Fuente:** Elaboración Propia

De acuerdo a los datos obtenidos en la Gráfica 10, se observa un comportamiento inversamente proporcional a la masa de salida, en donde la cantidad de material retenido inicia con un incremento hasta 0.004 g, descienden hasta cero y nuevamente se presenta un incremento hasta 0.002 g; las muestras restantes presentan un comportamiento que se mantiene entre 0 y 0.005 g.

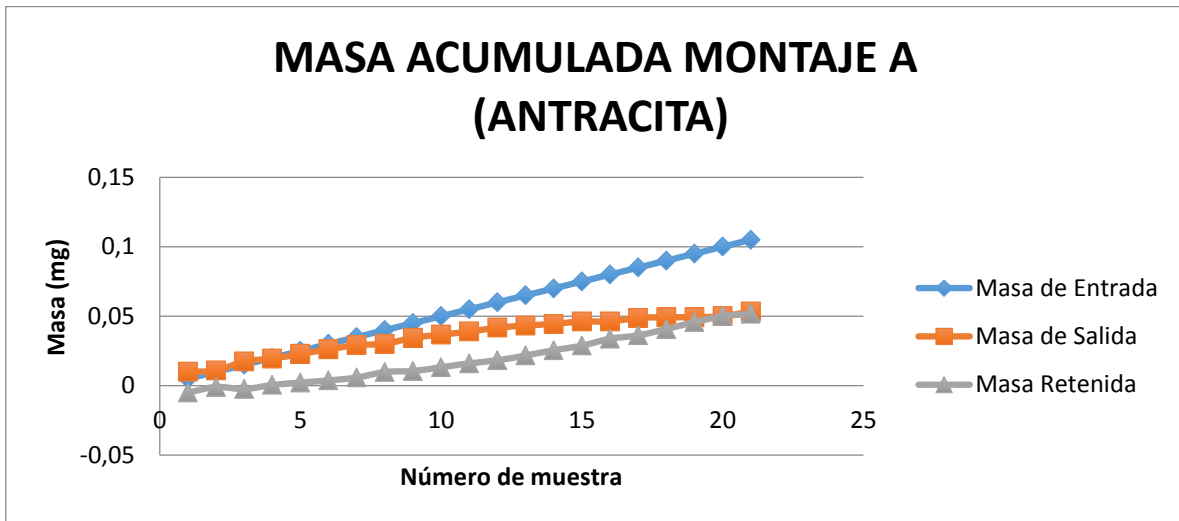
Posteriormente se realizan los cálculos de la masa de entrada y salida acumulada, sumando a cada ensayo el valor del anterior, para finalmente obtener la masa capturada acumulada, la cual corresponde a la diferencia de la masa de entrada y salida. Los resultados se encuentran relacionados en la Tabla 28 y la Gráfica 11.

**Tabla 28.** Resultado masa acumulada de entrada, salida y retenida Montaje A (Antracita)

NÚMERO DE MUESTRA	CONCENTRACIÓN DE LA ENTRADA (mg/L)	MASA DE ENTRADA	CONCENTRACIÓN DE SALIDA (mg/L)	MASA DE SALIDA	MASA CAPTURADA
1	0,05	0,005	0,1248	0,009984	-0,004984
2	0,05	0,01	0,012	0,010944	-0,000944
3	0,05	0,015	0,081	0,017424	-0,002424
4	0,05	0,02	0,0258	0,019488	0,000512
5	0,05	0,025	0,0415	0,022808	0,002192
6	0,05	0,03	0,0429	0,02624	0,00376
7	0,05	0,035	0,0366	0,029168	0,005832
8	0,05	0,04	0,0124	0,03016	0,00984
9	0,05	0,045	0,0533	0,034424	0,010576
10	0,05	0,05	0,0285	0,036704	0,013296
11	0,05	0,055	0,028	0,038944	0,016056
12	0,05	0,06	0,0346	0,041712	0,018288
13	0,05	0,065	0,0196	0,04328	0,02172
14	0,05	0,07	0,0146	0,044448	0,025552
15	0,05	0,075	0,0218	0,046192	0,028808
16	0,05	0,08	0,0001	0,0462	0,0338
17	0,05	0,085	0,0326	0,048808	0,036192
18	0,05	0,09	0,0054	0,04924	0,04076
19	0,05	0,095	0,0002	0,049256	0,045744
20	0,05	0,1	0,0093	0,05	0,05
21	0,05	0,105	0,0415	0,05332	0,05168

**Fuente:** Elaboración Propia

**Gráfica 11.** Resultados masa acumulada de entrada, salida y retenida.



**Fuente:** Elaboración propia

En la Gráfica 11 se puede observar que la masa de salida presenta un leve ascenso, el cual tiende a mantenerse constante y a encontrarse con la masa retenida en la muestra número 20, en donde ya se observa una posible colmatación del pavimento.

