

**Pavimentos Porosos Utilizados
Como Sistemas Alternativos Al
Drenaje Urbano**

**Alejandra Trujillo López
Diana Paola Quiroz Lasprilla**

Director: Andrés Torres

Pontificia Universidad Javeriana

Bogotá – Colombia

Diciembre de 2013

CONTENIDO

Índice de ilustraciones	3
Índice de tablas.....	5
1. Introducción.....	7
1.1 Descripción del documento.....	8
2. Marco Teórico.....	9
2.1 Ciclo hidrológico urbano y ciclo hidrológico natural.....	9
2.2 Inundaciones en zonas urbanas	10
2.3 Contaminantes presentes en la escorrentía urbana.....	11
2.4 Sistemas de drenaje alternativos	13
3. Pavimentos porosos	15
3.1 Configuraciones.....	20
3.1.1 Capa de rodadura y Base	20
3.1.2 Revestimiento.....	21
3.1.3 Reservorio	21
3.1.4 Salida Lateral.....	22
3.1.5 Capas Filtrantes	22
3.1.6 Materiales de pavimentación blandos.....	23
3.1.7 Cubiertas	23
3.2 Ventajas y desventajas.....	23
3.2.1 Ventajas	23
3.2.2 Desventajas.....	27
3.3 Ejemplos de aplicación	29
4. Diseño de pavimentos porosos.....	32
4.1 Diseño estructural.....	33
4.2 Diseño hidrológico e hidráulico	38
4.2.1 Método de la curva envolvente	40
4.2.2 Metodología Chile.....	43
4.2.3 The SUDS manual, CiriaC697	45
4.2.4 Los métodos franceses.....	47
4.2.5 Método de diseño de acuerdo a la calidad.....	51
4.3 Recomendaciones de diseño.....	59
5. Construcción de pavimentos porosos	60
5.1 Criterios para la construcción de pavimentos porosos	60

5.2	Trabajos preliminares	60
5.3	Sub-rasante.....	62
5.4	Construcción de pavimentos porosos de concreto.....	63
5.5	Construcción de adoquines drenantes.....	64
5.6	Construcción de pavimentos porosos en asfalto.....	67
5.7	Recomendaciones de construcción y materiales	70
5.7.1	Construcción.....	70
5.7.2	Materiales.....	71
6.	Mantenimiento de pavimentos porosos.....	72
6.1	Recomendaciones de mantenimiento.....	76
7.	Aplicabilidad	77
7.1	Sitio de estudio (Descripción)	77
7.2	Datos generales de la zona de estudio.....	78
7.3	Datos geotécnicos	81
7.4	Datos hidrológicos	81
7.4.1	Coeficiente de escorrentía	81
7.4.2	Curvas IDF	83
7.4.3	Datos de transporte:	84
7.5	Aplicación de métodos de diseño	84
7.5.1	Método de la Curva Envolvente:	84
7.5.2	Metodología Chile:.....	86
7.5.3	The SUDS Manual.....	88
7.5.4	Aplicación de los métodos franceses.....	89
7.5.5	Métodos de diseño de acuerdo a la calidad.....	94
7.6	Aplicación de los métodos de construcción.....	98
7.7	Aplicación de los métodos de mantenimiento	98
8.	Conclusiones	100
9.	Recomendaciones	102
10.	Referencias.....	103
11.	Anexos	113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno natural (Fuente: Coupe, S.).....	9
Ilustración 2: Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno rural (Fuente: Coupe, S.)	10
Ilustración 3: a) asfalto normal y poroso, b) concreto poroso (Fuente: Lucke et al., 2013)	17
Ilustración 4: a) Disposición típica de un sistema de pavimento permeable, b) Disposición típica de un sistema de pavimento poroso. (Fuente: Scholz & Grabowiecki, 2006).....	18
Ilustración 5: Estructuras modulares con bloques a) juntas, b) aperturas. (Fuente: Lucke et al., 2013).....	19
Ilustración 6: Estructura del pavimento permeable de infiltración total. (Adaptado de: Interpave, 2008).....	19
Ilustración 7: Estructura del pavimento permeable de infiltración parcial. (Adaptado de: INTERPAVE, 2008)	20
Ilustración 8: Estructura del pavimento permeable de infiltración nula (Adaptado de: INTERPAVE, 2008).	20
Ilustración 9: reservorio en pavimentos nivelados e inclinados. (Fuente: Ferguson, 2005)	22
Ilustración 10: contraste de los efectos hidrológicos en los pavimentos densos (a) y en los pavimentos porosos (b) (fuente: Ferguson, 2005).....	25
Ilustración 11: Convenciones de la estructura de pavimento poroso (Adaptado de: Interpave, 2008).....	36
Ilustración 12: Metodología para el cálculo del Cs de acuerdo al mantenimiento y a la calidad del afluente. (Fuente: Dirección de investigaciones científicas y tecnológicas - DICTUC-, 1996).....	44
Ilustración 13: Superposición de la curva Altura-Duración para una frecuencia elegida y la curva de evacuación. (fuente: Polanco Andrade & Sánchez Vega, 2012).....	49
Ilustración 14: curva de alturas acumuladas en un año (Fuente: (Polanco Andrade & Sánchez Vega, 2012).	50
Ilustración 15: curva para la determinación de la altura específica (fuente: Polanco Andrade & Sánchez Vega, 2012).....	51
Ilustración 16: UCWI en relación con SAAR, para invierno y verano.(Fuente: Dublin City Council, 2005).....	55

Ilustración 17: 1. Localización de Bogotá en el mapa de Colombia. 2 y 3. Localización de la zona de estudio en la ciudad de Bogotá.....	77
Ilustración 18: planta de la zona de estudio con sus áreas aferentes correspondientes...	80
Ilustración 19: Curvas IDF para la zona de estudio.....	83
Ilustración 20: Almacenamiento requerido para $T_r=3$ años.	87
Ilustración 21: Almacenamiento requerido para $T_r=3$ años.	89
Ilustración 22: Almacenamiento requerido para $T_r=3$ años.	91
Ilustración 23: Caudal específico para cada duración.	92
Ilustración 24: Precipitación acumulada para cada duración.....	92
Ilustración 25: Altura para cada duración.	93
Ilustración 26: Altura para cada duración.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Magnitud, fuente e impacto de los contaminantes. (Adaptado de: Lundy, Ellis, & Revitt, 2011)	12
Tabla 2: Ejemplos de pavimentos porosos en el mundo.	29
Tabla 3: Categorías de la resistencia del suelo (Adaptado de: EPA, 1980).....	34
Tabla 4: Mínimos espesores de un pavimento permeable para varias condiciones de tráfico. (Adaptado de: EPA, 1980).....	35
Tabla 5: Espesores mínimos de las capas de un pavimento permeable (adaptado de: MINVU, 1996).....	35
Tabla 6: Diseño de pavimentos permeables de acuerdo a las categorías de carga. msa: millones de ejes estándar (Adaptado de: Interpave, 2008).	36
Tabla 7: Ecuaciones de pre-dimensionamiento de pavimentos porosos rígidos (Fuente: Lopes da Silveira & Avruchgoldenfum, 2007)	43
Tabla 8: Factor específico de recarga para el cálculo del volumen de recarga rev. (fuente: cedex, 2008).....	53
Tabla 9: valores de SOIL para diferentes tipos de suelo (Fuente: Dublin City Council, 2005)	56
Tabla 10: Parámetros de aplicación de los métodos de diseño.....	58
Tabla 11: Áreas aferentes de las vías al pavimento poroso	78
Tabla 12: Áreas aferentes de los techos al pavimento poroso.	79
Tabla 13: Distancias de los sumideros a un sitio determinado.	81
Tabla 14: Coeficientes de escorrentía.....	82
Tabla 15: Coeficientes de escorrentía.....	82
Tabla 16: Ecuación de Montana para diferentes periodos de retorno	83
Tabla 17: Clasificación de vías de acuerdo a la demanda de vehículos (fuente: Guisselle Montoya H)	84
Tabla 18: Parámetros de la ecuación de Talbot.....	84
Tabla 19: Cálculo del valor de r.	85
Tabla 20: Resumen del resultados del método de la curva envolvente.....	86
Tabla 21: Valores de las áreas.	86
Tabla 22: Tabla resumen de la metodología Chile.	88
Tabla 23: Resumen de la metodología The SUDS Manual.	89
Tabla 24: Valor de la superficie activa y el coeficiente de aporte.	90

Tabla 25: Tabla resumen del método de las lluvias.	90
Tabla 26: Volumen de almacenamiento por el método simplificado.....	94
Tabla 27: Valores de porosidad de las diferentes capas de pavimento poroso	95
Tabla 28: Resultados del espesor de cada capa del pavimento poroso hallando el volumen a almacenar por el método simplificado.....	95
Tabla 29: volumen de almacenamiento por medio del método de precipitación fija	95
Tabla 30: resultado del espesor de la sub-base por medio del método de precipitación fija	96
Tabla 31: resumen de resultados de espesores de pavimento poroso al aplicar las metodologías existentes	97

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de urbanización implica el desarrollo de vías que permitan realizar las diferentes actividades de la ciudad. Este desarrollo vial requiere la construcción de pavimentos, los cuales puedan resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura (Montejo Fonseca, 2001). Sin embargo, estos pavimentos tradicionales ocasionan impermeabilizaciones importantes en el espacio urbano, lo cual aumenta los riesgos de inundación y de contaminaciones diferidas a largo plazo de los cuerpos acuáticos receptores (Gromaire-Mertz, Garnaud, González, & Chebbo, 1999).

Como respuesta a estos efectos nocivos, desde la década de 1980 se han venido concibiendo y probando una serie de técnicas alternativas de drenaje pluvial urbano. Estas técnicas intentan crear soluciones que generen la menor diferencia posible entre el ciclo hidrológico urbano y el ciclo hidrológico natural (Torres, 2001), complementando y sustituyendo en algunos casos los sistemas de drenaje convencionales y aliviando las demandas excesivas que se presentan de manera puntual en el tiempo en las redes de alcantarillado pluvial y combinado (Torres, Ortega, & Daza, 2011).

Adicionalmente, se ha observado que las técnicas alternativas pueden presentar beneficios ambientales, ya que en algunos casos su presencia contribuye a la disminución de concentraciones y cargas de contaminantes (Matthews, Watt, Marsalek, Crowder, & Anderson, 1997; Colandini, 1997; Bratieres et al., 2008) producidas en el proceso de la escorrentía sobre las superficies urbanas.

Una de las técnicas alternativas más utilizadas corresponde a los pavimentos porosos, los cuales permiten la percolación del agua a través de su estructura, lo que retarda la escorrentía generada por los eventos de lluvia, para posteriormente liberar de manera diferida el volumen de agua en el medio natural (río, acuífero, humedal, etc.) o en las estructuras de drenaje complementarias y/o convencionales (Colandini, 1997).

Los pavimentos porosos son utilizados principalmente en zonas de alta densidad, donde el espacio es limitado y en superficies de pendientes menores o iguales al 5% con el fin de evitar estancamientos de agua en la superficie y dentro de la sub-base (Maryland Stormwater Design Manual -MDE-, 2000).

En Colombia, son pocos los estudios y las aplicaciones sobre los pavimentos porosos. No obstante, se han realizado algunas investigaciones sobre las propiedades mecánicas en las cuales se han propuesto diseños de mezclas especiales para aumentar la porosidad sin sacrificar las resistencias (Reyes & Torres, 2002; Niño Rivera & Villamil, 2003). Adicionalmente, en la Pontificia Universidad Javeriana, se han estudiado las propiedades hidráulicas (Lozano Silva

& Niño Paredes, 2003) y de retención de contaminantes (Torres et al., 2011), así como el envejecimiento y colmatación (Gómez González, Rodríguez Benavides, & Torres, 2010) y aspectos económicos y financieros (O. Mora, Alvarado, & Torres, 2011) de dichos pavimentos. Recientemente el trabajo de grado realizado por Polanco y Sánchez (2012) utilizó los resultados hidráulicos y de envejecimiento obtenidos en laboratorio y mencionados anteriormente, para estudiar diferentes metodologías de diseño y proponer modificaciones adaptadas a las condiciones hidrológicas y geotécnicas de Bogotá.

A pesar de lo anterior, los pavimentos porosos no se han implementado ampliamente en el país y los resultados mencionados arriba no han sido utilizados para estandarizar las prácticas de construcción. Por lo tanto su diseño e instalación no representa una práctica generalizada en la ingeniería colombiana. Lo anterior puede deberse a que no existe aún en nuestro medio un documento en español que reúna los procesos de diseño, construcción y mantenimiento de éstos aplicables a las principales ciudades del país, y que tenga en cuenta los resultados obtenidos de los diferentes estudios sobre aspectos estructurales, geotécnicos, hidráulicos y ambientales.

Con el fin de hacer un aporte que permita disminuir esta falta de información en nuestro medio, este proyecto busca describir y analizar los diferentes métodos que existen para el diseño, construcción y mantenimiento de los pavimentos porosos utilizados como métodos alternativos al drenaje urbano.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO

El presente documento contiene diez capítulos en los cuales se busca recopilar información acerca de los pavimentos porosos para el diseño, construcción y mantenimiento, teniendo en cuenta si se pueden aplicar para una zona de estudio en Bogotá. Al final del mismo, se presentan las referencias bibliográficas utilizadas y consultadas para la elaboración de este trabajo y los anexos correspondientes.

Siendo un poco más específicos, inicialmente se hace una descripción general sobre los sistemas urbanos de drenaje sostenible (capítulo 2); como el documento es acerca de pavimentos porosos como alternativa al drenaje urbano, se hace énfasis en estos definiéndolos y mostrando sus ventajas y desventajas en cuanto a caracteres técnicos, ambientales, sociales y económicos (capítulo 3). Por otro lado se exponen los temas de diseño estructural, hidrológico e hidráulico de los pavimentos porosos (capítulo 4), su construcción (capítulo 5) y mantenimiento (capítulo 6), dando sus correspondientes recomendaciones.

Finalmente se hace la aplicación de los métodos de diseño, construcción y mantenimiento (capítulo 7) para una zona determinada en Bogotá, y se hacen las correspondientes conclusiones y recomendaciones (capítulo 8 y 9), no en base a los pavimentos porosos sino acerca del desarrollo de este texto.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CICLO HIDROLÓGICO URBANO Y CICLO HIDROLÓGICO NATURAL

El ciclo del agua o ciclo hidrológico representa la existencia y el movimiento del agua presentes en la Tierra. Se encuentran dos tipos, el ciclo hidrológico natural y el ciclo hidrológico urbano.

El ciclo hidrológico natural (Ilustración 1) es un proceso en el cual parte del agua de precipitación es interceptada por la vegetación antes que toque el suelo, el resto de agua satura al terreno antes de producir escorrentía superficial y sub-superficial. Posteriormente, el agua se concentra en ríos, lagos y humedales o se infiltra alimentando acuíferos naturales, que son fuentes para el abastecimiento de agua a las poblaciones. En todas las fases están presentes los procesos de evapotranspiración de las plantas y de evaporación necesarios para cerrarlo. (Castro Fresno, Rodríguez Hernández, Bayón, & Ballester Muñoz, 2005).

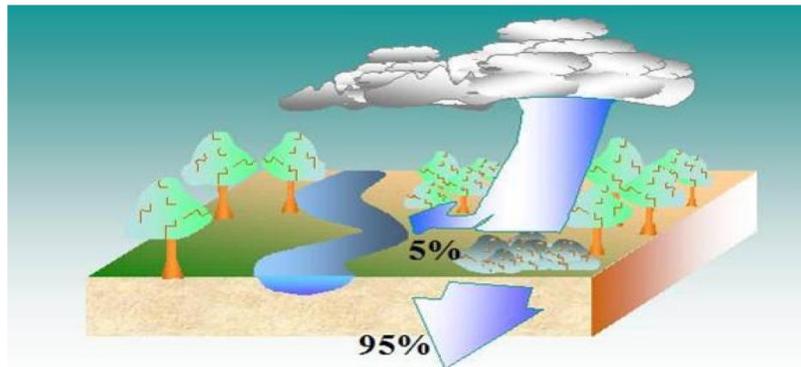


Ilustración 1: Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno natural (Fuente: Coupe, S.)

Por otro lado, en el ciclo hidrológico urbano (Ilustración 2), el agua, antes de llegar al suelo, purifica el aire recogiendo partículas contaminantes, que son arrastradas posteriormente. En la ciudad, la detención de agua de precipitación es efectuada por los tejados y superficies impermeables, por lo tanto, en zonas urbanas no se produce casi infiltración, por lo cual por ejemplo los acuíferos naturales situados bajo las ciudades quedan aislados (Castro Fresno et al., 2005; Chow, Maidment, & Mays, 1994).

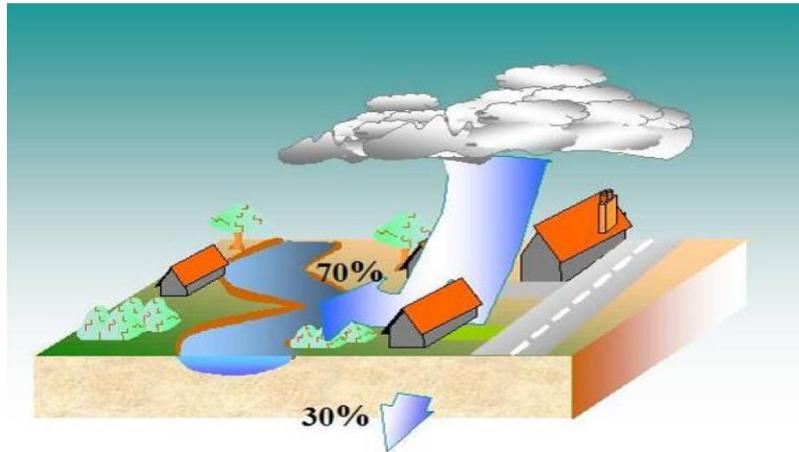


Ilustración 2: Reparto de escorrentía e infiltración en un entorno rural (Fuente: Coupe, S.)

2.2 INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

Las ciudades están creciendo y evolucionando permanentemente, por lo general más rápido que sus sistemas de drenaje pluvial. En combinación con las amenazas del cambio climático, la creciente urbanización y el envejecimiento de las redes pluviales (Henonin, Russo, Mark, & Gourbesville, 2013), además el suelo de las ciudades es poco permeable (vías, tejados, cubiertas, etc.), haciendo que el agua corra rápidamente por canales y pavimentos, concentrándose en un corto periodo de tiempo en los sistemas de alcantarillado subterráneos (Castro Fresno et al., 2005); esto hace que se genere un crecimiento en la frecuencia y en la magnitud de las inundaciones debido al aumento de la escorrentía, razón por la cual se disminuye la disponibilidad de superficies permeables, y por consiguiente el descenso en la capacidad de almacenamiento. Es por esto que cuando se presentan tormentas de menor magnitud y más frecuentes se pueden generar problemas de inundación (EPA, 1999).

Estas inundaciones se producen por el criterio de diseño tradicional de evacuar el agua caída en las superficies impermeables lo antes posible. Este criterio es, precisamente, el que hace que los sistemas convencionales de gestión de las aguas pluviales fallen, ya que se presenta una acumulación de una cantidad enorme de agua en un corto periodo de tiempo (Castro Fresno et al., 2005).

El fenómeno de inundaciones urbanas, que está relacionado con la falta de capacidad de diseño de los sistemas de drenaje cuando se presenta una precipitación elevada, es un problema global que tiene por consiguiente consecuencias económicas y sociales (René, Madsen, & Mark, 2013). Por otro lado, las inundaciones y las fuertes lluvias han sido asociadas con enfermedades infecciosas transmitidas por el agua, sin embargo, no está claro en qué medida suponen un riesgo para la salud pública (De Man et al., 2013).

2.3 CONTAMINANTES PRESENTES EN LA ESCORRENTÍA URBANA

La escorrentía urbana ha sido identificada como una de las principales causas de degradación de las aguas receptoras debido a que ésta contiene una gran variedad de contaminantes, influenciando la calidad de los cuerpos receptores (ríos, acuíferos, humedales, etc.; Luo et al., 2009).

Los contaminantes asociados con las aguas lluvias incluyen sedimentos, nutrientes, bacterias y virus, aceites y grasas, metales, residuos orgánicos, pesticidas y contaminantes gruesos, entre otros. Los contaminantes nocivos, como los hidrocarburos y metales pesados en el escurrimiento superficial tienen el potencial de poner en peligro los recursos del suelo y las aguas subterráneas, cuando no son suficientemente biodegradable y/o eliminados durante la infiltración (Scholz & Grabowiecki, 2006). A continuación se darán más detalles acerca de cada uno de estos contaminantes (Lundy, Ellis, & Revitt, 2011):

Tabla 1: Magnitud, fuente e impacto de los contaminantes. (Adaptado de: Lundy, Ellis, & Revitt, 2011)

Contaminante	Fuente	Concentraciones	Cargas (Kg/ha/año)	% Fallas atribuidas a la fuente del contaminante	Estandares de calidad del agua	Impacto
Nutrientes (mg/L): Concentración mínima irreducible (MIC): Fosfatos: 0.15, Nitrogeno: 1.9	Fertilizantes Residencial Autopistas y carreteras principales Comercial Industrial Techos	P: 0.02-14.3 N:0.4-20 N: 0-6 NH4:0.4-3.8 N: 0-4 NH4: 0.2-4.6 NH4: 0.2-1.1 NH4: 0.4-3.8	NH4: 7.2-25.1	2%-8% 2%-3%	P: 0.18 mg/L NH4: 0.25-9 mg/L	Crónico
FIOs: E. coli (MPN/100 mL) MIC:10 ⁴	Techos, calles y parques (por ejemplo: animales y mascotas)	40-10 ⁶				Crónico
Metales (µg/L): Pb, Cd, Zn, Ni, Cu	Autopistas y carreteras principales	Pb: 3-2410; Zn: 53-3550 Ni: 4-70; Cd:0.3-13 Pb: 10-150 Zn: 410; Cd: 0.2-0.5 Pb: 10-440; Zn: 300 Ni: 2-493	Pb: 1.1-13 Pb: 0.17-1.9 Zn: 1.15 Pb: 0.01-1.91 Zn: 1.15	5% <14% 5%	Pb: 7.2; Zn: 8-125 Cd: 0.45-1.5 0.08-0.25 Cu:1-28 Ni:20	Agudo y Crónico
	Carreteras urbanas					
	Carreteras suburbanas					
	Propiedades comerciales					
	Residencial	Cd: 0-5; Zn: 150	Pb: 0.001-0.03			
	Sumideros	Pb: 100-0.850				
Sólidos suspendidos totales (mg/L) MIC: 10-20mg/L	Alta densidad residencial	55-1568	130-840	5%-6%	TSS: 25 mg/L	Crónico
	Baja densidad residencial	10-290	50-183			
	Autopistas y carreteras principales	110-5700	815-6289			
	Carreteras urbanas	11-5400				
	Sumideros en carreteras	15-840	409-1700			
	Industrial	50-2582	620-2340			
	Comercial	12-270				
Techos	12.3-216					
Hidrocarburos (µg/L) HC: hidrocarburos PAH: hidrocarburos poliaromaticos	Alta densidad residencial	HC: 0.67-25	PAH: 0.002		PAH: 0.002-0.4	Crónico o Agudo
	Baja densidad residencial	HC: 0.89-4.5	HC: 1.8			
	Autopistas y carreteras principales	HC: 7.5-400; PAH: 0.03-6	HC: 0.01-43.3 PAH: 140			
	Carreteras urbanas	HC: 2.8-31 PAH: 1-3.5				
	Comercial	HC: 3.3-22 PAH:0.35-0.6	PAH: 0.01-0.35			
	Industrial	HC: 1.7-20	PAH: 0.07			
Pesticidas (µg/L)	Autopistas rurales	0.025-0.4			2 µg/L	Crónico
	Autopistas urbanas	0-17.5				
	Carreteras urbanas	0.4-48.1				
Orgánicos (mg/L) MIC: 2-4	Alta densidad residencial	2-17	2.8-7.6			Agudo
	Baja densidad residencial	0-4				
	Comercial	5-22	43-172			
	Industrial	8-23				
	Techos	2.8-8.1				
	Autopistas y carreteras principales	12-31	90-172			
	Carreteras urbanas	2-27				

2.4 SISTEMAS DE DRENAJE ALTERNATIVOS

Para controlar los efectos negativos antes mencionados de la urbanización sobre el ciclo hidrológico (inundación y transporte de contaminantes), se han creado sistemas de drenaje alternativos.

En efecto, la gestión de las aguas lluvias en zonas urbanas es de vital importancia para la reducción de contaminantes y el retardo de volúmenes de descarga de agua a los cuerpos receptores. Muchos de los sistemas de gestión del agua, que vienen bajo el título genérico de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) (Mullaney, Jefferies, & Mackinnon, 2011), se basan en dos principios: “Maximizar la capacidad de almacenamiento” y “Maximizar la capacidad de recarga” (Altarejos García, 2007).

Estas técnicas alternativas pretenden complementar, o en algunos casos sustituir, los sistemas de drenaje convencionales aliviando las demandas excesivas que se presentan de manera puntual en el tiempo de las redes de alcantarillado pluvial y combinado (Torres, Ortega, & Daza, 2011).

Los SUDS son conocidos con numerosas denominaciones en los diferentes países donde son empleados, así se pueden encontrar las siglas (Castro Fresno et al., 2005; Torres et al., 2011):

- SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) en Inglaterra
- BMPs (Best Management Practices) en Estados Unidos
- MPC (Mejores Prácticas de Control)
- BPAs (Buenas Prácticas Ambientales)
- TEDUS (Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible)
- LID (Low Impact Development) en Estados Unidos.
- WSUD (Water Sensitive Urban Design) en Australia
- Diseño Urbano Sensible al Agua.

En Colombia se tiene un documento técnico de soporte de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) para el plan de ordenamiento territorial establecido por la secretaria distrital de ambiente en el cual se describe y aplican algunas técnicas para diferentes zonas de Bogotá, sin embargo, en este documento no se tienen en cuenta los pavimentos porosos o permeables como si lo hacen los mencionados previamente.

Se puede decir que en la actualidad no existe una solución universal a los problemas relacionados con la gestión de las aguas lluvias debido a que cada área urbana tiene características diferentes como la topografía, el grado de urbanización, las redes y plantas de tratamiento de agua, entre otras.

Las técnicas alternativas para el tratamiento biológico de contaminantes se han desarrollado, incluyendo pavimentos con estructuras porosas que están diseñados no sólo para reducir las superficies impermeables de las zonas urbanas, sino también para atrapar los contaminantes asociados con las aguas pluviales en la fuente (Bentarzi et al., 2012).

3. PAVIMENTOS POROSOS

Los pavimentos convencionales son diseñados para el paso de vehículos. Por lo general, estos consisten una o más capas superpuestas de material de pavimento compactado y sellado superficial. Un aspecto integral de diseño de pavimento convencional consiste en impedir la entrada de agua en el suelo, a través del sello o las juntas de pavimentación, para proteger la integridad de la capa base y sub-base (Lucke, Beecham, Boogaard, & Myers, 2013).

Los pavimentos son una parte esencial del desarrollo urbano, sin embargo son los generadores de los excesos de caudal debido a su capa impermeable, que normalmente vienen contaminados con metales pesados e hidrocarburos. Estos excesos de caudal y de contaminantes se pueden evidenciar con mayor impacto, aguas abajo o en ecosistemas naturales ya que se recibe la mayor cantidad de agua y las propiedades que presenta (Lucke et al., 2013). Debido a esta acumulación de aguas contaminadas se debe buscar técnicas alternativas al drenaje urbano que logren filtrar y evitar la acumulación de aguas y contaminantes.

Uno de los sistemas de drenaje alternativos son los pavimentos porosos, los cuales son básicamente una mezcla de agregados gruesos uniformemente gradados, con muy bajo contenido de arena y un cementante, que puede ser una mezcla bituminosa o cemento portland, logrando un porcentaje de vacíos entre 15% y 20% (Reyes & Torres, 2002). Los pavimentos permeables se dividen principalmente en dos tipos: (i) pavimentos con revestimiento drenante; (ii) pavimentos con revestimiento impermeable. Estos dos tipos de pavimentos porosos pueden ser de evacuación distribuida (pavimentos drenantes de infiltración) y/o de evacuación localizada (pavimentos drenantes de retención) (Azzout, Barraud, Cres, & Alfakih, 1994).

Estos son una técnica de infiltración soportada por un material con alto contenido de agregados gruesos los cuales proporcionan una mayor porosidad (Torres et al., 2011). Lo anterior permite que la escorrentía de agua lluvia se infiltre en la tierra a través de una superficie permeable de pavimento o de otro tipo de superficie permeable (EPA, 1999).

Esta alternativa ha traído beneficios y resultados exitosos en cuanto al manejo de aguas lluvias, ya que es posible reducir gastos en obras de drenaje y aumentar la seguridad de los vehículos en circulación, proporcionando tiempos de concentración más elevados que los pavimentos convencionales (Gómez González et al., 2010). Por otro lado, estos ayudan a reducir significativamente la cantidad y la calidad del agua superficial (Torres et al., 2011), además de ayudar a mitigar los aumentos de temperatura y de ahorrar agua mediante el reciclaje de esta (Maryland Stormwater Design Manual -MDE-, 2000; Scholz & Grabowiecki, 2006).

