

## **Evaluación financiera de la implementación de pavimentos porosos en un proyecto inmobiliario localizado en Villas de Granada de la ciudad de Bogotá.**

Gustavo Adolfo Gómez González<sup>a</sup>, Nelson Luis Villero Guerra<sup>a</sup>, Holmes Julián Páez Martínez<sup>b</sup>, Andrés Torres<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Estudiante Maestría en Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

<sup>b</sup> Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

<sup>c</sup> Profesor titular, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

### **RESUMEN**

A través del tiempo en el desarrollo de la construcción en Colombia, las vías y sus drenajes dentro de proyectos inmobiliarios se han manejado comúnmente con pavimentos convencionales, ya sean rígidos o flexibles, sin embargo, existen soluciones viales y de drenaje diferentes como lo son los pavimentos porosos. Por este motivo surge un interés de determinar el beneficio financiero de la implementación de pavimentos porosos en un proyecto inmobiliario localizado en la zona de Villas de Granada de la ciudad de Bogotá. Para esto se caracterizó física e hidrológicamente el sitio de estudio, se dimensionaron las estructuras de pavimentos convencionales y porosos para ser comparados presupuestalmente en diferentes escenarios de implementación, a través de un análisis financiero que establece un posible ahorro. Del análisis financiero para los escenarios planteados se obtiene que el ahorro más significativo en porcentaje sobre el costo es mayor al 20% debido principalmente a la eliminación de todas las estructuras de alcantarillado pluvial. Los diámetros de la tubería son directamente proporcionales al ahorro recibido y el retorno de la inversión inicial por el cambio de tecnología, representada en capacitaciones y mantenimiento, tiene un periodo de repago inferior a un mes de tiempo.

### **Palabras Claves**

Pavimento poroso, evaluación de beneficios económicos, evaluación de beneficios financieros, suelos de tratamiento de desarrollo.

### **ABSTRACT**

Over time in the development of construction in Colombia, the roads and their drainage within residential projects have been commonly handled with conventional pavements, whether rigid or flexible. However, there are different road and drainage solutions such as porous pavements. For this reason, there is an interest to determine the financial benefit of the implementation of porous pavements in a residential project located in the Villas de Granada area of the city of Bogotá. For this, the study site was characterized physically and hydrologically, the conventional and porous pavement structures were sized to be budgeted in different implementation scenarios, through a financial analysis that establishes possible savings. The financial analysis for the proposed scenarios shows that the most significant savings in percentage over cost is greater than 20%, mainly due to the elimination of all storm sewer. The diameters of the pipeline are directly proportional to the savings received and the return of the initial investment for the change of technology, represented in training and maintenance, has a repayment period of less than a month of time.

### **Keywords**

Pervious pavement, porous pavement, permeable pavement, pervious concrete, evaluation of economic benefits, evaluation of financial benefits, areas of urban development.

## INTRODUCCIÓN

El cambio rápido de uso del suelo en los últimos 20 años y la urbanización afectan la tasa de infiltración disminuyéndola drásticamente y generando menores tiempos de concentración que provoca el aumento en la escorrentía superficial (Valencia y Nájera, 2018). En consecuencia, la urbanización y densificación de áreas urbanas ha generado eventos de inundación, con impactos significativos sobre la población y sobre áreas densamente pobladas que contienen infraestructura de vital importancia (Vammen, 2015).

En Colombia, la construcción de infraestructura vial se ha manejado comúnmente con pavimentos convencionales, ya sean rígidos o flexibles. Sin embargo, existen soluciones viales y de drenaje diferentes como los pavimentos porosos, que en muchos casos son más eficientes técnico-económicamente, principalmente por la disminución en las estructuras de drenaje (El-Hassan y Kianmehr, 2018). Los pavimentos porosos son típicamente descritos como materiales de gradación abierta, compuestos de cemento portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua (ACI 522 2010, 40). La mezcla de estos componentes produce un material endurecido con poros interconectados, los cuales varían de 2 a 8 mm, lo que permite que el agua fluya dentro de su estructura y sea recolectada por medio de sistemas de tuberías o se infiltre directamente al terreno natural (ACI 522 2010, 40). Se ha demostrado que los pavimentos porosos pueden reducir la escorrentía de las aguas pluviales y mejorar su calidad (Zachary, Frederick y Alan, 2007), recargar acuíferos, disminuir el hidroplaneo de los automóviles, generar un aumento de la visibilidad durante eventos lluviosos por parte de los conductores y contribuir a la sustitución o alivio de los sistemas de recolección de aguas lluvias (Amit, 2018).

