

PAVIMENTOS PERMEABLES COMO ALTERNATIVA DE DRENAJE URBANO

MARIO LEANDRO CASTRO ESPINOSA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTA

2011

PAVIMENTOS PERMEABLES COMO ALTERNATIVA DE DRENAJE URBANO

MARIO LEANDRO CASTRO ESPINOSA

Trabajo de Grado

(Monografía)

Director:

Sandra Lorena Galarza Molina

I.C. MSc.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTA

2011

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 6 de Diciembre de 2011

CONTENIDO

pág.

1	INTRODUCCIÓN:	14
2	PROBLEMAS DEL DRENAJE URBANO:	15
2.1	IMPACTOS DE URBANIZACIÓN EN EL CICLO DEL AGUA:.....	15
2.2	DISMINUCIÓN EN LA CALIDAD DEL AGUA:.....	16
3	JUSTIFICACIÓN	18
4	OBJETIVOS	19
4.1	OBJETIVO GENERAL:	19
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	19
5	SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE:	20
5.1	NO ESTRUCTURALES:.....	20
5.2	ESTRUCTURALES:.....	21
5.2.1	<i>Franjas de pasto:</i>	22
5.2.2	<i>Trincheras:</i>	23
5.2.3	<i>Canales Vegetados:</i>	24
5.2.4	<i>Jardines de Bioretención:</i>	24
5.2.5	<i>Sistemas geo-celulares o modulares:</i>	25
5.2.6	<i>Filtros de arena:</i>	27
5.2.7	<i>Estanques de infiltración:</i>	28
5.2.8	<i>Estanques de detención:</i>	28
5.2.9	<i>Estanques:</i>	29
5.2.10	<i>Humedales artificiales:</i>	30
5.2.11	<i>Techos verdes:</i>	30
5.2.12	<i>Pavimentos permeables:</i>	31
6	PAVIMENTOS PERMEABLES:	32
6.1	DESCRIPCIÓN:	32
6.2	VENTAJAS Y DESVENTAJAS:.....	34

6.2.1	<i>Ventajas:</i>	35
6.2.2	<i>Desventajas:</i>	35
6.3	TIPOS DE PAVIMENTOS PERMEABLES:	35
6.3.1	<i>Pavimentos permeables en asfalto poroso:</i>	36
6.3.2	<i>Pavimentos permeables en concreto poroso:</i>	36
6.3.3	<i>Pavimentos permeables de adoquín y modulares:</i>	37
6.4	ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS:	37
6.4.1	<i>Concreto poroso:</i>	37
6.4.2	<i>Asfalto poroso:</i>	40
6.4.3	<i>Adoquines:</i>	42
6.4.4	<i>Módulos (Grasspave®, Gravelpave®, Turfstone™):</i>	43
6.5	MATERIALES EMPLEADOS EN LA CAPA DE TRANSICIÓN, SUB-BASE PERMEABLE, GEOTEXTIL, MEMBRANA IMPERMEABLE:	45
6.5.1	<i>Capa de transición:</i>	45
6.5.2	<i>Sub-base permeable:</i>	45
6.5.3	<i>Membrana impermeable:</i>	47
6.5.4	<i>Geotextil:</i>	47
6.6	PRINCIPIOS DE DISEÑO:.....	47
6.6.1	<i>Selección del tipo de sistema: infiltración total, parcial o cero:</i>	48
6.6.2	<i>Diseño hidráulico:</i>	49
6.6.3	<i>Diseño hidráulico mediante de software de drenajes:</i>	61
6.6.4	<i>Manejo en caso de eventos excedentes:</i>	61
6.6.5	<i>Diseño estructural:</i>	61
6.7	PROCESOS CONSTRUCTIVOS:.....	67
6.7.1	<i>Información básica del lugar de aplicación:</i>	67
6.7.2	<i>Durante la construcción:</i>	67
6.7.3	<i>Preparación de la subrasante:</i>	68
6.7.4	<i>Cuidados de la membrana impermeable:</i>	68
6.7.5	<i>Cuidados del geotextil:</i>	68
6.7.6	<i>Compactación de la sub-base permeable:</i>	69
6.7.7	<i>Compactación de la capa de transición:</i>	69
6.7.8	<i>Cuidados de la capa de rodadura:</i>	69
6.8	MANTENIMIENTO:.....	70
7	EJEMPLOS DE APLICACIÓN:.....	71
8	APLICABILIDAD PARA BOGOTÁ:.....	76

8.1	SITIO DE DISEÑO:	76
8.2	CARACTERÍSTICAS DEL SITIO:	77
8.2.1	<i>Tipo de suelo (subrasante):</i>	77
8.2.2	<i>Diseño hidráulico:</i>	77
8.2.3	<i>Diseño estructural:</i>	81
8.2.4	<i>Espesores de diseño:</i>	82
8.2.5	<i>Observación:</i>	83
9	CONCLUSIONES:	84
10	REFERENCIAS:	86

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
<i>Imagen 1. Efectos de la impermeabilización en la escorrentía y en la infiltración. (Adaptado de: Metropolitan Council, 2003).</i>	16
<i>Imagen 2. Impactos de la urbanización en el ciclo del agua (Fuente: Torres, 2004).</i>	17
<i>Imagen 3. Franja de pasto y trinchera (Fuente: Melbourne water: http://wsud.melbournewater.com.au)</i>	23
<i>Imagen 4. Trinchera (Fuente: Center for Sustainable Communities: http://www.csc.temple.edu/tvssi/images/survey_BMP/delaware_countycc/dccc_2008_infiltration_tren.jpg)</i>	23
<i>Imagen 5. Canal vegetado: (Fuente: Thomas Engineering PA: http://www.thomasengineeringpa.com/images/Swale%202.JPG)</i>	24
<i>Imagen 6. Área de bioretencion (Fuente: PRIDE: http://www.protectedwithpride.org/images/newimagesgifsaugust0104/BIO.2.JPG)</i>	25
<i>Imagen 7. Amortiguamiento de aguas lluvias mediante módulos plásticos (Fuente: Hydro International: http://www.esi.info/zoom.cfm?image=Hydro_International_Stormcell_stormwater_storage_5.jpg&caption=Stormcell attenuation tanks&logo=28683_1313748611626_LG.jpg)</i>	26
<i>Imagen 8. Modular box (Fuente: PAVCO: http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=147)</i>	26
<i>Imagen 9. Honeycomb. (Fuente: Boddingtons Ltd: http://www.boddingtons-ltd.com/civil/images/tree-root-protection2.jpg)</i>	26
<i>Imagen 10. Sección típica de un filtro de arena (Adaptado de: CIRIA, 2007)</i>	27
<i>Imagen 11. Filtro de arena (fuente: City of Sandy: http://www.ci.sandy.or.us/vertical/Sites/%7B08758F4D-2A53-4D1D-B7C5-B13B658BB891%7D/uploads/%7BC57C9F2E-F9B4-4E96-B8C0-FAB02208981F%7D.JPG)</i>	27