Algunas de las ventajas y desventajas de los pavimentos porosos se presentan en un capítulo más adelante, pero en síntesis, no sólo se han establecido como una solución SUDS, sino también como una tecnología para el control de contaminantes respecto a la escorrentía superficial de las zonas utilizadas como vías o zonas de parqueo, donde el agua contaminada puede infiltrarse en el suelo subyacente (Scholz & Grabowiecki, 2006). Los contaminantes nocivos, como los hidrocarburos y metales pesados en el escurrimiento superficial tienen el potencial de poner en peligro los recursos del suelo y las aguas subterráneas, cuando no son suficientemente biodegradables y / o eliminados durante la infiltración (Scholz & Grabowiecki, 2006).

Las principales aplicaciones de los pavimentos porosos son las siguientes (Scholz & Grabowiecki, 2006):

- Acceso vehicular: accesos residenciales, servicios y caminos de acceso, cunetas, cruces y sendas de fuego.
- Estabilización de taludes y control de erosiones.
- Campos deportivos.
- Parqueaderos.
- Accesos peatonales.
- Senderos de bicicletas y ecuestres.

En general, los pavimentos porosos pueden ser utilizados en los estacionamientos, carreteras y otras áreas pavimentadas; son particularmente útiles para las calles y calzadas de zonas residenciales y en áreas de estacionamiento en áreas comerciales; no es efectivo en las áreas que reciben escorrentía con altas cantidades de sedimentos debido a la tendencia de los poros a obstruirse (EPA, 1999).

Mientras que hay muchos materiales diferentes disponibles comercialmente, los pavimentos permeables se pueden dividir en tres tipos básicos: asfalto poroso bituminoso, concreto permeable, y pavimento de mortero permeable entrelazado.

Estos tipos de pavimentos se pueden clasificar como pavimentos porosos o pavimentos permeables. Aunque la función de ambos tipos de pavimentos sea alcanzar los mismos beneficios, difieren considerablemente en su forma de operar y en su apariencia.

El principio general del sistema de pavimento permeable es simplemente para recoger, tratar e infiltrar libremente cualquier escorrentía superficial para apoyar la recarga de las aguas subterráneas. Tienen muchos beneficios potenciales, tales como la reducción de la escorrentía, la recarga de las aguas subterráneas, el ahorro de agua mediante el reciclaje y la prevención de la contaminación. Por otro lado, los pavimentos porosos han sido desarrollados para reducir las tasas de escorrentía y crecientes volúmenes de agua de lluvia recogida en las zonas urbanizadas. Estos pavimentos deben cumplir con las demandas de agua de

eventos pico mientras proporcionan una superficie resistente para ser utilizado en zonas urbanas (Scholz & Grabowiecki, 2006).

Los sistemas de pavimento poroso de concreto y pavimento poroso asfáltico son propensos a la obstrucción de sus poros, alrededor de tres años después de la instalación, haciendo así que se experimente una pérdida de porosidad. Una vez totalmente obstruido, estos sistemas tienen que ser eliminados por completo y posteriormente sustituido. El reemplazo frecuente de estos sistemas hace que estos tipos de técnicas sean poco prácticas y costosas (Scholz & Grabowiecki, 2006).



Ilustración 3: a) asfalto normal y poroso, b) concreto poroso (Fuente: Lucke et al., 2013)

La estructura más común de los pavimentos permeables y porosos consiste en tres capas (Ilustración 4): (i) una capa de rodadura que permite la entrada del agua, que puede ser en diferentes materiales como asfalto, concreto (pavimentos porosos), arcilla, grava, pasto (pavimentos permeables) (ii) una capa de material granular fino, la cual permite una instalación adecuada de la capa de rodadura y (iii) una capa compuesta por una matriz de material granular de gran tamaño, o por módulos o geo-células plásticas donde el agua se almacena (sub-base).

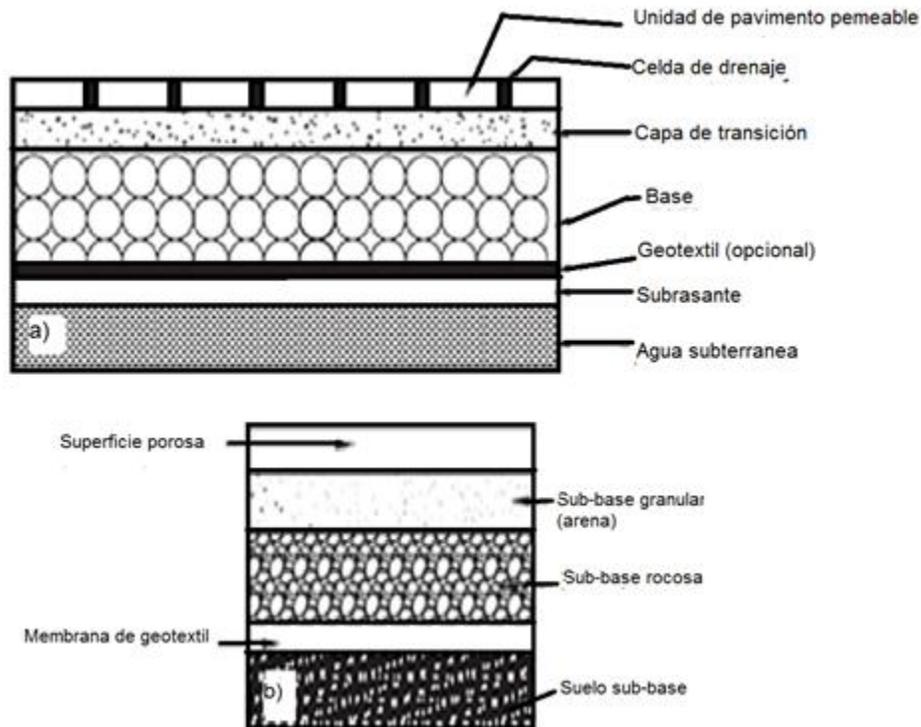


Ilustración 4: a) Disposición típica de un sistema de pavimento permeable, b) Disposición típica de un sistema de pavimento poroso. (Fuente: Scholz & Grabowiecki, 2006)

Los pavimentos permeables son diseñados específicamente para promover la infiltración de las aguas lluvias a través de las diferentes capas de base, lo cual da como resultado el manejo de aguas lluvias y beneficios ambientales. El agua lluvia es filtrada, ya sea recolectándola para su posterior reutilización o liberándola lentamente en suelos subyacentes o en sistemas de drenaje de aguas pluviales (Fletcher, Deletic, Mitchell, & Hatt, 2008).

Existen varias formas de pavimentos permeables: el monolítico y el modular (Fletcher et al., 2008). Las estructuras monolíticas incluyen asfalto poroso y concreto poroso (Ilustración 5a), que permite la infiltración a través de la superficie del pavimento. El asfalto poroso es similar a una mezcla típica de asfalto pero la porción fina de asfalto es omitida. Del mismo modo, en el concreto poroso la cantidad de agregados finos debe ser omitida. Las estructuras modulares son bloques o adoquines de concreto impermeables, pero el agua puede filtrarse a través de sus uniones o aperturas (Ilustración 5b).

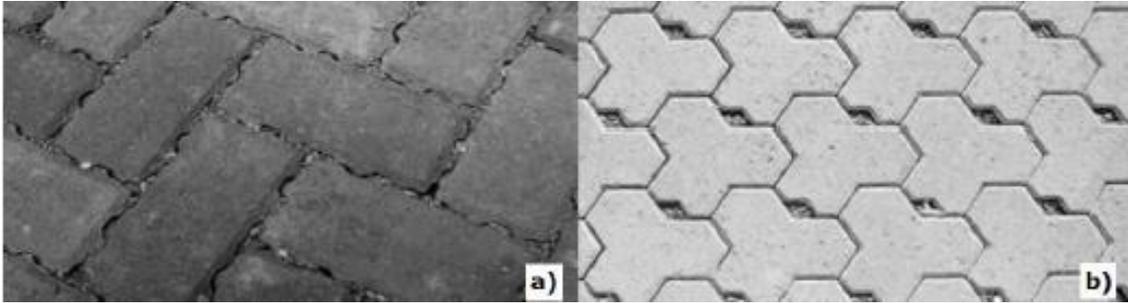


Ilustración 5: Estructuras modulares con bloques a) juntas, b) aperturas. (Fuente: Lucke et al., 2013)

La sub-base puede utilizarse para infiltrar y retener el agua parcial o completamente como se muestra en las Ilustración 6, Ilustración 7 e Ilustración 8. En el caso de la infiltración, el suelo natural (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 hacer uso de esta agua (aprovechamiento de agua lluvia) (Watanabe, 1995; Interpave, 2008).

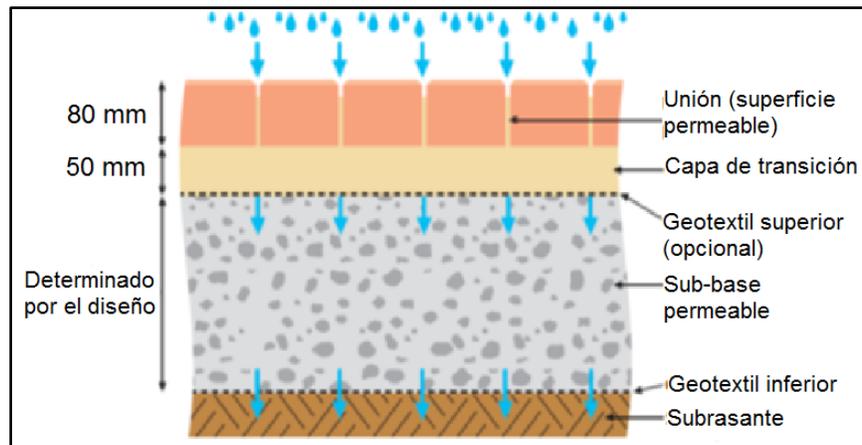


Ilustración 6: Estructura del pavimento permeable de infiltración total. (Adaptado de: INTERPAVE, 2008)

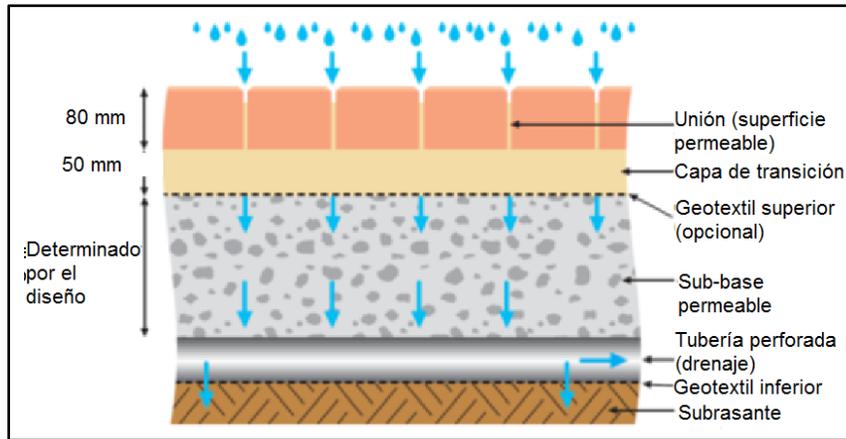


Ilustración 7: Estructura del pavimento permeable de infiltración parcial. (Adaptado de: INTERPAVE, 2008)

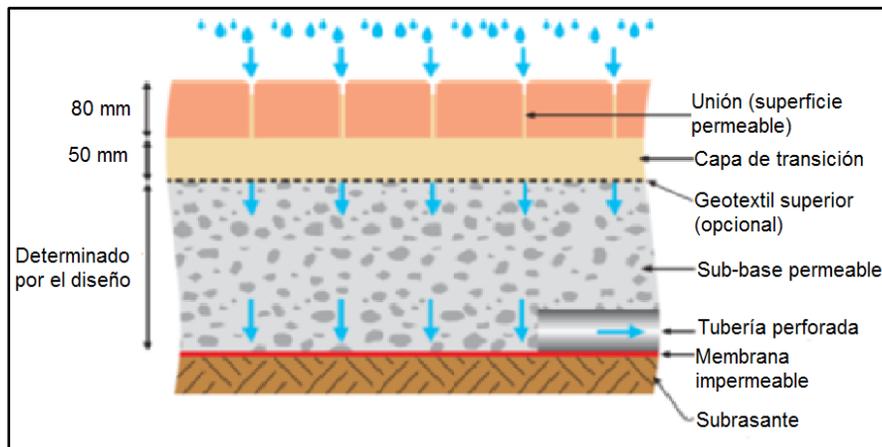


Ilustración 8: Estructura del pavimento permeable de infiltración nula (Adaptado de: INTERPAVE, 2008).

3.1 CONFIGURACIONES

Los pavimentos porosos, al igual que los pavimentos tradicionales, están formados por varios componentes, no todos los pavimentos contienen todas las configuraciones que se van a listar a continuación; cabe aclarar que cada pavimento tiene una combinación específica de estos, para permitir que cada pavimento cumpla con su propósito especial y la estructura en conjunto pueda ser construida con el menor gasto posible. Las configuraciones que se presentan a continuación son desarrolladas por Ferguson (2005).

3.1.1 CAPA DE RODADURA Y BASE

La capa de rodadura recibe directamente la carga de tráfico y los efectos desintegradores de la abrasión de este. Es probable que esté hecha de un

material especial, relativamente costoso, diseñado para resistir la abrasión y proporcionar cualidades tales como la apariencia y la accesibilidad.

La base del pavimento se puede implantar con material relativamente económico, para que la carga de tráfico se reparta uniformemente a través de la sub-base. La sub-base se agrega a la estructura del pavimento para dar mayor espesor, o para almacenar más agua, cuando se descarga a una tubería o se infiltra en el suelo.

3.1.2 REVESTIMIENTO

El revestimiento es cualquier capa aplicada en la parte superior de un pavimento preexistente o denso. Básicamente consta de una capa porosa sobre un pavimento de superficie densa. La capa porosa drena el agua fuera de la superficie, mejora la visibilidad, aumenta la tracción, y reduce el ruido y el resplandor, además hace el pavimento más seguro y aumenta su capacidad de transportar grandes cantidades de tráfico y obviar los costos de la ampliación de la carretera. Sin embargo, se dificulta el mantenimiento y el almacenamiento de agua en la estructura. Además la capa impermeable subyacente impide la ventilación que deben recibir las raíces de los árboles y la recarga de las aguas subterráneas.

3.1.3 RESERVORIO

El reservorio es una parte de un pavimento que almacena o transporta el agua, que sale a través de un tubo de drenaje o dentro del suelo, también es llamado capa de drenaje o manta de drenaje.

La Ilustración 9 muestra cómo la configuración de un reservorio puede variar con el nivel y de acuerdo a la inclinación de la superficie del pavimento. Por ejemplo, una superficie inclinada del reservorio puede permanecer en un suelo nivelado, siempre y cuando el material de base adicional necesario para compensar la diferencia en las laderas no sea excesivamente costoso.

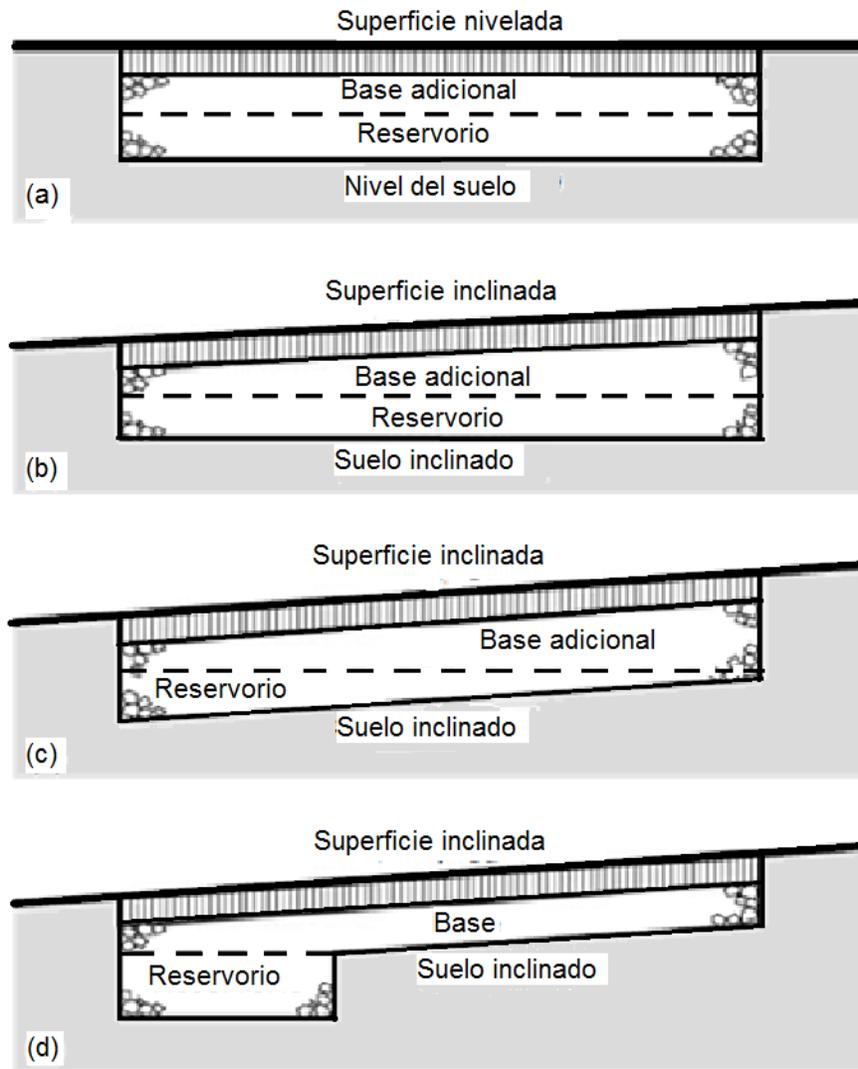


Ilustración 9: Reservoirio en pavimentos nivelados e inclinados. (Fuente: FERGUSON, 2005)

3.1.4 SALIDA LATERAL

Un tubo o cualquier otra salida lateral pueden descargar el exceso de agua de un reservorio de forma segura y además limita la profundidad y la duración de la formación de estancamientos de agua en la capa superior del pavimento. La capacidad de la salida controla la velocidad de descarga.

3.1.5 CAPAS FILTRANTES

Las capas filtrantes se insertan entre otras dos capas, o entre una capa y la sub-base, para segregar sus materiales. La segregación se necesita en algunos pavimentos para mantener la porosidad y la integridad estructural de cada capa. Las capas filtrantes pueden estar hechas de agregado de tamaño intermedio. También, se pueden hacer de geotextiles, que son tejidos que son permeables al

agua, pero que inhiben el movimiento de las partículas pequeñas. En algunos pavimentos, un geotextil añade resistencia a la tracción en el pavimento.

3.1.6 MATERIALES DE PAVIMENTACIÓN BLANDOS

La categoría de los materiales "blandos" de pavimentación incluye cualquier material granular a partir de una fuente orgánica o reciclados como mantillo de corteza, conchas trituradas o gránulos de caucho. Estos materiales son adecuados exclusivamente para zonas de tráfico muy ligero, como pasarelas peatonales, accesos residenciales, caminos ecuestres, entre otros. Estos materiales pueden ser muy apropiados en ambientes naturales, históricos o informales. Algunos materiales blandos son inestables en lugares con mucho viento o con agua concentrada.

3.1.7 CUBIERTAS

Se trata de estructuras a modo de puente construidas sobre zapatas que se suspenden sobre la superficie del suelo. Dejan el suelo por debajo prácticamente libre para el enraizamiento y la infiltración del agua. Son completamente permeables al aire y el agua, siempre y cuando sus componentes estén perforadas o separadas una de otra. Las cubiertas o pasarelas pueden soportar tráfico peatonal sin compactar el suelo subyacente. En ciertos casos, pueden soportar el tráfico vehicular. Para la construcción de estos, se puede optar por una variedad de materiales naturales, manufacturado o reciclados. Su durabilidad varía dependiendo del tipo de material y el mantenimiento que se necesite para este material. La principal desventaja de estas es su costo, que puede ser alto en comparación con algunos de los materiales de pavimentos comunes.

3.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Tras realizar una exhaustiva revisión de las fuentes bibliográficas, se han recopilado una serie de ventajas y desventajas que supone la utilización de los pavimentos permeables/porosos, presentándolas a continuación atendiendo a criterios de carácter técnico, social, ambiental y económico.

3.2.1 VENTAJAS

Se ha citado anteriormente que los pavimentos permeables/porosos corresponden a una de las técnicas alternativas de los sistemas de drenaje urbano sostenible. Por este motivo, los pavimentos permeables/porosos presentan muchas ventajas que ofrecen los sistemas urbanos de drenaje sostenible (García Haba, 2011).

3.2.1.1 VENTAJAS DE CARÁCTER TÉCNICO:

Generalmente, los pavimentos porosos tienen una relación directa con el control de la cantidad de la escorrentía urbana. La gestión de la escorrentía a través de la infiltración deriva en una reducción del volumen de escorrentía, o bien, en una laminación de los caudales a inyectar en la red de saneamiento convencional (menor caudal pico y mayor tiempo de concentración). Con menores caudales circulando por la red, disminuye la carga hidráulica en el sistema en tiempo de lluvia y se reducen los diámetros de las conducciones (García Haba, 2011).

Este sistema (pavimentos porosos) bien diseñado tiene una resistencia y una duración similar a un pavimento convencional. Además, su facilidad de manipulación permite una puesta en obra fácil, no requiere grandes espacios adicionales para su instalación y es apropiado para pendientes suaves, por lo que pueden implantarse en zonas urbanas consolidadas (García Haba, 2011).

Estos pavimentos son de rápida y fácil colocación (sin embargo necesita de mano de obra especializada), ya que para su colocación sólo es necesario extender el material y compactarlo evitando así el vibrado. Además se puede evitar el uso de cortadoras de disco de diamante y el sellado de juntas presentes en este. Para el curado es suficiente cubrir el pavimento permeable con un recubrimiento de polietileno (Saucedo Vidal, 2012).

Los pavimentos de asfalto convencionales tienden a deflectarse en menor tiempo que los pavimentos de asfalto poroso, pero la magnitud de la deflexión es aproximadamente igual (EPA, 1980).

Otra gran ventaja es que los pavimentos permeables pueden considerarse como una cadena de drenaje sostenible completa por sí mismos, pues integra los procesos de infiltración, captación, transporte y almacenamiento (Rodríguez Hernández, 2008).

En el caso de los adoquines se presentan ventajas como la restitución sencilla, debido a que es un pavimento permeable de carácter modular este tipo de pavimentos permite la fácil restitución de los elementos dañados y su puesta en obra es rápida y cómoda para las superficies de gran extensión (Rodríguez Hernández, 2008).

3.2.1.2 VENTAJAS DE CARÁCTER AMBIENTAL:

Las principal ventaja por la cual se impulsa la utilización de pavimentos permeables es la posibilidad de reutilización de las aguas pluviales para usos no potables (García Haba, 2011).

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 (Saucedo Vidal, 2012).

Este tipo de pavimentos ayuda a reducir el riesgo de inundaciones, ya que libera de manera diferida el agua. 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 (Saucedo Vidal, 2012). Estas ventajas toman vital importancia en aquellas zonas donde la disponibilidad de los recursos hídricos es muy limitada (García Haba, 2011).

En los pavimentos porosos y permeables se producen procesos físicos, químicos y biológicos que suceden en los pavimentos permeables, se mejora la calidad del agua de escorrentía urbana. Otra ventaja desde el punto de vista del control de la calidad de la escorrentía, y compartiendo cierta relación de carácter técnico, es la disminución de las descargas de sistemas unitarios al reducirse la carga hidráulica en las conducciones (García Haba, 2011).

Además, permiten el crecimiento de vegetación. En efecto, los árboles pueden vivir alrededor de 100 años o más, pero cuando están plantados cerca de pavimentos tradicionales disminuyen su tiempo de vida incluso a siete años. Los pavimentos porosos 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. Además a medida que el pavimento es permeable al aire y al agua, la parte de abajo del suelo puede mantenerse húmeda, mejorando el entorno del pavimento permitiendo la plantación y prolongando el tiempo de vida de vegetación (Ferguson, 2005, Yang & Jiang, 2003). La Ilustración 10 muestra como los pavimentos porosos ayudan a que se reponga el agua de estos, mejorando así la relación de este sistema con el medio ambiente:

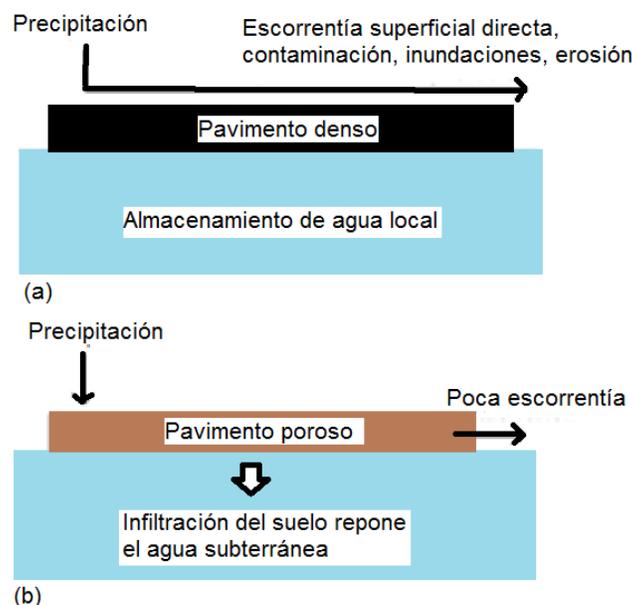


Ilustración 10: Contraste de los efectos hidrológicos en los pavimentos densos (a) y en los pavimentos porosos (b) (fuente: FERGUSON, 2005)

Adicionalmente, los pavimentos porosos son capaces de disminuir la contaminación propia de las aguas lluvias de escorrentía urbana presentando beneficios ambientales, reduciendo la contaminación de la siguiente forma: entre 36 y 95 % de sólidos totales (ST), 71% de fósforo (P), entre 54 y 89 % de demanda química de oxígeno (DQO), entre 50 y 93 % de plomo (Pb), 42% de cobre (Cu), 30% de cadmio (Cd) y entre 47 y 62% de Zinc (Zn) (Torres et al., 2011).

Según Kadurupokune, Jayasuriya, Othman, & Jesse (2007), los pavimentos porosos puede remover el 43% del fósforo total, 59% del nitrógeno, 8% del cobre, 22% de níquel y plomo, 43% de zinc y 40% los sedimentos. De acuerdo con diferentes estudios realizados, si los pavimentos están bien diseñados y tienen un mantenimiento adecuado, estos pueden remover acerca del 80% los sedimentos, 60% el fosforo, 80% nitrógeno, 70% metales pesados y 98% aceites y grasas.

Otra ventaja relacionada con la seguridad, es que proporcionan ventilación al suelo (García Haba, 2011), ya que la cantidad de vacíos hace que su densidad y la conductividad térmica sea mejor que la de un pavimento convencional (Zaetang, Wongsa, Sata, & Chindaprasirt, 2013). 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 (Yang & Jiang, 2003). Esto también permite que haya un ahorro de energía al disminuir el uso de aires acondicionados y luz eléctrica para iluminar las calles (Saucedo Vidal, 2012).

Por último, los pavimentos permeables pueden reducir las emisiones de CO₂ procedentes de los edificios, suponiendo una fuente de “energía verde” como complemento de las energías renovables, esto aplica para los pavimentos porosos que están hechos en adoquín, que dentro de sus celdas tienen vegetación (García Haba, 2011).

3.2.1.3 VENTAJAS 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), contribuyendo a que las carreteras donde estén instalados estos sean más seguras; por otro lado, estos mismos poros trabajan como canales de descompresión donde cualquier agua estancada escapa de debajo de los neumáticos del vehículo, manteniendo los neumáticos en contacto con la superficie (Ferguson, 2005).

Estéticamente, los pavimentos permeables proporcionan una mejor presentación respecto a otros sistemas de drenaje, y permiten el crecimiento de vegetación. Por

ello, tienen una adecuada integración paisajística en el entramado urbano, y son bien aceptados socialmente (García Haba, 2011).

Además, 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. Una superficie porosa absorbe la energía del sonido y permite que parte del aire que se encuentra alrededor de los neumáticos sea presionada dentro de los poros de este, disipando así la presión de aire antes de que se genere algún ruido. La reducción de ruido es particularmente eficaz para sonidos agudos. En conclusión, el ruido de los neumáticos en un pavimento poroso es de menor intensidad y bajo de tono que el de un pavimento tradicional (Ferguson, 2005), lo cual ayuda a mejorar la comodidad de los usuarios y de las personas que habitan en el sector.

En el caso de los pavimentos de adoquín, estos ofrecen una excelente estética, probablemente los adoquines sean los más versátiles y los que mejor acabados ofrecen (Rodríguez Hernández, 2008).

3.2.1.4 VENTAJAS DE CARÁCTER ECONÓMICO:

La reducción de los volúmenes de agua en la red convencional implica una reducción de los costos asociados a otros sistemas de tratamiento (por ejemplo, plantas de tratamiento, García Haba, 2011).

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 (Rodríguez Hernández, 2008).

3.2.2 DESVENTAJAS

Del mismo modo en que se han presentado las ventajas de los pavimentos permeables, se presentan a continuación sus inconvenientes según los aspectos técnicos, sociales, ambientales y económicos.