Lo anterior debido a la capacidad que posee la antracita de retener mayor cantidad de sólidos, los cuales ocupan los vacíos en menos tiempo, aumentando la colmatación del montaje.

#### 4.3.2. Resultados porcentaje de colmatación Montaje C (Carbón activado)

Una vez realizados los ensayos descritos en la metodología se obtienen los resultados consignados en la Tabla 29.

**Tabla 29.** Resultados ensayos de colmatación Montaje C

MONTAJE C (CARBÓN ACTIVADO)													
Muestra	Pc(g)	Pcs (g)	Pcc (g)	Pf (g)	Pfs (g)	Pfc (g)	STT (g/ml)	SFT (g/ml)	SVT (g/ml)	SST (g/ml)	SSF(g/ml)	SSV(g/ml)	SDT(g/ml)
1	22,13	28,81	22,02	0,83	1,02	0	0,0835	-0,001375	0,084875	0,002375	-0,00691667	0,00929167	0,081125
2	21,49	29,5	21,35	0,78	0,74	0	0,100125	-0,00175	0,101875	-0,0005	-0,0065	0,006	0,100625
3	22,26	29,98	22,12	0,82	0,8	0	0,0965	-0,00175	0,09825	-0,00025	-0,00683333	0,00658333	0,09675
4	20,76	28,84	20,64	0,79	0,77	0	0,101	-0,0015	0,1025	-0,00025	-0,00658333	0,00633333	0,10125
5	20,94	26,61	20,82	0,83	0,81	0	0,070875	-0,0015	0,072375	-0,00025	-0,00691667	0,00666667	0,071125
6	20,5	23,89	20,4	0,83	0,81	0	0,042375	-0,00125	0,043625	-0,00025	-0,00691667	0,00666667	0,042625
7	20,63	29,06	20,55	0,86	0,82	0	0,105375	-0,001	0,106375	-0,0005	-0,00716667	0,00666667	0,105875
8	21,74	30,65	21,68	0,78	0,76	0	0,111375	-0,00075	0,112125	-0,00025	-0,0065	0,00625	0,111625
9	21,22	30,34	21,13	0,76	0,75	0	0,114	-0,001125	0,115125	-0,000125	-0,00633333	0,00620833	0,114125
10	21,25	32,31	21,19	0,8	0,74	0	0,13825	-0,00075	0,139	-0,00075	-0,00666667	0,00591667	0,139
11	19,66	28,82	19,59	0,76	0,74	0	0,1145	-0,000875	0,115375	-0,00025	-0,00633333	0,00608333	0,11475
12	21,95	26,9	21,86	0,81	0,76	0	0,061875	-0,001125	0,063	-0,000625	-0,00675	0,006125	0,0625
13	21,31	30,22	21,23	0,77	0,8	0	0,111375	-0,001	0,112375	0,000375	-0,00641667	0,00679167	0,111
14	21,8	28,67	21,73	0,82	0,76	0	0,085875	-0,000875	0,08675	-0,00075	-0,00683333	0,00608333	0,086625
15	20,38	28,29	20,27	0,74	0,74	0	0,098875	-0,001375	0,10025	0	-0,00616667	0,00616667	0,098875
16	21,14	31,06	21,08	0,79	0,77	0	0,124	-0,00075	0,12475	-0,00025	-0,00658333	0,00633333	0,12425
17	21,14	26,8	21,05	0,86	0,85	0	0,07075	-0,001125	0,071875	-0,000125	-0,00716667	0,00704167	0,070875
18	22,54	26,22	22,45	0,82	0,83	0	0,046	-0,001125	0,047125	0,000125	-0,00683333	0,00695833	0,045875
19	21,26	31,13	21,2	0,77	0,77	0	0,123375	-0,00075	0,124125	0	-0,00641667	0,00641667	0,123375
20	21,79	32,33	21,7	0,83	0,81	0	0,13175	-0,001125	0,132875	-0,00025	-0,00691667	0,00666667	0,132
21	35,7	50,13	35,65	0,85	0,84	0	0,180375	-0,000625	0,181	-0,000125	-0,00708333	0,00695833	0,1805

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los datos obtenidos en los ensayos de colmatación se procede a realizar los cálculos de las masas con los valores de concentración (Tabla 26).

La masa de entrada se calcula multiplicando la concentración de entrada (0.05 mg) por el volumen (0.2 L) y la masa de salida corresponde a la multiplicación de las concentraciones obtenidas en los ensayos por el volumen de salida (0.12 L). Finalmente se calcula la masa capturada en el sistema con la diferencia de la masa de salida y entrada, obteniendo los resultados relacionados en la Tabla 30 y Gráfica 12.