<i>Imagen 12. Estanque de Infiltración (Fuente: Stormwater Partners: http://www.stormwaterpartners.com/facilities/images/InfiltrationBasin1.jpg.....</i>	<i>28</i>
<i>Imagen 13. Cuenca de detención (Fuente: Wikipedia: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/4/47/Boneyard_Detention_Basin.jpg)</i>	<i>29</i>
<i>Imagen 14. Estanque artificial (Fuente: Minnesota Department of Agriculture: http://www.mda.state.mn.us/protecting/conservation/practices/~media/Images/protecting/practices/wetlandconst.ashx?w=300&h=284&as=1)</i>	<i>29</i>
<i>Imagen 15. Humedal artificial (Fuente: Madri+d noticias: http://www.madrimasd.org/gestion2006/img/Noticias/analisis220306Fig3.jpg)</i>	<i>30</i>
<i>Imagen 16. Techos verdes (Fuente: MIRAVERDE: http://www.miraverde.com/DSC02987.JPG) ...</i>	<i>31</i>
<i>Imagen 17. Pavimento Asfalto Poroso (Fuente: Aggregate Industries: http://www.aggregate.com/PageFiles/2764/suds-TypicalDesign.jpg).....</i>	<i>31</i>
<i>Imagen 18. Influencia de la urbanización en el drenaje natural. (Adaptado de: Interpave, 2008). ..</i>	<i>32</i>
<i>Imagen 19. Estructura del pavimento permeable de total infiltración. (Adaptado de: Interpave, 2008).</i>	<i>33</i>
<i>Imagen 20. Estructura del pavimento permeable de infiltración parcial. (Adaptado de: Interpave, 2008).</i>	<i>34</i>
<i>Imagen 21. Estructura del pavimento permeable de infiltración 0. (Adaptado de: Interpave, 2008).</i>	<i>34</i>
<i>Imagen 22. Concreto poroso (Fuente: perviouspavement.org)</i>	<i>38</i>
<i>Imagen 23. Asfalto poroso (fuente: motor.terra.es/galerias-coches/html/la-seguridad-vial-del-futuro-en-traffic-2009-2.htm)</i>	<i>41</i>
<i>Imagen 24. Juntas filtrantes en pavimentos de adoquín. (Adaptado de: Interpave, 2008).</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 25. Pavimento Grasspave® y Gravelpave® (Fuente: invisiblestructures.com)</i>	<i>44</i>
<i>Imagen 26. Pavimento Turfstone™ (Fuente: idealconcreteblock.com)</i>	<i>44</i>
<i>Imagen 27. Metodología de diseño de pavimentos permeables (Adaptado de Interpave, 2008). ...</i>	<i>48</i>

<i>Imagen 28. Grafico para obtención del coeficiente de seguridad de colmatación (Fuente: MINVU, 1996).</i>	57
<i>Imagen 29. Espesores de la capa de almacenamiento para el caso infiltración total y parcial (Adaptado de Interpave, 2008).</i>	64
<i>Imagen 30. Espesores de la capa de almacenamiento para el caso infiltración cero (Adaptado de Interpave, 2008).</i>	65
<i>Imagen 31. Pavimento permeable en la plaza principal de Soyalo en el estado de Chiapas, México (Fuente: Concreto Permeable: http://www.concretopermeable.com/fichatecnicahidrocreto.pdf).....</i>	71
<i>Imagen 32. Pavimento permeable en asfalto poroso en el estacionamiento de la planta de Schnyder Electric en Tlaxcala, México (Fuente: Concreto Permeable: http://www.concretopermeable.com/fichatecnicahidrocreto.pdf)</i>	71
<i>Imagen 33. Pavimento permeable en asfalto poroso frente al hotel Intercontinental de Zapopan, Jalisco (México) (Fuente: Eco Concreto: http://www.ecologiaenconcreto.com.mx/aclaraciones.pdf)</i>	72
<i>Imagen 34. Pavimento permeable en asfalto poroso en Ontario Canadá (Fuente: Ministerio de Transporte de Ontario: http://www.mto.gov.on.ca/english/transtek/roadtalk/rt15-2/).....</i>	72
<i>Imagen 35. Contraste entre Pavimento permeable en asfalto poroso al fondo de la imagen, y pavimento convencional al frente, en la Universidad de Carolina del Norte, USA (Fuente: Green Counsel: http://nylawline.typepad.com/greencounsel/2006/09/they_paved_para_1.html).....</i>	73
<i>Imagen 36. Pavimento permeable en adoquine en la escuela secundaria Benito Juárez en Chicago, Illinois (Fuente: Steven Can Plan: http://www.stevencanplan.com/tag/bioswale/)</i>	73
<i>Imagen 37. Pavimento permeable en adoquin en Stonehill private Catholic liberal arts college, Boston (Fuente: Land Scape Online: http://www.landscapeonline.com/research/article/15100).</i>	74
<i>Imagen 38. Pavimento permeable en adoquin en St. Germain's – Diamond-Vogel Parking Lot, 17th Ave East & London Rd Duluth, Minnesota (Fuente: Lake superior Streams: http://www.lakesuperiorstreams.org/stormwater/toolkit/pervPaveCase.html).....</i>	74

Imagen 39. Aplicación de pavimentos en concreto poroso para estacionamientos en el Campus San Joaquín de la Universidad Católica de Chile (Fuente: Centro de Aguas Urbanas: <http://www.centroaguasurbanas.cl/docimagenes-piloto.htm>) 75

Imagen 40. Aplicación de pavimento permeable en adoquines de concreto poroso en el Centro de Eventos y Convenciones Espacio Riesco en Santiago de Chile (Fuente: Centro de Aguas Urbanas: <http://www.centroaguasurbanas.cl/documentos/UsodePavimentosPermeablesRevistaBIT.pdf>) 75

Imagen 41. Ubicación geográfica del sitio de diseño (Fuente: Googlemaps: <http://maps.google.com/>)..... 76

Imagen 42. Plano del sitio de aplicación. (Fuente: Pedro Gómez, ANEXO 2) 79

LISTA DE TABLAS

pág.

<i>Tabla 1. Granulometría concreto hidráulico poroso (adaptado de: ASTM, 2011).</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 2. Diseño de mezcla usado para la fabricación de concreto poroso. (Adaptado de: Tennis et al, 2004).....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3. Granulometría concreto de asfalto poroso (Adaptado de: Cahill et al, 2003).....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4. Propiedades de los agregados pétreos para asfalto poroso (Adaptado de NAPA, 2003). 42</i>	
<i>Tabla 5. Material de llenado de celdas en pavimentos Grasspave® y Gravelpave® (Adaptado de www.invisiblestructures.com).</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 6. Granulometría capa de transición. (Adaptado de Interpave, 2008).</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 7. Granulometría sub-base permeable. (Adaptado de Interpave, 2008).</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 8. Selección del tipo de sistema según características de la subrasante (Adaptado de: CIRIA, 2007).</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 9. Datos de permeabilidad y capacidad portante de suelos (Adaptado de: CIRIA, 2007).</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 10. Numero de la curva CN de escorrentía para áreas urbanas (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 11. Numero de curva de escorrentía para tierras agrícolas cultivadas (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 12. Numero de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 13. Selección del tipo de carga (Adaptado de Interpave, 2008).</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 14. Ajuste a los espesores en caso de CBR menor a 5% (Adaptado de Interpave ,2008). ...</i>	<i>66</i>

Tabla 15. Datos de la curva IDF para la estación Guaymaral (Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá: ANEXO 1)..... 78

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Especificaciones para cemento Portland (Standard Specification for Portland Cement).

Anexo 2. Especificaciones para concreto reforzado con fibras (Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete).

Anexo 3. Especificaciones de aditivos químicos para concreto (Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete).

Anexo 4. Curvas IDF para cada estación existente en Bogotá, del EAAB.

Anexo 5. Planos arquitectónicos para el sitio de diseño.