3.2.2.1 DESVENTAJAS DE CARÁCTER TÉCNICO:

Los principales inconvenientes según aspectos técnicos son: la colmatación (por sólidos suspendidos en la escorrentía o transportados por el aire, así como por partículas adheridas a los neumáticos de vehículos) y la degradación (por ciclos de hielo-deshielo) (García Haba, 2011).

El pavimento poroso es muy sensible a la compactación del terreno, ya que puede verse reducida su capacidad de infiltración. Por tanto, un desacertado diseño, una mala ejecución o un insuficiente o inexistente mantenimiento producirá una reducción en la fiabilidad del sistema (García Haba, 2011).

La resistencia a la compresión del concreto poroso es de aproximadamente 2000 libras por pulgada cuadrada (psi) o más, mientras que la del pavimento tradicional en concreto es del orden de 3500 psi o más, lo que hace que sea una desventaja de este material. (Ferguson, 2005).

Como el pavimento poroso tiene una menor resistencia que el de concreto común, solo debe colocarse en zonas de tránsito ligero (Saucedo Vidal, 2012). Otra desventaja en cuanto a la instalación, es que debe evitarse en zonas que puedan tener un gran aporte de sedimentos o terrenos con pendientes mayores al 5% (García Haba, 2011).

La puesta en obra del pavimento poroso es lenta y laboriosa, además de necesitar revisión constante durante todo el proceso de construcción, además su método de mantenimiento consiste en trabajos difíciles como la restitución, pues requiere fresado, limpieza y alisado de la estructura (Rodríguez Hernández, 2008).

3.2.2.2 DESVENTAJAS DE CARÁCTER AMBIENTAL:

Por su estructura porosa, pueden penetrar contaminantes que de no ser retenidos, adsorbidos o reducidos, continúan transportándose a través del suelo contaminando las aguas subterráneas, por lo que debe evitarse su instalación en áreas contaminadas, como se explica en el capítulo de construcción (García Haba, 2011).

En casos donde la infiltración al suelo es muy reducida, si no se produce un adecuado drenaje de la escorrentía almacenada entre eventos de lluvia, pueden darse condiciones anaerobias, es decir que algunos organismos pueden vivir y desarrollarse en ausencia completa o casi completa de aire. Además, el agua almacenada durante un largo periodo de tiempo puede aumentar su temperatura, por lo que su vertido en el medio receptor puede afectar negativamente a los sistemas acuáticos (García Haba, 2011).

3.2.2.3 DESVENTAJAS DE CARÁCTER SOCIAL:

En este caso, el principal inconveniente es la carencia de experiencia y la desconfianza de los técnicos, lo cual supone una limitación a la hora de intentar implantar pavimentos permeables. Desde el punto de vista de seguridad, existe un riesgo de deslizamiento en los primeros meses de su instalación (García Haba, 2011).

La estética del pavimento poroso es limitada, dado que ofrece un acabado continuo, es decir solo permite que la superficie logre estar bien terminada (superficie lisa), si la superficie no tiene buenos acabados puede resultar incómodo de pisar y de rodar con ruedas pequeñas debido a las discontinuidades (Rodríguez Hernández, 2008), y la estética depende del delineado final que se le puede poner a la superficie.

3.2.2.4 DESVENTAJAS DE CARÁCTER ECONÓMICO:

Como desventaja de carácter económico se distingue el elevado costo de instalación y de mantenimiento de la permeabilidad en casos de condiciones adversas de aporte de sedimentos (García Haba, 2011). El costo del pavimento poroso es comúnmente mayor que el del pavimento convencional, ya que es una mezcla especial con procedimientos de instalación especiales que requieren personal especializado con experiencia. La diferencia en el costo total depende de los costos relativos de los materiales y mano de obra (Ferguson, 2005).

El pavimento permeable requiere un mantenimiento constante, lo cual eleva los costos debido a que puede perder permeabilidad ya que a medida que pasa el tiempo los espacios vacíos tienden a taparse con material fino (Saucedo Vidal, 2012).

3.3 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

En varias partes del mundo se han implementado pavimentos porosos para diferentes usos. A continuación se presentan algunos casos.

Tabla 2: Ejemplos de pavimentos porosos en el mundo.

TIPO DE PAVIMENTO	IMAGEN	LUGAR
Pavimento permeable en asfalto		Plaza principal de Soyaló en el estado de Chiapas, México, se pinta como parte de la decoración urbanística. (fuente: HIDROCRETO, 2012)
Pavimento permeable en asfalto poroso		Estacionamiento de la planta de Schnyder Electric en Tlaxcala, México. (fuente: HIDROCRETO, 2012)

<p>Pavimento permeable en asfalto poroso</p>		<p>Estacionamiento en Ontario Canadá. (fuente: Ministerio de transporte de Ontario (MTO), 2011)</p>
<p>Pavimento permeable en asfalto poroso</p>		<p>Frente al hotel Intercontinental de Zapopan en Jalisco, México (fuente: ECOCRETO, 2010)</p>
<p>Pavimento permeable en adoquín</p>		<p>St. Germain's – Diamond-Vogel Parking Lot, 17th Ave East & London Rd Duluth, Minnesota, USA (fuente: Lake superior Duluth, 2007)</p>
<p>Pavimento permeable en adoquín</p>		<p>Stonehill private Catholic liberal arts college en Boston, USA. (Fuente: Foley, 2013)</p>

Pavimento
en asfalto
tradicional
combinado
con
agregado
poroso



Parqueadero
realizado para una
oficina en Medford
Village, New Jersey
(fuente: Ferguson,
2005).

4. DISEÑO DE PAVIMENTOS POROSOS

Como ya se ha mencionado en la introducción de este documento, comienza a verse en Colombia la necesidad de implementar manuales y recomendaciones sobre el diseño de los pavimentos permeables. En los países que más tiempo llevan empleando los pavimentos permeables (Estados Unidos y Reino Unido), existen normas y manuales sobre el diseño de estos sistemas lo suficientemente consolidados (García Haba, 2011).

A diferencia de los pavimentos convencionales en donde el diseño depende únicamente de la resistencia a la carga aplicada o propiedades mecánicas, a los pavimentos permeables se les agregan factores hidráulicos tales como permeabilidad y relación de vacíos (Tennis, Leming, & Akers, 2004).

Según el Maryland Stormwater Design Manual -MDE-, 2000, para el diseño de los pavimentos porosos y permeables se encuentran las siguientes condiciones:

- Transporte del agua:

La escorrentía deberá fluir a través de los pavimentos permeables y salir de ellos de una manera segura y no erosiva. La escorrentía de las zonas adyacentes debe ser desviada a un sistema de conducción.

Las superficies del pavimento deben tener una permeabilidad de 203.2 mm/h (8 pg/h) o más para conducir el agua a la sub-base rápidamente. La pendiente del pavimento permeable deberá ser de al menos 1% pero no mayor a 5%.

La parte inferior de la sub-base será el nivel para mejorar la distribución y reducir la formación de estancamientos. Una red de tuberías perforadas puede ser utilizada para distribuir uniformemente la escorrentía en la parte inferior de la cama. Tubos perforados también se pueden utilizar para conectar las estructuras situadas dentro de la sección de pavimento permeable.

- Paisajismo:

Los árboles y arbustos no deben estar situados junto al asfalto y concreto, ya que puede haber daños causados por la penetración de raíces y la obstrucción de las hojas en el pavimento poroso.

Por otro lado, es necesario llegar a un balance entre el diseño estructural y el hidráulico para de esta manera obtener un sistema óptimo que presente buen comportamiento en ambos aspectos (CIRIA, 2007): los dos diseños arrojarán diferentes espesores y el que sea mayor será escogido como el espesor de diseño (Interpave, 2008).

El diseño de cualquier pavimento permeable se basa en la premisa de que debe ser capaz de gestionar un determinado evento de precipitación, al mismo tiempo que debe aportar una función estructural. En base a esto, el diseño óptimo de un pavimento permeable debe realizarse atendiendo a dos criterios: hidrológicos e hidráulicos, y estructurales (García Haba, 2011):

- Criterios estructurales: Se encargan de que el sistema ofrezca una resistencia estructural suficiente para soportar ciertas cargas de tráfico de vehículos.
- Criterios hidrológicos e hidráulicos: Definen la capacidad de gestionar las aguas de escorrentía urbana de manera eficiente, reteniendo un evento de lluvia deseado, y evacuarlo controladamente hacia el terreno subyacente o al sistema de drenaje en un tiempo entre 24 y 48 horas.

4.1 DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño estructural de un pavimento permeable se centra básicamente en la definición del espesor mínimo de la estructura. En este caso, los criterios de diseño deben ser aquellos que proporcionen la capacidad portante adecuada a la categoría de tráfico que deba soportar el pavimento, sin que este sufra deformaciones importantes (García Haba, 2011).

Aunque el procedimiento de diseño depende de la superficie permeable empleada, siempre se contemplan los siguientes pasos (García Haba, 2011):

1. Establecer la categoría de tráfico.
2. Comprobar la calidad de la explanada para asegurar la capacidad portante de la estructura. En caso de ser necesario, mejorar la capacidad portante.
3. Seleccionar el tipo de sub-base y su espesor.
4. Seleccionar el tipo y espesor de la superficie permeable.

En cuanto a la superficie permeable, su espesor viene determinado de acuerdo a la resistencia que debe soportar durante su uso, y a la tipología de la superficie. Respecto a la base y a la sub-base, la primera consiste generalmente en una capa de grava de 13 mm de diámetro, y suele tener un espesor de entre 25 mm y 50 mm. La segunda está formada normalmente por grava de un diámetro comprendido entre 20 mm y 75 mm, y el espesor mínimo que establecen la mayoría de manuales y normativas para asegurar la funcionalidad del firme desde el punto de vista estructural, es de 15 centímetros. Es posible reemplazar o combinar el material granular de la sub-base mediante estructuras de plástico,

como los depósitos modulares o los conductos planos con resistencias de hasta 500 ton/m² (García Haba, 2011).

En el caso de que sea necesario mejorar las características estructurales del pavimento permeable, es posible reforzarlo con geo sintéticos o estabilizarlo con cemento o ligantes (Rodríguez Hernández, 2008)

La gran mayoría de normativas y manuales de diseño recomiendan varios espesores en función de la calidad de la topografía y de la categoría del tráfico que debe soportar el pavimento permeable, basados en diferentes experiencias con este tipo de pavimentos.

En Estados Unidos, EPA (1980) establece unos espesores mínimos totales (superficie y sub-base) para un pavimento permeable realizado en concreto o en asfalto, en función de tres categorías de tráfico e índices CBR (Tabla 4), las siguientes tablas muestran un espesor de pavimento con respecto al tipo de suelo e índices de CBR (Tabla 3):

La Tabla 3 hace referencia a las características del suelo de la zona que se desea estudiar, para con estas tener un valor aproximado del índice de CBR y poder encontrar un espesor mínimo de pavimento poroso con la Tabla 4:

Tabla 3: Categorías de la resistencia del suelo (Adaptado de: EPA, 1980)

	Descripción del suelo	Resistencia - CBR
Excelente	Contiene un alto porcentaje uniforme de materiales granulares. Las clases unificadas del suelo (USC): GW, GM, GC, GP; algunos SM, SP y SC. Grupos de Suelos AASHTO: A-1, A-2 y algunos de los A-3	15 o más
Bueno	Contiene algunos materiales granulares mezclados con limo y / o arcilla. Las clases unificadas del suelo (USC): SM, SP, SC: algunos ML, CL, CH. Grupos de Suelos AASHTO: A-2, A-3, algunos A-4, y unos pocos A-6 o A-7	10-14
Razonable	Arenas arcillosas, limos arenosos, o arcillas limosas, pueden tener cierta plasticidad. USC: ML, CL, algunos MH, CH. AASHTO: Que van desde la A-4 a A-7 (bajos índices de grupo)	6-9
Pobre	Arcillas plásticas, limos finos, arcillas limosas finas o micaceas. USC: MH, CH, OL, OH. AASHTO: desde A-4 a A-7 (los índices más altos de grupo)	5 o menos

Tabla 4: 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 ¹	CBR		
			≥ 15	10 - 14	6 - 9
1	Tráfico ligero	≥ 5	127	178	229
2	Tráfico ligero-medio (máx. 1000 vpd ²)	6 - 20	152	203	279
3	Tráfico medio (máx. 3000 vpd)	21 - 75	178	229	305

¹ EAL (equivalent axial load) Equivalencia de cargas por eje: la AASHTO-93 establece que se deben transformar los diferentes ejes que circulan por una ruta a un eje simple doble de 80 kN (18 Kips) de peso, considerado como eje patrón, referido al carril de diseño.
² Vehículos por día.

En Chile, MINVU (1996) propone los siguientes espesores mínimos para pavimentos porosos en asfalto o concreto de acuerdo a la experiencia del Servicio de Vivienda y Urbanismo (Tabla 5):

Tabla 5: Espesores mínimos de las capas de un pavimento permeable (adaptado de: MINVU, 1996)

Capa	Espesor mínimo (cm)
Superficie: Acera/Andén	4
Superficie: Calles de bajo tráfico	5
Base	15
Sub-base granular	15

Por otro lado, Interpave (2008) recomienda en el caso de pavimentos de adoquines, un espesor de superficie fijo de 130 mm, y un espesor de sub-base variable, en función del índice CBR, según el destino de las aguas filtradas y considerando seis categorías de tráfico.

En los casos de infiltración completa y parcial al terreno subyacente, y un CBR ≥ 5 en el terreno, el espesor de la sub-base recomendado está comprendido entre 250 mm y 450 mm, mientras que los sistemas sin infiltración al terreno subyacente y con un CBR ≥ 5, el espesor varía entre 400 mm y 600 mm.

Por otro lado para los pavimentos permeables en adoquín, se utilizan las siguientes configuraciones basándose en la categoría de cargas donde se piensa ubicar el pavimento (Tabla 6).

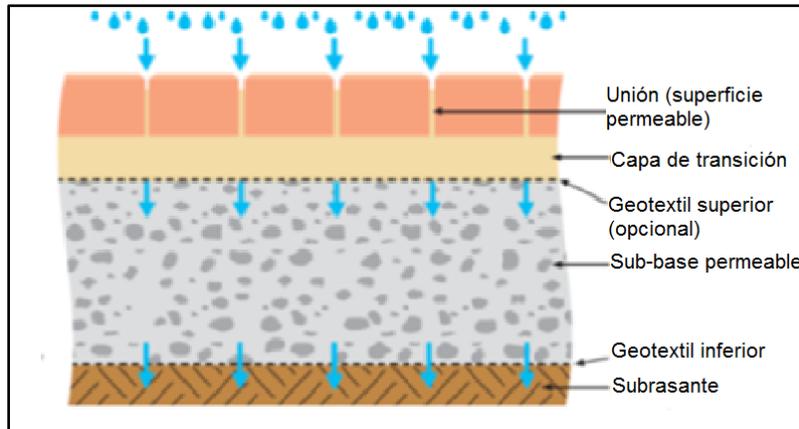


Ilustración 11: Convenciones de la estructura de pavimento poroso (Adaptado de: Interpave, 2008).

Para entender mejor la Tabla 6, deben tenerse en cuenta las convenciones mostradas en la Ilustración 11. Por otro lado, cuando se hace referencia al agregado unido hidráulicamente, quiere decir que son materiales que se fijan y endurecen con la adición de agua.

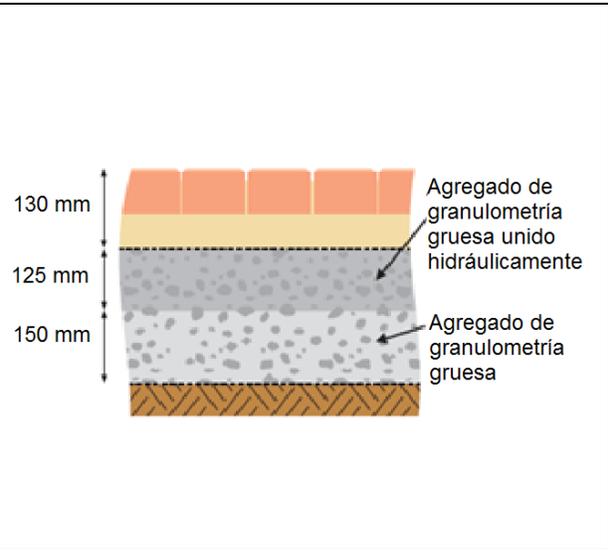
Tabla 6: Diseño de pavimentos permeables de acuerdo a las categorías de carga. msa: millones de ejes estándar (Adaptado de: Interpave, 2008).

CATEGORÍA DE CARGA 1	
<p>Parqueadero doméstico:</p> <p>No se permiten vehículos pesados (de transporte de mercancías)</p> <p>Cero ejes estándar</p> <p>Patio Caminos privados Elemento decorativo Parque cerrado Aceras sin invasión de vehículos</p>	
CATEGORÍA DE CARGA 2	
<p>Carros:</p> <p>Emergencias (Solo vehículos pesados)</p> <p>100 ejes estándar</p> <p>Bahías y pasillos de aparcamiento Plataformas de carga de una estación del ferrocarril Exposición externa de carros Estadio deportivo - Ruta peatonal Aceras ocasionalmente invadida por vehículos Calles privadas /cruces</p>	

CATEGORÍA DE CARGA 3

Peatonal:

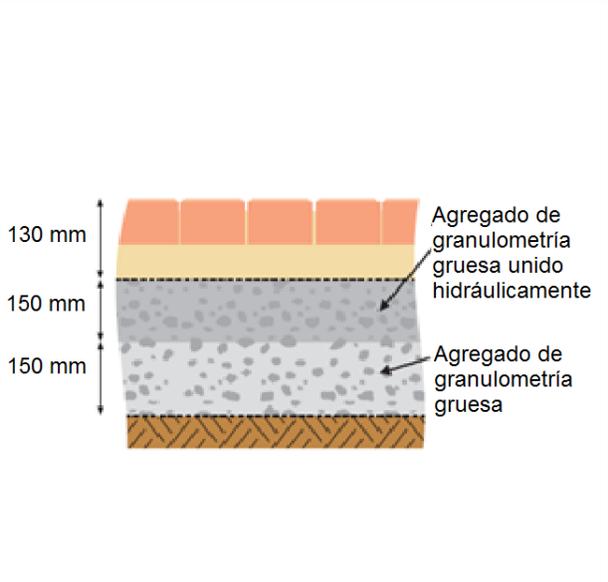
Un vehículo pesado por semana
0.015 msa³
 Calles peatonales en ciudades y pueblos
 Accesos infantiles
 Zona de aparcamiento para un desarrollo residencial
 Jardines - Áreas externas
 Cementerios - Crematorios
 Parqueadero de hoteles
 Parqueaderos de aeropuertos sin paradas o recogida de buses
 Centro deportivo



CATEGORÍA DE CARGA 4

Tiendas:

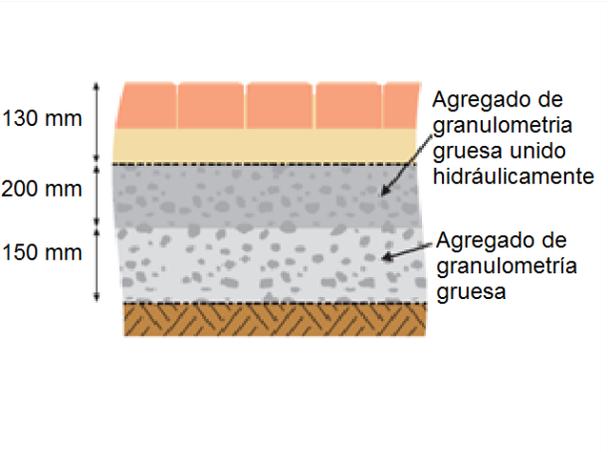
Diez vehículos pesados por semana
0.15 msa
 Vía de acceso de entrega en desarrollos comerciales
 Calles de acceso a escuelas y colegios
 Vía de entregas a oficinas
 Entregas a desarrollos residenciales pequeños
 Vías de entrega a jardines o huertos
 Patio de estación de bomberos
 Parqueadero de aeropuertos con buses hacia el terminal
 Ruta de acceso a estadios deportivos



CATEGORÍA DE CARGA 5

Comercial:

100 vehículos pesados por semana
1.5 msa
 Locales comerciales
 Vía pública de tráfico ligero
 Desarrollo ligero de industrias
 Mixtos al por menor / Desarrollos industriales
 Plaza de la ciudad
 Aceras con invasión regular de vehículos
 Carreteras públicas de aeropuertos



CATEGORÍA DE CARGA 6	
<p>Tráfico Pesado:</p> <p>1000 vehículos pesados por semana</p> <p>15 msa</p> <p>Calles principales</p> <p>Centros de distribución</p> <p>Estación de buses (buses cada 5 minutos)</p> <p>Autopistas</p> <p>Paradas de camiones</p> <p>Parada de buses</p> <p>Glorietas</p> <p>Carriles de buses</p>	
<p>³ msa (millones de ejes estándar): debe recordarse que el tránsito del proyecto se presenta en millones de ejes estándar de 8.2 toneladas métricas por eje sencillo (80 kN) de acuerdo con las unidades utilizadas a nivel internacional (Corro & Prado, 1999).</p>	

4.2 DISEÑO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

El diseño hidrológico e hidráulico de pavimentos permeables debe tener en cuenta cuatro aspectos (Woods-Ballard et al., 2007):

- Estimar las características de percolación de la capa de pavimento.
- Determinar el volumen de almacenamiento (proporcionado por los poros de la sub-base) para alcanzar tasas de rendimiento adecuadas.
- Estimar la necesidad, y en su caso cuantificar la capacidad del drenaje longitudinal adicional.
- Gestionar la respuesta del pavimento ante eventos extremos de precipitación.

Posteriormente se definen y desarrollan los parámetros anteriormente mostrados, destacando el volumen de almacenamiento y la capacidad del drenaje longitudinal, ya que son los aspectos para el desarrollo básico del cálculo y diseño de los pavimentos permeables.

- a) Estimar las características de percolación de la capa de pavimento (García Haba, 2011):

La capacidad de percolación de la capa del pavimento debe ser significativamente mayor que la máxima intensidad de la lluvia de cálculo. Regularmente no suele ser un factor limitante en el diseño, pues suele ser al menos un orden de magnitud superior a las máximas intensidades de lluvia esperadas.

Por ejemplo, valores típicos de percolación a través de la capa de un pavimento de concreto poroso, pueden encontrarse entre 0,5 y 5 cm/s (Aguado, Josa, & Pindado, 1995). Hay que tener en cuenta que la capacidad de percolación no se mantendrá constante en el tiempo, sino que disminuirá progresivamente hasta que se estabilice. Este fenómeno es debido a la colmatación, por lo que deberá tenerse en cuenta un factor de seguridad sobre la capacidad de percolación. A la hora de definir el factor de seguridad, no existe un criterio unificado sobre qué valor emplear, y en qué condiciones, pues este debería determinarse en función del clima y la topografía de la zona de aplicación, y del mantenimiento de la infraestructura.

Actualmente pueden encontrarse en la literatura algunos factores de seguridad recomendados por diferentes autores, como Woods-Ballard et al., 2007, quienes recomiendan un factor de seguridad de 10. Por su parte, Rodríguez Hernández, 2008, cita que el factor de seguridad debe ser como mínimo del orden de 10, pudiendo considerarse órdenes mayores como 100 o incluso 1.000 al disminuir el tiempo que debe haber entre un proceso de mantenimiento y otro. En Chile, MINVU (1996) emplea un factor de seguridad en función de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento, y recomienda calcularlo según el procedimiento de la Ilustración 12.

b) Volumen de almacenamiento (García Haba, 2011):

La capacidad de almacenamiento en el pavimento depende directamente de las características del régimen de precipitación, de la capacidad de infiltración al terreno subyacente, de la capacidad del drenaje complementario (si existe) y del área drenada al propio pavimento. Además, está directamente relacionada con el espesor de cada una de las capas del pavimento y sus respectivos índices de poros (García Haba, 2011).

Existen varios métodos y criterios que sirven para determinar el volumen de almacenamiento y dimensionar la estructura. En Estados Unidos, la mayoría de las normativas emplean el denominado “Criterio Unificado de Diseño”, basado en el volumen que es necesario gestionar para cumplir unos determinados objetivos o niveles relacionados con la cantidad y calidad del agua. Los objetivos o niveles que establece el estado de Georgia (A.R.C, 2001), son:

- Protección frente a avenidas extremas.
- Protección de llanuras.
- Protección de cauces.
- Calidad del agua.

Otro criterio de diseño es el que propone el U.S.EPA (2008), el cual tiene en cuenta la recarga de acuíferos y la reducción de escorrentía:

- Protección de avenidas.

- Protección de llanuras (pequeñas tormentas).
- Protección frente avenidas extremas (grandes tormentas).
- Protección de cauces
- Calidad del agua.
- Recarga de acuíferos y/o reducción de escorrentía.

Los métodos de diseño que se presentan posteriormente, fueron desarrollados en la tesis de pregrado de Polanco & Sánchez (2012) y en la tesis doctoral de García (2011). Estos diferentes métodos de diseño se desarrollaron para una zona de estudio específica en el capítulo de aplicabilidad.

4.2.1 MÉTODO DE LA CURVA ENVOLVENTE

Este método fue desarrollado por Lopes da Silveira & AvruchGoldenfum (2007). Mediante este método, la curva de masa (en el tiempo) de los volúmenes afluentes del dispositivo es comparada con la curva de la masa de los volúmenes efluentes, y la máxima diferencia entre las dos curvas corresponde al volumen de almacenamiento.

Para efectos de cálculos, los volúmenes se pueden expresar en láminas de agua equivalentes sobre el área en planta de la estructura de pavimento. La curva afluente está dada por la curva de Altura-duración-Frecuencia de las lluvias, mientras que el efluente es generalmente una línea recta, pues se supone por simplicidad un flujo de salida constante de la estructura que depende de la capacidad de absorción por unidad de superficie del pavimento. Se definen inicialmente las siguientes variables de masa en función del tiempo.

H_E : lámina de agua de entrada acumulada sobre el área en planta de la estructura de pavimento.

H_S : lámina de agua de salida acumulada, también medida sobre el área en planta del pavimento.

H_E se construye tomando la IDF multiplicada por el tiempo y contemplando factores de escurrimiento y relaciones de áreas aportantes de la cuenca hacia el pavimento.

Teniendo en cuenta la ecuación de Talbot (Ecuación 2), la cual permite solucionar explícitamente el volumen máximo se obtiene H_E , en mm.

$$H_E = R \frac{a \cdot T^b}{d + c} \frac{d}{60} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$I = \frac{a \cdot T^b}{d + c} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

R: relación entre el área de drenaje y la zona de infiltración

a,b,c: parámetros de la ecuación de Talbot

T: periodo de retorno (años)

d: duración de la precipitación (min)

La función de H_s (en mm) es obtenida conforme lo siguiente:

$$H_s = \gamma \cdot H_{\max} \cdot f \frac{d}{60} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

f: Flujo de salida constante del pavimento rígido poroso ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$).

γ : Relación entre el área de percolación y el volumen del pavimento rígido poroso (mm^{-1})

H_{\max} : Profundidad del volumen acumulado del dispositivo (mm)

El volumen máximo o el tamaño equivalente a la lámina de agua almacenable obtenido a través de la maximización de la diferencia entre H_E y H_s , se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial(H_E - H_s)}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 4}$$

Utilizando las expresiones anteriores, se obtiene la siguiente ecuación:

$$R \frac{a \cdot T^b}{(d + c)} \left[1 - \frac{d}{t + c} \right] - \gamma \cdot H_{\max} \cdot f = 0 \quad \text{Ecuación 5}$$

Al simplificar la

Ecuación 5, se obtiene:

$$R \frac{c \cdot a \cdot T^b}{(d + c)^2} - \gamma \cdot H_{\max} \cdot f = 0 \quad \text{Ecuación 6}$$

Despejando el tiempo de duración de la precipitación, se tiene:

$$d = \sqrt{\frac{R \cdot c \cdot a \cdot T^b}{\gamma \cdot H_{\max} \cdot f}} - c \quad \text{Ecuación 7}$$

Este tiempo otorga la máxima diferencia de volúmenes, es decir, el tiempo para el cual puede calcularse el volumen de almacenamiento o volumen máximo. Ese volumen V_{alm} (en mm) se expresa por:

$$V_{alm} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{RT}^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \sqrt{H_{max}} \sqrt{f} \right)^2 \quad \text{Ecuación 8}$$

A partir de esta expresión general se pueden calcular los parámetros de dimensionamiento para diferentes técnicas alternativas.

Este método considera únicamente el aspecto cuantitativo de la retención y/o reducción de la escorrentía superficial, sin tener en cuenta el control de la contaminación. Tampoco considera aspectos relevantes relacionados con la localización y el tipo de suelo.

Para un pavimento poroso rígido se tiene que el área de percolación es aproximadamente igual al área del dispositivo en planta, por lo tanto:

$$\sqrt{\gamma} * \sqrt{H_{max}} = 1 \quad \text{Ecuación 9}$$

Luego:

$$V_{alm} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{RT}^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{f} \right)^2 \quad \text{Ecuación 10}$$

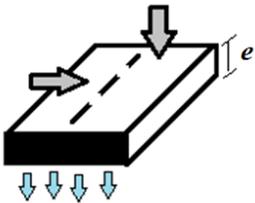
A partir de V_{alm} , el cálculo del espesor de la zona de reservorio del pavimento es obtenido fácilmente por:

$$e = \frac{V_{alm}}{\eta} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde η es la porosidad del material de relleno de la zona porosa.