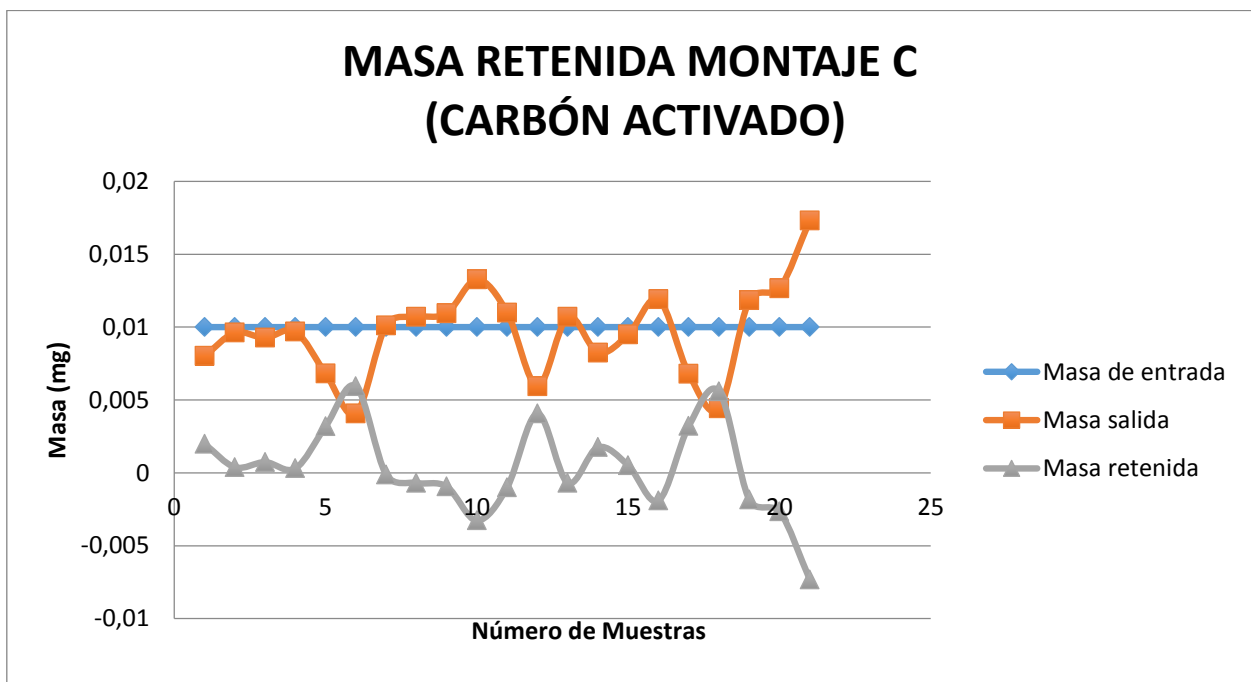
**Tabla 30.** Resultados masa de entrada, salida y capturada Montaje C (Carbón Activado)

NÚMERO DE MUESTRA	CONCENTRACIÓN DE ENTRADA (mg/L)	MASA DE ENTRADA	CONCENTRACIÓN DE SALIDA (mg/L)	MASA DE SALIDA	MASA CAPTURADA
1	0,05	0,01	0,0668	0,008016	0,001984
2	0,05	0,01	0,0801	0,009612	0,000388
3	0,05	0,01	0,0772	0,009264	0,000736
4	0,05	0,01	0,0808	0,009696	0,000304
5	0,05	0,01	0,0567	0,006804	0,003196
6	0,05	0,01	0,0339	0,004068	0,005932
7	0,05	0,01	0,0843	0,010116	-0,000116
8	0,05	0,01	0,0891	0,010692	-0,000692
9	0,05	0,01	0,0912	0,010944	-0,000944
10	0,05	0,01	0,1106	0,013272	-0,003272
11	0,05	0,01	0,0916	0,010992	-0,000992
12	0,05	0,01	0,0495	0,00594	0,00406
13	0,05	0,01	0,0891	0,010692	-0,000692
14	0,05	0,01	0,0687	0,008244	0,001756
15	0,05	0,01	0,0791	0,009492	0,000508
16	0,05	0,01	0,0992	0,011904	-0,001904
17	0,05	0,01	0,0566	0,006792	0,003208
18	0,05	0,01	0,0368	0,004416	0,005584
19	0,05	0,01	0,0987	0,011844	-0,001844
20	0,05	0,01	0,1054	0,012648	-0,002648
21	0,05	0,01	0,1443	0,017316	-0,007316

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 30 se observan valores negativos correspondientes a la masa capturada. Ya que dichos valores no pueden ser físicamente negativos, se puede afirmar que al momento de la realización del ensayo los crisoles cayeron cerca a los filtros de tela, aumentando la cantidad de sólidos medidos.