1 Introducción:

Debido a los efectos que se presentan por el cambio climático, la implementación de sistemas amigables con el medio ambiente como Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible cada día cobran más importancia. Conocer y utilizar estos métodos hace un aporte al mejoramiento del medio ambiente y la calidad de vida de los seres del planeta (Ferguson, 2005). Respecto a la implementación de pavimentos permeables se han obtenido grandes ventajas en los países industrializados, los beneficios que se han logrado son los siguientes: la recarga de acuíferos (principal fuente de agua en países europeos), el amortiguamiento de la lluvia, el aprovechamiento de la misma, y un aumento en la seguridad vial al evitar zonas de encharcamiento y congelamiento (CIRIA, 2007).

Diversas aplicaciones y métodos se han ido desarrollando desde los años 80 en Europa, Norte América y Australia (Ferguson, 2005; CIRIA, 2007; Fletcher *et al.*, 2008) pero cada una de estas se ha orientado a regímenes hidrológicos propios, haciendo de estos insuficientes para su implementación a nivel mundial. A través de este documento se pretende mostrar el estado del arte de los pavimentos permeables, generar la unificación de estos conocimientos y adaptarlos a las características de cualquier zona, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que estos podrían conllevar. Un diseño adaptado a la ciudad de Bogotá, en una de las zonas con alto riesgo de inundación, mostrara la posibilidad de implementar o no el sistema.

2 Problemas del drenaje urbano:

A través de los años, varios adelantos en la hidrología urbana se han desarrollado derivados del análisis de las relaciones entre la ciudad y el ciclo del agua (Torres, 2004). Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible son una idea que surge en Europa y Estados Unidos a principios de la década de los 80's, como una forma alternativa al drenaje de aguas lluvias convencional. Este concepto tiene como objetivo minimizar los impactos en el ciclo hidrológico derivados del desarrollo urbano y cambiar el paradigma que las aguas lluvias son un molesto problema que se soluciona desasiéndose de ellas rápidamente, capturándolas y evacuándolas hacia algún lugar aguas abajo (CIRIA, 2007).

2.1 Impactos de urbanización en el ciclo del agua:

El más fuerte impacto que se presenta debido el desarrollo urbanístico es el aumento de las zonas impermeables y la deforestación, lo que genera una disminución en la capacidad de infiltrar, retener, evaporar y transpirar el agua lluvia. Por otra parte la alteración en la topografía y el aumento de zonas con poca rugosidad causan un crecimiento en la velocidad de la escorrentía, todos estos cambios se resumen en un aumento en la probabilidad de ocurrencia de inundaciones al verse excedida la capacidad y el tiempo de drenaje (CIRIA, 2007). La imagen 1 muestra un ejemplo del cambio del ciclo hidrológico a través del tiempo con el aumento de las zonas impermeables.

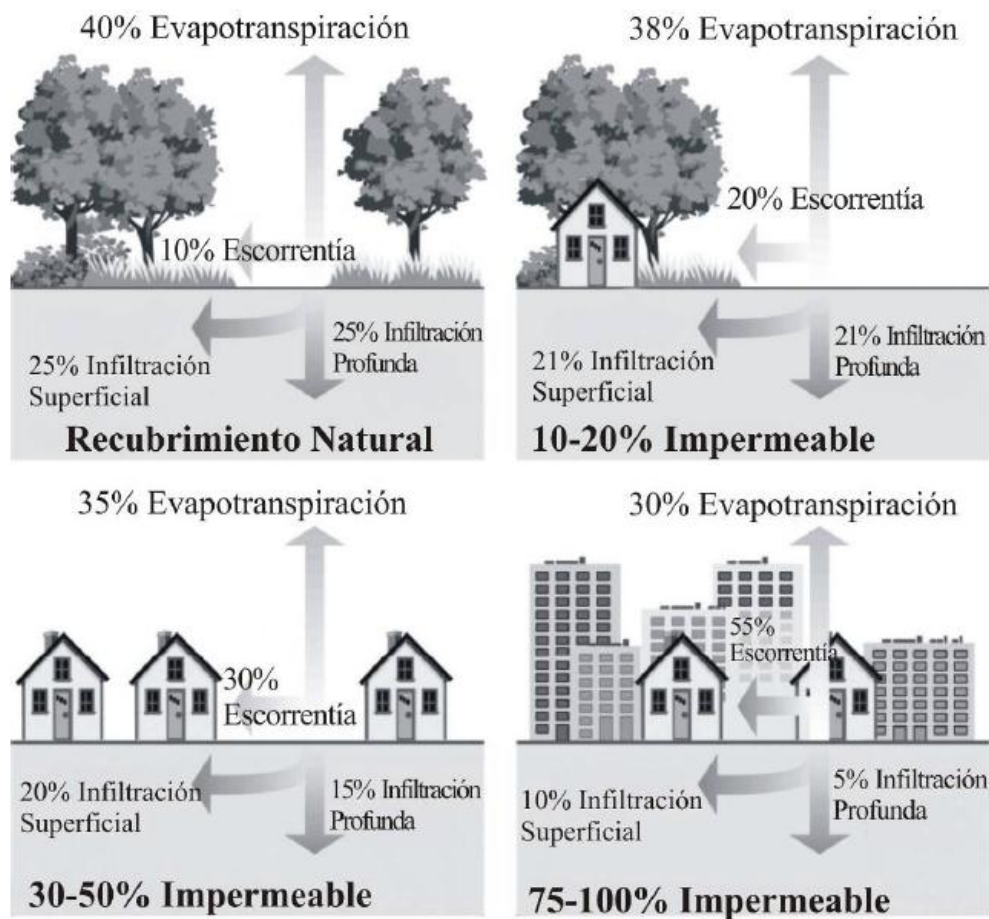


Imagen 1. Efectos de la impermeabilización en la escorrentía y en la infiltración. (Adaptado de: Metropolitan Council, 2003).

2.2 Disminución en la calidad del agua:

Otro fuerte impacto de la urbanización es el que afecta directamente la calidad del agua. A medida que el hombre hace uso del agua, esta se va contaminando con aceites, sedimentos, detergentes, metales pesados, fertilizantes, patógenos, plaguicidas, basuras, entre otros. Dicha disminución en la calidad del agua se convierte en un problema de salud pública y un deterioro del medio ambiente. Lo anterior, se agravara aun más si se quitan barreras que puedan ir deteniendo los contaminantes (por ejemplo, el filtro natural que proporcionan algunos suelos) y en la mayoría de los casos estos viajan a los grandes cuerpos de agua sin que nada

les detenga (CIRIA, 2007). La imagen 2 es una grafica que los impactos de la urbanización en ciclo del agua.