Mundialmente, hace más de 50 años se han utilizado los pavimentos porosos principalmente en andenes, plazuelas, parqueaderos, vías peatonales y de muy bajo tráfico (Field, Masters, y Singer 1982). Como se mencionó anteriormente, de los pavimentos porosos se conocen varias características (Amit, 2018), ya se han realizado diseños (González Vásquez y Túllume Paiva, 2015), se conocen los materiales para su construcción (Argos, 2018) y se han implementado con buenos resultados no solo para vías de bajo tráfico, sino para vías de tráfico considerable como en el caso de España (Recasens 2006). Adicionalmente, se han demostrado ventajas financieras en su utilización, así como se puede analizar con Castañeda Urrego y Moujir Salazar (2015) en reducción de costos del metro cúbico en comparación con los pavimentos convencionales. De igual forma Mora, Alvarado, y Torres (2011) evidencian una reducción de costos de hasta el 3%, proveniente principalmente de la reducción del diámetro de tubería de drenaje. Por su parte Field, Masters, y Singer (1982) presentan también una reducción de costos en la utilización de pavimentos porosos al reducir bordillos, drenajes y alcantarillados pluviales de menor tamaño. De igual forma, Law, Diemont, y Toland (2017), y Liu y otros (2016), hacen referencia a bajos costos de los pavimentos porosos como infraestructura verde, y con grandes beneficios ambientales.

A pesar de los beneficios descritos y del estado actual del conocimiento, en Colombia los pavimentos porosos aún no han sido implementados como una técnica habitual de construcción. En efecto, esto aún no ha sido estudiado de manera exhaustiva, específicamente para el caso de Bogotá, encontrándose esta tecnología lejos de ser explotada a escala de ciudad en Colombia. A pesar de que los pavimentos porosos se han utilizado principalmente para zonas de parqueaderos, andenes, patios, vías peatonales, drenajes, vías de bajo volumen, entre otros (Dyavappanavar, Nagaraja, Paramesh, Shettar y Ballur, 2017), aún no se ha tenido en cuenta el pavimento poroso como posible alternativa en proyectos inmobiliarios y por lo tanto no se reportan a la fecha casos específicos sobre los beneficios financieros asociados a los pavimentos porosos en dichas áreas.

Se presentan una gran variedad de brechas en este tema, principalmente en cuanto a los beneficios financieros de la estructura de pavimento incluyendo todo el sistema de drenaje, así como la incidencia de este beneficio en el costo total del proyecto. En efecto, no se tienen estudios detallados del uso de los pavimentos porosos en las zonas de suelos urbanos o de tratamiento de desarrollo de las ciudades colombianas, específicamente en la ciudad de Bogotá, y por lo tanto no hay a la fecha estudios financieros acerca de cuál sería su beneficio si se implementan en vías locales de los proyectos inmobiliarios que actualmente se vienen desarrollando en el país con gran auge. Por este motivo surge un interés en determinar el beneficio financiero de la implementación de pavimentos porosos en un proyecto inmobiliario localizado en una zona en tratamiento de desarrollo de la ciudad de Bogotá.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio de estudio es un proyecto inmobiliario de vivienda de interés social, ubicado en el barrio Villas de Granada, al occidente de la ciudad de Bogotá, entre las calles 74<sup>a</sup> y 77 y entre las carreras 114<sup>a</sup> y 116<sup>b</sup>. Para el presente caso de estudio, los suelos se encuentran en tratamiento de desarrollo. En este tipo de suelos, el urbanismo debe desarrollarse de forma integral en los espacios públicos y las vías locales (Consejo de Bogotá, 2004). El proyecto se encuentra dividido en tres grandes urbanizaciones, las cuales suman un total de 346 unidades multifamiliares en un área de 26.533 m<sup>2</sup>. Adicionalmente, se encontró un área de cesión para construcción de vías vehiculares locales de 7.980 m<sup>2</sup> distribuidos entre las calles 74 y 77 y la carrera 116.

Los pavimentos convencionales dentro de este proyecto son los existentes en las calles 74, 77 y la carrera 116. Estos pavimentos se diseñaron teniendo en cuenta la capacidad portante del suelo sobre el que fueron construidos. Quedaron definidos en su geometría bajo el perfil vial V-5. Este perfil según normativa vigente para el distrito tiene una dimensión transversal de 18 metros que se discriminan así: 12 metros de calzada y 3 metros de andén en cada costado. Estructuralmente cada vía tiene una composición diferente en función de la capacidad portante del suelo sobre el que fue construida (Tabla 1). A diferencia de las calzadas, todos los andenes se construyeron con la misma estructura, 10 cm de material granular B-200 para la nivelación de la subrasante, posteriormente un geotextil con fines de separación; 30 cm de subbase granular tipo A; y finalmente una losa de 10 cm de espesor en concreto de 21 MPa.