**Gráfica 12.** Resultado masa de entrada, salida y retenida montaje C (Carbón Activado)



**Fuente:** Elaboración Propia

De acuerdo a los datos obtenidos se puede evidenciar un comportamiento inversamente proporcional entre la masa de salida y la retenida en el sistema, con fluctuaciones con comportamiento descendente, el cual varía entre los 0.005 y -0.005 mg. Adicionalmente se observa que en la toma de muestra 20 el comportamiento de la masa retenida presenta un descenso acercándose a los -0.01 mg. Lo anterior debido a la capacidad de retención del carbón activado, el cual al tener una superficie de contante menor que la antracita, retiene menos sólidos disminuyendo así, el proceso de colmatación.

Posteriormente se realizan los cálculos de la masa de entrada y salida acumulada, sumando a cada ensayo el valor del anterior, para finalmente obtener la masa capturada acumulada, la cual corresponde a la diferencia de la masa de entrada y

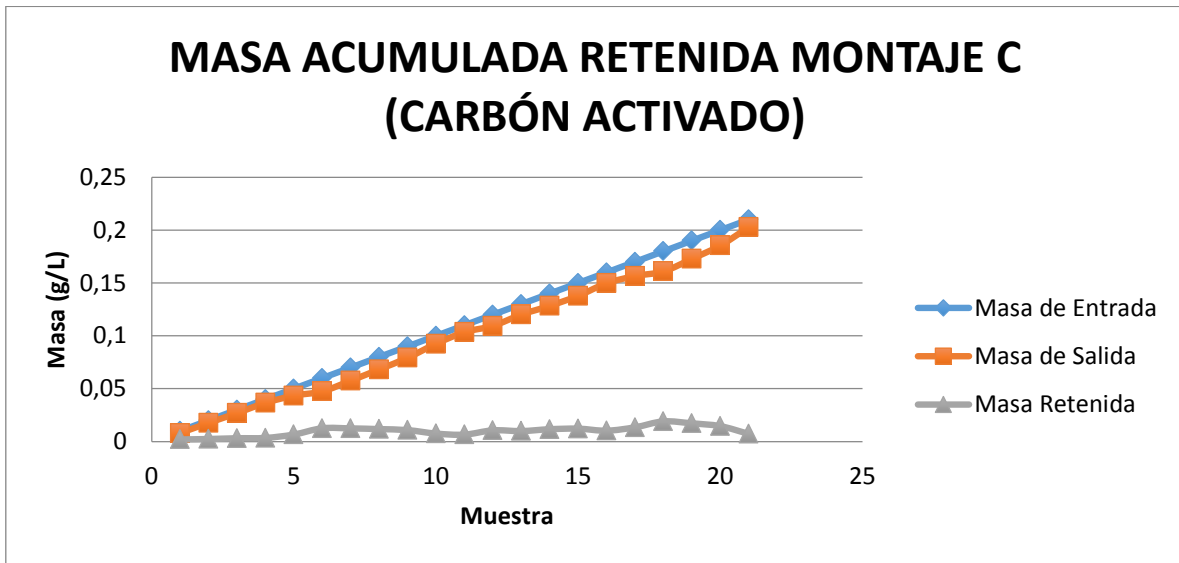
salida acumulada. Los resultados se encuentran relacionados en la tabla 31 y la gráfica 13.

**Tabla 31.** Resultado masa acumulada de entrada, salida y retenida Montaje C (Carbón Activado)

NÚMERO DE MUESTRA	CONCENTRACIÓN DE ENTRADA (mg/L)	MASA DE ENTRADA	CONCENTRACIÓN DE SALIDA (mg/L)	MASA DE SALIDA	MASA CAPTURADA
1	0,05	0,01	0,0668	0,008016	0,001984
2	0,05	0,02	0,0801	0,017628	0,002372
3	0,05	0,03	0,0772	0,026892	0,003108
4	0,05	0,04	0,0808	0,036588	0,003412
5	0,05	0,05	0,0567	0,043392	0,006608
6	0,05	0,06	0,0339	0,04746	0,01254
7	0,05	0,07	0,0843	0,057576	0,012424
8	0,05	0,08	0,0891	0,068268	0,011732
9	0,05	0,09	0,0912	0,079212	0,010788
10	0,05	0,1	0,1106	0,092484	0,007516
11	0,05	0,11	0,0916	0,103476	0,006524
12	0,05	0,12	0,0495	0,109416	0,010584
13	0,05	0,13	0,0891	0,120108	0,009892
14	0,05	0,14	0,0687	0,128352	0,011648
15	0,05	0,15	0,0791	0,137844	0,012156
16	0,05	0,16	0,0992	0,149748	0,010252
17	0,05	0,17	0,0566	0,15654	0,01346
18	0,05	0,18	0,0368	0,160956	0,019044
19	0,05	0,19	0,0987	0,1728	0,0172
20	0,05	0,2	0,1054	0,185448	0,014552
21	0,05	0,21	0,1443	0,202764	0,007236