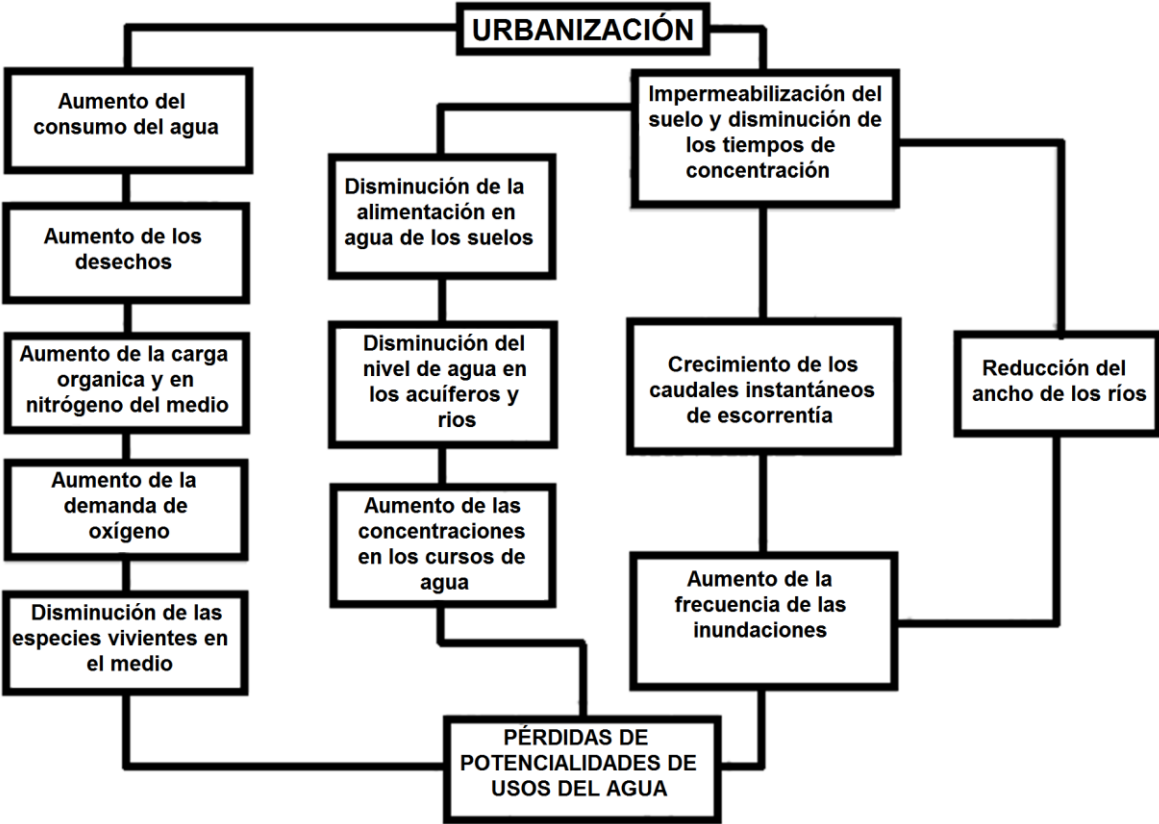


Imagen 2. Impactos de la urbanización en el ciclo del agua (Fuente: Torres, 2004).

3 Justificación

La implementación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible ayudan a contrarrestar los efectos negativos de la urbanización en el ciclo hidrológico. Por medio de estos se mejora la calidad del agua lluvia en el sitio donde se produce, se puede obtener beneficio gracias al almacenamiento, no solo para el aprovechamiento del agua en las actividades diarias, sino en el control de inundaciones que con el cambio climático y la impermeabilidad de las zonas urbanizadas día a día se hace más presente (Ferguson, 2005).

Por lo tanto, los pavimentos permeables pueden llegar a ser parte de la solución a los problemas de inundaciones, debido a que el 70 por ciento de las zonas urbanizadas están constituidas por vías (Ferguson, 2005). Esta es la razón de ser de esta monografía, por una parte encontrar y unificar métodos actuales de diseño que se adapten a las características propias de nuestro país, pero también, impulsar la investigación e implementación de este sistema, con el fin de contrarrestar los problemas en la calidad de vida y salud pública que los desbordamientos de ríos y las inundaciones traen a la población Colombiana.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general:

- Describir y analizar los pavimentos permeables como sistema alternativo para el drenaje urbano.

4.2 Objetivos específicos:

- Establecer el estado de arte de los pavimentos permeables como alternativa para el drenaje de aguas lluvias.
- Analizar y comparar los requerimientos de diseño de los pavimentos permeables como técnica alternativa de drenaje urbano.
- Identificar las metodologías de diseño de pavimentos permeables aplicables a Bogotá.

5 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible:

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible son conocidos como SUDS (*Sustainable Urban Drainage Systems*) en el Reino Unido, BMPs (*Best Management Practices*) en Estados Unidos o Mejores Prácticas de Control (MPC) en los países hispano parlantes (Jiménez, 1999).

Los SUDS minimizan los impactos en el ciclo hidrológico por medio de prácticas de control en la fuente, reduciendo la entrada de contaminantes a las aguas lluvias de escorrentía, y de prácticas que incentivan el manejo del agua lluvia en el lugar donde se producen, realizando tratamientos temporales, fomentando la detención y la infiltración. Al ocurrir esto, los medios convencionales de drenaje aguas abajo de los nuevos sistemas mantendrían su capacidad total de drenaje al no verse excedido en ningún momento su caudal de diseño. (CIRIA, 2007; Delleur, 2003; Durrans, 2003).

Además del ya nombrado beneficio al control de inundaciones, se tienen muchos otros tales como, la mejora en la calidad del agua, fomento de la recarga de acuíferos mediante procesos que permiten la percolación, y proporcionan comodidades y beneficios a la vida silvestre pues varias de sus técnicas recrean zonas verdes en donde se pueden desarrollar hábitats y fomentar el aumento de la biodiversidad (CIRIA, 2007).

Los SUDS se pueden clasificar en medidas no estructurales y estructurales, entendiéndose las primeras como acciones que se pueden realizar sin necesidad de elaborar una obra de tipo civil (Durrans, 2003).

5.1 No estructurales:

Las medidas no estructurales son prácticas que buscan concientizar al ciudadano de hacer un mejor uso del agua y sus desechos, generando unas reglas de control

en la fuente generadora de contaminación, entre las principales prácticas se encuentran (Durrans, 2003):

- Hacer conciencia del problema.
- Identificar principales contaminantes.
- Generar un cambio de hábitos en hogares e industrias.
- Planificar y diseñar minimizando las superficies impermeables para reducir la escorrentía.
- Incentivar la limpieza frecuente de superficies impermeables y sumideros para reducir la acumulación de contaminantes.
- Controlar la aplicación de herbicidas y fungicidas en parques y jardines.
- Evitar el arrastre de sedimentos de zonas en obra.
- Proporcionar procedimientos de limpieza de vertidos mediante técnicas secas.
- Evitar en lo posible el contacto del agua lluvia con contaminantes.
- Separar las aguas pluviales de aguas residuales.
- Almacenar y reutilizar el agua lluvia

5.2 Estructurales:

Son estructuras de bajo impacto ambiental que contribuyen al diseño paisajístico, generan una disminución de las áreas impermeables, minimizan la escorrentía superficial mediante; la infiltración, la retención temporal y la percolación. Y favorecen el mejoramiento de la calidad del agua (Centro de aguas urbanas Chile, 2011; CIRIA, 2007), los principales sistemas y sus características son:

- Franjas de pasto
- Trincheras
- Canales Vegetados
- Jardines de Bioretención

- Sistemas geo-celulares o modulares
- Filtros de arena
- Estanques de infiltración
- Estanques de detención
- Estanques
- Humedales artificiales
- Techos verdes
- Pavimentos permeables

A continuación se hará una breve descripción de cada uno:

5.2.1 Franjas de pasto:

Son franjas de pasto densamente vegetadas con poca pendiente, creadas con el fin de mejorar la calidad del agua a través del proceso de filtración y de sedimentación que sufre la escorrentía al pasar por el sistema. Estas franjas a menudo funcionan como pre tratamiento y se combinan comúnmente con trincheras y estanques para disminuir los riesgos de colmatación y aumentar la vida útil de las mismas. Una de las ventajas más importantes de las franjas de pasto es que no necesitan un mantenimiento para evitar la colmatación, pues las partículas contaminantes una vez sedimentadas o filtradas son absorbidas por la vegetación (Centro de aguas urbanas Chile, 2011; CIRIA, 2007), típicamente las franjas de pasto se combinan con trincheras como se muestra en la imagen 3.