*Tabla 1. Estructura de los pavimentos convencionales*

Unidades (cm)	Relleno seleccionado B-200	Subbase granular Tipo A	Base Granular Tipo A	Concreto asfáltico MD20	Rodadura asfáltica MD12
<b>Calle 74</b>	10	41	20	8	5
<b>Calle 77</b>	10	30	30	7	6
<b>Paseo Los cerezos (Carrera 116)</b>	10	48	25	9	6

Para la caracterización del suelo se tomaron muestras in situ para las tres vías de estudio, las cuales fueron caracterizadas por el laboratorio de ensayos y materiales Concrelab, obteniendo que el tipo de suelo es arcilla limo arenosa de color gris, de consistencia dura y plasticidad alta, con un CBR de 6,70% y una permeabilidad de 5,15 E-07 m/s.

La estación meteorológica más cercana al sitio de estudio (9 km de distancia) es Tibaitatá perteneciente al área operativa 11 con código 21205420 del IDEAM. Las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IdF) se presentan en la Figura 1(a).

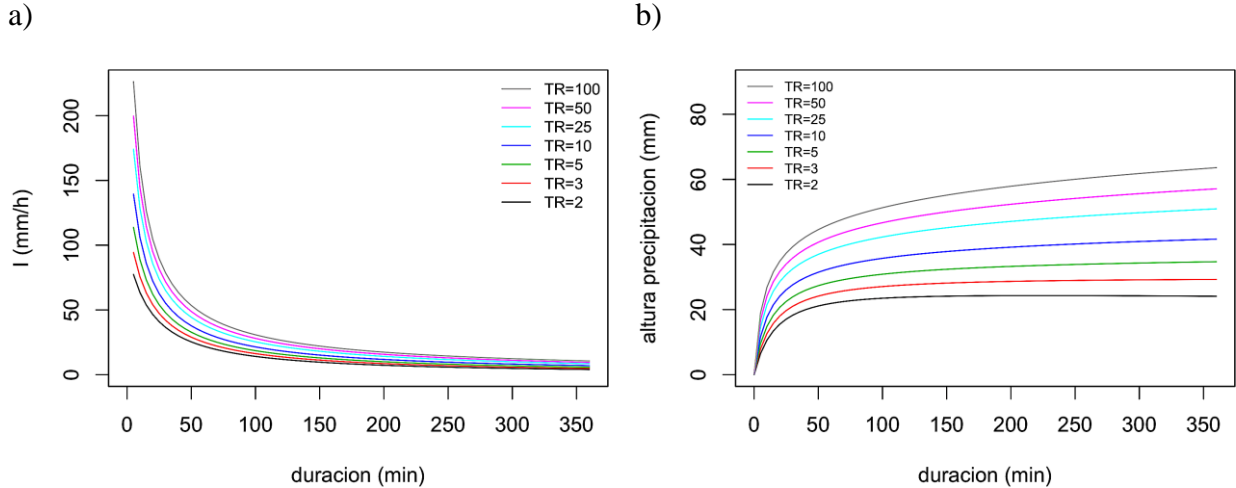


Figura 1. (a) Curvas IdF (b) Curvas HdF, estación Tibaitatá (IDEAM)

Las curvas IdF de la zona de estudio se pueden transformar en curvas Altura Duración Frecuencia, mediante la siguiente expresión:

$$H(d, T) = I(d, T) * d \quad (1)$$

donde  $I(d, T)$  corresponde a la intensidad de lluvia representada en mm/h con una duración  $d$  (en h) para diferentes periodos de retorno  $T$ , y  $H(d, T)$  representa la altura de precipitación en mm con una duración  $d$  para diferentes periodos de retorno  $T$ . Las gráficas de alturas de precipitación presentadas en la Figura 1(b) son el resultado de aplicar la ecuación 1 a las curvas de intensidad de la Figura 1(a).

Para desarrollar el dimensionamiento hidrológico del pavimento poroso se emplearon los métodos franceses (Azzout et al., 1994). Primero es necesario determinar un caudal de salida ( $Q_s$ ) el cual se calcula como:

$$Q_s = C_s * f * A_{pav} \quad (2)$$

donde  $C_s$  es el coeficiente de seguridad (puede ser tomado como 0,1),  $f$  es la capacidad de absorción por unidad de superficie de infiltración en  $m^3/s/m^2$  y  $A_{pav}$  es la superficie de infiltración de la vía en  $m^2$ .

En el cálculo de la superficie activa  $S_a$  se tienen en cuenta las superficies involucradas en la escorrentía y que son drenadas por la estructura de pavimento, así como la estructura de almacenamiento que se está diseñando:

$$S_a = C * A \quad (3)$$

donde  $C$  es el coeficiente de aporte y  $A$  es el área total de la cuenca de drenaje en  $m^2$ . Según Azzout et al. (1994), el coeficiente de aporte  $C$  se utiliza para tomar en cuenta únicamente la fracción de la lluvia que llega efectivamente a la salida de la cuenca considerada. El coeficiente  $C$  es variable en función del tipo de suelo y del estado de humedad del suelo al comienzo de la lluvia (ver por ejemplo Tabla 2), y se utilizan para el cálculo del coeficiente de aporte  $C$  en un área urbana heterogénea mediante la Ecuación 4.