A manera de síntesis del método descrito anteriormente, se presenta la Tabla 7, mostrada a continuación:

Tabla 7: Ecuaciones de pre-dimensionamiento de pavimentos porosos rígidos (Fuente: Lopes da Silveira & Avruchgoldenfum, 2007)

Dispositivo	Representación esquemática	Fórmulas para pre-dimensionamiento
Pavimento permeable		$V_{alm} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{RT}^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{f} \right)^2$ $e = V_{alm} / \eta$
<p>e: espesor del pavimento poroso rígido (mm) V_{alm}: volumen de dimensionamiento (mm) η: porosidad del material de relleno de la zona porosa a,b,c: parámetros de la ecuación IDF de Talbot R: producto del coeficiente de escorrentía por la relación entre el área contribuyente y el área del pavimento poroso rígido T: periodo de retorno (años) f: flujo constante del dispositivo de salida (mm.h⁻¹)</p>		

4.2.2 METODOLOGÍA CHILE

La metodología Chile fue desarrollada inicialmente por la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas -DICTUC- (1996). La aplicación de la presente metodología inicia con la selección de una lluvia de diseño. Una vez obtenida esta, el volumen de almacenamiento se estima como la máxima diferencia entre el volumen acumulado de aguas lluvias que reciben la sub-base y el volumen acumulado infiltrado.

Se recomienda determinar el volumen a infiltrar acumulado para una lluvia de período de retorno de T años como el generado por las intensidades medias, de acuerdo a la curva IDF correspondiente. Es decir, el volumen acumulado de agua lluvia, V_{afl} , en metros cúbicos, para un tiempo d, en horas, se calcula como:

$$V_{afl}(d) = 1.25(0.001C \cdot I_d \cdot Ad) = 0.00125C \cdot A \cdot P_d^T \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- C: coeficiente de escorrentía superficial correspondiente al área total aportante
- A: área total aportante (metros cuadrados)
- I_d : intensidad de la lluvia de período de retorno T y duración d (mm/h)
- d: tiempo acumulado de lluvia (horas)
- P_d^T : precipitación acumulada en el tiempo d para la lluvia de periodo de retorno de T años

Se recomienda multiplicar por un factor de seguridad de 1.25 el volumen acumulado para considerar la porción de lluvia que cae antes y después de la porción más intensa de la tormenta, no incluida en las curvas IDF.

Para calcular el volumen de almacenamiento, V_{alm} del pavimento poroso rígido se estima el volumen acumulado que puede ser drenado, utilizando la tasa de infiltración estimada en función del tiempo. Se puede determinar gráficamente como la máxima diferencia entre el volumen afluente acumulado de agua lluvia o volumen de recarga $V_{afl}(d)$ y el volumen acumulado infiltrado $V_{inf}(d)$, ambos en función del tiempo. Este último, en metros cúbicos, está dado por:

$$V_{inf}(d) = 0.001(f \cdot C_s \cdot A_{pav} \cdot d) \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

f: capacidad de infiltración del suelo, que corresponde al suelo que subyace al pavimento (mm/h)

A_{pav} : área del pavimento poroso (m^2)

d: tiempo acumulado de lluvia (h)

C_s : coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración dependiendo de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento que toma en cuenta los efectos de la colmatación en el tiempo que experimenta el suelo.

Se recomienda calcular el coeficiente C_s según el siguiente procedimiento:

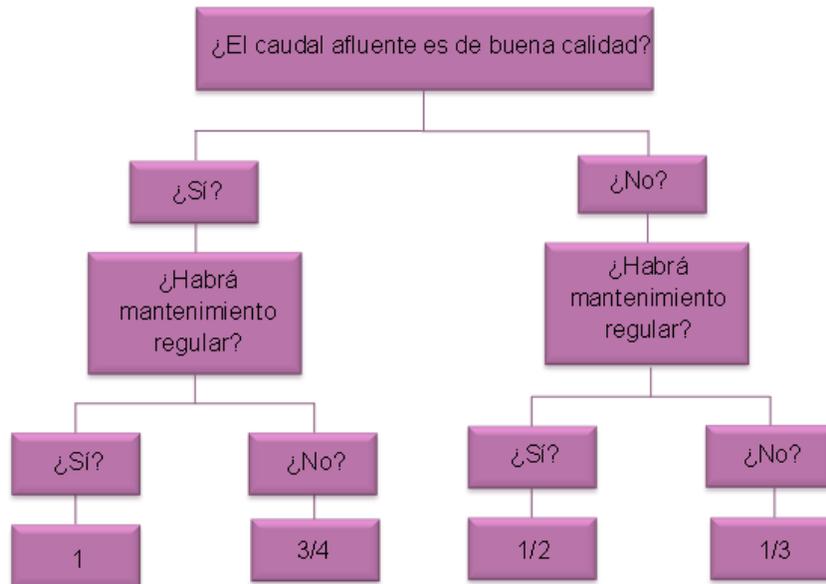


Ilustración 12: Metodología para el cálculo del C_s de acuerdo al mantenimiento y a la calidad del afluente. (Fuente: Dirección de investigaciones científicas y tecnológicas -DICTUC-, 1996)

El volumen de almacenamiento necesario se calcula como:

$$V_{alm} = \max(V_{afl}(d) - V_{inf}(d)) \quad \text{Ecuación 14}$$

Si la tasa de infiltración del terreno es siempre mayor que la intensidad de la lluvia, incluso que la de menor duración, entonces no se requiere un volumen de acumulación en la sub-base, sino que bastará con la superficie de contacto con la sub-rasante para la infiltración.

El espesor necesario de la sub-base es:

$$e = V_{alm}/(\eta \cdot A_{pav}) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde η es la porosidad del material de la sub-base.

Se recomienda que el tiempo máximo de vaciado del volumen almacenado en la sub-base sea inferior a 48 horas. Este tiempo máximo (en horas) se puede estimar como:

$$t_m = \frac{\eta \cdot e}{C_s f} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

- e: espesor definitivo asignado a la sub-base (mm)
- f: tasa de infiltración del suelo o de la sub-rasante (mm/h)
- C_s : coeficiente de seguridad adoptado
- η : porosidad del relleno de la sub-base

4.2.3 THE SUDS MANUAL, CIRIAC697

The SUDS manual es un método que fue experimentado por Woods-Ballard et al. (2007), en el cual en el diseño de sistemas de infiltración, una de las mayores incertidumbres es determinar el coeficiente de infiltración del suelo, ya que éste varía con el tiempo. Por esta razón se debe introducir un factor de seguridad en el procedimiento del diseño y así se podrá reducir el valor del coeficiente de infiltración.

Para un evento de lluvia, dado que descarga a un sistema de infiltración de un tamaño particular, las ecuaciones hidráulicas pueden ser resueltas para encontrar la máxima profundidad H_{max} .

En el procedimiento establecido a continuación, se asegura que las aguas lluvias serán infiltradas a través de la superficie inferior del sistema en el suelo a la velocidad requerida. Para los sistemas tales como pavimentos porosos que tienen una superficie hecha de asfalto poroso o bloques de concreto, la velocidad a la

que el agua puede infiltrarse a través de la superficie, la falla puede ocurrir debido a una infiltración superficial pobre, mas no debido a la baja infiltración en el suelo circundante. El diseñador debe asegurar la capacidad de infiltración de la superficie del material seleccionado.

La máxima profundidad de agua que debe ser almacenada por un pavimento poroso rígido puede ser calculada mediante la ecuación siguiente:

$$H_{\max} = \frac{d}{\eta} (R \cdot I - f) \text{ (en m)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

R: relación entre el área de drenaje y la zona de infiltración

$$R = \frac{A}{A_{\text{pav}}} \quad \text{Ecuación 18}$$

f: coeficiente de infiltración, obtenido por el ensayo de percolación (m/h) y ajustado con el factor de seguridad adecuado.

d,I: duración e intensidad de lluvias con el periodo de retorno requerido en la ubicación del sitio (h, m/h).

A_{pav} : área del sistema de infiltración (m^2).

A: área a ser drenada o área total de la cuenca (m^2).

η : porosidad del material de relleno (volumen de vacíos / volumen total).

A continuación se describe el procedimiento que se deberá seguir para el diseño de sistemas de infiltración: (i) Inicialmente se debe obtener el coeficiente de infiltración f (m/h) dividiendo la tasa de infiltración obtenida mediante ensayos de campo por un factor de seguridad apropiado; (ii) obtener la porosidad del material granular empleado para el relleno; (iii) Decidir el área a ser drenada A (m^2) y el área superficial de infiltración A_{pav} (m^2) y calcular la relación de drenaje, R , donde $R = A/A_{\text{pav}}$; (iv) seleccionar la duración de la lluvia, d (h) y determinar la intensidad de lluvia correspondiente I (m/h); (v) comprobar si f supera R . Si es así, la tasa de infiltración excede la tasa potencial de escorrentía, en cuyo caso $H_{\max} = 0$, de lo contrario calcular el valor de H_{\max} (m); (vi) Repetir los pasos (iv) y (v) para un rango de duración de las precipitaciones, y construir una hoja de cálculo o una tabla de resultados. Por último seleccionar el mayor valor de H_{\max} .

Para un pavimento de infiltración se asume $R=1$; por lo tanto el paso (iii) es omitido y la máxima profundidad de agua está dada por:

$$H_{\max} = \frac{d}{\eta} (I - f) \quad \text{Ecuación 19}$$

Para la infiltración de un pavimento donde no se ha previsto ningún material de sub-base para permitir el almacenamiento a corto plazo de agua, el almacenamiento se produce en campo abierto por encima de la superficie de infiltración. En este caso $R=1$ $\eta=1$ los pasos (ii) y (iii) son omitidos y la máxima profundidad de agua es dada por:

$$H_{\max} = d(I - f) \quad \text{Ecuación 20}$$

4.2.4 LOS MÉTODOS FRANCESES

Según Azzout et al. (1994) estos métodos son simplificados en la medida en que sólo permiten hacer un dimensionamiento. Los dos métodos presentados, se basan en dos hipótesis: (i) el caudal de salida de la estructura de almacenamiento es constante; (ii) hay una transferencia instantánea de lluvia a la estructura de almacenamiento.

- **Determinación del caudal de salida (Q_s)**

Si hay infiltración en el lugar, el caudal de salida es igual al producto de la superficie de contacto entre la calzada y la capacidad de absorción del suelo q_{as} . Un posible bloqueo puede ser tomado en cuenta mediante la introducción de un coeficiente de seguridad.

El caudal de salida Q_s se calcula como:

$$Q_s = C_s \cdot f \cdot A_{pav} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde.

C_s : coeficiente de seguridad (puede ser tomado como 0.1)

f : capacidad de absorción por unidad de superficie de infiltración en $m^3/s/m^2$

A_{pav} : la superficie de infiltración en la vía en m^2

Es importante resaltar que cuando se habla de un flujo constante, se entiende que esto es sólo una aproximación.

- **Determinación de la superficie activa (S_a)**

En el cálculo de la superficie activa S_a se tiene 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.

La superficie activa S_a se calcula como:

$$S_a = C \cdot A \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde.

C : coeficiente de aporte

A : área total de la cuenca de drenaje (m^2)

Según Azzout et al. (1994) una de las dificultades de utilizar los métodos simplificados radica en la determinación del coeficiente de aporte C. Este es el coeficiente que se utiliza para tomar en cuenta únicamente la fracción de la lluvia que llega efectivamente a la salida de la cuenca considerada. Cuando en la alimentación de las cuencas hidrográficas la retención es altamente urbanizada, se puede asumir C como el coeficiente de impermeabilización (proporción de superficies impermeables que contribuyen a la escorrentía en toda la superficie de la cuenca). Pero cuando la cuenca es heterogénea y contiene áreas naturales, su estimación se dificulta: C en este caso difiere en gran medida del coeficiente de impermeabilización. La relación C es variable en función del tipo de suelo, del estado de humedad del suelo al comienzo de la lluvia. La literatura ofrece valores típicos promedio de estos coeficientes basados en los tipos de suelo (densidad tipo de espacio de vivienda, tipo de cubierta vegetal..., etc.). El coeficiente se puede calcular de la siguiente forma:

$$C_a = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde C es el coeficiente de escorrentía dependiendo del tipo de suelo y S es el área de la superficie a la que hace referencia el tipo de suelo.

Para evaluar el volumen de almacenamiento, se proponen los siguientes métodos:

4.2.4.1 EL MÉTODO DE LAS LLUVIAS

A partir de las relaciones Altura-duración-Frecuencia de las Lluvias en la zona de estudio, la elección del periodo de retorno, la porosidad del material de la capa de almacenamiento y el caudal de salida, es posible determinar el espesor del pavimento.

En este método, además de los supuestos anteriores, se tiene en cuenta que no hay continuidad pluviométrica: las estadísticas correspondientes al cálculo de volúmenes de almacenamiento de agua se basan en la independencia de los eventos de lluvia. Esto significa que durante los recuentos los periodos de tiempo seco no se consideran.

Este método se basa en el recuento de Lluvias idénticas a las usadas para la construcción de las curvas IDF. En un conjunto de episodios lluviosos medidos para N años. Se calculan las N intensidades máximas anuales para diferentes intervalos de tiempo d a partir de lo cual es posible construir una clasificación de los valores de frecuencia de I y determinar las diferentes curvas de intensidad máxima y duración del análisis de frecuencias F o periodos de retorno T.

Para dimensionar la retención es necesario transformar están intensidades I(d,T) en alturas H(d,T), mediante la siguiente expresión:

$$H(d, T) = I(d, T) \cdot d \quad \text{Ecuación 24}$$

Estas curvas determinadas estadísticamente representan la evolución de las alturas de precipitación para diferentes duraciones. Cabe aclarar que no se trata de curvas que describen la evolución de aportes acumulados en función del tiempo para un conjunto de lluvias.

El caudal de salida constante Q_s se puede expresar como un caudal específico en mm/h a partir de la ecuación siguiente:

$$q_s = 360 Q_s / S_a \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

Q_s Caudal de salida, en m^3/s (Ecuación 21)

S_a Área activa de escorrentía que alimenta la estructura de almacenamiento, en ha

Con base en lo anterior, es posible extraer 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 $q_s \cdot d$ en función de la duración de la evacuación d . Esto se evidencia a continuación en la Ilustración 13.

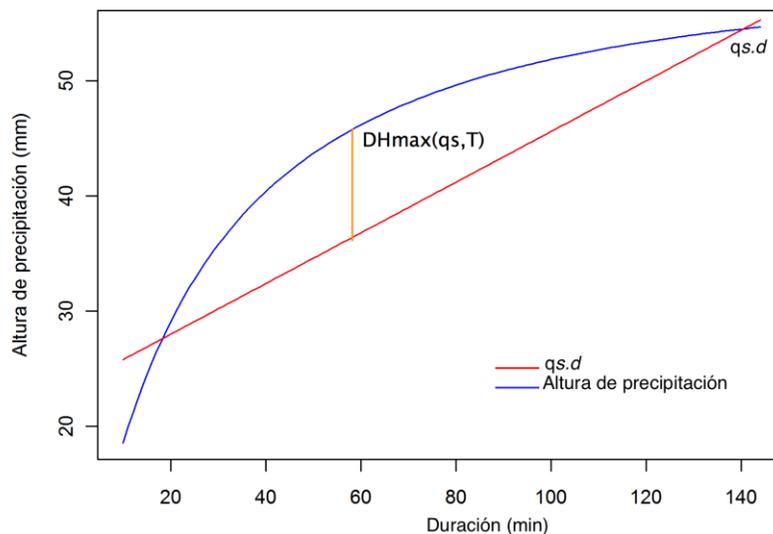


Ilustración 13: Superposición de la curva Altura-Duración para una frecuencia elegida y la curva de evacuación. (fuente: Polanco Andrade & Sánchez Vega, 2012)

En la Ilustración 13 se evidencia que las diferencias $DH(q_s, T, d)$ entre la curva $q_s \cdot d$ y $H(d, T)$, corresponden a las alturas a almacenar para diferentes duraciones d . La diferencia máxima $DH_{max}(q_s, T)$ corresponde a la altura total de almacenamiento necesaria para evitar desbordamientos. El volumen de agua almacenada se determina por:

$$V = 10DH_{max}(q_s, T) \cdot S_a \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

S_a : área activa en ha

$DH_{\max}(q_s, T)$: máxima altura específica de almacenamiento en función del caudal específico y el periodo de retorno en mm

4.2.4.2 MÉTODO DE LOS VOLÚMENES

El método de los volúmenes difiere del anterior por el hecho de que no se extraen los eventos más importantes de lluvia de un periodo determinado (IDF), sino que utilizan alturas de precipitación acumuladas por año.

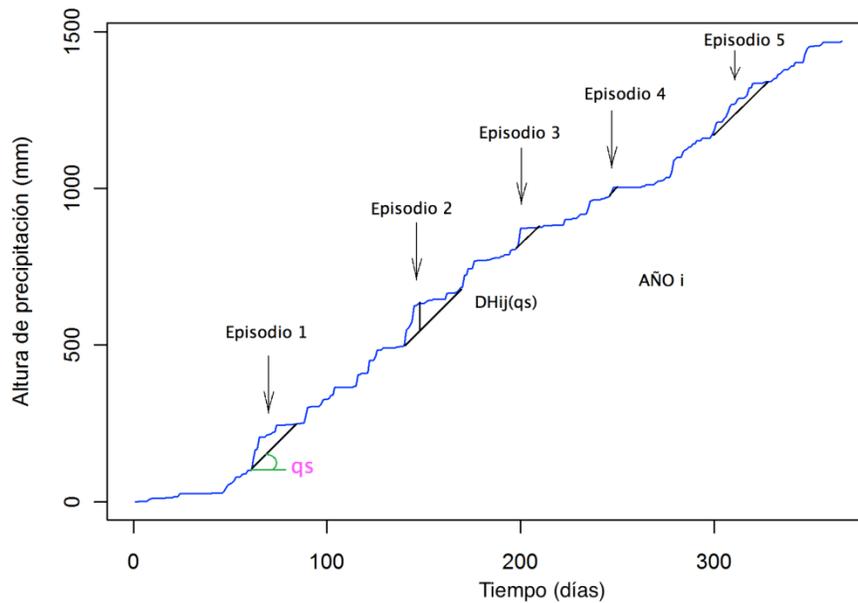


Ilustración 14: Curva de alturas acumuladas en un año (Fuente: (Polanco Andrade & Sánchez Vega, 2012).

Para cada año i , para cada evento de lluvia j y para cada caudal específico q_s , se calcula la altura $DH_{ij}(q_s)$ que es la diferencia entre la curva de alturas acumuladas para cada episodio y la de evacuación $q_t.d$.

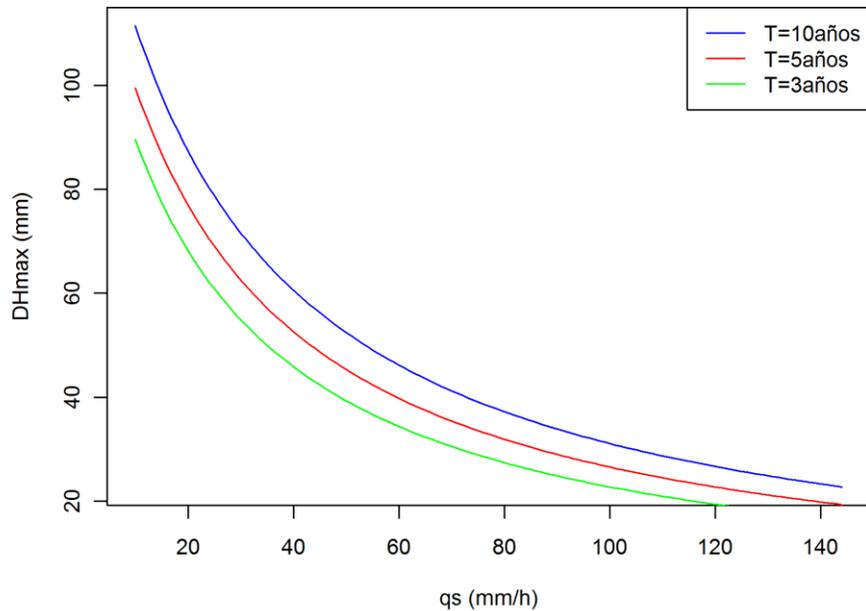


Ilustración 15: Curva para la determinación de la altura específica (Fuente: Polanco Andrade & Sánchez Vega, 2012)

El volumen se determina mediante la Ecuación 26, al igual que para el método de las lluvias).

Se han realizado comparaciones entre los dos métodos presentados anteriormente. Una de las más famosas, reportadas en Azzout et al., 1994, muestra los resultados obtenidos por medio de los dos métodos al utilizar series de lluvias prolongadas de las estaciones de Montpellier Bel Air y Montsouris de París. Se destaca el hecho de que el método de los volúmenes arroja valores de almacenamiento generalmente superiores a los obtenidos mediante el método de las lluvias. En el método de las lluvias, se aíslan y se extraen los eventos “interesantes” de una serie pluviométrica completa, por lo tanto se pierde el concepto de sucesión de lluvias. Para la correcta aplicación, el método de los volúmenes requiere de series de lluvias continuas de larga duración. En ausencia de estas mediciones, se recomienda utilizar el método de las lluvias.

4.2.5 MÉTODO DE DISEÑO DE ACUERDO A LA CALIDAD

Los dos métodos que se presentan a continuación son realizados por U.S.EPA (2004) En el caso de los pavimentos permeables, la mayoría de normativas estadounidenses recomiendan su diseño según el criterio calidad del agua, aunque también pueden diseñarse para proporcionar cierto control de la cantidad de agua (García Haba, 2011).

Desde el punto de vista de la calidad del agua, la función principal del pavimento permeable pasa por gestionar las pequeñas tormentas y una fracción de los

eventos importantes, debido al grado de contaminación que presentan sus escorrentías (García Haba, 2011).

Concretamente consiste en almacenar como mínimo, el volumen de escorrentía generado por pequeñas tormentas, y el “first flush” de los grandes eventos. A este volumen se le denomina “volumen de calidad de agua” (WQ_v), el cual es el parámetro básico de diseño del volumen de almacenamiento (García Haba, 2011).

El volumen de calidad de agua se define como el volumen de tratamiento necesario para reducir las cargas de sólidos en suspensión vertidos al medio receptor al menos un 80% del valor medio anual, y se obtiene a partir de series anuales de precipitación (CEDEX, 2008). Según U.S.EPA (2004) para definir el volumen de calidad, pueden emplearse dos métodos:

- Método simplificado (The Short Cut Method).
- Método hidrológico de pequeñas tormentas (Small Storm Hydrology Method).

Ambos métodos son función de un coeficiente volumétrico de escorrentía (R_v) y del volumen de precipitación caído en la cuenca, y son aplicables a cuencas urbanas de hasta 40-50 hectáreas, que posean un alto grado de impermeabilidad (CEDEX, 2008).

4.2.5.1 MÉTODO SIMPLIFICADO:

Habitualmente se utiliza para cuencas donde predomina un determinado uso del suelo o para realizar un cálculo rápido que permita estimar un orden de magnitud del volumen de calidad. El volumen de calidad se obtiene según la siguiente expresión:

$$WQ_v = P * R_v * A \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

WQ_v : volumen de calidad.

P: precipitación de diseño.

R_v : coeficiente volumétrico de escorrentía, calculado mediante la ECUACIÓN 28

A: área de la cuenca.

$$R_v = 0.05 + 0.009 * I \quad \text{Ecuación 28}$$

El principal inconveniente de este método consiste en que el coeficiente de escorrentía sólo depende del porcentaje de impermeabilidad de la cuenca (I), sin tener en cuenta la precipitación (CEDEX, 2008).

4.2.5.2 MÉTODO HIDROLÓGICO DE PEQUEÑAS TORMENTAS:

Para el método hidrológico de pequeñas tormentas se estima un coeficiente volumétrico de escorrentía (R_v) a partir de los trabajos de Pitt, Clark, & Parmer (1994) los cuales consisten en estimar este parámetro en función de los porcentajes de permeabilidad e impermeabilidad de la cuenca, de la precipitación de la lluvia empleada para estimar el volumen de calidad de agua y del uso del suelo.

Una vez estimado el coeficiente volumétrico de escorrentía, y conocida el área de la cuenca, solamente queda definir la precipitación de diseño. Para ello se utilizan reglas de diseño basadas en percentiles de la serie de precipitaciones del año medio. Las más utilizadas en los Estados Unidos son:

Regla del 85%: Se trata de la lluvia del percentil del 85% de la serie de precipitaciones del año medio, es decir, la precipitación asociada al suceso cuya altura total es superior a la del 85% de los sucesos correspondientes al año medio. Y la regla del 90%: En este caso, es el percentil 90% de la serie de precipitaciones del año medio.

Para estimar el volumen de recarga de acuíferos (RE_v), las normativas de Maryland Stormwater Design Manual -MDE- (2000) y V.A.N.R (2002) recomiendan calcularlo como una fracción del volumen de calidad de agua, multiplicándolo por un factor específico de recarga. En la Tabla 8 se recogen los factores específicos de recarga utilizados por estas normativas, en función del tipo de suelo según el U.S.D.A (1985).

Tabla 8: Factor específico de recarga para el cálculo del volumen de recarga RE_v . (Fuente: CEDEX, 2008)

Tipo de suelo	Descripción	Permeabilidad hidráulica (cm/s)	Factor específico de recarga
A	Bajo potencial de escorrentía. Suelos con gran capacidad de infiltración (gravas y arenas)	>1.14	0.40 - 0.38
B	Capacidad moderada y lenta de infiltración (arenas margosas)	0.76 - 0.38	0.26 - 0.25
C	Capacidad reducida y lenta de infiltración (limos y arcillas margosas)	0.38 - 0.13	0.13 - 0.10
D	Gran potencial de escorrentía. Suelos con tasas de infiltración muy lentas. Muy poco permeables (arcillas)	0.13 - 0	0.017 - 0

En el Reino Unido, el diseño hidráulico de los SUDS se realiza en base a los criterios de cantidad y calidad de agua. Los principales requisitos que deben tenerse en cuenta en el diseño de pavimentos permeables son (Interpave, 2008):

- Laminar y reducir el volumen de escorrentía. Consiste en evitar la formación de escorrentía generada por todos los eventos de precipitación mayores o iguales a 5 mm.
- Eliminar los contaminantes que arrastra la escorrentía gestionando un volumen de calidad de agua (V_t).

Existen dos métodos para estimar el volumen de calidad (Woods-Ballard et al., 2007):

- Método de precipitación variable (Variable rainfall depth method): Se basa en una fórmula empírica desarrollada para Escocia (Ecuación 29), en función del grado de impermeabilidad de la cuenca, del uso del suelo y de la altura de precipitación correspondiente al percentil 90% de la serie de precipitaciones del año medio. En función de los parámetros empleados, el volumen de calidad oscila entre 10 mm y 20 mm de escorrentía distribuidos sobre la cuenca.
- Método de precipitación fija (Fixed rainfall depth method): Se trata de un método más sencillo, puesto que considera una altura de precipitación fija, basada en la experiencia del método anterior. Los valores típicos de precipitación varían entre 11 mm y 15 mm, y es el método utilizado en Inglaterra y en Gales. Para obtener el volumen de calidad, basta con aplicar la precipitación únicamente en las zonas impermeables de la cuenca.

$$V_t \left(\frac{m^3}{ha} \right) = 9 * D * \left[\frac{SOIL}{2} + \left(1 - \frac{SOIL}{2} \right) * I \right] \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

V_t : volumen de calidad.

SOIL: índice de capacidad de retención de agua en el suelo, obtenido del “Flood Studies Report”, “The Wallingford Procedure” o “The Wallingford Procedure for Europe” (en el siguiente párrafo se explica como obtener este valor)

I: fracción de la cuenca que es impermeable.

D: altura de precipitación.

Para hallar el índice de capacidad de retención de agua en el suelo (SOIL) se puede hacer de varias maneras: la primera es haciendo uso de la Ecuación 30, para tener un valor más exacto del valor que se está hallando y si se tienen todos los datos necesarios para utilizarla, el segundo es haciendo uso de la Tabla 9 que puede depender de diferentes factores como el parámetro de aceptación de lluvia en invierno (WRAP), la escorrentía o las características del suelo.

$$SOIL = \frac{1}{25} * (PR - 0.829 * PIMP - 0.078 * UCWI + 20.7) \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde,

PR: porcentaje de escorrentía

PIMP: porcentaje de impermeabilidad de la zona

UCWI: índice urbano de captación de humedad, este valor se obtiene de la

Ilustración 16, donde se debe ingresar a la gráfica con el valor promedio estándar anual de precipitaciones (SAAR).