Imagen 3. Franja de pasto y trinchera (Fuente: Melbourne water: <http://wsud.melbournewater.com.au>)

5.2.2 Trincheras:

Las trincheras son excavaciones de poca profundidad rellenas con grava gruesa, generando una zona de almacenamiento temporal de agua, su evacuación se realiza por medio de la percolación o por medio de tubería perforada. Este sistema está diseñado para recibir el flujo de manera lateral (idealmente de franjas de pasto), y proporciona un aumento en la calidad del agua mediante el filtrado (Centro de aguas urbanas Chile, 2011; CIRIA, 2007), en la imagen 4 se muestra la construcción de una trinchera.



Imagen 4. Trinchera (Fuente: Center for Sustainable Communities: http://www.csc.temple.edu/tvssi/images/survey_BMP/delaware_countycc/dccc_2008_infiltration_tren.jpg)

5.2.3 Canales Vegetados:

Son estructuras longitudinales completamente vegetadas usadas para amortiguar, almacenar y transportar el agua lluvia, mediante escurrimiento de tipo laminar o percolación en zonas donde el terreno lo permita. Este tipo de estructuras generan un aumento en la calidad del agua por medio de la sedimentación, debido al flujo laminar los sólidos suspendidos caen por su propio peso (CIRIA, 2007), un ejemplo de canal vegetado se observa en la imagen 5.



Imagen 5. Canal vegetado: (Fuente: Thomas Engineering PA: <http://www.thomasengineeringpa.com/images/Swale%202.JPG>)

5.2.4 Jardines de Bioretención:

Son zonas de baja profundidad, suelen ser depresiones o jardines usados para el amortiguamiento y tratamiento primario de las aguas lluvias, mediante las propiedades químicas y físicas de las plantas. Estos sistemas involucran procesos de sedimentación, absorción, percolación (donde el suelo lo permite), evaporación, descomposición y bioremediación (proceso para degradar los contaminantes mediante plantas) para aumentar la calidad del agua lluvia (Prince George's County, 2001), la imagen 6 muestra un ejemplo de jardín de bioretención.



Imagen 6. Área de bioretencion (Fuente: PRIDE: <http://www.protectedwithpride.org/images/newimagesgifsagust0104/BIO.2.JPG>)

5.2.5 Sistemas geo-celulares o modulares:

Los sistemas geo-celulares pueden ser instalados en cualquier parte y son usados para amortiguar o almacenar el agua lluvia, estos sistemas pueden ser pozos de absorción o volúmenes de almacenamiento. Son resistentes a cargas de tráfico por lo cual se pueden mezclar con el sistema de pavimentos permeables (véase capítulo 5.5.2) (para optimizar sus resultados) y ser usados bajo vías o estacionamientos. La gran ventaja de los sistemas modulares es su alta capacidad de almacenamiento pues cada módulo tiene una relación de vacíos de 94% (CIRIA, 2007) la imagen 7 muestra un ejemplo de sistemas geo-celular combinado con pavimento poroso.

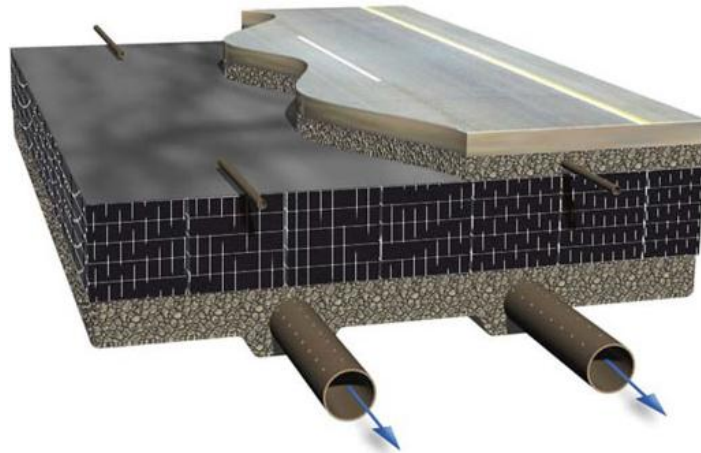


Imagen 7. Amortiguamiento de aguas lluvias mediante módulos plásticos (Fuente: Hydro International: [http://www.esi.info/zoom.cfm?image=Hydro_International_Stormcell_stormwater_storage_5.jpg&caption=Stormcell attenuation tanks&logo=28683_1313748611626_LG.jpg](http://www.esi.info/zoom.cfm?image=Hydro_International_Stormcell_stormwater_storage_5.jpg&caption=Stormcell%20attenuation%20tanks&logo=28683_1313748611626_LG.jpg))

Los sistemas geo-celulares se dividen en dos categorías básicas:

A. "Modular Box" que son módulos rectangulares (CIRIA, 2007), imagen 8.

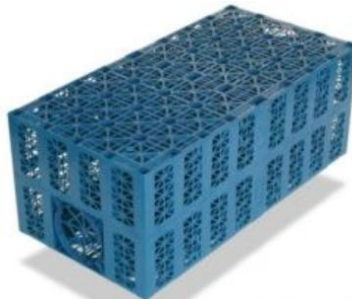


Imagen 8. Modular box (Fuente: PAVCO: <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=147>)

B. "Honeycomb" estructuras con formas hexagonales (CIRIA, 2007), imagen 9.



Imagen 9. Honeycomb. (Fuente: Boddingtons Ltd: <http://www.boddingtons-ltd.com/civil/images/tree-root-protection2.jpg>)

5.2.6 Filtros de arena:

Los filtros de arena son un sistema que se utiliza para el amortiguamiento del agua lluvia y para el tratamiento de la misma, estos filtros de arena son muy populares en EEUU. Se deben diseñar de tal manera que su mantenimiento sea fácil y de bajo costo. Este sistema consta de una excavación aislada la cual se llena con grava, luego se instala un geotextil, para finalmente llenar con arena hasta el tope de la parte interior, con el fin de evitar la migración de finos hacia la tubería perforada. En la superficie se puede recubrir con grava o piedra para evitar la contaminación del aire con partículas arenosas (CIRIA, 2007), la imagen 10 es un perfil básico de un filtro de arena y la imagen 11 muestra un ejemplo de este sistema.

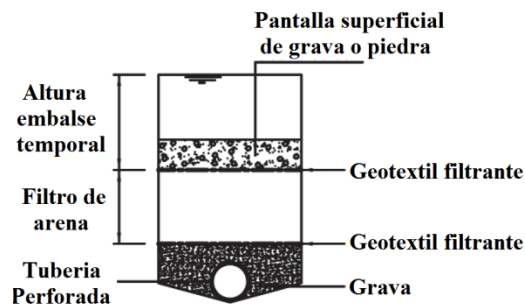


Imagen 10. Sección típica de un filtro de arena (Adaptado de: CIRIA, 2007)



Imagen 11. Filtro de arena (fuente: City of Sandy: <http://www.ci.sandy.or.us/vertical/Sites/%7B08758F4D-2A53-4D1D-B7C5-B13B658BB891%7D/uploads/%7BC57C9F2E-F9B4-4E96-B8C0-FAB02208981F%7D.JPG>)

5.2.7 Estanques de infiltración:

Son estructuras que almacenan el agua lluvia temporalmente y la evacuan por medio de la percolación ayudando de esta manera a la recarga de acuíferos (EPA, 1999). Estas obras pueden ser implementadas en pequeños espacios tales como patios, parques y zonas verdes. Los estanques deben ser construidos en terrenos donde el nivel freático sea profundo con respecto al fondo, para asegurar que el agua filtre a través del suelo (Mays, 2001; CIRIA, 2007), la imagen 12 es ejemplo de un estanque de infiltración.