$$C_a = \frac{\sum_{i=1}^n C_i * S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (4)$$

Tabla 2. Coeficientes de escorrentía de áreas homogéneas utilizados para calcular el coeficiente de aporte para zonas urbanas heterogéneas (Azzout et al., 1994)

Parámetros	C <sub>i</sub>
Espacios verdes, paisajes, campos deportivos	0,25 a 0,35
<b><u>Vivienda Individual (unidades/ha)</u></b>	
12	0,40
16	0,43
20	0,45
25	0,48
35	0,52
<b><u>Vivienda colectiva (unidades/ha)</u></b>	
50	0,57
60	0,60
80	0,70
Instalaciones públicas	0,65
Áreas de actividades	0,70
Supermercados	0,80 a 0,90
Estacionamientos, carreteras	0,95

El caudal de salida constante  $Q_s$  se puede expresar como un caudal específico  $q_s$  en mm/h:

$$q_s = 360 Q_s / S_a \quad (5)$$

donde  $Q_s$  es el caudal de salida en  $m^3/s$  y  $S_a$  el área activa de escorrentía que alimenta la estructura de almacenamiento, en ha. La altura final de la lámina de agua a retener está representada por la máxima diferencia entre la altura de precipitación de la Figura 1(b) y el caudal específico de salida calculado con la ecuación 5.

Finalmente, el espesor de la capa de pavimento poroso se calcula con una relación entre la altura final de la lámina definida antes y el porcentaje de vacíos del concreto poroso:

$$e = h / pv \quad (6)$$

donde  $e$  es el espesor de la capa de pavimento poroso en mm,  $h$  es la altura de la lámina de agua a retener y  $pv$  es la relación de vacíos del concreto poroso. Con base en lo anterior, es posible encontrar conjuntamente la altura de precipitación a un periodo de retorno dado  $H(d,T)$  y la curva que describe la evolución temporal de la altura de descarga de agua  $q_s.d$  en función de la duración de la evacuación  $d$ .

Con relación a la estructura del pavimento poroso se requiere una capa de concreto poroso, una capa filtrante (granular) y un geotextil No-tejido en su parte inferior. Adicionalmente, para aumentar su resistencia a la compresión y utilizarse en vías vehiculares de tráfico bajo, se incorporó una subbase granular para dar mayor capacidad a la estructura (Argos, 2018).

El dimensionamiento estructural del pavimento poroso se basó en los espesores mínimos de un pavimento permeable para varias condiciones de tráfico expuesto por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Tabla 3).

Tabla 3. Mínimos espesores de un pavimento permeable para varias condiciones de tráfico.  
Nota: los espesores dados en la tabla están en milímetros (Adaptado de: EPA, 1980)

Categoría de tráfico	Descripción	EAL <sup>1</sup>	Espesor mínimo en mm de acuerdo con CBR		
			≥ 15%	10 – 14%	6 – 9%
1	Tráfico ligero	≤ 5	127	178	229
2	Tráfico ligero-medio (máx. 1000 vpd <sup>2</sup> )	6 – 20	152	203	279
3	Tráfico medio (máx. 3000 vpd)	21 - 75	178	229	305

<sup>1</sup>EAL (Equivalent axial load) Ejes equivalentes en millones: la AASHTO-93 establece que se deben transformar los diferentes ejes que circulan por una ruta a un eje de doble llanta de 80 kN (18 Kips) de peso, considerado como eje patrón, referido al carril de diseño.  
<sup>2</sup>Vehículos por día.

Finalmente al obtener el dimensionamiento desde el punto de vista hidráulico y desde el punto de vista estructural, el espesor de la estructura de pavimento poroso que se toma es el mayor entre los dos (Azzout et al., 1994).

El presupuesto ejecutado para las viviendas y vías de interés del proyecto se muestra en la Tabla 4. Los costos directos son los costos asociados a la construcción, sin incluir administración, utilidad e imprevistos; la provisión es una reserva para la contingencia de cualquier riesgo del proyecto.

Tabla 4. Presupuesto ejecutado para el proyecto de vivienda los cerezos (cifras en millones de pesos)

<b>Relación de Presupuesto Etapa Cuatro: Los Cerezos (COP 2018)</b>			
<b>En millones de pesos</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Costo Directo</b>	<b>Provisión</b>	<b>Total</b>
Etapa III: Vivienda (122 unidades multifamiliares)	3291	103	3394
Etapa III: Zonas Comunes	1120	64	1184
Calle 74	1461	0	1461
Etapa IV: Vivienda (88 unidades multifamiliares)	2602	119	2721
Etapa IV: Zonas Comunes	935	66	1001
Calle 77	599	0	599
Etapa V: Vivienda (136 unidades multifamiliares)	4068	83	4151
Etapa V: Zonas Comunes	1347	45	1392
Carrera 116: Paseo los Cerezos	1893	0	1893
<b>Total</b>			<b>17796</b>

Para la evaluación financiera solo se incluyen los ítems del presupuesto en los que haya variación en las cantidades con relación al presupuesto de los pavimentos porosos para los diferentes escenarios. Es decir, entregables como las redes de alcantarillado sanitario, redes eléctricas, acueducto, paisajismo, etc., no son tenidos en cuenta en el presupuesto porque tienen el mismo peso en la implementación de ambos tipos de pavimento (Tabla 5).