**Fuente:** Elaboración Propia

**Gráfica 13.** Masa acumulada retenida Montaje C (Carbón Activado)



**Fuente:** Elaboración Propia

De acuerdo a lo observado en la Gráfica 13 se evidencia, al igual que en la gráfica anterior, una relación inversamente proporcional entre la masa de salida y la masa retenida en el sistema, en donde ésta última a lo largo de las muestras se torna constante y la masa de salida va en aumento. Adicionalmente se observa que al final de la muestra 20 se observa que en caso de obtener más muestras se puede presentar un comportamiento descendiente.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados de cada uno de los parámetros tanto para el montaje A (Antracita) como el montaje C (Carbón Activado), se puede evidenciar una reducción bastante significativa en el sistema que empleó antracita en comparación al montaje con carbón activado, puesto que el primero obtuvo una remoción del 100% de los coliformes totales a los 10 minutos de la toma de muestra y con un comportamiento constante hasta el final del ensayo. Lo anterior confirma que las propiedades de retención de coliformes se deben al área superficial de éste material, el cual al encontrarse triturado permitió un mayor contacto con las bacterias llevándolas a adherirse a las paredes superficiales y generando así la retención de éste contaminante en la capa filtrante.

Con respecto al montaje con carbón activado como material filtrante, se logra analizar que este material filtrante no posee las características de adsorción equivalentes a la antracita; sin embargo los resultados evidencian una reducción inicial significativa correspondiente al 53%, para finalizar con 43% menos de coliformes presentes en el agua con relación a la concentración de entrada. Esto nos indica que el carbón utilizado para la evaluación de éste proyecto tiene una superficie de contacto importante pero no tan significativa como la presentada por la antracita.

También es posible, que el montaje A (Antracita) haya adsorbido mayor cantidad de materia orgánica, y que el carbón por su baja área superficial se haya colmatado, por tal motivo no tendría la capacidad de remover gran cantidad de coliformes como en un inicio.

Sin embargo es necesario seguir realizando pruebas ya que puede que en ensayos posteriores se presente nuevamente la remoción de coliformes totales por la acción de los microorganismos presentes en el proceso.

Lo anterior debido a que el comportamiento de la conductividad puede generarse por los sólidos disueltos que ya se encuentran presentes en el montaje, los cuales son diferentes a los aportados por la mezcla, puesto que parte del concreto y de la grava generan dichos sólidos, asociados a los valores de conductividad.

Para el Montaje A (Antracita) el comportamiento de los parámetros estuvo determinado por el aumento bastante significativo de los niveles de pH; fluctuaciones que llegaron a aumentar hasta alcalinidad del agua equivalentes a 12, a diferencia del montaje con carbón el agua quién logra mantener después de los 10 primeros minutos un pH con leves variaciones entre 7.2 y 7.8, lo que indicaría que si la calidad del agua proveniente del sistema depende de los niveles de pH, el montaje con carbón activado presenta mejores resultados. Sin embargo, la conductividad, sólidos totales disueltos y la turbidez no presentan resultados favorables del ensayo en el cual se empleó carbón activado. Puesto que en efecto

se evidencia una reducción en los niveles de éstos parámetros, pero ésta no es tan significativa como los obtenidos por la antracita.

A nivel general se puede afirmar que el montaje en el cual se empleó antracita presenta una reducción importante no sólo del contaminante de estudio, sino de los parámetros in-situ, los cuales en su mayoría se encuentran relacionados con la cantidad de sólidos y partículas en suspensión del sistema, las cuales son más significativas en la segunda muestra (a la salida del sistema) y presentan una reducción constante a través del tiempo de muestreo.

De esta manera, se puede afirmar que el montaje A (Antracita) es una alternativa eficiente para la captación de aguas lluvia y retención de contaminantes en relación al montaje que empleó carbón activado, el cual presenta de igual manera una alternativa básica como pre-tratamiento de aguas lluvia para su posible reutilización, ya que además de la eficiencia en la retención de contaminantes (coliformes) es un material que en comparación con el carbón activado es más económico, lo que a su vez permite que la viabilidad en su aplicación sea mayor..