Imagen 12. Estanque de Infiltración (Fuente: Stormwater Partners: <http://www.stormwaterpartners.com/facilities/images/InfiltrationBasin1.jpg>)

5.2.8 Estanques de detención:

Son estructuras diseñadas para amortiguar los volúmenes de escorrentía de agua lluvia y debido a la pérdida de velocidad en el flujo se presenta un proceso de sedimentación que aumenta la calidad del agua. Las estructuras de este tipo se pueden implementar en zonas donde no se tiene un uso específico, al cual una vez implementado el sistema se le podría dar un uso recreacional o paisajístico, ya que a diferencia de las estanques de infiltración esta mantiene el agua embalsada la mayor parte del tiempo (CIRIA, 2007), como se observa en la imagen 13.



Imagen 13. Cuenca de detención (Fuente: Wikipedia: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/4/47/Boneyard_Detention_Basin.jpg)

5.2.9 Estanques:

Son embalses artificiales permanentes de agua lluvia, que tiene entre 1 y 2m de profundidad, los cuales cuentan con vegetación emergente y sumergida. Este tipo de estanques están diseñado para garantizar la retención del agua en largos periodos de lluvia. En ellos se desarrollan procesos de sedimentación y absorción de nutrientes por parte de las plantas, lo que aumenta la calidad del agua (CIRIA, 2007), la imagen 14 muestra un ejemplo de estanque.



Imagen 14. Estanque artificial (Fuente: Minnesota Department of Agriculture: <http://www.mda.state.mn.us/protecting/conservation/practices/~media/Images/protecting/practices/wetlandconst.ashx?w=300&h=284&as=1>)

5.2.10 Humedales artificiales:

Son sistemas desarrollados con zonas pantanosas, diseñados para almacenar el agua de escorrentía. Estos proporcionan un beneficio paisajístico, ecológico y recreativo dentro de las zonas urbanizadas. El funcionamiento de los humedales artificiales se basa en almacenar agua por encima de los niveles de agua permanente, niveles mínimos que se deben mantener para garantizar la sobrevivencia de la vegetación acuática y los microorganismos (CIRIA, 2007), la imagen 15 muestra un ejemplo de humedal artificial.



Imagen 15. Humedal artificial (Fuente: Madri+d noticias: <http://www.madrimasd.org/gestion2006/img/Noticias/analisis220306Fig3.jpg>)

5.2.11 Techos verdes:

Este sistema consiste en capas de vegetación que recubren tejados y terrazas. Su funcionamiento se basa en hacer una mayor retención del agua lluvia (amortiguamiento de caudales). Por otro lado, debido a las propiedades que tiene la vegetación, al pasar por el sistema el agua lluvia sufre un proceso de filtración lo que aumenta su calidad, otro beneficio que proporciona el uso de los techos verdes es el aislamiento del calor, generando una disminución en la temperatura ambiente al interior de los hogares. Como desventaja principal se tiene, la incrustación de raíces en el tejado y la generación de humedades, lo que puede

ser contrarrestado con una muy buena impermeabilización. Para su diseño se debe tener en cuenta, la capacidad portante de la superficie a cubrir y la resistencia a la penetración de raíces (CIRIA, 2007) la imagen 16 muestra un ejemplo de techos verdes.



Imagen 16. Techos verdes (Fuente: MIRAVERDE: <http://www.miraverde.com/DSC02987.JPG>)

5.2.12 Pavimentos permeables:

Hacen parte de los sistemas estructurales de las técnicas alternativas de drenaje urbano, y como son el objeto de este documento serán explicados de manera detallada en el capítulo siguiente, en la imagen 17 se observa un perfil de un pavimento en concreto permeable.

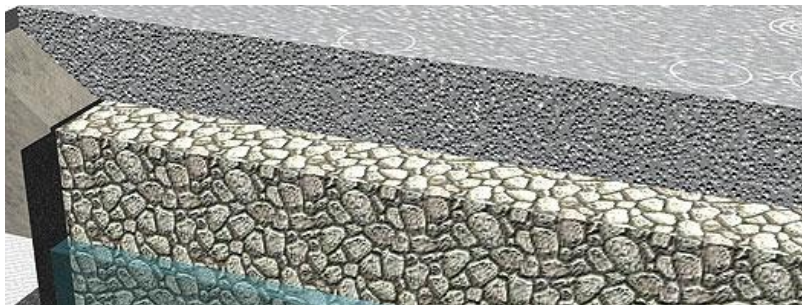


Imagen 17. Pavimento Asfalto Poroso (Fuente: Aggregate Industries: <http://www.aggregate.com/PageFiles/2764/suds-TypicalDesign.jpg>)

6 Pavimentos permeables:

6.1 Descripción:

Los pavimentos permeables nacen como una forma alternativa de mitigación de la escorrentía superficial y los caudales pico (generadores de inundaciones), en las zonas urbanizadas en las cuales la cuenca ha perdido su permeabilidad, como se muestra en la imagen 18. El objetivo de estos sistemas es generar zonas donde el agua se infiltre o se almacene amortiguando la cantidad de agua lluvia precipitada y aumentando los tiempos de concentración de la misma. Se recomienda su uso en zonas de baja pendiente, con poco tráfico tales como estacionamientos, vías con tráfico ligero u ocasional, y andenes, entre otros, en los que su nivel freático se encuentre muy por debajo del fondo de la zona de almacenamiento para que este no interfiera ni disminuya el volumen de acopio (Legret *et al.*, 1999; EPA, 1999).

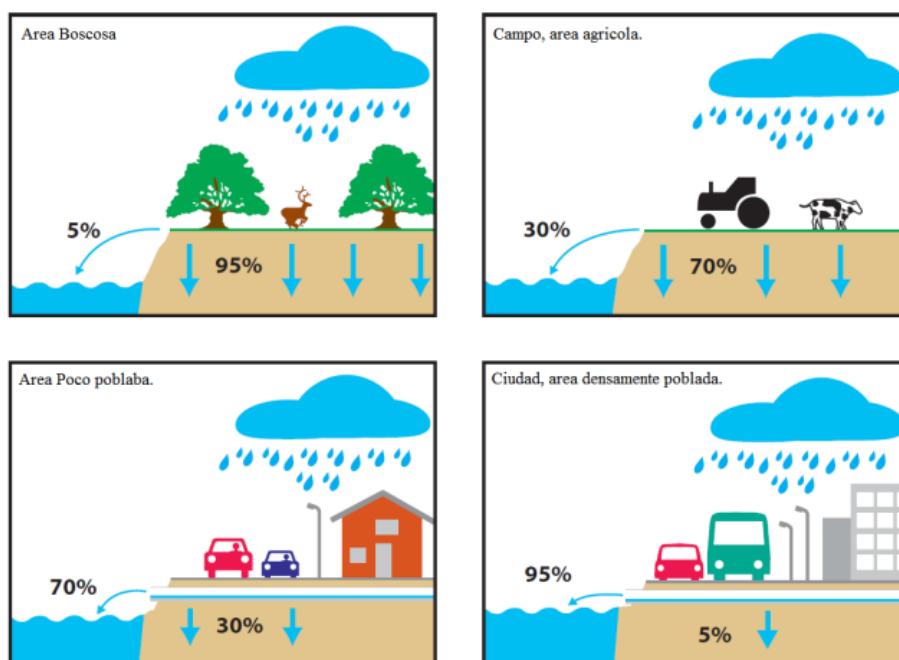


Imagen 18. Influencia de la urbanización en el drenaje natural. (Adaptado de: Interpave, 2008).

La estructura de los pavimentos permeables consiste generalmente de tres capas: (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).