Tabla 5. Presupuesto resumido de pavimentos convencionales (cifras en millones de pesos)

Presupuesto Pavimento Flexible Los Cerezos (COP 2018)		
Ítem	Descripción	Contrato
		V. Total (millones)
<b>1</b>	Preliminares	
<b>11</b>	Excavaciones y retiros	290
<b>12</b>	Rellenos	597
<b>13</b>	Redes y pozos de alcantarillado pluvial	216
<b>13 20</b>	Pozo de inspección	32
<b>13 30</b>	Sumideros	45
<b>14</b>	Espacio público	678
	<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>1858</b>

Para el presupuesto de los pavimentos porosos el precio por m<sup>3</sup> según consulta de concreteras en Colombia es de 364000+IVA (19%) COP (2018). Con este precio se estima el presupuesto de la implementación de los pavimentos porosos. Para el mantenimiento se tiene un precio estimado por m<sup>2</sup> de 2600 COP (2018), que incluye los rendimientos de alquiler de un vactor (vehículo utilizado en los mantenimientos correctivos y preventivo de las redes hidráulicas) y equipos de hidrolavado y aspirado especial para concreto poroso. El mantenimiento contemplado incluye una limpieza superficial rutinaria y una profunda anualmente.

Se plantearon tres escenarios financieros donde se combinan las áreas posibles de intervención. En el primer escenario se tiene en cuenta la implementación de los pavimentos porosos en vías y andenes, en un segundo escenarios sólo se tienen en cuenta las vías, es decir, sin andenes, y para el tercer escenario se tienen en cuenta, únicamente los andenes. Estos tres escenarios se someten al análisis financiero a través de indicadores que establecen cuál de ellos es la mejor opción para el constructor bajo las condiciones dadas. Los indicadores de bondad utilizados son: el valor presente de los beneficios (VP), la relación beneficio-costos (B/C) y el periodo de pago como el retorno de la inversión (ROI) con el que se puede medir el rendimiento de la inversión (Vélez Pareja, 2013). Se definen los flujos de caja libre con los que se puede determinar la utilidad operacional de implementar el pavimento poroso. Estas condiciones son un periodo (15 días), tiempo en el que se liquidaron las ejecuciones en obra, plazo de ejecución (6 meses) según términos contractuales y la tasa de descuento (14%), que fue la tenida en cuenta para desarrollar el proyecto caso de estudio después de realizar una encuesta entre tres constructoras desarrolladoras de proyectos similares al estudiado, tomando la menor tasa de descuento de las tres obtenidas en la encuesta, esto con el fin de analizar el caso más crítico.

Una vez se tienen los flujos y las condiciones, para cada uno de los escenarios, se realiza el análisis financiero trayendo todos los valores de los flujos a valor presente VP (Vélez Pareja, 2013):

$$VP = \sum_j \frac{I_j}{(1+i)^j} \quad (7)$$

donde  $I_j$  es la suma de los beneficios en el periodo  $j$ ,  $i$  es la tasa de descuento y  $j$  el período.

Para la relación beneficio/costo se definió como el valor presente de los flujos positivos o de los beneficios sobre el valor presente de los costos:

$$VP_B = \sum_j \frac{I_j}{(1+i)^j} = B \quad (8)$$

$$VP_C = \sum_j \frac{E_j}{(1+i)^j} = C \quad (9)$$

donde  $I_j$  es la suma de los beneficios en el periodo  $j$ ,  $E_j$  es la suma de los costos en el periodo  $j$ ,  $i$  es la tasa de descuento y  $j$  el período.

La diferencia en beneficios de los flujos de cada presupuesto, convencional y poroso, se entiende como el ahorro a favor del presupuesto que resulte preponderante. En caso de que exista un ahorro se puede calcular la relación beneficio/costo de éste y según la magnitud de este índice cuantificar sus implicaciones.

El periodo de repago o Payback es el tiempo necesario para que el inversionista recupere la cantidad invertida:

$$PR = \frac{\text{Inversión}}{\text{Beneficios}} \quad (10)$$

Se tuvo en cuenta una inversión inicial adicional, asociada a la implementación de estas nuevas prácticas con concreto poroso, asumida por el contratista. Para este caso de estudio se tomó como inversión inicial el costo de capacitaciones iniciales al personal técnico en obra, para el rendimiento con el que se calcularon los análisis de precios unitarios el personal que se capacita son 20 personas con un precio por cada uno de ellos de 2.500.000 COP (2018). Aunque el mantenimiento del pavimento poroso se recomienda luego de un año de servicio, éste se tuvo en cuenta en el análisis financiero para simular las condiciones más críticas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 6 reporta las magnitudes de las áreas de las zonas de intervención y los respectivos coeficientes definidos de acuerdo con la Tabla 2. Al aplicar la ecuación 4 se obtiene un coeficiente de aporte de 0,69.