Una vez determinadas las ventajas de cada uno de los montajes en relación a la retención de coliformes y determinación de parámetros in-situ de calidad de agua, se obtiene los resultados de colmatación, los cuales permiten conseguir una idea básica sobre la vida útil del pavimento, en donde se puede afirmar que la antracita presenta menores niveles de colmatación, lo que traería consigo una vida útil mayor que la del montaje con carbón activado, producto de la superficie de contacto de cada uno de los materiales filtrantes, puesto que la antracita al presentar mayor superficie, permite la retención de mayor cantidad de contaminantes y sólidos en menor tiempo.

A diferencia del comportamiento del sistema con carbón activado el cual no cuenta con las propiedades filtrantes y de retención de contaminantes, es importante enunciar que la masa de entrada al sistema es la misma de salida, lo que indica que el sistema se colmató rápidamente y no retiene contaminantes.

## 6. CONCLUSIONES

Luego de evaluar el funcionamiento con respecto a la captación de aguas lluvias y remoción de contaminantes, en este caso de estudio en específico donde se evaluaron coliformes totales, se puede concluir que la metodología estructural para el diseño de pavimentos porosos permite realizar ensayos que determinen resultados con mayor aplicabilidad, ya que el pavimento construido puede emplearse en zonas con bajos niveles de tráfico pesado como parqueaderos, senderos peatonales y parques infantiles; puesto que cuentan con una estructura de construcción sencilla y de bajo costo, para que no sólo proporcione soporte sino que además permita la captación de aguas lluvia. Además, permite adaptar el sistema para cualquier tipo de tráfico con sólo aumentar el grosor de las capas.

Además, según los resultados obtenidos en la determinación de coliformes y parámetros in-situ se puede concluir que el pavimento no sólo recibe las aguas lluvias sino que además puede contar con la inclusión de una capa de material filtrante que permita remover la carga de coliformes totales y sólidos, los cuales se encuentran asociados a los niveles de turbidez y conductividad, en donde presentaron una disminución del 40% con variaciones significativas que se evidenciaron tanto en el montaje A como en el montaje C, ya que se pudo presenciar el fenómeno del primer lavado, donde los sólidos son arrastrados por la escorrentía presente en los primeros 30 minutos. Estos resultados se vieron reflejados en cada una de las gráficas, las cuales ilustraban resultados constantes al final de las muestras.

Debido a esto se puede afirmar que los pavimentos porosos son una alternativa eficiente, flexible y adaptable para ser aplicada en regiones con problemas de escasez hídrica o presencia de gran cantidad de sólidos en las aguas lluvias, puesto que no sólo permite la captación y almacenamiento de las mismas, sino que además le brinda la posibilidad a comunidades de remover los contaminantes presentes en las aguas lluvias y como primera medida reutilizarlas para uso doméstico y complementarse con un proceso de desinfección básico, proporcionando un agua de mejor calidad. Adicionalmente, estos pavimentos porosos pueden ser implementados en diferentes lugares con variedad de categorías de tráfico, ya que tan sólo se debe aumentar el grosor de las capas de la sub-base, las cuales brindan el soporte y la resistencia requerida.

Es importante tener en cuenta que con respecto a la vida útil del pavimento se observó que el montaje con antracita presenta mayores beneficios en caso de ser implementado, ya que su colmatación en comparación con el carbón activado es menor, en donde se evidenció reducciones de coliformes y sólidos, pero no tan significativas como las obtenidas por la antracita.

## 7. RECOMENDACIONES

Una vez evaluada y validada la metodología estructural en campo es importante resaltar las siguientes recomendaciones.