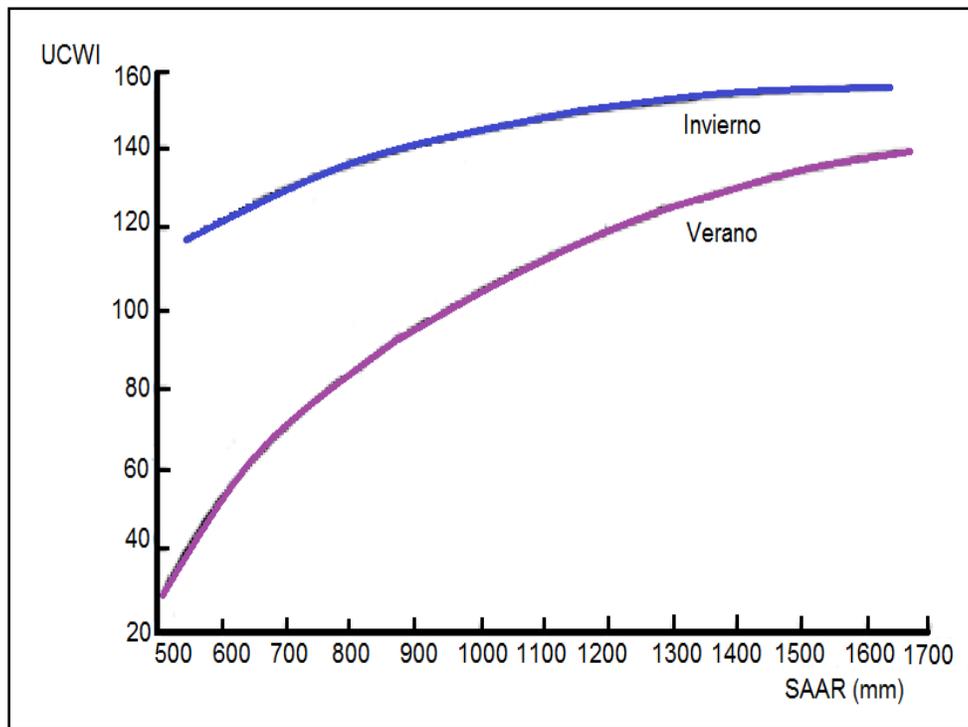


Ilustración 16: UCWI en relación con SAAR, para invierno y verano. (Fuente: Dublin City Council, 2005)

La segunda forma y más fácil para hallar el valor SOIL es haciendo uso de la Tabla 9 mostrada a continuación, esta tabla puede depender de diferentes factores como el parámetro de aceptación de lluvia en invierno (WRAP), la escorrentía o las características del suelo (Dublin City Council, 2005).

Tabla 9: valores de SOIL para diferentes tipos de suelo (Fuente: Dublin City Council, 2005)

Tipo suelo	WRAP	Escorrentía	Características del suelo	SOIL
1	Muy alta	Muy baja	Arenoso, bien drenado	0.15
2	Alta	Baja	Suelos intermedios (arena)	0.30
3	Moderada	Moderada	Suelos intermedios (limos)	0.40
4	Baja	Alta	Arcilloso, pobremente drenado	0.45
5	Muy baja	Muy alta	Escarpado, áreas rocosas	0.50

Una vez conocido el volumen que se quiere almacenar en el pavimento permeable, es posible obtener el espesor de la sub-base del pavimento permeable, además del área permeable necesaria. El cálculo puede afrontarse de dos maneras diferentes: planteando un balance de volúmenes, o bien, mediante un modelo matemático de simulación.

El proceso necesario para estimar el espesor de la sub-base a partir del balance de volúmenes es el siguiente:

$$V_{\text{almacenado}} = V_{\text{afluente}} - V_{\text{efluente}} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$V_{\text{almacenado}} = (V_{\text{escorrentia}} + V_{\text{lluvia}}) - (V_{\text{infiltración}} + V_{\text{desagüe}}) \quad \text{Ecuación 32}$$

$$V_{\text{almacenado}} = A_{\text{permeable}} * (n_{\text{sub-base}} * h_{\text{sub-base}} + n_{\text{base}} * h_{\text{base}} + n_{\text{superficie}} * h_{\text{superficie}}) \quad \text{Ecuación 33}$$

Considerando que el coeficiente de escorrentía es 1, que la capacidad de campo es 0:

$$V_{\text{lluvia}} = I_{\text{lluvia}} * A_{\text{permeable}} * t_{\text{lluvia}} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$V_{\text{escorrentia}} = I_{\text{lluvia}} * A_{\text{permeable}} * t_{\text{lluvia}} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$V_{\text{infiltración}} = f_{\text{suelo}} * A_{\text{infiltración}} * t_{\text{infiltración}} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$V_{\text{desagüe}} = Q_{\text{desagüe}} * t_{\text{desagüe}} \quad \text{Ecuación 37}$$

Siendo $t_{\text{desagüe}} \leq t_{\text{lluvia}} \leq t_{\text{infiltración}}$

Se tiene que:

$$V_{\text{almacenado}} = A_{\text{permeable}} * (n_{\text{sub-base}} * h_{\text{sub-base}} + n_{\text{base}} * h_{\text{base}} + n_{\text{superficie}} * h_{\text{superficie}}) = I_{\text{lluvia}} * t_{\text{lluvia}} * (A_{\text{permeable}} + A_{\text{impermeable}}) - (f_{\text{suelo}} * A_{\text{infiltración}} * t_{\text{infiltración}} + Q_{\text{desagüe}} * t_{\text{desagüe}})$$

Considerando:

$$A_{infiltración} = A_{permeable} \quad \text{Ecuación 38}$$

$$t_{infiltración} = t_{lluvia} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$n_{base} * h_{base} + n_{superficie} * h_{superficie} = 0 \quad \text{Ecuación 40}$$

$$V_{desagüe} = 0 \text{ (no existe desagüe)} \quad \text{Ecuación 41}$$

El espesor de la sub-base en las condiciones de funcionamiento más desfavorables (sin desagüe), resulta:

$$h_{sub-base} = \frac{t_{lluvia}}{n_{relleno}} * \left(I_{lluvia} * \frac{A_{permeable} + A_{impermeable}}{A_{permeable}} - f_{suelo} \right) \quad \text{Ecuación 42}$$

Por otra parte, considerando:

$$A_{infiltración} = A_{permeable} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$V_{afuente} = V_{tratamiento} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$n_{sub-base} * h_{sub-base} + n_{base} * h_{base} = n_{relleno} * h_{relleno} \quad \text{Ecuación 45}$$

$$V_{desagüe} = 0 \text{ (no existe desagüe)} \quad \text{Ecuación 46}$$

Se obtiene el área permeable necesaria para un determinado volumen de tratamiento (por ejemplo, el volumen de calidad de agua), también en las condiciones de funcionamiento más desfavorables, como:

$$A_{permeable} = \frac{V_{tratamiento}}{(n_{relleno} * h_{relleno} + n_{superficie} * h_{superficie}) + f_{suelo} * t_{infiltración}} \quad \text{Ecuación 47}$$

Con respecto a los métodos de diseño desarrollados en el presente capítulo se puede evidenciar que el parámetro en común de todos los métodos son los datos hidrológicos trabajados de distinta manera. Sin embargo, estos tienen otros factores que hacen que se presenten variaciones en el desarrollo y resultados de los mismos. A continuación se presenta la Tabla 10, correspondiente al resumen de los parámetros para cada método de diseño nombrado anteriormente:

Tabla 10: Parámetros de aplicación de los métodos de diseño.

		PARÁMETROS										
NUMERAL	MÉTODOS	Altura de precipitación en el tiempo	Curvas IDF	Periodos de retorno	Porosidad	Parámetros de ecuación de Talbot	Caudal de salida	Relación entre área contribuyente y área pavimento	Área total aportante	Área permeable	Coefficiente de escorrentía	Indice de capacidad de retención
4.2.1	Curva Envolvente		√	√	√	√	√	√				
4.2.2	Metodología Chile		√	√	√		√		√	√	√	
4.2.3	The SUDS Manual		√	√	√		√		√	√		
4.2.4.1	Método de las lluvias		√	√			√		√	√	√	
4.2.4.2	Método de los volúmenes	√		√			√		√	√	√	
4.2.5	Método según la calidad	√			√				√	√		√

4.3 RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Las siguientes limitaciones o restricciones son críticas al considerar el uso de pavimentos permeables/porosos para capturar y tratar las aguas lluvias (Maryland Stormwater Design Manual -MDE-, 2000):

- Espacio: el tamaño y la distribución de las superficies pavimentadas dentro de un proyecto deben ser considerados durante la planificación temprana y el diseño, debido a que estos pavimentos no deben utilizarse en zonas en las que hay riesgo de daños en la fundación, la interferencia con los sistemas de eliminación de aguas residuales del subsuelo, o efectos perjudiciales para otras estructuras subterráneas.
- Topografía: la pendiente de superficie del pavimento debe ser menor o igual al 5% para evitar la formación de estancamientos de agua en la superficie y dentro de la sub-base.
- Suelos: los suelos arenosos y limosos son fundamentales para la aplicación exitosa de los pavimentos permeables. Las condiciones del agua subterránea ayudarán a determinar el espesor de las capas que componen este pavimento, por esta razón la sub-base debe estar por encima de los niveles freáticos locales.
- Área de Drenaje: A medida que el área impermeable de drenaje aumenta, la eficacia disminuye. Por lo tanto, la escorrentía de las zonas adyacentes debe ser limitada.
- Estructura: estas alternativas tienen una capacidad de soporte de carga más baja que los pavimentos convencionales, por lo tanto, las aplicaciones deben ser limitadas a lugares que no reciben tráfico de vehículos pesados y donde los sub-suelos no se asienten.
- Operación: los pavimentos permeables son altamente susceptibles a la obstrucción, por lo tanto las personas que hacen uso o se encuentran cerca de la zona de pavimento permeable deben que ser educados para reducir la obstrucción y asegurar que el mantenimiento sea adecuado y permitan que el sistema funcione correctamente. (MDE)

5. CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS POROSOS

Como cualquier obra civil en este tipo de sistema prima la planeación y el conocimiento de la zona de aplicación para garantizar su vida útil y máximo desempeño (MINVU, 1996), a continuación se nombrarán varios criterios que se deben tener en cuenta a la hora de construir un pavimento poroso.

5.1 CRITERIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS POROSOS

Los criterios para la construcción con pavimento poroso que deben ser tomados en cuenta son (Maryland Stormwater Design Manual -MDE-, 2000):

- Erosión y control de sedimentos: La instalación no debe tener lugar hasta que el sitio circundante se estabilice, es decir, que esté libre de residuos y sedimentos y que el terreno no se encuentre erosionado. Si esto no se puede lograr, la escorrentía de áreas alteradas, debe ser desviada por una zona que no esté cerca del pavimento.
- Compactación del suelo: El subsuelo no debe ser compactado. Por otro lado, la construcción debe ser realizada con equipos que sean ligeros de peso y además que presenten un ancho mínimo para no generar alta compactación del suelo.
- Sistemas de distribución: el desagüe superior, desagüe inferior, y tuberías de distribución deben ser evaluados para verificar que tanto el material como las perforaciones cumplen con las especificaciones correspondientes. Por otro lado, los extremos superiores de las tuberías deben estar tapados antes de la instalación para que se mantengan limpios durante todo el proceso. Todas las tuberías de desagüe inferior o de distribución utilizadas deben ser instaladas a lo largo de la parte inferior del pavimento.
- Instalación de la sub-base: Los agregados de la sub-base deben estar limpios y libres de finos.

A continuación se ampliarán los ítems anteriormente mencionados para la realización de los preliminares del proceso de construcción de los pavimentos tanto porosos como permeables:

5.2 TRABAJOS PRELIMINARES

Los trabajos preliminares nombrados a continuación son establecidos para pavimentos porosos de hormigón y adoquines y fueron propuestos por Saucedo

Vidal (2012). Inicialmente, el suelo natural encontrado en cualquier proyecto deberá muestrearse y someterse a pruebas de permeabilidad y capacidad de carga.

Después de esto, se ubica y se traza el área en donde se va a instalar el nuevo pavimento poroso o permeable. En los casos en donde haya que demoler algún pavimento existente, se debe estar seguros de retirar la estructura anterior también, o sea la base que normalmente se compone de grava cementada, asfalto y tepetate¹ compactado. En algunos casos, si se presentan riegos de asfalto, deberán ser retirados, ya que estos materiales no contribuirán con la infiltración del agua. Se deberán marcar los niveles de suelo terminado hasta donde debe quedar el nuevo pavimento poroso o permeable terminado.

Una vez terminado el trazo y las demoliciones, de ser necesarias, se procederá a excavar el terreno hasta la profundidad deseada. Una vez se tiene definido el espesor del pavimento poroso o permeable y de la base que se va a usar se puede determinar a qué profundidad hay que excavar el terreno. El ideal es que la excavación se haga hasta encontrar el terreno natural; en ese punto se aplica una vibro-compactación con el objeto de estabilizarlo y nivelarlo, no dejando áreas sueltas que pudieran deformarse durante el proceso de construcción.

Una nivelación adecuada debe dejar pendientes aceptables (menores o iguales a 5%) hacia los pozos o canales de absorción. Terminado esto se debe compactar el terreno por medios mecánicos.

También se deberán delimitar las áreas de instalación del pavimento poroso o permeable con algún tipo de curvatura, esto se hace cuando hay que dejar fronteras o juntas con algún otro pavimento existente o juntas frías para el propio colado de estos pisos. En los casos en que haya que colocar un pavimento de concreto permeable junto a un pavimento tradicional, habrá que proteger a éste con una película plástica ya que el agua que penetra por el piso del pavimento de concreto permeable puede deformarlo.

En algunos casos no hay que excavar sino construir una estructura de protección para contener la base y el pavimento poroso o permeable. Estas piezas se podrán construir también con concreto hidráulico común.

¹Tepetate es el nombre que recibe un horizonte del suelo endurecido, considerado a veces como un material para litológico —es decir, similar a las piedras— y característico de las zonas volcánicas de América. Por su alto contenido de arcilla, el tepetate absorbe grandes cantidades de agua, tiene poca fertilidad y se endurece cuando pierde humedad. Puede encontrarse subyaciendo la superficie, o bien, aflorar en algunas zonas. Representa un gran obstáculo para el desarrollo de las actividades agrícolas por sus características, pero tiene algunos usos en la industria de la construcción. (Diccionario: listadepalabras.es).

5.3 SUB-RASANTE

Según Saucedo Vidal, (2012) la uniformidad del soporte de la sub-rasante, en lugar de la resistencia, es el mejor criterio para una adecuada selección de la misma. El pavimento permeable tiene una losa que distribuye las cargas sobre una gran área similar a la del pavimento convencional; esta distribución de cargas disminuye la presión en la sub-rasante y elimina la necesidad de grandes espesores de esta.

Como la uniformidad del soporte de la sub-rasante es esencial en la función de los pavimentos, debe garantizarse esta uniformidad tanto en condiciones secas como húmedas de la esta capa. Una adecuada construcción del pavimento de concreto permeable facilita estos requerimientos, específicamente cuando están expuestos a agua lluvia. Sin embargo, los problemas en el soporte de la sub-rasante pueden resultar de la presencia de limos y/o arcillas, los cuales son altamente compresibles y tienen poca cohesión o se expanden en condiciones húmedas.

Estas condiciones en los suelos puede ser analizadas individualmente en los soportes, si es necesario se deben modificar, reemplazar o colocar un material permeable adicional sobre el suelo inadecuado.

Dependiendo del tipo de suelo, la sub-rasante debería compactarse entre 90 y 95% de la densidad determinada por (AASHTO, 1993) El módulo de reacción de la sub-rasante debería estar determinado por las condiciones del suelo existente y cumplir con los requerimientos de diseño.

Antes de la colocación del pavimento, la sub-rasante o sub-base deberían ser compactadas de acuerdo a las especificaciones y a las condiciones de humedad. El pavimento de concreto permeable tiene una humedad mínima libre y si la sub-rasante o sub-base está en condiciones secas, el tiempo de colocación se acelerará y se reducirá el desempeño del pavimento.

El tiempo de colocación es importante para cumplir con la humedad de la sub-rasante sin la presencia de la resistencia libre del agua como en los métodos del pavimento de concreto convencional.

La base es la capa que viene justo por debajo de la carpeta del concreto hidráulico permeable, se hace con grava limpia de $\frac{3}{4}$ " pudiendo hacerla con distintos tipos de piedra, siempre y cuando se cumpla la característica de no contener arena.

Esta base, por no contar con un material como la arena, que lo haga homogéneo, descompone las cargas que se le aplican al pavimento en todas direcciones, en forma heterogénea, favoreciendo que la carga transmitida al terreno sea mínima.

Otros materiales importantes son el geotextil y la geomalla. Estos materiales se usan para contener de una manera mucho más eficaz los terrenos que presentan

poco soporte, como las arcillas expansivas. Los geotextiles son telas que tienen una gran resistencia a la flexión y que permiten contener los materiales en su sitio ayudando en gran manera a su estabilidad.

Se aplican directamente sobre el terreno compactado mecánicamente y sobre esta se aplica la sub base, que servirá también para fijarla en su sitio. Es de notarse la gran resistencia a la tensión que estas telas aportan, lo que mejora considerablemente la estabilidad de los suelos o bases.

Estos materiales no son costosos pero solo se usan en terrenos mejorados por medios mecánicos o con problemas de elasticidad ya que aportan un buen medio de contención, pero pueden afectar también de manera negativa, porque pueden atenuar la permeabilidad.

En la actualidad se reconocen cuatro funciones principales:

- Separación, al evitar o minimizar la mezcla de materiales de diferentes granulometrías.
- Filtración y drenaje, al evitar la migración de partículas de suelo y permitir el libre flujo de agua y gases.
- Refuerzo, al soportar tensiones, estabilizar la masa de suelo y proteger geomembranas.
- Impermeabilización, al formar una barrera que impida el paso de fluidos y partículas de suelo.

5.4 CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS POROSOS DE CONCRETO

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 pesados, se requieren losas de mayor espesor (Ferguson, 2005).

El espesor de la sub-base se puede aumentar para compensar la carga de tráfico alta, cuando se presenta una sub-base blanda, o cuando se quiere proporcionar mayor almacenamiento de aguas lluvias (Ferguson, 2005).

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 (MINVU, 1996).

El sistema de vibrado empleado es del tipo “strike off”, o de impacto superficial. Se recomienda en la mayoría de los casos usar un vibrador mecánico en el modo más lento posible. Si se implementan frecuencias de vibrado altas, lo más

probable es que el concreto se sobre compacte, alterando así la estructura de los poros y por ende la permeabilidad. Inmediatamente después del vibrado, se debe utilizar un rodillo pesado de acero, del ancho total de la losa, para compactar la mezcla a la altura de las guías. Dependiendo de la consistencia de la mezcla y de la temperatura ambiente, puede necesitarse más de una pasada del rodillo, que debe producir una presión de 4 a 7 ton/m², y debe ser limpiado y aceitado antes de cada pasada (Ferguson, 2005).

La sub-base se compacta comúnmente por lo menos entre 90 y 98 por ciento de la densidad Proctor. La tasa de infiltración cuantitativa de la sub-rasante es consecuencia de la gestión de las aguas pluviales del proyecto, antes de la compactación; después de la compactación, la tasa de infiltración del subsuelo se prueba para confirmar los cálculos hidrológicos y el espesor previsto de sub-base o losa se ajusta para proporcionar el almacenamiento hidráulico necesario (Ferguson, 2005).

Usualmente no es necesario realizar operaciones de terminación después de la compactación, no siendo recomendables operaciones como pulimiento, pues puede obstruir o sellar los poros de la superficie disminuyendo su permeabilidad. No obstante, debe corregirse cualquier defecto superficial inmediatamente de forma manual (Paine, 1992).

Las juntas requeridas en los pavimentos porosos difieren de las convencionales, debido a que el pavimento poroso tiene menos de un tercio de la retracción de un concreto común. El espaciamiento de los acoplamientos transversales es de aproximadamente 15 a 20 metros. En este caso, los equipos convencionales no son aplicables, debiendo utilizarse un rodillo especial con una hoja filosa. La experiencia ha mostrado que las juntas de dilatación térmica no son necesarias en estos pavimentos (Paine, 1992).

El curado es uno de los elementos fundamentales para obtener un pavimento con las condiciones deseadas. Este proceso requiere una mayor atención y cuidado que el que se tiene en los pavimentos de concreto convencionales, debido a la gran superficie de contacto del concreto con el ambiente. Un incorrecto proceso de curado en los primeros 7 días puede reducir la durabilidad de la superficie en un 60%. El proceso de curado debe comenzar inmediatamente después de compactar y producir las juntas transversales, el método más utilizado para realizar este procedimiento es cubrir la superficie de pavimento y los costados con una membrana de polietileno (Paine, 1992).

5.5 CONSTRUCCIÓN DE ADOQUINES DRENANTES

Proyectar Ingeniería (2009), propone un método de construcción de adoquines drenantes, este se va a exponer a continuación:

Para la preparación de la sub-rasante, esta se debe compactar con un espesor de al menos 20 cm, y debe tener una pendiente hacia la cuneta más cercana de al menos 0.5%.

Sobre la sub-rasante compactada se debe colocar un geo textil no tejido, el cual se debe continuar verticalmente contra el pavimento de adoquines convencional o el contenedor de raíces, hasta llegar al nivel inferior de los adoquines. Las franjas de geo textil se deben traslapar al menos 0.3 m en cada dirección y se debe tener cuidado de que no se arruguen o se rasguen con los equipos de compactación.

Para la colocación de la base, inicialmente se debe humedecer el agregado que va a utilizarse para la base, después de esto se debe colocar en capas de máximo 10 cm de espesor, hasta que no haya movimiento visible de sus partículas. Se debe utilizar el equipo más pesado posible (hasta un rodillo compactador de 10 ton), pero sin que se comience a triturar la grava.

Si en el espacio no cabe un rodillo de las especificaciones anteriores, se debe usar un equipo de menor tamaño que asegure la mejor compactación.

Por otro lado, los agregados para la sub-base se deben humedecer y colocar con el espesor indicado, sin que sufra ningún daño como se indicó para la arena en los pavimentos de adoquines comunes.

Una vez terminada la sub-base, se debe cortar el geo textil que viene de la base de grava, a ras con el nivel de la arena y de la gravilla, antes de colocar los adoquines drenantes y comunes.

Una vez terminada la colocación y ajuste de los adoquines, como se indicó para los adoquines comunes, se deben llenar las aberturas con los mismos agregados de la sub-base y luego se puede usar una gravilla ASTM D 448, No.9 o No.10 para llenar mejor las juntas.

Al terminar el llenado de las aberturas y juntas, se debe barrer muy bien la superficie de adoquines y luego compactarlos con al menos dos pasadas de una placa vibro-compactadora con una fuerza centrífuga de al menos 18 kN.

Luego se debe barrer de nuevo la gravilla hasta llenar las aberturas, barrer y compactar de nuevo con al menos dos pasadas de vibro-compactación corriente. Para el resto de actividades, se debe proceder de manera análoga a un pavimento de adoquines comunes.

- **Adhesión de adoquines de concreto a muros inclinados.**

La superficie de soporte debe estar sana, limpia, libre de grasa, polvo y otras sustancias que le hayan caído como mezcla de cemento, pinturas, etc.

No es necesario saturar con agua antes de su aplicación, ni el muro ni los adoquines, pero es conveniente limpiar el fondo de los adoquines con un trapo húmedo para retirarles el polvo y material suelto, ligeramente adherido.

Para la aplicación, una vez mezclado el mortero de pega, se debe extender con una llana dentada, en forma circular o de abajo hacia arriba, con un espesor de unos 2 mm.

En un recipiente se debe tender una buena cantidad de mortero y los adoquines se deben impregnar con el mortero, en su cara inferior o de soporte, antes de colocarlos y asentarlos sobre el mortero extendido con llana. Según la plasticidad que se le dé al mortero, se puede ayudar a que éste penetre, presionando y arrastrando cada adoquín sobre el fondo del recipiente o usando un trapo o estopa que tenga mortero y frotándolo contra la cara inferior del adoquín, hasta que toda se vea humedecida por el mortero (no necesariamente cubierta).

Previamente a la mezcla del mortero, se debe planear la colocación de los adoquines, de manera que se pueda comenzar de abajo hacia arriba. En caso de que la primera hilada no se pueda colocar contra un soporte como piso o viga, se debe generar un soporte temporal, que puede ser un listón de madera, clavado al muro, este muro es el límite que existe entre el adoquín y una pared, y a partir de éste extender el mortero y asentar los adoquines.

Los adoquines se deben empujar mediante golpes con un mazo de caucho, después de haberlos colocado en la posición correcta.

Se debe tener cuidado en el número de hiladas que se pueden pegar de manera que los adoquines no se desacomoden con su propio peso. Si los adoquines se comienzan a ejercer presión y a moverse, se deben usar cuñas de cartón o de madera para mantenerlos en posición antes de que fragüe el mortero.

Dado que la pega de adoquines apenas se ha iniciado en el medio, no es posible asegurar que el recubrimiento quede sólidamente adherido al muro. Se debe elaborar un tramo de un metro de altura y un metro de ancho, y después de una semana se debe maltratar el muro tratando de caminar sobre él, arrastrar carretillas, bultos, etc. Si se comporta bien, se considera que no es necesario rellenar las juntas. Si se producen algunos desprendimientos del centro del panel, se debe tratar de llenar las juntas, primero las horizontales y luego las verticales, con un mortero de arena de revoque seca y cemento, en proporción 1:3, empujándolo hasta el fondo de las juntas mediante las cuchillas de los palustres o las placas que se usan para ajustar los adoquines.

Este mortero dentro de las juntas se dejará para que se hidrate con la humedad ambiente. Con cada tanda de aplicación, se debe barrer la superficie con un cepillo de cerdas duras y cortas, y con un trapo para retirar el que se haya adherido a la superficie de los adoquines.

Tanto al pegar los adoquines como al llenar las juntas, se debe cubrir la zona recién intervenida con una lámina de plástico o carpa, bien pisada, para evitar la pérdida de humedad, pero sin agregarle agua para el curado, pues los adoquines se hincharían y se tendrían problemas posteriores cuando se contrajeran.

5.6 CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS POROSOS EN ASFALTO

Stormwater Center (2009), propone un método de construcción de pavimentos porosos en asfalto, este se va a exponer a continuación:

Como precaución se deben desviar los contaminantes impermeables como tierra y barro que puedan estar en la superficie de la base y entrar al pavimento, prácticas simples como mantener los equipos de construcción lejos de la zona donde se va a situar el pavimento, la instalación de cercas de obstrucción de fango donde se realizó la excavación y zanjas temporales de drenaje que desvían la escorrentía de la zona deben ser considerados durante y después de la construcción para garantizar que el pavimento siga siendo permeable a lo largo de su vida útil.

- **Instalación del medio poroso:**

Al realizarse la compactación debe tenerse en cuenta la importancia que tienen los materiales naturales en esta, para saber cuál es la compactación adecuada para la sub-base, a continuación se nombran los cuidados que se deben tener en cuenta para asegurar la compactación correcta.

- **Control de la nivelación:**

Se debe revisar, notificar y aprobar los alineamientos y elevaciones para el trabajo antes de comenzar la construcción. Las superficies terminadas deberán ser lo más lisas posibles, libre de marcas de rodillos y sin puntos bajos donde se puedan formar estancamientos. Todas las áreas deben drenar libremente.

- **Preparación de la subrasante:**

El material originario de la subrasante no se compactará. La compactación es aceptable si se usa como un base impermeable para el asfalto poroso o si no se desea la infiltración.

Si se genera erosión en la subrasante y causa acumulación de material fino y/o estancamientos superficiales, este material debe ser removido con equipo ligero y los suelos adyacentes deben ser escarificados a una profundidad mínima de 6 pulgadas con un rastrillo y un tractor ligero.

Se debe poner la subrasante con los alineamientos, nivelaciones y elevaciones indicadas. Llenar y revisar las áreas dañadas por la erosión, el estancamiento o la compactación por el tráfico antes de colocar la sub-base.

Para la construcción de la sub-base de los pavimentos porosos, se debe nivelar y crear barreras sobre la misma elevación que funcionen como diques internos, esto evitará la erosión en esta capa.

- **Instalación de la capa porosa:**

Inmediatamente después de la preparación de la subrasante se debe poner el geotextil y la capa porosa, cualquier acumulación de residuos o sedimentos que ha tenido lugar después de la aprobación de la subrasante deberán ser eliminados antes de la instalación del geotextil.

La instalación del geotextil debe hacerse de acuerdo con las normas y recomendaciones del fabricante, las bandas de este deben traslaparse por lo menos en 16 pulgadas y se debe asegurar que no va a estar a menos de 1.2m de la excavación y se deben adoptar todas las medidas necesarias para impedir cualquier escurrimiento o sedimento que pueda entrar a la capa de almacenamiento.

Se debe instalar la capa base con una compactación máxima de 95% de proctor estándar (ASTM D698 / AASHTO T99), esta capa debe ser lo suficientemente uniforme para que permita la colocación del asfalto poroso y no debe tener menos de 10 cm de profundidad.

Cuando la zona este totalmente estabilizada y hecha correctamente el dispositivo o los controles de sedimentos temporales pueden ser removidos.

- **Instalación del asfalto para el pavimento poroso:**

Transporte de material: los equipos de transporte no deben ser tan grandes, además deben estar limpios y deben tener la facilidad de hacer descargas suaves o sea, que no tengan un gran impacto. La mezcla deberá estar cubierta para protegerla de la lluvia, el polvo y los cambios de temperatura.

Colocación y nivelación: la pavimentadora será una unidad autopropulsada con una regla niveladora o un conjunto de enrasado capaz de resistir altas temperaturas; normalmente se requieren altas temperaturas para conseguir la unión de la capa recién colocada con la capa puesta con anterioridad, esto impide una ruptura indebida y fractura del agregado en la interface. La pavimentadora debe ser capaz de esparcir y dar un acabado a la mezcla sin dejar de lado que debe proporcionar los anchos y espesores requeridos. La regla niveladora debe ser ajustable para proporcionar la forma de sección transversal deseada. La superficie acabada deberá ser de textura uniforme y correcta, que no muestre ninguna señal de rasgado o huellas.