Tabla 6. Áreas del proyecto y Coeficientes escorrentía

	Áreas (m <sup>2</sup> )	Coeficientes
Superficie	Subtotal	$C_i$
Techos	14579,61	0,70
Parques	6093,34	0,30
Pavimentos	5327,00	1,00
Andenes	1782,00	0,95
<b>Total</b>	<b>27781,95</b>	
<b>Coficiente de aporte</b>		<b>0,69</b>

De la ecuación 3, con un área total de la cuenca de drenaje de 27.781,95 m<sup>2</sup>, y un coeficiente de aporte de 0,69, se obtuvo una superficie activa  $S_a$  de 19.053,63 m<sup>2</sup>, convertidos a hectáreas 1,91, obteniendo un caudal específico de 0,05179 mm/s. Para las estructuras de drenaje de este tipo de



proyectos se tomó un periodo de retorno promedio de 5 años, se calculó una altura de almacenamiento de 26 mm representada en la Figura 2, y finalmente se definió el porcentaje de vacíos del concreto poroso de 15%.

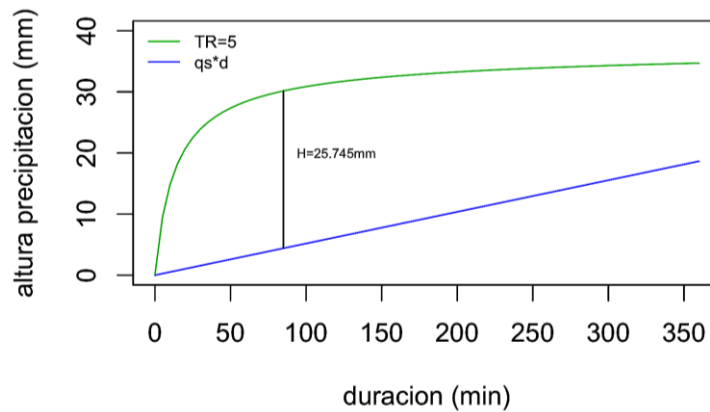


Figura 2. Altura de almacenamiento para  $Tr = 5$  años

Por otro lado, se empleó la ecuación 6 para definir el espesor de la capa de concreto poroso de 171,6 mm.

Se definió que la vía de estudio presenta tráfico ligero y un CBR de 6,70 % de la caracterización del suelo, por consiguiente, el espesor mínimo es 229 mm (Tabla 3), luego se obtuvo la estructura de soporte del mismo (Figura 3), así como de los andenes peatonales (Figura 4), con base en las recomendaciones constructivas y normativas provenientes de las prácticas empleadas en Estados Unidos, y utilizadas con buenos resultados a nivel Colombia por la empresa Argos.

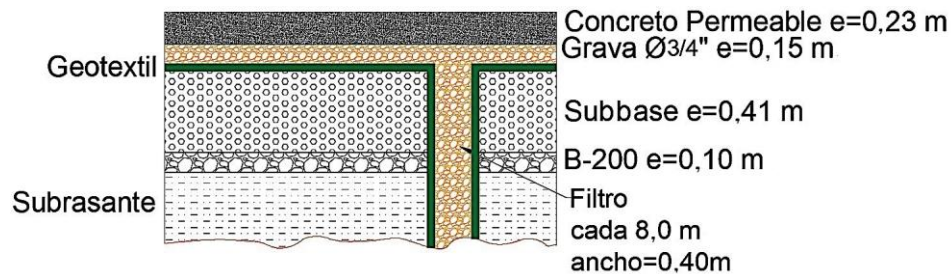


Figura 3. Estructura pavimento poroso, (Argos, 2018).

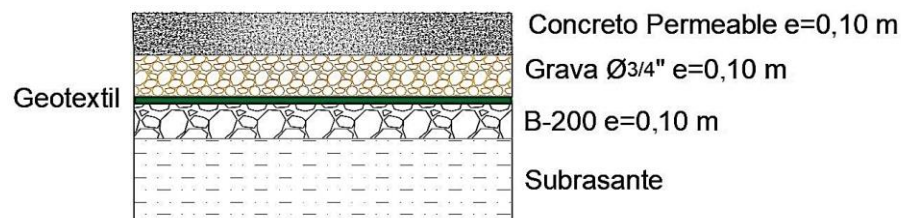


Figura 4. Estructura andenes peatonales pavimento poroso (Argos, 2018).