- Los dos materiales filtrantes evidenciaron resultados benéficos, pero en un posible conjunto podrían complementar sus propiedades y lograr una mejor retención de contaminantes y sólidos, ya que el carbón activado permite la mejor calidad de agua puesto que mantiene los niveles requeridos de pH (7) y la antracita actúa como un elemento con propiedades de retención significativas.
- Se recomienda realizar una toma de muestras con mayor número de ensayos, los cuales permitan determinar con seguridad la vida útil del pavimento y poder evaluar su comportamiento y funcionamiento a través del tiempo. Estas muestras deben contar con un lavado intermedio del pavimento, vertiendo agua limpia entre lapsos de muestreo con el fin de determinar si realmente el sistema tiene un funcionamiento constante.
- Al momento de realizar la mezcla de concreto se recomienda emplear equipos tecnológicos como mezcladoras, de ésta manera la mezcla de concreto se incorporará con la grava, logrando una mejor adhesión entre ellas.
- Antes de realizar el montaje del pavimento, asegurarse que las condiciones como tipo de tráfico, resistencia del suelo, tamaño de las bases etc., sean las adecuadas.
- Se sugiere que se realice el mantenimiento del pavimento poroso mediante un retrolavado en periodos secos y realizar estudios futuros para determinar con exactitud la capacidad de colmatación y así mismo evitar el rebose de las aguas.
- Es importante que se realicen ensayos de resistencia al concreto poroso, con el fin de confirmar su aplicabilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Trujillo López y D. P. Quiroz Lasprilla, «Pavimentos Porosos Utilizados Como Sistemas Alternativos de Drenaje Sostenible,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. , 2013.
- [2] J. Castro , H. De Solminihac, C. Videla y B. Fernández, «Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón,» *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 24, nº 3, pp. 271-284, 2009.
- [3] LAYHER®, «El concreto poroso o permeable y su aplicación en la construcción,» *CONSTRUIR*, vol. 3, nº 12, pp. 48-49, 2013.
- [4] M. P. Molina León, L. Gutierrez y J. Salazar, «DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE DTS - SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE SUDS PARA EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL ZONAL NORTE POZN,» Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá D.C., 2011.
- [5] J. Hernández Rodríguez, «ESTUDIO, ANÁLISIS Y DISEÑO DE SECCIONES PERMEABLES DE FIRMAS PARA VÍAS URBANAS CON UN COMPORTAMIENTO ADECUADO FRENTE A LA COMATACIÓN Y CON LA CAPACIDAD PORTANTE NECESARIA PARA SOPORTAR TRÁFICOS LIGEROS,» GITECO UC, Santander, 2008.
- [6] I. Navarro Pérez, «Determinación de la viabilidad técnica y económica de un sistema de almacenamiento temporal de aguas de drenaje urbano para la ciudad de Bogotá,» Bogotá D.C., 2007.
- [7] L. Lundy, J. B. Ellis y D. M. Revitt, «Risk prioritisation of stormwater pollutant sources,» *Water Research*, vol. 46, nº 20, pp. 6589-6600, 2012.
- [8] Jhoan Wiley & Sons, *STORMWATER MANAGEMENT*, New York, 1993.
- [9] P. Broviak, «Pervious pavement: naturally absorbent,» *Public Works*, vol. 136, nº 1, pp. 34-38, 2005.
- [10] A. Hernández Muñoz, «Saneamiento y alcantarillado 3ra edición,» Mangallares (España), Servicio de publicaciones de la escuela de ingenieros de caminos de Madrid (UPM), 1992, p. 730.
- [11] R. Berbee, R. Rijs, De Brower y Van Velzen, «Characterization and Treatment of Runoff from Highways in the Netherlands Paved with impervious Asphalt,» *Wster Environment Research*, vol. 71, nº 2, pp. 183-190, 1999.
- [12] A. Torres , D.H.M, Ostega Suencún y E y Herrera Daza, «Propiedades filtrantes de los paimentos porosos rígidos,» de *Actas del evento Agua 2009: La gestión integrada del recurso hídrico frente al cambio climático - Seminario Internacional: Un Nuevo Paradigma en el manejo Integrado del Agua en Áreas Urbanas*, Calí, Colombia, 2009, pp. 9-13.

- [13] ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES, «Agenda Ambiental de la Localidad 1 Usaquén,» Alcaldía Mayor de Bogotá, Bogotá D.C., 2009.
- [14] Alcaldía Mayor de Bogotá. Secretaría de Hacienda. Departamentos Administrativo de Planeación, «Recorriendo Usaquén Diagnóstico físico y socioeconómico de las localidades de Bogotá,» Bogotá D.C., 2004.
- [15] World Meteorological Organization. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, «INTERNATIONAL GLOSSARY OF HIDROLOGY,» Publications Board, Geneva, Switzerland, 2012.
- [16] F. D. Sánchez, M. García, O. Jaramillo y N. Verdugo , «AGUA SUPERFICIAL Caracterización y análisis de la oferta,» de *ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA*, Bogotá D.C., 2010, pp. 54-108.
- [17] E. García Haba, *CONTROL DE ESCORRENTÍAS URBANAS MEDIANTE PAVIMENTOS PERMEABLES: APLICACIÓN EN CLIMAS MEDITERRÁNEOS*, Valencia, 2011.
- [18] J. Rodríguez Bayón, J. Rodríguez Hernández , E. Gómez Ullate y D. Castro Fresno, «SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE. SUDS,» Universidad de Cantabria, Santander.
- [19] S. Perales Mompaler y I. A. Doménech, «LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE: UNA ALTERNATIVA A LA GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA,» Valencia.
- [20] J. W. Delleur, «The Evolution of Urban Hydrology: Past, Present and Future,» *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 129, nº 8, pp. 563-573, 2003.
- [21] B. Woods Ballard, R. Kellagher, R. Martin, C. Jefferies, R. Bray y P. Shaffer, *Site handbook for the construction of SUDS*, London: Classic House, 2007.
- [22] C. Pratt, S. Wilson y P. Cooper, *Source control using constructed pervious surfaces*, London: CIRIA, 2002.
- [23] D. Castro Fresno, J. Rodríguez Bayón, J. Rodríguez Hernández y F. Ballester Muñoz, «SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS),» *Interciencia*, vol. 30, nº 5, 2005.
- [24] Yung-Tse Hung, Vivek Jain, Chin-Yih Kuo y Ruth Yu-li Yeh, «Porous Pavement for Stormwater Management,» *OCEESA JOURNAL*, vol. 23, nº 2, pp. 66-69, 2006.
- [25] Interpave, «Permeable Paviments: Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements,» British Precast Concrete Federation Ltd., 2007.
- [26] B. K. Ferguson, «Porous Paviments: The Overview,» University of Georgia School of Environmental Design, Athens, 2005.
- [27] Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), *Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas*