Acondicionamiento de la superficie existente: las superficies de contacto como bordillos, alcantarillas y pozos de registro serán pintadas con una capa delgada y uniforme de asfalto diluido justo antes de que la mezcla asfáltica sea puesta sobre ellos.

Requisitos de temperatura: la temperatura de la mezcla asfáltica en el momento de la descarga del vehículo de acarreo y en la pavimentadora deberá estar entre 135 y 165°C.

Esparcido y acabados: el asfalto poroso debe ponerse en capas de 10 cm de espesor, se debe asegurar que las capas de asfalto se unan por completo, además deben mantenerse libre de polvo, humedad y tráfico, durante todo el proceso construcción del pavimento poroso.

Compactación: inmediatamente después de que la mezcla asfáltica se haya extendido y se hayan corregido las irregularidades de la superficie, se compactara cada lamina de asfalto uniformemente.

Esta compactación se realiza con un equipo de los rodillos que deben estar en buenas condiciones mecánicas, y con personal competente capaz de no generar contragolpes en la superficie del pavimento poroso; esta debe manejarse a una velocidad suficientemente baja para que no se produzcan desplazamientos ni acumulación de asfalto, además el peso de los rodillos debe ser suficiente para compactar la mezcla sin triturar el agregado.

Juntas: se pondrán juntas entre pavimentos nuevos y antiguos, o elaborados días anteriores para asegurar la unión continua entre las viejas y nuevas mezclas. Estas uniones van a hacerse cortando el pavimento verticalmente en ángulo recto de acuerdo un eje central y dejándose un espaciamiento entre ellos de 450 a 600 mm, y estas juntas deben estar recubiertas completamente con asfalto diluido antes de depositar la mezcla de pavimento. La junta debe ser suavizada y nivelada con un rastrillo desechando el material sobrante y debidamente alisada.

Revisión de la superficie: se debe verificar que la superficie esté sin mancha o lesiones; las transiciones deben fusionarse perfectamente y estar limpias, y el acabado del pavimento debe ser regular y sin desniveles.

Acabados: la superficie del pavimento poroso debe aspirarse y limpiarse para eliminar el material suelto y el polvo. Se deben pintar líneas de 10 cm de ancho para demarcar las zonas de parqueo, o los carriles de acuerdo a la función para la que haya sido diseñado el pavimento.

5.7 RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES

5.7.1 CONSTRUCCIÓN

El éxito de los pavimentos porosos, sus materiales y sus configuraciones no se da en todos los casos en los que se implante este sistema, este también depende del lugar en el que se vaya a ubicar el proyecto. Para conseguir plenamente las ventajas de costo, permeabilidad, apariencia y estabilidad, es imprescindible analizar los patrones de tráfico del sitio, la topografía, el uso previsto, y las disposiciones de mantenimiento previstos, para identificar los lugares donde cada tipo de material será totalmente apropiado (Ferguson, 2005).

Aunque las especificaciones se encuentran disponibles para el diseño de la mezcla y de la construcción de concreto permeable, todavía permanece la necesidad de pruebas de laboratorio para asegurar el rendimiento esperado (Shu, Huang, Wu, Dong, & Burdette, 2011).

El requisito más importante es la búsqueda y el análisis del sitio donde se va a realizar el proyecto, se puede analizar en cuanto a la ubicación de las calles, estacionamientos, aceras, patios y otras áreas que requieran de pavimentación para soportar el tráfico. Esos tipos de áreas y las frecuencias de tráfico definen microambientes, que permiten estudiar y definir los diferentes materiales y configuraciones adecuadas para el pavimento, ya sea de acuerdo al uso o a la cantidad de tráfico que se reporte en la zona (Ferguson, 2005).

Los taludes de tierra que colindan con los bordes del pavimento poroso deben ser drenados hacia zonas más bajas y lejos del pavimento en todas las direcciones posibles. Esto se hace con el propósito de conservar la porosidad y la permeabilidad del pavimento mediante la prevención de la acumulación de sedimentos sobre la superficie. Un pavimento poroso no debe ser utilizado para absorber el drenaje de las zonas fuera de pavimento, sino que debe ser utilizado para infiltrar sólo el agua de lluvia que cae sobre este (Ferguson, 2005).

Es común que en las zonas donde recientemente se instaló un pavimento poroso o permeable continúen actividades como la jardinería, la construcción de edificios y entre otras, durante algún tiempo. Estas actividades pueden generar sedimentos móviles que presentan un peligro de obstrucción en la superficie de pavimento poroso, es por esto que se sugiere informar o señalar la presencia de un pavimento poroso para prevenir el daño o la pérdida de efectividad del mismo (Ferguson, 2005).

Para el proceso de construcción también se recomienda hacer ciertos ensayos básicos para verificar que el funcionamiento del pavimento poroso sea el correcto, en el anexo 6 se nombran dos ensayos fáciles y rápidos que son: el ensayo de capacidad de percolación y el ensayo de capacidad de infiltración.

5.7.2 MATERIALES

La adición de tiras de plástico para en el pavimento poroso de concreto hace que sea posible llegar a la resistencia requerida en las vías de tráfico medio y alto, abriendo la posibilidad de utilizar concreto poroso en las carreteras urbanas de Bogotá (O. Mora et al., 2011). Por otro lado, se mostró que la adición de polímero (caucho de estireno butadieno, SBR) mejora significativamente la trabajabilidad, resistencia, y resistencia a la congelación-descongelación del concreto permeable mientras que mantiene su alta porosidad y permeabilidad (Kevern, 2008).

Si a la mezcla se le agregan agregados finos orgánicos, intensificadores (como humo de sílice), y superplastificantes, se mejora la fuerza y la resistencia a la abrasión de concreto permeable realizado con cemento Portland. (Yang & Jiang, 2003).

Los geotextiles ayudan a evitar que la arena migre hacia la base de los sistemas de pavimentos permeables, además, la presencia de estos ayudan a reducir la profundidad de ahuellamiento y la tasa de rotura de bloque. Por otro lado, la mayoría de los geotextiles pueden ayudar a retener y degradar aceites, si la obstrucción (por ejemplo, sedimentación) no es un problema (Scholz & Grabowiecki, 2006).

Un nuevo material, que se puede añadir, es una mezcla de concreto triturado y una mezcla de abono o compost, que sirve para proporcionar soporte estructural y además está destinado a retener y biológicamente tratar contaminantes de aguas pluviales. El pavimento con este nuevo material está diseñado como un sistema para la gestión de las aguas pluviales, en otras palabras, favorece la infiltración de la escorrentía, retiene los contaminantes del agua de tormenta (hidrocarburos, metales pesados, etc.) y los degrada a través de biodegradación (Bentarzi et al., 2012).

Por otro lado, la diatomita (DA), es una roca ligera natural que resulta de los restos fosilizados de diatomeas silíceas. Se compone de conchas perforadas rígidas llamadas frústulas y posee baja densidad y alta porosidad. Diatomita se puede utilizar como aditivo puzolánico para mejorar la plasticidad y los esfuerzos del concreto. La piedra pómez (PA), es un agregado liviano natural con una estructura de tipo esponja creado por la liberación de gases durante la solidificación de la lava. La piedra pómez se puede utilizar en la producción de concreto ligero con suficiente fuerza y densidad para su uso como concreto ligero estructural. Los resultados indicaron que el uso de DA y PA en concreto permeable podría reducir la densidad y la conductividad térmica de aproximadamente 3-4 veces en comparación con el concreto permeable que contiene áridos naturales, por otro lado se observó que tienen un adecuado uso como concreto aislante (Zaetang et al., 2013).

6. MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS POROSOS

La tasa de infiltración de los pavimentos porosos empezará con una disminución significativa pero se estabilizará con el paso del tiempo, debido a la acumulación de residuos en el material. Sin embargo, se sugiere que las tasas de infiltración siempre sigan siendo significativamente más altas que la intensidad de lluvia, por lo que, incluso sin mantenimiento, debe haber infiltración suficiente para los eventos de lluvia (Interpave, 2008).

Debido a la función que deben cumplir los pavimentos porosos/permeables, estos se deben utilizar únicamente cuando se puede realizar un mantenimiento regular ya que el mantenimiento periódico de los pavimentos permeables ha demostrado una mejoría en cuanto a su comportamiento y un aumento en su vida útil (Maryland Stormwater Design Manual -MDE-, 2000), además la vida útil de un pavimento poroso y la frecuencia de mantenimiento recomendada depende en gran medida de la zona de la ciudad para la cual esté destinado a implementarse (Gómez González et al., 2010).

El mantenimiento de los pavimentos porosos juega un papel importante para garantizar su correcto funcionamiento. El mantenimiento de estos depende del tipo de pavimento y el entorno en el que se construye. El mantenimiento adecuado es esencial para garantizar su funcionamiento eficiente. Sin embargo, el mantenimiento requerido es similar a lo que se ha aplicado a un pavimento tradicional. La principal diferencia es que el pavimento poroso se debe aspirar en lugar de barrer. Al aspirar se elimina el sedimento y los escombros que bloquean la infiltración de la escorrentía. La frecuencia del mantenimiento depende de la cantidad de sedimentos arrastrados por el viento, vehículos o peatones, etc. en el pavimento poroso de las zonas aledañas (Kadurupokune et al., 2007).

Los procedimientos y consideraciones esenciales para el mantenimiento de sistemas de pavimentos permeables van a ser nombrados a continuación (Maine Department of Environmental Protection, 2012):

- Fertilización: la fertilización del área de infiltración puede evitarse a menos que sea absolutamente necesario establecer vegetación.
- Prohibición del almacenamiento de nieve: la nieve removida de alguna parte dentro o fuera del área donde se ubica el pavimento poroso, no debe ser almacenada o dejada en el área de infiltración, con la excepción de que se apruebe el almacenamiento en áreas de pavimentos alternativos, por el departamento encargado.
- Inspección y monitoreo: inspeccionar el sistema de infiltración varias veces en el primer año de operación y al menos anualmente después del primer año. Revisar el comportamiento del sistema después de grandes tormentas

para verificar si la superficie tiene estancamientos en la entrada, lo que puede indicar la presencia de obstrucciones. Observar los niveles de agua, los cuales deben ser registrados durante varios días después de la tormenta para garantizar el desagüe durante 72 horas después de la tormenta.

Un aparato que se puede utilizar para realizar la inspección y el monitoreo es el uso de un radar de penetración de suelos, que es un sistema de radar de penetración de terreno, que a través de la antena del dispositivo se envía un pulso electromagnético al terreno, y se registran los pulsos reflejados desde las distintas capas, las cuales responden según sus propiedades dieléctricas. Las respuestas permiten encontrar el espesor de las capas así como el contenido de agua de las mismas. En los sistemas acoplados al aire (pues también hay sistemas acoplados al terreno), las antenas están usualmente entre 150 mm y 500 mm encima de la superficie. Debido a la interferencia de la capa de pavimento, las ondas tienen baja profundidad de penetración. Sin embargo, se registra gran velocidad en la respuesta. El sistema tiene un par de antenas: una como transmisora y otra como receptora. Al vehículo se le presentó un medidor de distancias, de tal manera que los datos van a ser registrados en función de la distancia (Lai & Sinha, 2003).

- Dispositivos de control de contaminantes: los dispositivos de control de contaminantes como los separadores de aceite y agua, desnatadoras, entre otros, deben ser inspeccionados regularmente para determinar si el pavimento poroso debe ser limpiado o reemplazado.
- Remoción de sedimentos y mantenimiento del rendimiento del sistema: los sedimentos deben ser removidos del sistema al menos anualmente para prevenir el deterioro del rendimiento del sistema. El pre-tratamiento de entrada puede ser revisado periódicamente y limpiarse cuando la acumulación de sedimentos sea mayor al 10% de la capacidad disponible. Este proceso puede ser hecho manualmente o con bombeos. Dentro o fuera de tuberías se debe chequear si hay obstrucciones. Acumulaciones de grasa y aceite deben ir al dispositivo separador y de regulaciones locales. El sistema debe ser rehabilitado o reemplazado si se ha disminuido su rendimiento al punto que no se cumplen los estándares aplicables para las aguas lluvia.
- Pre-tratamiento con franjas de protección: si una zona verde se utiliza para la infiltración, esta zona debe ser inspeccionada regularmente. El crecimiento la vegetación de esta zona debería verse fuerte y denso. Los espacios vacíos o áreas erosionadas se deben reparar y/o volver a sembrar. El riego y/o la fertilización deben ser proporcionados durante los

primeros meses después de que la zona es establecida, y pueden ser necesarios periódicamente en épocas de sequía. Estas zonas deben ser podadas periódicamente para evitar el crecimiento descontrolado de las malas hierbas. El rendimiento de estas zonas se vería afectado si la vegetación tiene un tamaño demasiado pequeño. El césped sobrante debe ser removido para evitar que se obstruya.

- Pozos de observación: los pozos de observación son utilizados para determinar el rendimiento del sistema y los puntos de acceso para permitir la remoción de sedimentos acumulados, por lo tanto deben ser incluidos en el diseño de los sistemas de infiltración. Los pozos y las cuencas de infiltración deben tener manómetros y personal para medir, varillas marcadas o instrumentación similar de medición de acumulación de sedimentos y determinar qué tan rápido drena el sistema después de una tormenta. El plan de mantenimiento debe indicar la velocidad de drenaje del sistema de infiltración y proporcionar la eliminación de los sedimentos del sistema de infiltración.
- Monitoreo del agua subterránea: el monitoreo de la calidad de agua subterránea puede ser requerido como parte del sistema de mantenimiento para demostrar que las prácticas de remoción de contaminantes son efectivas. El monitoreo de la calidad de aguas subterráneas puede ser, generalmente, requerido para las actividades de infiltración del agua para áreas de césped artificiales, como campos de golf y ciertos campos atléticos, y conectados a grandes áreas impermeables, como aparcamientos y pistas de aterrizaje.
- Pruebas de aguas subterráneas: las aguas subterráneas deben ser analizadas trimestralmente para evaluar parámetros indicadores tales como el pH, oxígeno disuelto y cloruros, entre otros. Se ha encontrado que el zinc debe ser medido trimestralmente, pues este tiende a aparecer en cualquier lugar de dos a diez años después de la operación de grandes sistemas. La toma de muestras para diesel y residuos de gasolina debe ser analizado y observar si hay drenaje de grandes áreas urbanizadas.
- Limpieza de canales: retire las hojas, semillas y otros restos de los techos de canalones (en especial en épocas de primavera y otoño). Se debe instalar una rejilla o tamiz grueso aguas abajo de la tubería que lleva el agua al área de drenaje y se debe reemplazar la rejilla o tamiz si este se rompe.
- Rehabilitación: se deben remover las piedras del sistema y de las tuberías perforadas; y si es necesario reconstruir el sistema de infiltración. Para

minimizar el costo eventual de rehabilitación, el sistema debe ser localizado en zonas de césped lo más cercanas posible a las superficies de suelo.

- Barrido y aspirado: Las superficies de pavimento se deben barrer y aspirar para reducir la acumulación de sedimentos y asegurar que la superficie se mantenga porosa. El barrido se debe realizar por lo menos dos veces al año con una unidad de limpieza comercial. Los sistemas de lavado y las unidades de aire comprimido no deben utilizarse para llevar a cabo la limpieza de superficies. La forma de hacer mantenimiento es a través del aspirado de los sedimentos en la superficie en condición seca cuando el clima lo permita. Por ningún motivo se recomienda llevar a cabo procesos de lavado con agua a presión o barridos por medio de aire comprimido, pues estas dos practicas pueden remover los materiales de la capa de transición y generar vacíos, afectando la resistencia de la estructura a los esfuerzos (Smith, 2006).
- Control de vehículos pesados: camiones y otros vehículos pesados pueden aportar a la contaminación en las superficies porosas, lo que lleva a la obstrucción y la falla prematura de estas. A estos vehículos se les debe prevenir el derrame de material sobre el pavimento.
- Ubicación: dependiendo de la zona la recuperación de la vida útil como resultado de un lavado varía según la zona urbana de 2 meses para zonas de alta contaminación (por ejemplo zonas en construcción) a 20 meses para zonas de baja contaminación (como zonas residenciales o parqueaderos) aproximadamente. El anterior resultado sugiere que los pavimentos porosos podrían tener mayor tiempo de vida útil en zonas de baja contaminación (Gómez González et al., 2010).
- Educación: las señales permanentes o mensajes mostrados pueden identificar un pavimento poroso y sus propósitos. Ellos pueden educar al público sobre el uso de estos materiales potencialmente desconocidos y con esto evitar que la gente derrame aceites u otros fluidos perjudiciales para el pavimento (Ferguson, 2005).
- Obstrucción completa: si el pavimento se obstruye completamente se puede usar para la rehabilitación el uso de una máquina de barrer. Ensayos en el Reino Unido y Francia han demostrado que el uso de un chorro de lavado y barredora de succión son más eficaces que un cepillo y barredora de succión en la limpieza de sedimentos (Interpave, 2008).
- Corrección a daños perjudiciales: al igual que con los pavimentos convencionales, las depresiones, ahuellamiento y partes agrietadas o rotas, que se consideran perjudiciales para el desempeño estructural del

pavimento o un peligro para los usuarios, se requerirá una acción correctiva apropiada (Interpave, 2008).

- Cuando la escorrentía converge de áreas adyacentes hacia la capa de recarga, usualmente se instala un tragante² u otra estructura para reducir la cantidad de detrito y sedimento. Esta estructura también requiere de la remoción periódica del sedimento y detrito (R. Mora, 2009)

El mantenimiento de los SUDS es crítico para el funcionamiento a largo plazo, ya que depende de una serie de factores como la ubicación, el suelo, los detalles de la construcción, la propiedad y la carga contaminante impuesta. Algunos tipos de componentes son más fáciles de mantener que otros. (Jefferies, Duffy, Berwick, McLean, & Hemingway, 2009). Los SUDS deben tener la capacidad de tener un buen mantenimiento a un costo económico (Jefferies et al., 2009)

6.1 RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO

En cuanto a la falta de mantenimiento, esta debe ser evitada por parte de las autoridades competentes dedicando el dinero necesario para esta tarea, todos los años, este es necesario para llevar a cabo tanto las labores de mantenimiento propiamente dichas, como campañas de concienciación de la ciudadanía que sirvan de medidas preventivas, entre otras (Castro Fresno et al., 2005).

En este tipo de zonas se debe evitar que transiten vehículos que estén transportando agregados (finos específicamente) o algún material que pueda afectar el funcionamiento adecuado del pavimento. Cuando el sedimento se sitúa sobre la superficie de pavimento se debe quitar inmediatamente mediante aspiración o por otros medios nombrados en el capítulo de mantenimiento (Ferguson, 2005).

² Los tragantes son las estructuras de concreto o de mampostería que se encuentran situadas en las calles con el propósito de captar el agua de lluvia y conducirlo a las alcantarillas. Su función es permitir que el escurrimiento superficial entre por las cunetas de las calles a través de los tragantes o colectores de calle a los drenajes. Los tragantes son de tres tipos generales: de acera, de cuneta y de combinación, conjuntando estas últimas, aberturas en la acera con aberturas en la cuneta. (Cermeño Solares, 2011)

7. APLICABILIDAD

7.1 SITIO DE ESTUDIO (DESCRIPCIÓN)

El lugar de estudio seleccionado se encuentra ubicado en la ciudad de Bogotá D.C, en la calle 40 entre la avenida carrera séptima y la carrera 13.

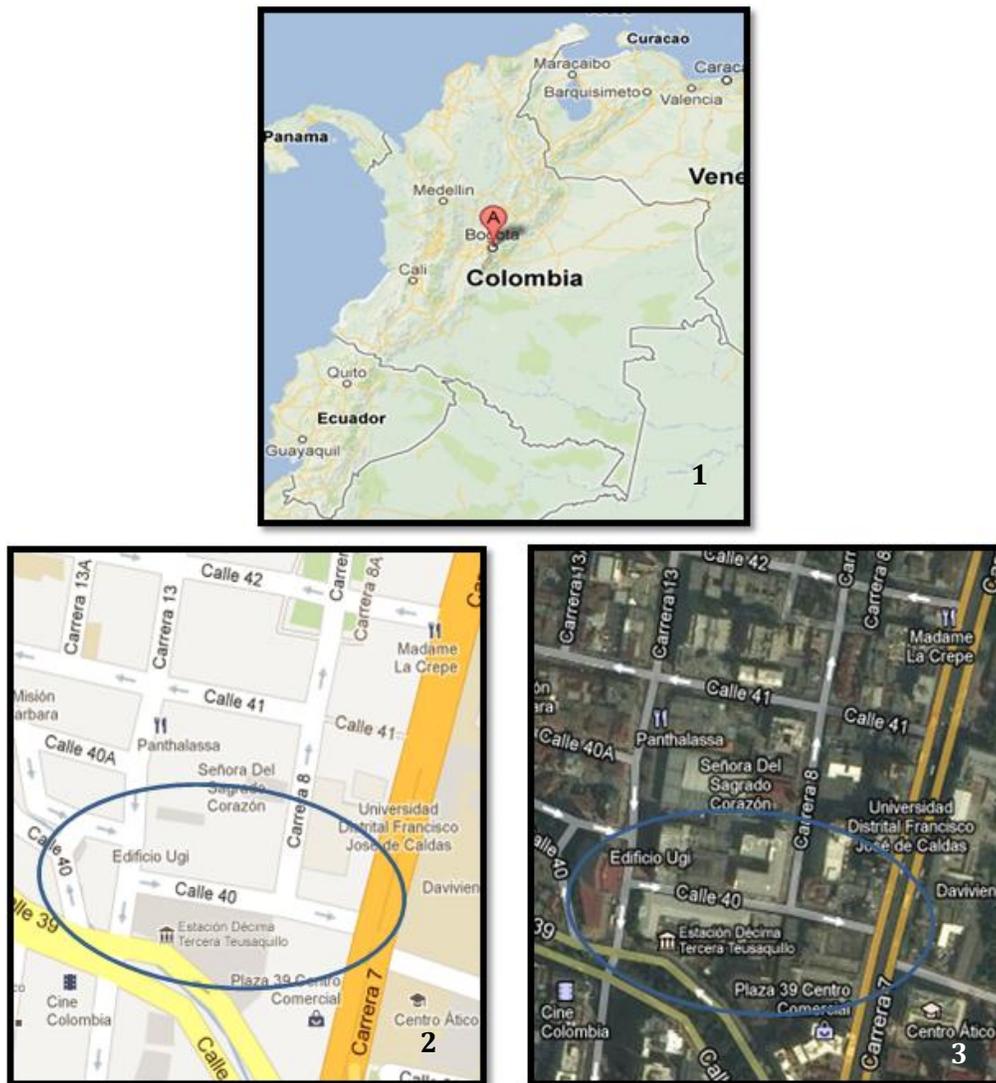


Ilustración 17: 1. Localización de Bogotá en el mapa de Colombia. 2 y 3. Localización de la zona de estudio en la ciudad de Bogotá.

Esta zona es ideal para la utilización de los pavimentos porosos, debido a la limitación de espacio y a la densidad poblacional que se presenta allí, ya que es un lugar residencial y universitario, donde no se encuentran muchos espacios vegetados, y en el cual no se pueden construir otro tipo de sistemas alternativos

de drenaje urbano como lo son: las franjas filtrantes, humedales artificiales, cunetas verdes, estanques de retención, entre otros.

El lugar escogido para desarrollar los pavimentos porosos es poco transitado vehicularmente, pues la vida útil de estos incrementa significativamente, si estos se implementan en zonas residenciales o parqueaderos, donde no se presenta un alto flujo vehicular. En las calles muy transitadas el pavimento poroso tiende a colmatarse muy rápidamente (Gómez González et al., 2010).

Por otro lado, las pendientes de los pavimentos no pueden ser muy elevadas ($\leq 5\%$), esto se hace para prevenir la acumulación de agua en la superficie y dentro de la sub-base (Maryland Stormwater Design Manual -MDE-, 2000). Esta calle cuenta con una topografía no tan pronunciada, por lo tanto se puede asumir que la pendiente es menor del 5%, lo cual permite que la escorrentía pueda escurrir a través de los pavimentos porosos.

7.2 DATOS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se hace la recolección de datos necesarios para una zona de estudio a la cual se le quieren aplicar los métodos de diseño, construcción y mantenimiento que se nombraron anteriormente, estos datos se obtuvieron midiendo con una cinta métrica buscando hallar áreas aferentes al pavimento poroso las cuales van a aportar escorrentía a el sistema que queremos analizar.

Inicialmente se midieron las zonas pavimentadas que pueden de acuerdo a la topografía del terreno, y en un evento de lluvia pueden aportar escorrentía a la calle 40 (la zona de estudio) (Tabla 11).

Tabla 11. Áreas aferentes de las vías al pavimento poroso

Zona	Área (m ²)
Carrera 7ma	75.12
Calle 40	1175.98
Separador	51.35

En la Tabla 12 mostrada a continuación se obtuvieron los valores de las áreas aferentes de los techos de las edificaciones que estaban alrededor del área de estudio y el material del que están contruidos para posteriormente hallar el coeficiente de escorrentía de la zona.

Tabla 12. Áreas aferentes de los techos al pavimento poroso.

Número	Teja	Área
	Material	m ²
1	Fibra de vidrio	63.40
2	Fibro-cemento	69.88
3	Fibro-cemento	70.99
4	Concreto	89.85
5	Plástico	71.63
6	Zinc	96.13
7	Fibra de vidrio	704.26
8	Concreto	1000.68
9	Fibro-cemento	441.75
10	Plástico	571.13
11	Concreto	605.16
12	Fibro-cemento	109.10
13	Fibro-cemento	233.22
14	Baldosa	214.44
15	Fibro-cemento	421.28
16	Fibro-cemento	692.81
17	Fibro-cemento	554.48
18	Fibro-cemento	89.09
19	Zinc	82.00
20	Fibro-cemento	162.68
21	Fibro-cemento	33.90
22	Fibro-cemento	315.07

La Ilustración 18 presenta un esquema de la zona de estudio, donde se muestran las áreas aferentes al pavimento poroso.

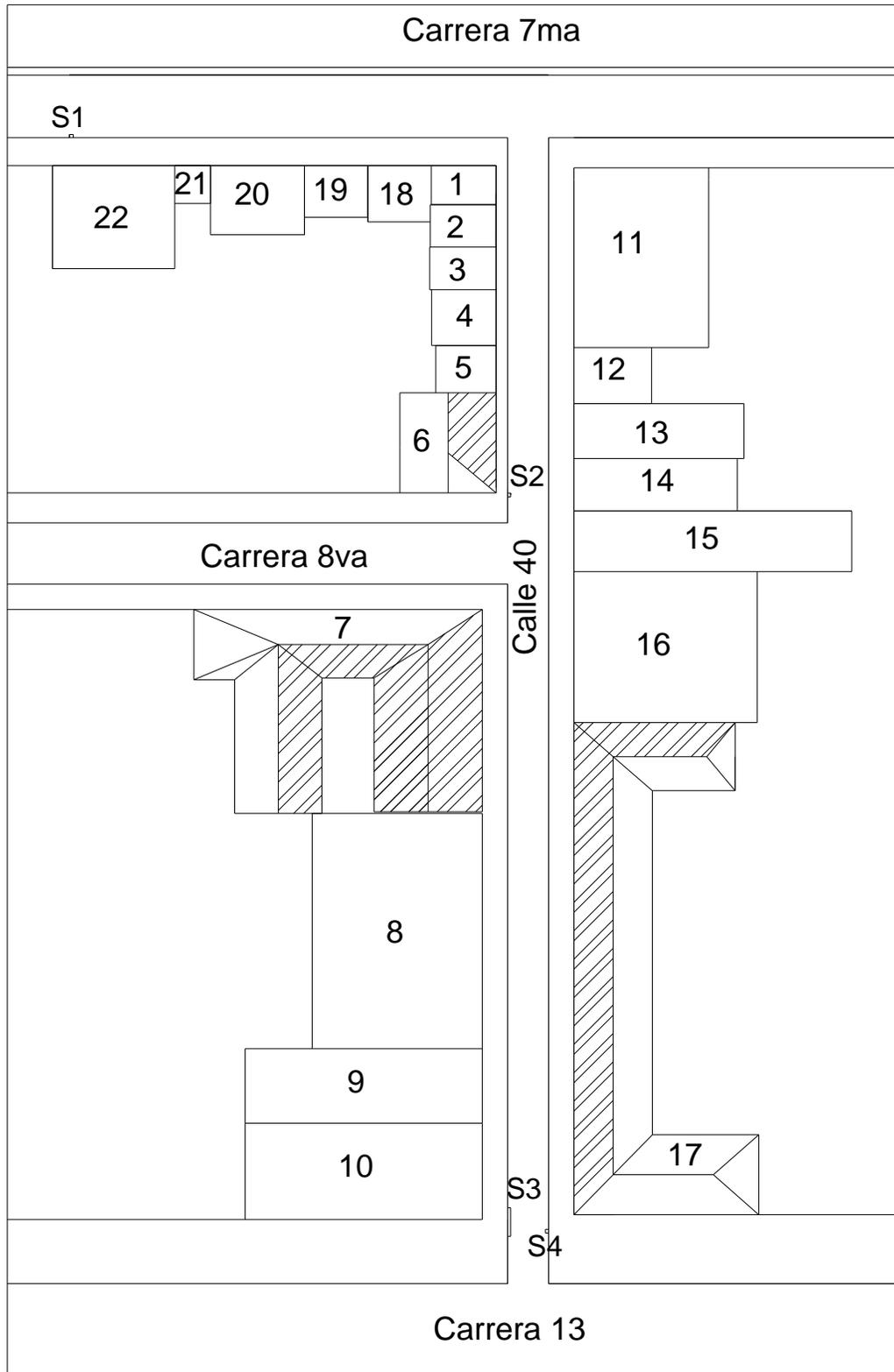


Ilustración 18: Planta de la zona de estudio con sus áreas aferentes correspondientes.