La sub-base se puede utilizar para infiltrar y retener el agua parcial o completamente como se muestra en las imágenes 19, 20 y 21. En el caso de la infiltración, el suelo natural (subrasante) 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).

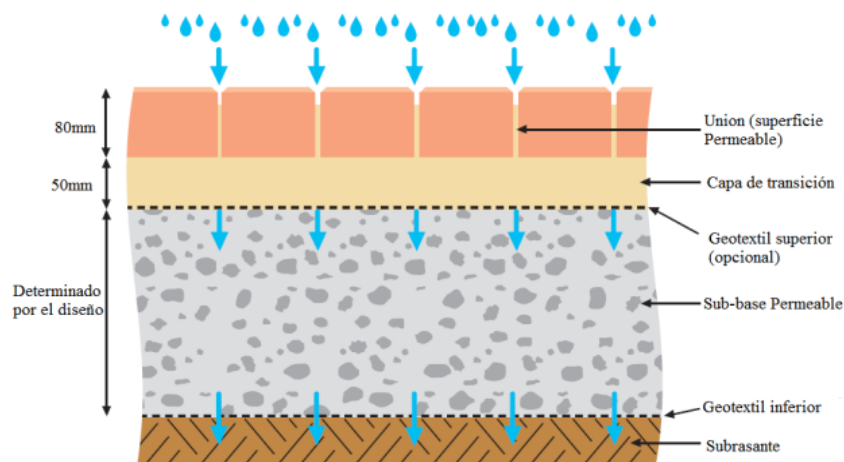


Imagen 19. Estructura del pavimento permeable de total infiltración. (Adaptado de: Interpave, 2008).

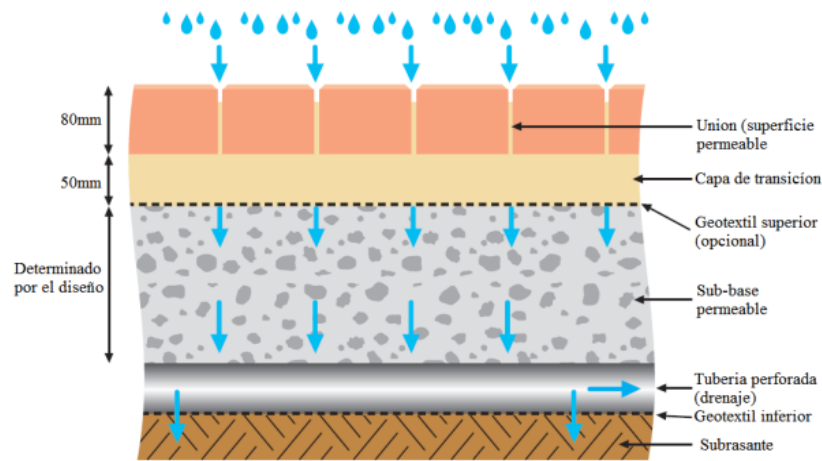


Imagen 20. Estructura del pavimento permeable de infiltración parcial. (Adaptado de: Interpave, 2008).

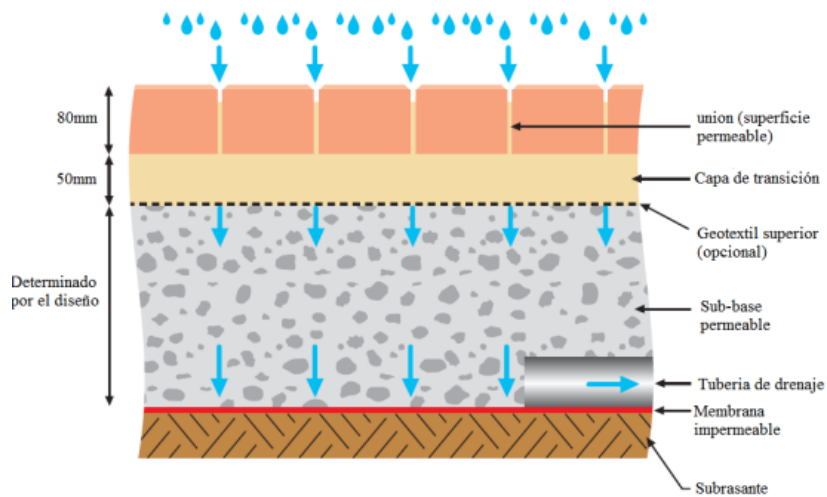


Imagen 21. Estructura del pavimento permeable de infiltración 0. (Adaptado de: Interpave, 2008).

6.2 Ventajas y desventajas:

Las ventajas y desventajas dependerán de cómo el sistema cumple con un funcionamiento hidráulico y estructural adecuado dentro del tiempo de vida útil para el cual fue diseñado (Tennis *et al*, 2004; CIRIA, 2007).

6.2.1 Ventajas:

- Remoción eficiente de partículas contaminantes de la escorrentía superficial tales como metales pesados, aceites y sedimentos.
- Reducción significativa del volumen y de la velocidad de la escorrentía superficial.
- Uso adecuado en zonas densamente pobladas y desarrolladas.
- Alta capacidad de adaptación al entorno.
- Uso más eficiente de la tierra (Doble uso del espacio).
- Bajo costo en el mantenimiento.
- Elimina la necesidad de cunetas, tuberías de alcantarillado y pozos de inspección.
- Elimina el encharcamiento en la superficie de rodadura.
- Buena aceptación de la comunidad, no interfiere en la movilidad o en el urbanismo.

6.2.2 Desventajas:

- No se puede usar en zonas con alta carga de sedimentos.
- Se usa únicamente en vías con bajo volumen de tráfico.
- La velocidad máxima de tránsito es de 48 km/h.
- Presenta alto riesgo de colmatación y proliferación de vegetación si no tiene un mantenimiento adecuado.
- No se usa en zonas con nivel freático alto.

6.3 Tipos de pavimentos permeables:

Existen diferentes tipos de pavimentos permeables, los cuales se pueden clasificar de acuerdo al material de su capa de rodadura. Estos se clasifican en tres grupos:

(i) Pavimentos de asfalto poroso, (ii) pavimentos de concreto poroso, y (iii) pavimentos de adoquín y modulares (Brattebo y Booth, 2003; Ferguson, 2005).

A continuación se presentará la descripción de los tipos de pavimentos permeables, y las diferencias que existen entre estos.

6.3.1 Pavimentos permeables en asfalto poroso:

Es el tipo de pavimento poroso más antiguo, data de los años 70's (Ferguson, 2005) y consta de una capa de rodadura, conformada por una mezcla bituminosa de asfalto en pequeñas cantidades y agregados de tamaño grueso uniformemente gradados (Azzout et al., 1994), reforzado con fibras de polímeros para contrarrestar la pérdida de resistencia por el aumento del porcentaje de vacíos (entre 15% y 20%). (Reyes y Torres, 2002).

El aumento del porcentaje de vacíos permite tener una superficie más permeable por donde el agua se puede infiltrar a la zona de almacenamiento o amortiguamiento, lo que mejora la tracción, la visibilidad, y disminuye la escorrentía superficial cuando ocurren los eventos lluviosos en la zona o vía en donde se es implementado (Ferguson, 2005).

Una segunda capa de arena filtrante que separa, la capa de rodadura de la capa de almacenamiento y llena los vacíos superficiales de esta última. Para evitar la colmatación del sistema en ocasiones esta se separa de la capa de rodadura por medio de un geotextil (Cahill *et al*, 2003; Ferguson, 2005).