De las estructuras obtenidas para la vía y andenes se calcularon las cantidades de obra que integran el presupuesto, estas son: capa de concreto poroso, capa filtrante, geotextil, subbase granular tipo A IDU, base granular tipo A, relleno B-200, excavaciones mecánicas y excavaciones manuales. Se obtuvo un presupuesto total para la construcción con pavimento poroso de 1.370 millones COP

(2018), valor que teniendo en cuenta las áreas de vías corresponde a 240.771 COP (2018) por m<sup>2</sup> y andenes de 95.844 COP (2018) por m<sup>2</sup>. Este valor por m<sup>2</sup> es inferior al del presupuesto de pavimentos convencionales que asciende a 327.248 COP (2018) por m<sup>2</sup> de vía y 126.972 COP (2018) por m<sup>2</sup> de andén. Esta diferencia se debe a varios factores como cantidades en las excavaciones y rellenos; pero fundamentalmente a las estructuras de drenaje. Por otra parte, también se debe a la diferencia en el menor tiempo de ejecución de las obras con concreto poroso. En este caso se encontró que el m<sup>2</sup> de andén en concreto poroso resulta más costoso que en concreto convencional de 21 MPa, a diferencia de Castañeda Urrego y Moujir Salazar (2015) para quienes el m<sup>3</sup> de concreto poroso resulta menos costoso que el concreto convencional de 21 MPa.

Más allá de la diferencia por m<sup>2</sup>, entre los presupuestos de ambos pavimentos, se encontró el ahorro, la relación beneficio/costo y el periodo de repago o Payback de la inversión inicial, que se hace al construir pavimentos porosos (Tabla 7).

*Tabla 7. Indicadores financieros por escenario (en millones de pesos 2018)*

No.	Escenario	VP Convencional	VP Poroso	Ahorro	% Del Costo	B/C	PAYBACK (Período Repago)
1	Vía + Andenes	1825	1397	428	23,45%	7,40	2
2	Vía	1665	1274	391	23,49%	7,16	1
3	Andenes	178	175	3	1,70%	1,06	2

De la Tabla 7 se infiere que el mayor ahorro se da en el escenario 1, es decir, cuando se construyen la vía y el andén en concreto poroso; asimismo, es el escenario que mayor relación beneficio/costo tiene. Sin embargo, al analizar el porcentaje del ahorro sobre el costo de cada escenario, se tiene una diferencia inferior a 0,1% entre los escenarios 1 y 2, siendo el escenario 2 el de mayor porcentaje de ahorro con 23,49%. Este valor es sustancialmente mayor que el ahorro reportado por Mora, Alvarado, y Torres (2011), quienes encontraron un 3% de ahorro sobre los costos, debido a la reducción en diámetros y la pendiente de tubería y el espesor de pavimento. La diferencia en el porcentaje del ahorro sobre el costo, entre los escenarios 1 y 2, es de un margen muy pequeño (0,1%). Por eso si tenemos que elegir un escenario, hay que tener en cuenta que en la relación beneficio/costo el escenario 1 tiene 7,40 mientras que el escenario 2 tiene 7,16. Por consiguiente se recomienda optar por el escenario 1.

Esta importante diferencia en los ahorros se debe principalmente a la eliminación de todas las estructuras de drenaje (tuberías de aguas lluvias, pozos de inspección de aguas lluvias, sumideros). Es importante tener en cuenta que las estructuras de drenaje de mayor peso son las tuberías, donde para el caso de estudio los diámetros son considerables (10", 18", 24", 27"); si estos diámetros fueran menores el ahorro sería menor.

En el escenario 3, los indicadores de porcentaje de ahorro sobre el costo y la relación beneficio/costo son de un orden de magnitud menor que los otros dos escenarios. Esto es atribuible

a la diferencia de 2.000 COP (2018) en los análisis de precios unitarios entre andenes en concreto convencional y poroso, aun cuando la cantidad de andenes es de 1.295 m<sup>2</sup>.

Con respecto al periodo de repago, que relaciona una inversión inicial para la implementación de concretos porosos, se puede decir que para los escenarios 1 y 3 es el mismo (dos quincenas), mientras que para el escenario 2 el periodo de repago es de un periodo (15 días). Es evidente que para los tres escenarios el tiempo de retorno de la inversión inicial es pequeño, teniendo en cuenta que el tiempo de ejecución del proyecto que en todos los casos es de 6 meses y que el mantenimiento está programado a un año. La diferencia de 15 días entre los escenarios 1 y 3 con respecto al escenario 2 no tendrá mayor incidencia en la decisión del inversionista, teniendo en cuenta la magnitud de los ahorros con relación a la inversión.