En la zona de estudio se encuentran cuatro sumideros (S1, S2, S3 y S4), tres sobre la calle 40, y uno sobre la carrera séptima, mostrados y enumerados en la Ilustración 18.

Tabla 13. Distancias de los sumideros a un sitio determinado. Nota: Estas distancias fueron medidas a la mitad del sumidero.

Desde	Hasta	Distancia (m)
S1	Calle 40	68.97
S2	Carrera 8	4.40
S3	Carrera 13	9.75
S4	Carrera 13	8.28

Los sumideros S1, S2, S4, miden 60 cm de largo, y el sumidero S4 mide 4.5 m.

7.3 DATOS GEOTÉCNICOS

Se escogió una zona de estudio cerca a la calle 40; los datos fueron tomados en el edificio Ático, perteneciente a la Pontificia Universidad Javeriana, la cual de igual manera los suministró con fines académicos.

El globo de terreno en estudio se ubica en una franja de transición entre los cerros orientales de la ciudad y la parte plana, conocida como la zona de piedemonte oriental.

Subyacen a los rellenos superficiales intercalaciones de capas arcillo-limosas con rastros ocasionales de arena fina que anteceden a los materiales propios del perfil de meteorización de la formación Bogotá (Tpb) –parte superior de la unidad-conformado por arcillas y arcillolitas laminadas abigarradas (grises, violáceas, moradas y rojas) de resistencia mecánica alta (elevada capacidad portante y baja deformabilidad).

7.4 DATOS HIDROLÓGICOS

7.4.1 COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

El coeficiente de escorrentía es la relación entre el volumen de agua de escorrentía en la superficial total y el volumen total de agua precipitado, en un intervalo de tiempo determinado (Monsalve Sáenz, 1999) y se puede hallar con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{V \text{ escorrentía superficial}}{V \text{ precipitado total}} \quad \text{Ecuación 48}$$

A continuación se presentan los valores de los coeficientes de escorrentía para las diferentes áreas aferentes de la calle 40, entre carreras séptima y 13. Estos datos de los coeficientes de escorrentía fueron tomados de Martínez de Azagra (2010).

Tabla 14. Coeficientes de escorrentía.

Zonas	Coeficiente de escorrentía
Carrera 7ma	0.85 - 0.90
Calle 40	0.85 - 0.90
Separador	0.30 - 0.75

Tabla 15. Coeficientes de escorrentía.

Número	Teja	Coeficientes de escorrentía
	Material	
1	Fibra de vidrio	0.90 - 0.95
2	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
3	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
4	Concreto	0.85 - 0.95
5	Plástico	0.90 - 0.95
6	Zinc	0.85 - 0.90
7	Fibra de vidrio	0.90 - 0.95
8	Concreto	0.85 - 0.90
9	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
10	Plástico	0.90 - 0.95
11	Concreto	0.85 - 0.90
12	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
13	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
14	Baldosa	0.55 - 0.75
15	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
16	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
17	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
18	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
19	Zinc	0.85 - 0.90
20	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
21	Fibro-cemento	0.75 - 1.00
22	Fibro-cemento	0.75 - 1.00

7.4.2 CURVAS IDF

Estos datos fueron tomados en la estación pluviográfica San Luis, la cual está muy cercana al sitio de estudio, perteneciente al EAAB, la cual tiene una latitud de 43°N 4'39" y una longitud de 74°W 74°.

Se presenta la Tabla 16 donde se presenta la ecuación de Montana (Ecuación 49) para seis diferentes periodos de retorno y mostrando los parámetros C_1 , C_2 y X_0 necesarios para desarrollar la ecuación.

$$i = C_1 * (X_0 + D)^{C_2} \quad \text{Ecuación 49}$$

Tabla 16: Ecuación de Montana para diferentes periodos de retorno

Tr (años)	C_1	C_2	X_0	Ecuación Montana
3	2324.3	-0.95	16.8	$i = 2324.3 * (16.8 + D)^{-0.95}$
5	2425.2	-0.94	15.2	$i = 2425.2 * (15.2 + D)^{-0.94}$
10	2489.9	-0.92	13.4	$i = 2489.9 * (13.4 + D)^{-0.92}$
25	2654.7	-0.90	11.9	$i = 2654.7 * (11.9 + D)^{-0.90}$
50	2764.8	-0.89	11.0	$i = 2764.8 * (11.0 + D)^{-0.89}$
100	2951.5	-0.89	10.5	$i = 2951.5 * (10.5 + D)^{-0.89}$

A continuación se muestra una gráfica con las curvas IDF (Ilustración 19) obtenidas con las ecuaciones mostradas en la Tabla 16 para la zona de estudio que se eligió.

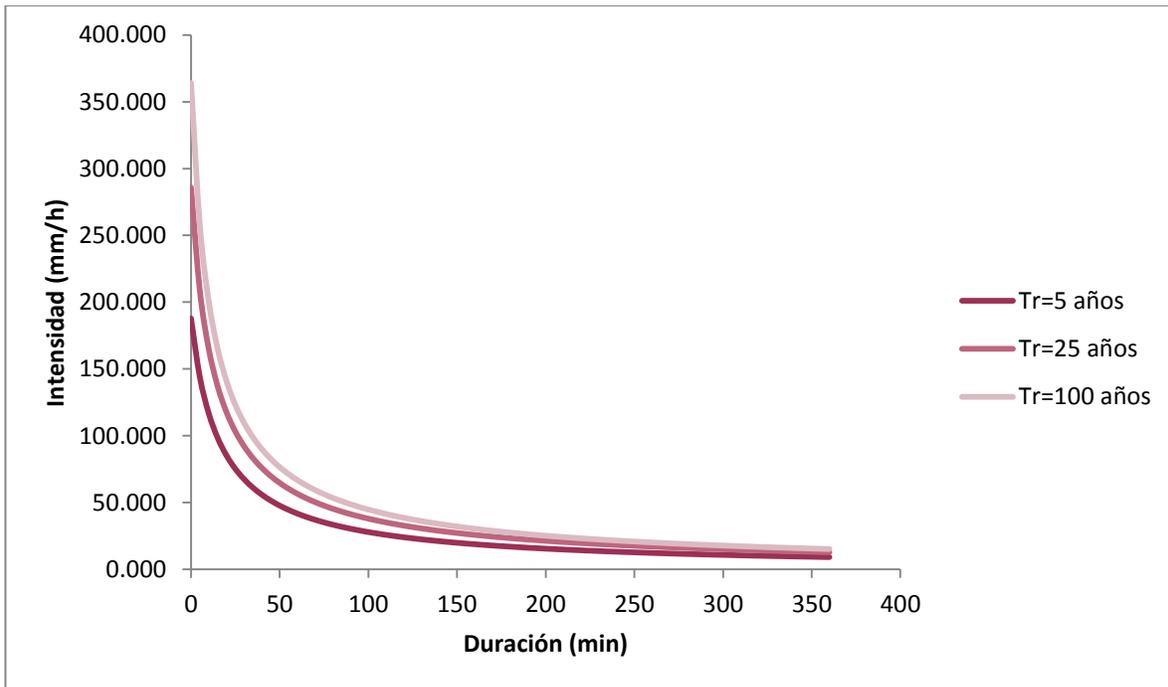


Ilustración 19: Curvas IDF para la zona de estudio

7.4.3 DATOS DE TRANSPORTE:

Según documento de ingeniería de tránsito realizado por Montoya, en noviembre de 2005, las carreteras o vías de acuerdo a la demanda de vehículos se pueden clasificar como se muestra a continuación:

Tabla 17: Clasificación de vías de acuerdo a la demanda de vehículos (fuente: Guisselle Montoya H,2005)

Autopistas	Carreteras con un volumen diario promedio anual (IMDA) superior a 4000 veh/día, de calzadas separadas, con uno o más carriles, con control total de accesos (ingreso y salida) que proporciona flujo vehicular completamente continuo
Carreteras duales o multicarril	Carreteras con un IMDA superior a 4000 veh/día, de calzadas separadas, con uno, dos o más carriles; con control parcial de accesos
Carreteras de primera clase	Carreteras con un IMDA entre 4000 y 2001 veh/día de una calzada de dos carriles (DC)
Carreteras de segunda clase	Carreteras que soportan un IMDA de 1000 a 401 veh/día de una calzada de dos carriles (DC)
Carreteras de tercera clase	Carreteras con un IMDA menor a 400 veh/día de una calzada (Montoya, 2005)

La calle 40, se encuentra en el rango de carreteras de tercera clase. Es por eso esto que se decide tomar un valor de volumen diario promedio anual menor a 400 veh/día.

7.5 APLICACIÓN DE MÉTODOS DE DISEÑO

7.5.1 MÉTODO DE LA CURVA ENVOLVENTE:

Para desarrollar este método, se deben encontrar los parámetros de la ecuación de Talbot, a continuación se presentan ajustados para las curvas IDF de la zona de estudio (Tabla 18):

Tabla 18. Parámetros de la ecuación de Talbot.

a	2840.240	3229.981	3623.806	4222.620	4538.844	3486.098
T (años)	3	5	10	25	50	100
b	0.043	0.004	0.004	0.003	0.005	0.075
c	18.866	17.499	16.232	15.198	14.437	13.783

Los parámetros de la ecuación de Talbot se hallan haciendo uso de las curvas IDF calculadas inicialmente por medio de la ecuación de Montana, el objetivo es presentar el mismo valor de intensidad o la menor diferencia posible, tanto para la

ecuación Talbot como para la ecuación de Montana, variando a, b, c, hasta que este valor sea igual.

Además de lo anterior, es necesario saber el valor del caudal de salida constante del pavimento, el valor de R , que es el producto del coeficiente de escorrentía por la relación entre el área contribuyente y el área del pavimento poroso rígido y la porosidad η . Lo anterior se usa para determinar el volumen máximo de almacenamiento del pavimento poroso y el espesor de este.

El valor de R fue calculado de la siguiente manera (Tabla 19):

Tabla 19. Cálculo del valor de R .

A - Calle 40 (m²)	(1)	1175.98
C - Calle 40	(2)	0.85
A - Cra 7ma (m²)	(3)	75.12
A - Separador (m²)	(4)	51.35
A - Aferente (m²)	(5)	6692.92
C - Promedio	(6)	0.856

$$R = \frac{(1) * (2) + (6) * ((1) + (3) + (4) + (5))}{(1)}$$

El coeficiente promedio es el resultado de multiplicar las áreas aferentes por su coeficiente de escorrentía correspondiente, sobre la sumatoria de áreas total. Por otro lado, se utilizó la porosidad del modelo de pavimento poroso, la cual es igual 0.18 (Gómez González et al., 2010)

Tomando el caudal de salida constante del pavimento, el cual es igual a 146.338 mm/h, de acuerdo a ensayos de laboratorio realizados por Polanco Andrade & Sánchez Vega (2012). Una vez obtenidos todos los valores necesarios para realizar el cálculo de este método, se procede a calcular el volumen de almacenamiento máximo con la Ecuación 10, para los diferentes periodos de retorno (Tabla 20). A continuación se va a aplicar el procedimiento, para un periodo de retorno de 3 años, y se hará lo mismo para los otros T_r considerados. El desarrollo completo del método se encuentra en el anexo 1.

$$V_{alm} = \left(\sqrt{\left(\frac{2840.24}{60}\right)} \sqrt{6.671 * 3^{\frac{0.043}{2}}} - \sqrt{\frac{18.866}{60}} \sqrt{146.338} \right)^2 = 130.205 \text{ mm}$$

Finalmente se reemplazan los datos correspondientes en la Ecuación 11 para obtener el espesor de diseño mostrado a continuación:

$$e = \frac{130.205}{0.18} = 0.723 \text{ m}$$

Es evidente que a medida que el periodo de retorno aumenta, el espesor del pavimento aumentará. La diferencia entre un periodo de retorno de 3 años y uno de 100 años es casi un metro. Dependiendo de las necesidades que se tengan en cualquier zona, se escogerá el periodo de retorno más conveniente, y donde se presente la mejor relación de costo beneficio.

Tabla 20. Resumen del resultados del método de la curva envolvente.

Tr (años)	3	5	10	25	50	100
R	6.671	6.671	6.671	6.671	6.671	6.671
f (mm/h)	146.338	146.338	146.338	146.338	146.338	146.338
Porosidad (n)	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Valm (mm)	130.205	155.693	192.455	245.976	280.699	309.433
e (m)	0.723	0.865	1.069	1.367	1.559	1.719

7.5.2 METODOLOGÍA CHILE:

Para realizar la metodología Chile, se tiene que calcular un volumen afluente y un volumen de infiltración, los cuales dependen de varios factores que se explicarán a continuación:

Sabiendo el caudal afluente no es de buena calidad, y que el mantenimiento que se le hará al pavimento poroso no será regular, el coeficiente de seguridad C_s , tiene un valor de 1/3, este sale de la Ilustración 12. Por otro lado, el valor del coeficiente de escorrentía promedio, es igual a la multiplicación de cada área por su coeficiente de escorrentía correspondiente, dividido por la sumatoria de áreas total. Este coeficiente promedio incluye las áreas aferentes al pavimento, y el área del pavimento como tal. Este valor es igual a 0.855.

Los valores de intensidad utilizados en este método, fueron los obtenidos mediante la ecuación de Montana, ecuación que fue desarrollada con anterioridad. La capacidad de infiltración del suelo, es igual a 146.3375 mm/h para un pavimento poroso nuevo (Polanco Andrade & Sánchez Vega, 2012). Los valores de áreas son las siguientes (Tabla 21):

Tabla 21. Valores de las áreas.

Área total (m ²)	7995.374
Área pavimento (m ²)	1175.980

El volumen afluente se calculó con la Ecuación 12, mientras que el volumen de infiltración se calculó con la Ecuación 13. A continuación se presenta el cálculo para un periodo de retorno de 3 años, considerando que se hace para la intensidad en la que se presenta el mayor espesor de pavimento. Esto se hace de igual forma para los otros Tr. El desarrollo completo del método se encuentra en el anexo 2.

$$V_{aflu} = 1.25 * \left(0.001 * 0.855 * 31.739 * 7995.374 * \frac{75}{60} \right) = 339.096 \text{ m}^3$$

$$V_{inf} = 0.001 * \left(146.338 * \frac{1}{3} * 1175.98 * \frac{75}{60} \right) = 71.704 \text{ m}^3$$

$$V_{alm} = 339.096 - 71.704 = 267.39 \text{ m}^3$$

El espesor necesario de la sub-base para un $T_r=3$ años, se obtiene con la Ecuación 15 y el tiempo máximo se obtiene con la Ecuación 16 son:

$$e = \frac{267.39}{1175.98 * 0.18} = 1.263 \text{ m}$$

$$t_m = \frac{0.18 * 1.263 * 1000}{\frac{1}{3} * 146.338} = 4.66 \text{ h}$$

A continuación se muestran las gráficas que representan el volumen de almacenamiento, el afluente y el de infiltración para el periodo de retorno de 3 años.

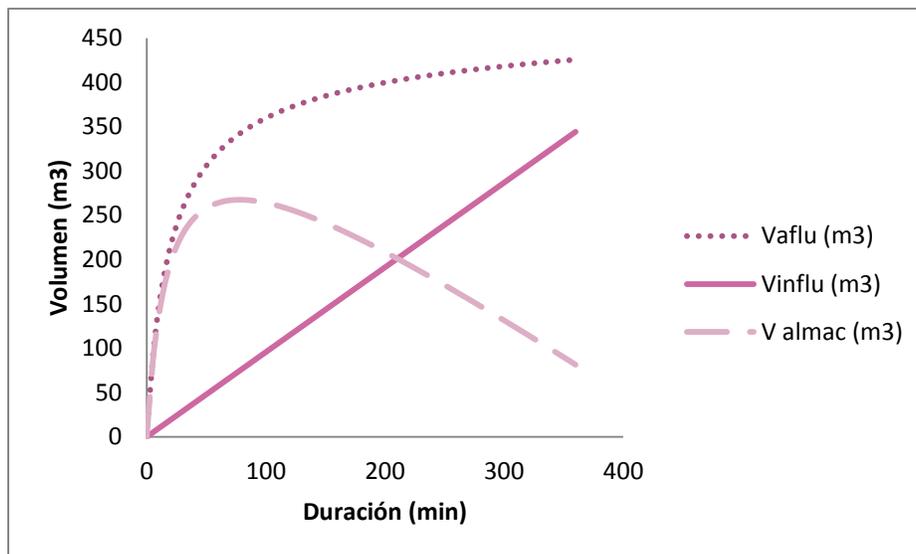


Ilustración 20: Almacenamiento requerido para $T_r=3$ años.

A continuación se presentan los resultados para cada periodo de retorno:

Tabla 22. Tabla resumen de la metodología Chile.

T (años)	3	5	10	25	50	100
C	0.855	0.855	0.855	0.855	0.855	0.855
Area total (m2)	7995.374	7995.374	7995.374	7995.374	7995.374	7995.374
Area pavimento (m2)	1175.980	1175.980	1175.980	1175.980	1175.980	1175.980
porosidad	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180
Vmax almac (m3)	267.445	305.120	361.395	446.497	502.071	546.066
e (m)	1.263	1.441	1.707	2.109	2.372	2.580
tm (h)	4.662	5.319	6.300	7.784	8.752	9.519

El tiempo máximo de vaciado, se recomendó menor a 48 horas, los tiempos para cada periodo de retorno, son todos menores a este valor, lo que hace que sea un valor correcto. De igual forma que en el método anterior, se puede evidenciar que a medida que aumenta el periodo de retorno aumenta el espesor del pavimento poroso.

7.5.3 THE SUDS MANUAL

Para la aplicación de esta metodología, se obtuvo el coeficiente de infiltración f , el cual está dividido por un coeficiente de seguridad adecuado, en este caso es igual a 2. El coeficiente de infiltración es igual a 73.169 mm/h.

Seguidamente, se utilizó la porosidad del modelo de pavimento poroso, la cual es igual 0.18 (Gómez González et al., 2010). Teniendo en cuenta, que se trata de un pavimento de infiltración, se asume que la relación entre el área de drenaje y el área de la zona de infiltración es igual a 1. Por otro lado, para la duración y la intensidad del evento de lluvia considerado para el diseño, se utilizaron los datos arrojados por la ecuación de Montana desarrollada previamente, para diferentes periodos de retorno.

Después de obtener los datos anteriores, se aplica la ecuación para encontrar la máxima profundidad, la cual corresponde a la altura de almacenamiento. Hay que aclarar que este procedimiento solamente aplica para los valores positivos de la diferencia entre la precipitación y la infiltración del pavimento. Los valores que den negativos se omiten en el procedimiento.

Como ejemplo, para un periodo de retorno de 3 años se hace lo siguiente, utilizando la Ecuación 19 para calcular el espesor del pavimento:

$$H_{max} = e = \frac{\left(\frac{10}{60}\right)}{0.18} * \frac{(102.227 - 73.169)}{1000} = 0.027m$$

Tabla 23: Resumen de la metodología The SUDS Manual.

Tr (años)	e_{max} (m)
3	0.027
5	0.059
10	0.059
25	0.089
50	0.110
100	0.128

En la Tabla 23 se muestran únicamente los valores obtenidos para la duración en que se obtuvo el mayor espesor de pavimento para cada condición del pavimento y periodo de retorno. El espesor de pavimento tiende a aumentar con relación al periodo de retorno, ya que son directamente proporcionales.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas luego de realizar los cálculos para cada duración:

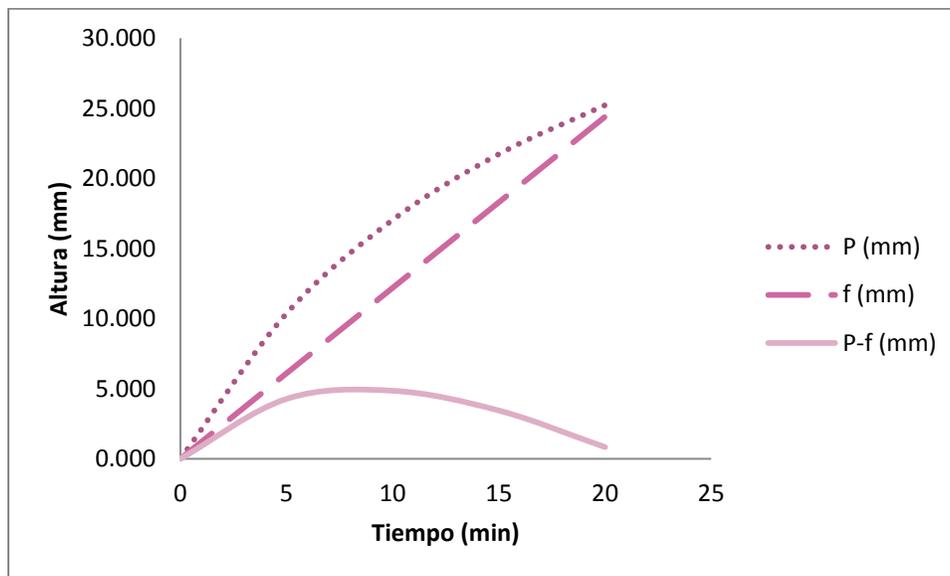


Ilustración 21: Almacenamiento requerido para $Tr=3$ años.

El desarrollo completo del método se encuentra en el anexo 3.

7.5.4 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS FRANCESES

Para la determinación del caudal de salida, se necesita un coeficiente de seguridad, la capacidad de absorción y el área del pavimento. Anteriormente se mencionaba que el valor del coeficiente de seguridad puede ser igual a 0.1, el cual afecta directamente la capacidad de absorción del pavimento por unidad de superficie (Azzout et al., 1994). Por otro lado, la capacidad de absorción por

unidad de superficie de infiltración, es de $0.000312 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$, según estudios realizados por Mora et al., (2011). Finalmente, el área del pavimento medida en planta es igual a 1175.98 m^2 . El valor del caudal de salida, obtenido con la Ecuación 21, para la zona de estudiada es de $3.67\text{E}-2 \text{ m}^3/\text{s}$.

La superficie activa, por otro lado, fue obtenida al multiplicar el coeficiente de aporte por el área total de la cuenca de drenaje, esto se hace siguiendo la Ecuación 22. El coeficiente de aporte es igual al coeficiente de escorrentía promedio calculado previamente para la metodología Chile:

Tabla 24. Valor de la superficie activa y el coeficiente de aporte.

Sa (m²)	6837.708
C	0.855
A (m²)	7995.374

Anteriormente se propusieron dos métodos para calcular la altura de almacenamiento en un pavimento poroso, el método de las lluvias y el método de los volúmenes:

7.5.4.1 MÉTODO DE LAS LLUVIAS:

Es necesario calcular los caudales específicos q_s que se calculan como el cociente entre los caudales de salida obtenidos anteriormente y la superficie activa, dando como resultado un valor de 19.317 mm/h , obtenido mediante la Ecuación 25.

Una vez obtenidas las curvas IDF de la zona de estudio, se encontró la altura de almacenamiento para cada uno de los seis periodos de retorno utilizados, y ya teniendo el caudal específico, se hace la diferencia entre la altura de precipitación y el caudal específico y se obtiene la altura, que hace referencia a la máxima diferencia presentada.

Con estos valores es posible obtener el volumen de almacenamiento, por medio de la Ecuación 26, y el espesor correspondiente para cada periodo de retorno, el cual corresponde al cociente entre el volumen de agua y el área efectiva del pavimento poroso.

Tabla 25. Tabla resumen del método de las lluvias.

Tr	3	5	10	25	50	100
V (m³)	140.975	166.710	204.131	259.350	295.857	326.454
e (m)	0.666	0.788	0.964	1.225	1.398	1.542

En la Tabla 25 se muestran únicamente los valores obtenidos para la duración en la cual se obtuvo el mayor almacenamiento requerido para cada condición del pavimento y periodo de retorno.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para diferentes duraciones, mediante las gráficas de las curvas HdF y el caudal específico para cada periodo de retorno:

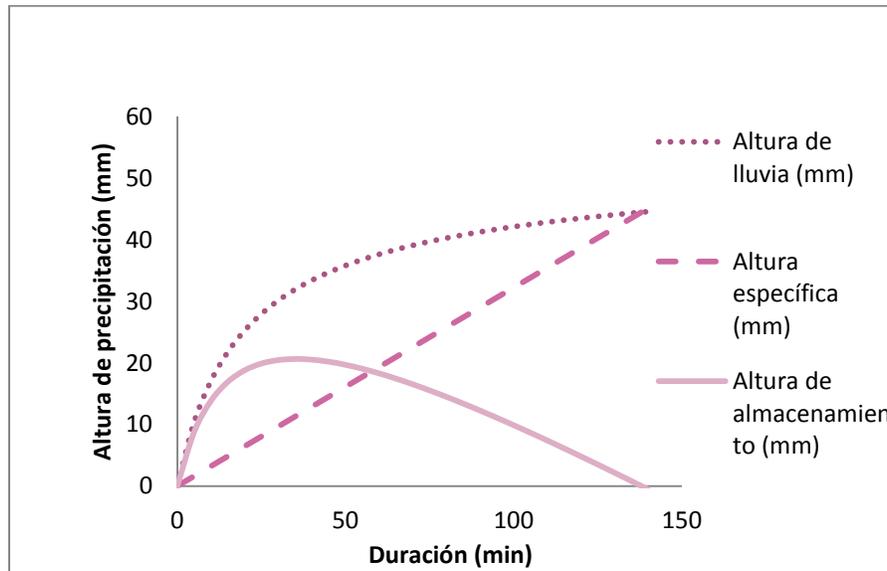


Ilustración 22: Almacenamiento requerido para $T_r=3$ años.

El desarrollo completo del método se encuentra en el anexo 5.

7.5.4.2 MÉTODO DE LOS VOLÚMENES

Para la realización de este método, se realizó la gráfica del caudal específico q_s , para cada duración correspondiente, es este caso se tomaron 4 años de diseño: 2007, 2008, 2009 y 2010 (Ilustración 23). Adicionalmente se graficó la precipitación acumulada (Ilustración 24) y se observó si había una diferencia entre la curva de precipitación acumulada para cada episodio y la curva de evacuación $q_{s.d}$.

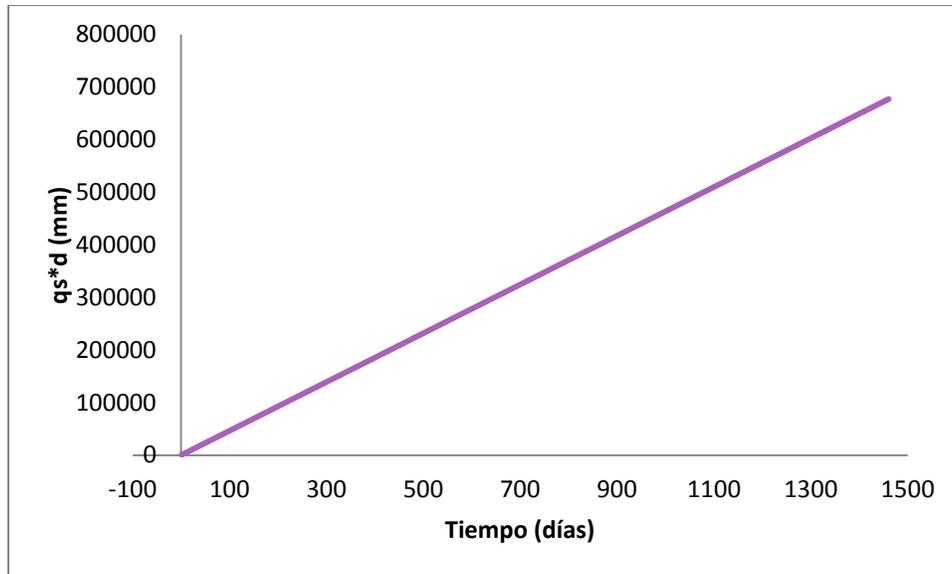


Ilustración 23: Caudal específico para cada duración.

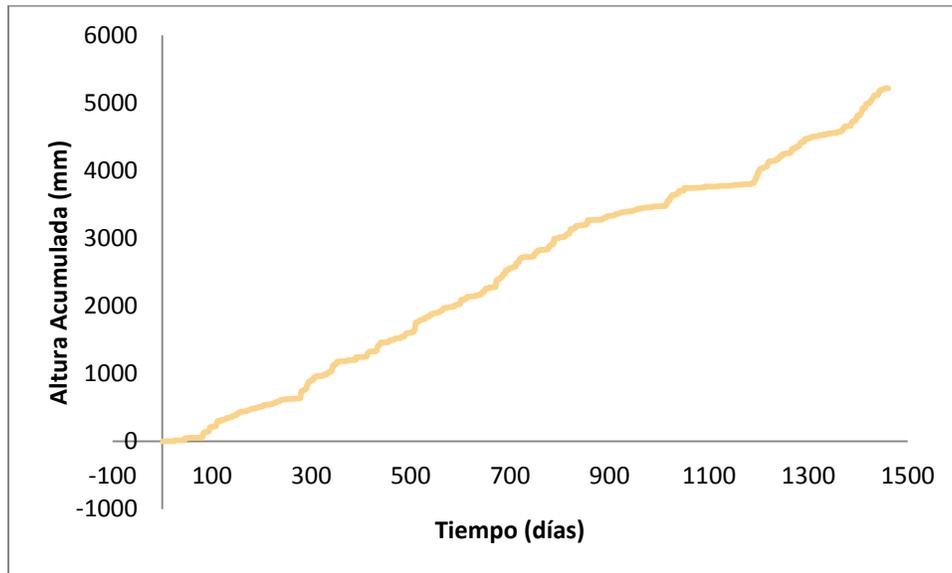


Ilustración 24: Precipitación acumulada para cada duración.