Lluvias en Sectores Urbanos. Guía de diseño, Santiago de Chile, 1996.

- [28] P. D. Tennis, M. Leming y D. J. Akers, *Pervious Concrete Pavements*, San Diego, California: Portland Cement Association, 2004.
- [29] U.S. EPA, «Storm Best Management Practices Design Guide,» de *Volume 1: General considerations*, Cincinnati, U.S. Environmental Protection Agency, 2004, p. 179.
- [30] C. McBride y J. Knapton, «THE DESIGN OF PERMEABLE PAVEMENTS FOR RETAIL DEVELOPMENT IN IRELAND,» de *8th International Conference on Concrete Block Paving*, San Francisco, California USA, 2006.
- [31] J. Drake, A. Bradford y T. V. Seters, «Stormwater quality of spring-summer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement,» *Journal of Environmental Management*, vol. 139, pp. 69-79, 2014.
- [32] B. O. Brattebo y D. B. Booth, «Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems,» *Water Research*, vol. 37, nº 18, pp. 4369-4376, 2003.
- [33] K. Tota-Maharaj y M. Schoiz, «Efficiency of Permeable Pavement Systems for the Removal of Urban Runoff Pollutants Under Varying Environmental Conditions.,» *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 29, nº 3, pp. 358-369, 2010.
- [34] L. Haselbach, C. Poor y J. Tilson, «• Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 53, pp. 652-657, 2014.
- [35] G. Gómez Gonzalez , A. Rodríguez Benavidez y A. Torres, «DURABILIDAD DE LAS CAPACIDADES FILTRANTES DE LA CAPA DE RODADURA DE UN PAVIMENTO POROSO RIGIDO,» de *XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*, Punta del Este, Uruguay, 2010.
- [36] A. Torres , D. H. M. Ortegón Suescún y E. Herrera, *PROPIEDADES FILTRANTES DE LOS PAVIMENTOS POROSOS*, Bogotá, Colombia, 2004.
- [37] F. Reyes y A. Torres , «EFECTO DE LAS FIBRAS PLÁSTICAS EN LA FLEXIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS DRENANTES,» *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 17, nº 2, pp. 93-102.
- [38] AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION, «The concrete pavement restoration guides,» de *CONCRETE PAVING*, 1998, pp. 1-23.
- [39] A. Karasawa y S. Suda, «Characteristics of New type Permeable Concrete Block Paving System,» *International Conference*, vol. 96, nº 5, pp. 613-622, 1996.
- [40] M. VILLEMAGNE, A. M. PALLIERE y P. RETOUR, *Construcción de Pavimentos*, Editado por la Asociación de Productores de Concreto- Asoconcreto y el Instituto Colombiano de Productores de Cemento - ICPC, 2000.

- [41] D. SANCHEZ, *Manejo y colocación en obra*, Asociación de Productores de Concreto - Asoconcreto, 2000.
- [42] B. SHACKEL , J. O. KALIGIS y MUKTIARTO, «Infiltration and Structural Test of Permeable Eco.Paving,» *International Conference*, vol. 96, nº 5, pp. 623-632, 1996.
- [43] H. HODSON, *Nuevas Tecnologías, Pavimentos de Concreto Permeable*, Bogotá, Colombia, 1983.
- [44] F. Reyes y A. Torres , «EFECTO DE LAS FIBRAS PLÁSTICAS EN LA FLEXIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS DRENANTES,» *Ingeniería de la Contrucción*, vol. 17, nº 2, pp. 93-102, 2002.
- [45] Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. Unidad Ejecutiva de Localidades, «FICHA AMBIENTAL LOCALIDAD 1: USAQUÉN,» Alcaldía Mayor de Bogotá, Bogotá D.C., 2003.