## **CONCLUSIONES**

El ahorro presentado por el pavimento poroso evidencia un incremento en la reducción de costos considerable debido principalmente a la eliminación de todos los elementos de drenaje, dentro de los cuales están tuberías de alcantarillado de aguas lluvias de hasta 27", implicando que para proyectos similares donde tengan tuberías de diámetros grandes, la implementación de los pavimentos porosos se puede tener en cuenta y alcanzar ahorros superiores al 20% del costo. Es recomendable analizar todas las variables de los proyectos a implementar para poder establecer el ahorro positivo: es probable que para otras características del sitio y del tamaño del proyecto los ahorros no sean tan considerables. Adicionalmente, sería interesante poder cuantificar el ahorro en costos que representa el beneficio ambiental.

Para poder emprender un proyecto innovador es necesario incurrir en unos costos iniciales asociados a la implementación de esta nueva tecnología, estos costos necesariamente deben retornar con el desarrollo del proyecto. Dentro de los flujos de ahorros encontrados en la presente investigación se definió que la inversión inicial es compensada dentro de los dos primeros periodos del proyecto, es decir en 1 mes. Se puede decir que la inversión inicial retorna rápidamente. Si tenemos en cuenta la magnitud del ahorro este tiempo de retorno es una invitación clara hacia la innovación. Se recomienda en futuras investigaciones detallar los posibles costos implícitos adicionales en la implementación de nuevas tecnologías.

Del análisis de los escenarios financieros se puede afirmar que la construcción de andenes en concreto poroso no representa un ahorro importante, que motive al constructor a la innovación con este tipo de material, esto debido a que, en su análisis de precios unitarios, el concreto convencional tiene menor valor que el concreto poroso. Adicionalmente el proceso constructivo de andén en concreto poroso requiere más esfuerzo que en concreto convencional, por consiguiente, implica que el hacer o no hacer concreto poroso en andenes es despreciable. Se recomienda entonces la implementación de los pavimentos porosos principalmente en vías al querer obtener beneficios financieros.

## **REFERENCIAS**

- Amit, S. (2018). Experimental Study on Hydrological and Mechanical Property of Pervious Concrete. *Journal of Ceramics and Concrete Sciences*, 2(2, 3).
- Azzout, Y., Barraud, S., y Cres, F. (1994). Techniques alternatives en assainissement pluvial: Choix, conception, réalisation et entretien. *Techniques alternatives en assainissement pluvial: Choix, conception, réalisation et entretien () Technique et Documentation Lavoisier*.

- ACI 522, C. (2010). 522R-10 report on pervious concrete. ().
- Castañeda Urrego, L. F., y Moujir Salazar, Y. F. (2015). Diseño y aplicación de concreto poroso para pavimentos.
- Consejo de Bogotá. (2004). POT de Bogotá: Consejo de Bogotá.
- Dyavappanavar, S. P., Nagaraja, K. R., Paramesh, C. A., Shettar, P. G., & Ballur, P. (2017). Behavior of Pervious Concrete by Gradation Method.
- El-Hassan, H., y Kianmehr, P. (2018). Pervious concrete pavement incorporating GGBS to alleviate pavement runoff and improve urban sustainability. *Road Materials and Pavement Design*, 19(1), 167-181
- EPA. (1980). Porous Pavement (Vol. Phase I- Design and Operational Criteria). United States.
- Field, R., Masters, H., y Singer, M. (1982). An overview of porous pavement research. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 18(2), 265-270. doi:10.1111/j.1752-1688.1982.tb03970.x
- González Vásquez, J. W., y Túllume Paiva, J. D. (2015). Diseño de mezclas de concreto poroso para pavimentos de tránsito liviano.
- Law, E. P., Diemont, S. A. W., y Toland, T. R. (2017). A sustainability comparison of green infrastructure interventions using emergy evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 145, 374-385. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.039
- Liu, W., Chen, W., Feng, Q., Peng, C., y Kang, P. (2016). Cost-benefit analysis of green infrastructures on community stormwater reduction and utilization: A case of Beijing, China. *Environmental Management*, 58(6), 1015-1026. doi:10.1007/s00267-016-0765-4
- Mora, O., Alvarado, D., y Torres, A. (2011). Economic analysis of the application of porous pavements on Bogotá roads. *Conferencia], 12nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre Brazil*,
- Recasens, R. M. (2006). Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad. *Universitat Politècnica De Catalunya, Zaragoza*.
- Valencia, D. M. R., y Nájera, J. D. C. Z. (2018). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palagrande. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 115-126.
- Vammen, K. (2015). Desafíos del agua urbana en las Américas: Perspectivas de las academias de ciencias. *Agricultura, Sociedad Y Desarrollo*, 12(3), 475-478.
- Vélez Pareja, I. A. (2013). Decisiones de inversión: Para la valoración financiera de proyectos y empresas Pontificia Universidad Javeriana.

Zachary Bean, E., Frederick Hunt, W., y Alan Bidelspach, D. (2007). Evaluation of four permeable pavement sites in eastern North Carolina for runoff reduction and water quality impacts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(6), 583-592.