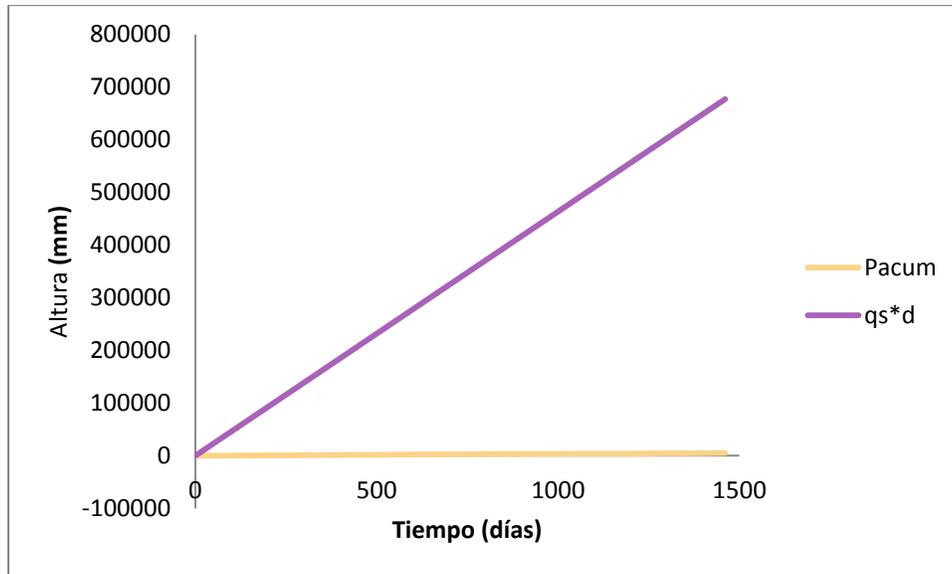


Ilustración 25: Altura para cada duración.

Al superponer estas dos gráficas (Ilustración 25), se puede observar que no hay una altura de acumulación y que las diferencias que se presentan entre una curva y otra son muy significativas. Sin embargo, esto se verificó para cada evento de lluvia que se presentó durante los 4 años de estudio, esto se hizo corriendo curva de $q_s \cdot d$ cada que iniciara un evento de precipitación:

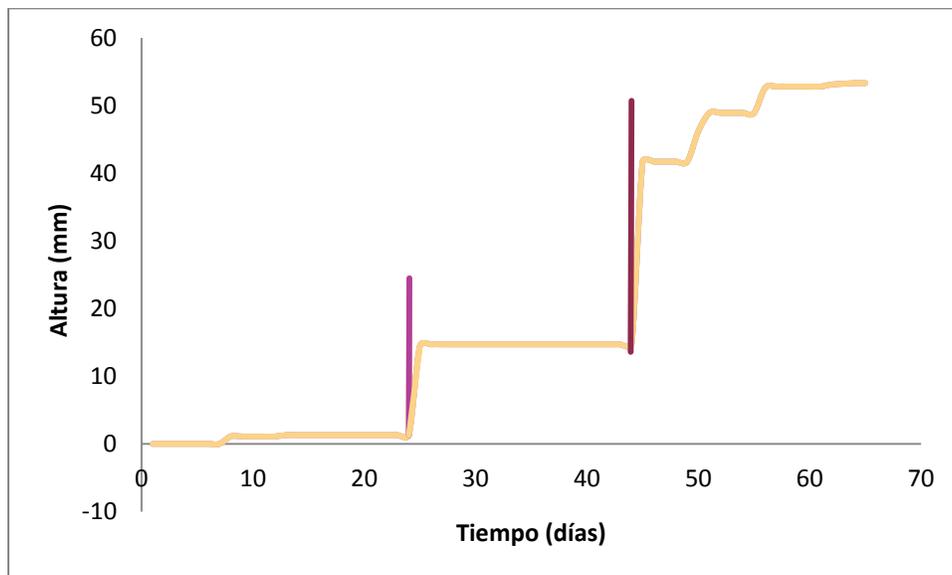


Ilustración 26: Altura para cada duración.

En la Ilustración 26, sólo se muestra la evaluación para dos eventos de lluvia de todos los que se presentan. Por facilidad, en los cálculos se compararon las pendientes de los eventos de lluvia, con la pendiente de la curva del caudal específico y la pendiente de la curva del evento de lluvia. Se observó que siempre la pendiente del $q_s \cdot d$ fue mayor que la otra considerablemente, lo que indica que no se presenta una altura de almacenamiento, esto se debe en gran parte a que el

pavimento es nuevo y por ende no es necesario que exista un almacenamiento, puesto que la evacuación es más rápida que si el pavimento se encuentra colmatado, rehabilitado o en otra condición.

Llegado el caso que si se presente una altura máxima de almacenamiento, se debe calcular el volumen con la misma ecuación que se calculó el volumen en el método de las lluvias, es decir la Ecuación 26.

El desarrollo completo del método se encuentra en el anexo 5.

7.5.5 MÉTODOS DE DISEÑO DE ACUERDO A LA CALIDAD

Para hallar el volumen de almacenamiento por medio del método simplificado inicialmente se debe conocer el porcentaje de impermeabilidad de la cuenca (I) el cual se puede hallar de la siguiente manera (Ecuación 50):

$$I(\%) = \frac{\text{Área a drenar}}{\text{Área total}} * 100 \qquad \text{Ecuación 50}$$

Para la zona de estudio el porcentaje de impermeabilidad de la cuenca es de 85,29%, con este valor se encuentra el coeficiente volumétrico de escorrentía, obtenido con la ECUACIÓN 28. Posteriormente se halla el volumen de calidad que se quiere almacenar (WQv) que se obtiene según la Ecuación 27. Todo el procedimiento anterior se resume en la Tabla 26, donde se toman dos precipitaciones de diseño, la primera corresponde a la Regla del 85% y la segunda a la regla del 90%, es decir la precipitación asociada al suceso cuya altura total es superior a estos porcentajes de los sucesos correspondientes al año medio, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 26: Volumen de almacenamiento por el método simplificado

Regla	85%	90%
P (mm)	40.30	43.40
I (%)	0.85	0.85
Rv	0.8176	0.8176
WQv (m³)	263.45	283.71

En este caso se tiene el área permeable con el cual se quiere trabajar, que es 1176.2 m² (el área del pavimento), por lo que se facilita el uso del método, y se reduce a hallar valores de alturas de las capas necesarias, se tienen los siguientes valores de porosidad que se requieren para cada capa del pavimento poroso (Tabla 27):

Tabla 27: Valores de porosidad de las diferentes capas de pavimento poroso

n relleno	0.18
n sub-base	0.19
n superficie	0.20

Se asumen valores de la altura del relleno y la altura de la superficie para poder hallar una altura de sub-base, reemplazando y despejando de la Ecuación 33, los datos asumidos y da como resultado la altura de la sub-base. Estos valores se evidencian en la Tabla 28:

Tabla 28: Resultados del espesor de cada capa del pavimento poroso hallando el volumen a almacenar por el método simplificado.

n relleno	0.25	0.25
h relleno (m)	0.4	0.4
n superficie	0.2	0.2
h superficie (m)	0.2	0.2
A permeable (m²)	0.62	0.62
A impermeable (m²)	0.25	0.25
t lluvia (h)	0.3	0.3
n sub-base	0.19	0.19
H sub-base (m)	0.44	0.53

El volumen de almacenamiento (volumen de calidad) por medio del método de precipitación fija, para el cual se utilizan los parámetros mostrados en la Tabla 29, los cuales van a ser reemplazados en la Ecuación 29. Para este ejemplo de aplicación se tienen intercalaciones de capas arcillo-limosas, por lo que se puede decir que es un suelo pobremente drenado y de escorrentía alta, de acuerdo a la Tabla 9 este parámetro esta entre los valores de 0.40 y 0.45, el valor tomado de SOIL de 0.43 de acuerdo a la Tabla 9:

Tabla 29: Volumen de almacenamiento por medio del método de precipitación fija

Regla	85%	90%
D (mm)	40.3	43.4
SOIL	0.43	0.43
I (mm/h)	0.85	0.85
Vt (m³/ha)	320.82	345.50

Se asumen los mismos valores de porosidad mostrados en la Tabla 27, y se reemplaza de la misma manera que se hizo para el método anterior en la Ecuación 33, y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 30: Resultado del espesor de la sub-base por medio del método de precipitación fija

Vt (m³/ha)	320.82	345.50
n relleno	0.25	0.25
h relleno (m)	0.4	0.4
n superficie	0.2	0.2
h superficie (m)	0.2	0.2
A permeable (m²)	1176.12	1176.12
t lluvia (h)	0.3	0.3
n sub-base	0.19	0.19
Hsub-base (m)	0.70	0.81

Una vez aplicados todos los métodos de diseño, se realizó una tabla resumen que se muestra a continuación, la cual facilita la comparación de los resultados obtenidos para el espesor de pavimento.

Tabla 31: resumen de resultados de espesores de pavimento poroso al aplicar las metodologías existentes

	Tr (años)	e (m)
Curva envolvente	3	0.72
	5	0.86
	10	1.07
	25	1.37
	50	1.56
	100	1.72
Método Chile	3	1.26
	5	1.44
	10	1.71
	25	2.11
	50	2.37
	100	2.58
The SUDS Manual	3	0.03
	5	0.06
	10	0.06
	25	0.09
	50	0.11
	100	0.13
Método de las lluvias	3	0.67
	5	0.79
	10	0.96
	25	1.23
	50	1.40
	100	1.54
Método de los volúmenes	-	-
Métodos de acuerdo a la calidad	simplificado	
	85%	0.44
	90%	0.53
	hidrológico de pequeñas tormentas	
	85%	0.70
	90%	0.81

En la Tabla 31 se evidencia una variación en los espesores obtenidos a través de la aplicación de las metodologías existentes, esto se debe principalmente a que

cada una de ellas utiliza diferentes factores de seguridad y consideraciones individuales.

El método que más difiere es The SUDS manual, ya que considera que el único aporte a la estructura corresponde a la precipitación efectiva que cae sobre ella, sin tener en cuenta la escorrentía superficial proveniente de las áreas aferentes.

Adicionalmente esta metodología no considera un factor de seguridad que contemple la frecuencia de mantenimiento de la estructura, por lo tanto la capacidad de absorción de este método siempre es mayor que la de los anteriores.

Por otro lado, el método de los volúmenes, no considera ningún espesor, ya que para un pavimento poroso nuevo no se requiere almacenamiento, en esta metodología el caudal de salida es superior, y es por esto que la estructura no debe contar con un espesor de pavimento definido.

7.6 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN

Para esta zona se puede colocar pavimento poroso, ya que la calle 40, que es nuestra zona de estudio, se encuentra en el rango de carreteras de tercera clase, es decir tráfico bajo; para este ejemplo de aplicación se puede construir el pavimento poroso en concreto o asfalto, no se debe hacer en adoquín debido a que excede los límites de tráfico permisibles. Se debe realizar siguiendo el procedimiento mencionado en el capítulo de construcción.

7.7 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO

En cuanto al mantenimiento, estudios realizados previamente por Gómez González et al. (2010), muestran que para la zona de la carrera 7a entre las calles 39 y 45 en Bogotá, el pavimento tiende a colmatarse muy rápidamente (8 meses y medio). Adicionalmente, se estimó una frecuencia de mantenimiento de 2 meses y medio. Sin embargo, se estima que estas duraciones podrían disminuir significativamente si el pavimento poroso se implementa en zonas de baja contaminación, como zonas residenciales o parqueaderos.

Por otro lado, el sistema de infiltración se debe inspeccionar varias veces en el primer año de operación y al menos anualmente después del primer año, además de inspeccionar regularmente los dispositivos de control de contaminante para determinar si el pavimento poroso debe ser limpiado o reemplazado.

Se deben remover los sedimentos del sistema al menos anualmente para prevenir el deterioro del rendimiento del pavimento, estas superficies se deben barrer y aspirar para reducir la acumulación de sedimentos y asegurar que la superficie

continúe porosa. El barrido se debe realizar por lo menos dos veces al año. En caso que se presente una obstrucción completa, se puede usar para la rehabilitación el uso de una máquina de barrer, el uso de un chorro de lavado o una barredora de succión.

Para ayudar a que el pavimento se conserve por más tiempo, se pueden ubicar señales permanentes o mensajes que ayuden a identificar la presencia del pavimento poroso y sus propósitos. Estos mensajes pueden educar al público sobre el uso de estos materiales potencialmente desconocidos y con esto evitar que la gente derrame aceites u otros fluidos perjudiciales para el pavimento.

8. CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo como finalidad realizar una revisión crítica del estado del arte acerca de los pavimentos porosos y permeables utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano, específicamente en cuanto a métodos de diseño, construcción y mantenimiento. A partir de un ejemplo de aplicación se intentó verificar si dichos métodos eran adaptables para su aplicación a la ciudad de Bogotá.

Se encontraron siete métodos de diseño hidrológico, de los cuales cuatro se basan en curvas IDF (curva envolvente, metodología Chile, The SUDS manual y el método de las lluvias) y dos en series de precipitación (método de los volúmenes y el método según la calidad que se divide en el método simplificado y método hidrológico de pequeñas tormentas). Por otro lado tan sólo un método intenta dimensionar la estructura en función de objetivos ambientales (método según la calidad), pero sin tener en cuenta concentraciones de contaminantes objetivo de entrada al sistema ni objetivos de remoción. Adicionalmente, los métodos encontrados se basan en atenuar los caudales picos, con el propósito de evitar o mitigar inundaciones, pero no se encontraron métodos de diseño específicos para aprovechamiento de aguas lluvias.

Por otro lado, según la revisión de literatura realizada, uno de los factores más importantes que determina el funcionamiento de los pavimentos porosos es la colmatación. Sin embargo, en los métodos de diseño reportados en la literatura, este factor es tenido únicamente en cuenta a partir de factores de seguridad, lo cual podría no ser suficientemente específico para zonas urbanas con diferentes grados de contaminación en sus aguas de escorrentía. Debido a la importancia que tiene la colmatación en la permeabilidad de los pavimentos porosos, se debe garantizar el mantenimiento del mismo, por lo cual en nuestro medio este factor podría ser una limitante para la aplicación de este sistema de drenaje alternativo de manera generalizada y a escalas urbanas importantes.

Dentro de la literatura revisada se encontró poca información sobre la construcción de pavimentos porosos y además los métodos encontrados son heredados o derivados de guías y manuales de construcción de pavimentos tradicionales (impermeables), la especificidad de los métodos de construcción de pavimentos porosos se basa en garantizar un mantenimiento inicial, lo cual podría no ser suficiente.

Por lo anterior, es posible que dichos métodos constructivos no cumplan correctamente con la funcionalidad y el propósito de los pavimentos permeables (lograr una percolación del agua a través de sus capas, sin perder capacidad portante ni estabilidad). Sin embargo, es de resaltar que en nuestro medio es factible poner en práctica los métodos constructivos reportados en la literatura, puesto que en general no requieren de un grado especialización muy elevado.

Adicionalmente no se encuentra literatura extensa en cuanto al mantenimiento de este tipo de pavimentos, la mayoría de recomendaciones encontradas corresponden a la recuperación de las capacidades de permeabilidad de las diferentes capas. Lo anterior implica que faltan métodos específicos para la rehabilitación, reemplazos específicos de componentes y toma de decisiones sobre acciones de mantenimiento.

9. RECOMENDACIONES

En este trabajo de grado se describen métodos de diseño de pavimentos porosos que utilizan un factor de seguridad general para incluir la colmatación para todos los casos en los que se quiere aplicar este sistema, basados en la frecuencia de mantenimiento que se le puede realizar a la zona. Sin embargo se debe tener en cuenta que tanto los métodos de diseño como la zona, los procedimientos de construcción, entre otros, pueden variar, por lo tanto se recomienda establecer un método que contemple la colmatación evaluando diferentes factores que afecten o aporten a la misma.

Haciendo la revisión correspondiente a la construcción de pavimentos porosos se encuentra que estos métodos se basan y se derivan en su totalidad en la construcción de pavimentos comunes (menos en el caso de adoquines), por lo tanto se deben establecer procedimientos y guías específicas tanto para la construcción de pavimento de concreto poroso como para la construcción de pavimento asfáltico y en especial procesos que se puedan aplicar en las principales ciudades de Colombia.

Debido a que el buen funcionamiento de pavimentos porosos es consecuencia del mantenimiento inicial de la estructura, los métodos constructivos que se desarrollen posteriormente para pavimentos porosos deben buscar la forma de evitar el mantenimiento inicial y así mismo asegurar la funcionalidad del sistema.

Para el mantenimiento de los pavimentos porosos, solo se encuentran listadas las acciones que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el mantenimiento del sistema, pero no se tienen en cuenta los pasos a seguir para realizar el procedimiento correctamente, por lo tanto se recomienda proponer un texto guía o manual específico acerca de los procesos que deben llevarse a cabo para el mantenimiento de la estructura y así mismo instruir en qué caso debe aplicarse o ejecutarse cada uno de los métodos establecidos en el documento con la finalidad de que ayude a la toma de decisiones sobre el mantenimiento de pavimentos porosos.

10. REFERENCIAS

- A.R.C. (2001). *Georgia Stormwater Managment Manual* (Primera edición., Vol. Vol 1: Stormwater Policy Guidebook). Estado de Georgia, Atlanta.
- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington DC.
- Aguado, A., Josa, A., & Pindado, M. (1995). Nuevas tendencias en los hormigones porosos. Presented at the VII Jornada del Hormigón, Barcelona.
- Altarejos García, L. (2007). Aplicación de sistemas de drenaje urbano sostenible en el desarrollo urbanístico de Paterna (Valencia). Presented at the V Congreso nacional de la ingeniería civil, Sevilla.
- Azzout, J.-R., Barraud, S., Cres, F., & Alfakih, E. (1994). Techniques alternatives en assainissement pluvial. *Paris: Tec et Doc*, 372 p.
- Bentarzi, Y., Terfous, A., Ghenaim, A., Wanko, A., Hlawka, F., & Poulet, J. . (2012). Hydrodynamic characteristics of a new permeable pavement material produced from recycled concrete and organic matter. *Urban Water Journal*.
- Bratieres, K., Fletcher, T. ., Deletic, A., Alcazar, L., Le Coustumer, S., & McCarthy, D. . (2008). Removal of nutrients, heavy metals and pathogens by stormwater biofilters (p. 10 p). Presented at the 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK.

- Castro Fresno, D., Rodríguez Hernández, J., Bayón, J. R., & Ballester Muñoz, F. (2005). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). *Revista Interciencia*, Vol. 30, Página Inicial: 255.
- CEDEX. (2008). Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano. *Centro de publicaciones de la secretaría general técnica del ministerio de fomento*, (ISBN 978-84-7790-475-5).
- Cermeño Solares, M. A. (2011). *Diseño de Tragantes*. Guatemala: Universidad de San Carlos.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- CIRIA. (2007). *The SUDS Manual*. Londres.
- Colandini, V. (1997). *Effets des structures-réservoirs à revêtement poreux sur les eaux pluviales: qualité des eaux et devenir des métaux lourds*. University of Pau, France.
- Corro, S., & Prado, G. (1999). Diseño estructural de pavimento asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. Retrieved from <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Media/CI-8.pdf>
- De Man, Van den Berg, Leenen, Schijven, Schets, Van der Vliet, ... Roda Husman. (2013). Quantitative assessment of infection risk from exposure to waterborne pathogens in urban floodwater. *Water Research*.

- Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas -DICTUC-. (1996). *Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos*. (Guía de diseño). Santiago de Chile.
- Dublin City Council. (2005). *Greater Dublin Strategic Drainage Study*. Dublin.
- ECOCRETO. (2010). Aclaraciones sobre el pavimento ecológico construido con ecocreto. Retrieved from <http://www.ecologiaenconcreto.com.mx/aclaraciones.pdf>
- EPA. (1980). *Porous Pavement* (Vol. Phase I- Design and Operational Criteria). United States.
- EPA. (1999). *Preliminary data summary of urban storm water* (p. 214). Washington DC.
- Ferguson, B. K. (2005). *Porous Pavements*.
- Fletcher, D., Deletic, A., Mitchell, G., & Hatt, B. (2008). Reuse of Urban Runoff in Australia: A Review of Recent Advances and Remaining Challenges. *Journal of Environmental Quality*, Vol 37, 116–127.
- Foley, M. (2013). Permeable Pavers Fulfill College's "Green" Wishes. *LandscapeOnline.com*. Retrieved from <http://www.landscapeonline.com/research/article/15100>
- García Haba, E. (2011). *Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos*. (Fin de Master). Universidad Politecnica de Valencia.

- Gómez González, G. ., Rodríguez Benavides, A. ., & Torres, A. (2010). Durabilidad de las capacidades filtrantes de la capa de rodadura de un pavimento poroso rígido. (p. 11 p). Presented at the XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.
- Gromaire-Mertz, M. ., Garnaud, S., González, A., & Chebbo, G. (1999). Characterisation of urban runoff pollution in Paris. *Water Science and Technology*, Vol XXXIX(núm 2), pp 1–8.
- Henonin, J., Russo, B., Mark, O., & Gourbesville, P. (2013). Real-time urban flood forecasting and modelling - a state of the art. *Journal of Hydroinformatics*, 20.
- HIDROCRETO. (2012). Sistemas para infiltrar o recuperar el agua pluvial por medio de pisos y pavimentos porosos. *Concreto Permeable Ecológico*. Retrieved from <http://www.concretopermeable.com/fichatecnica/hidrocreto.pdf>
- Interpave. (2008). Guide to the desing, contruction and maintenance of concrete block permeable pavements.
- Jefferies, C., Duffy, A., Berwick, N., McLean, N., & Hemingway, A. (2009). Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) treatment train assessment tool. *Water Science and Technology*.
- Kadurupokune, N., Jayasuriya, L. N. ., Othman, M., & Jesse, K. (2007). Contributing to the sustainable use of stormwater: the role of pervious pavements. *Water Science and Technology*, Vol LVI(núm 12), pp. 69–75.

- Kevern, J. (2008). *Advancement of pervious concrete durability*. (PhD). Dissertation Ames (IA) Iowa State University.
- Lai, S., & Sinha, K. C. (2003). Measures of Short-Term Effectiveness of Highway Pavement Maintenance. *Journal of Transportation Engineering*, Vol 129, N°6. Retrieved from http://www.ingenieria.peru-v.com/documentos/Del_mantenimiento_de_pavimentos.pdf
- Lake superior Duluth. (2007). Case Study: St. Germain's - Diamond-Vogel Parking Lot. Retrieved from <http://www.lakesuperiorstreams.org/stormwater/toolkit/pervpavecase.html>
- Lopes da Silveira, A. ., & AvruchGoldenfum, J. (2007). Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamiento de Dispositivos de Controle Pluvial naFonte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol 12.(núm 2.), pp. 157–170.
- Lozano Silva, R. ., & Niño Paredes, J. . (2003). *Estudio Hidráulico de Calzadas con Estructura de Reservorio*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Lucke, T., Beecham, S., Boogaard, F., & Myers, B. (2013). Are Infiltration Capacities of Clogged Permeable Pavements Still Acceptable? *Novatech 2013*.
- Lundy, L., Ellis, J. ., & Revitt, D. . (2011). Risk prioritisation of stormwater pollutant sources. *Water Research*.

- Luo, H., Luo, L., Huang, G., Liu, P., Li, J., Hu, S., ... Huang, X. (2009). Total pollution effect of urban surface runoff. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 1186–1193.
- Maine Department of Environmental Protection. (2012). Infiltration BMPs. *Maine Stormwater Best Management Practices Manual*. Retrieved from <http://www.maine.gov/dep/land/stormwater/stormwaterbmps/vol3/chapter6.pdf>
- Martínez de Azagra, A. (2010). Método de los coeficientes de escorrentía. Retrieved from www.oasification.com
- Maryland Stormwater Design Manual -MDE-. (2000). *Environmental Site Design*. Maryland.
- Matthews, R. ., Watt, W. ., Marsalek, J., Crowder, A. ., & Anderson, B. . (1997). Extending retention times in a stormwater pond with retrofitted baffles. *Water Quality Research Journal of Canada*, 1(32), 73–87.
- Ministerio de transporte de ontario (MTO). (2011). MTO's first pervious concrete pavemente trial. *Road Talk*. Retrieved from <http://www.mto.gov.on.ca/english/transtek/roadtalk/rt15-2/>
- MINVU. (1996). *Manual de Técnicas Alternativas Para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos*. Ministerio de la Vivienda y el Urbanismo del Gobierno de Chile, Santiago.
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería* (Segunda Edición.). Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Montejo Fonseca, A. (2001). *Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá*. Universidad Católica de Colombia.
- Montoya, G. (2005). *Ingeniería de tránsito*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.
- Mora, O., Alvarado, D., & Torres, A. (2011). Economic analysis of the application of porous pavements on Bogotá. Presented at the 12nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
- Mora, R. (2009). Reducción de la escorrentía superficial con el uso de pavimentos porosos y capas de recarga. Retrieved from <http://www.geologia.ucr.ac.cr/reduccion%20escorrentia.pdf>
- Mullaney, J., Jefferies, C., & Mackinnon, E. (2011). The performance of block paving with and without geotextile in the sub-base. Presented at the 12nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
- Niño Rivera, I., & Villamil, M. (2003). *Concreto poroso para pavimentos drenantes* (Especialista en Ingeniería de Pavimentos). Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- Paine, J. (1992). Portland cement pervious pavement construction. *Concrete Construction Journal-USA*.
- Pitt, R., Clark, S., & Parmer, K. (1994). *Potential Groudwater Contamination from Intentional and Nonintentional Stormwater infiltration*.
- Polanco Andrade, A., & Sánchez Vega, A. (2012). *Diseño hidráulico de losas en pavimento poroso rígido como estructuras complementarias al*

drenaje pluvial de Bogotá (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

- Proyectar Ingeniería. (2009). *Pavimento de adoquín*. Retrieved from http://www.contratos.gov.co/archivospuc1/2009/ACL/133001000/09-1-49341/ACL_PROCESO_09-1-49341_133001000_1432759.pdf
- René, J.-R., Madsen, H., & Mark, O. (2013). A methodology for probabilistic real-time forecasting - an urban case study. *Journal of Hydroinformatics*.
- Reyes, F., & Torres, A. (2002). Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes. *Ingeniería de construcción, Vol XVII*(Ejemplar 2), pp 93–102.
- Rodríguez Hernández, J. (2008). *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 tráfico ligero*. (Tesis Doctoral). Universidad de Cantabria.
- Saucedo Vidal, A. (2012). Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México.
- Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2006). Review of permeable pavement systems. *Science Direct, Building and Environment*.
- Shu, X., Huang, B., Wu, H., Dong, Q., & Burdette, E. G. (2011). Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 3187–3192.

- Smith, D. (2006). *Permeable Interlocking Concrete Pavements: Selection, Design, Construction, Maintenance*. (Tercera edición.). Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI). Canadá.
- Stormwater Center. (2009). *UNHSC Design Specifications for Porous Asphalt Pavement and Infiltration Beds*. University of New Hampshire. Retrieved from http://www.unh.edu/unhsc/sites/unh.edu.unhsc/files/pubs_specs_info/unhsc_pa_spec_10_09.pdf
- Tennis, P., Leming, L., & Akers, D. (2004). Pervious Concrete Pavements. *Portland Cement Association, Skokie, Illinois and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, Usa*, 36 pág.
- Torres, A. (2001). Alternativas técnicas de drenaje. *Acodal*, pp. 7–12.
- Torres, A., Ortega, D. H. M., & Daza, E. H. (2011). Propiedades filtrantes de los pavimentos porosos rígidos. Programa Editorial Universidad del Valle.
- U.S.D.A. (1985). *National Engineering Handbook* (Vol. Section 4-Hydrology).
- U.S.EPA. (2004). *Storm Best Management Practices Design Guide*. (Vol. Vol 1: General considerations). U.S Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- U.S.EPA. (2008). *Managing Stormwater in Your Community. Center for watershed protection*, (Publication No: 833-R-08-001).
- V.A.N.R. (2002). *The Vermont Stormwater Management Manual*. (Vol. Vol 1-Stormwater Treatment Standards).

- Watanabe, S. (1995). Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes. *Water Science and Technology*, 25–32.
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jeffries, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS Manual*. Londrés: Ciria Classic house.
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research*, 381–386.
- Zaetang, Y., Wongsas, A., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2013). Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 585–591.

11. ANEXOS

Anexo 1: Método de la curva envolvente

Anexo 2: Metodología Chile

Anexo 3: The SUDS Manual

Anexo 4: Método de las lluvias

Anexo 5: Método de los volúmenes.

Anexo 6: Ensayos para pavimentos porosos