6.3.2 Pavimentos permeables en concreto poroso:

La capa de rodadura de este pavimento consiste en una mezcla de agregados gruesos uniformemente gradados, y cemento y agua. La mezcla se desarrolla con una relación agua cemento baja para aumentar la resistencia, que al igual que en

el primer caso la pérdida de resistencia es ocasionada por el aumento del porcentaje de vacíos. Esta mezcla ocasiona una estructura porosa de célula abierta por donde el agua puede fluir (Ferguson, 2005).

6.3.3 Pavimentos permeables de adoquín y modulares:

Los pavimentos permeables de adoquín permiten la infiltración del agua por medio de las juntas creadas entre los adoquines, estas son llenadas o emboquilladas con grava fina o arena de río. Este tipo de pavimento permeable suele ser utilizado con mayor frecuencia en andenes y jardines debido a su baja resistencia (Smith, 2006; Interpave, 2008).

La capa de rodadura de los sistemas modulares pueden estar conformadas por rejillas de plástico de alta resistencia o por módulos en concreto, estos se rellenan de grava o tierra para sembrar pasto (Ferguson, 2005).

6.4 Elementos constructivos:

Los materiales empleados para cada tipo de capa rodadura de los pavimentos permeables y los materiales que componen la estructura del pavimento como tal (capa de transición, sub-base permeable, geotextil, membrana impermeable, tubería de drenaje), se describen a continuación.

6.4.1 Concreto poroso:

El concreto hidráulico poroso usa los mismos materiales que el concreto hidráulico convencional, la única diferencia es que se eliminan los agregados más finos. Lo anterior se realiza para aumentar la cantidad de vacíos y proporcionar la

capacidad filtrante de la estructura (Tennis *et al*, 2004; Ferguson, 2005). La imagen 22 muestra un ejemplo de este.



Imagen 22. Concreto poroso (Fuente: perviouspavement.org)

- **Cemento:**

Al igual que el concreto convencional se usa cemento portland regido bajo la norma ASTM C 150 (ANEXO 1), en esta se especifica la composición química, la resistencia y los tiempos de fraguado (Tennis *et al*, 2004, Ferguson, 2005).

- **Agregados:**

Los agregados son la mayor parte del volumen del concreto poroso y los responsables de resistir las cargas aplicadas. La granulometría de los agregados cambia con respecto a la del concreto convencional, respecto a la eliminación de las partículas más finas. Los límites permisibles de abrasión están especificados en la norma ASTM C33, los ejemplos de granulometría para concreto poroso están especificadas en la norma ASTM C 33 No. 67 “Distribución granulométrica entre el rango de 19.0 mm hasta 4.75 mm”, o ASTM C 33 No. 8 “Distribución granulométrica entre el rango de 9.5 mm hasta 2.36 mm”, o ASTM C 33 No. 89 “Distribución granulométrica entre el rango de

9.5 mm hasta 1.18 mm”. Como se muestra en la tabla 1 (Tennis *et al*, 2004; Ferguson, 2005; ASTM, 2011).

Numero	Tamaño Nominal	Tamaño del tamiz								Porcentaje que pasa (%)
		25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No.50)	
67	19.0 – 4.75 mm (¾ pul. – No. 4)	100	90 – 100	...	20 – 55	0 – 10	0 – 5	...	...
8	9.5 – 2.36 mm (¾ pul. – No. 8)	...	...	100	85 – 100	10 – 30	0 – 10	0 – 5	...
89	9.5 – 1.18 mm (¾ pul. – No. 16)	...	...	100	90 – 100	20 – 55	5 – 30	0 – 10	0 – 5

Tabla 1. Granulometría concreto hidráulico poroso (adaptado de: ASTM, 2011).

- **Agua:**

Una relación agua cemento dentro del rango de 0.27 a 0.34 es común para la fabricación de concreto poroso. El control de la relación agua-cemento en las mezclas para concreto poroso no garantiza del todo un concreto más resistente como en el caso de los concretos convencionales. Un diseño de mezcla común sin aditivos ni refuerzo se muestra en la tabla 2 (Tennis *et al*, 2004).

	Porporciones kg/m3
Cemento	270 – 415
Agregados	1190 – 1480
Relacion Agua/cemento	0.27 – 0.34
Relacion Agregado/cemento	4 – 4.5:1
Relacion Agr. fino/Agr. grueso	0 – 1:1

Tabla 2. Diseño de mezcla usado para la fabricación de concreto poroso. (Adaptado de: Tennis *et al*, 2004)

- **Refuerzo:**

De ser posible es recomendable reforzar el concreto con fibras de polímero de entre 2.5 y 5cm de largo, lo que mejora significativamente su resistencia a la

tracción y disminuye la deformación, en la norma ASTM C1116 (ANEXO 2) se especifica el tipo de fibra que debe ser usado.

La incorporación de las fibras al concreto hidráulico poroso, se hace como si estas fueran un volumen de agregado (generalmente dicho volumen corresponde a no más del 0.1 por ciento), y se mezclan en conjunto con todos los demás componentes (Ferguson, 2005).

- **Aditivos:**

Se recomienda el uso de aditivos retardantes que aumenten los tiempos de colocación y fraguado, y los reductores de agua que aporten mayor manejabilidad, ambos a su vez mejoraran los resultados en cuanto a la resistencia. Los aditivos son incluidos en la mezcla húmeda como volumen de agua y de acuerdo a las especificaciones del fabricante (Tennis *et al*, 2004), estos son regidos bajo la norma ASTM C 494 (ANEXO 3), que muestra el tipo de aditivos retardantes, reductores de agua y los beneficios que provee al concreto hidráulico (Ferguson, 2005).

6.4.2 Asfalto poroso:

Para la mezcla del asfalto poroso se recomienda que el porcentaje de vacios se encuentre entre el 16% y el 22% para promover la infiltración y el flujo vertical (NAPA, 2004). Al igual que con el concreto hidráulico se eliminan los agregados más finos con el fin de aumentar el contenido de vacios (Cahill *et al*, 2005), la imagen 23 muestra un ejemplo de asfalto poroso.



Imagen 23. Asfalto poroso (fuente: motor.terra.es/galerias-coches/html/la-seguridad-vial-del-futuro-en-traffic-2009-2.htm)

- **Asfalto:**

Es un material derivado del proceso de refinación del petróleo, este material ligante debe estar dentro del rango del 5.5% al 6.5% del peso total en un diseño de mezcla de concreto asfáltico poroso (Thelen, 1978), y sus propiedades de viscosidad dependerán del sitio de aplicación, teniendo en cuenta la temperatura, la carga aplicada y el tiempo de vida útil. La selección del tipo de asfalto se hará de la misma manera que para un concreto asfáltico tradicional (NAPA, 2003; Ferguson, 2005).

- **Agregados:**

El cambio en la granulometría con respecto a la del concreto asfáltico tradicional es la alta reducción en los agregados finos como se muestra en la tabla 3 (Cahill *et al*, 2003). Los cuales deben cumplir las mismas normas de angularidad, durabilidad y estabilidad que las usadas en el concreto asfáltico tradicional (Ferguson, 2005).

Tamaño del tamiz		Porcentaje que pasa (%)		
mm	Pulgadas	The Franklin Institute [Thelen, 1978]	National Asphalt Pavement Association [NAPA, 2003]	Cahill Associates [Cahill 2003]
37.5 mm	0.5 "	100		
19 mm	0.75 "		100	
12.5 mm	0.5 "		85-100	100
9.5 mm	0.375 "	95	55-75	95
4.75 mm	No. 4	35	10-25	35
2.36 mm	No. 8	15	5-10	15
1.18 mm	No. 16	10		10
0.6 mm	No. 30			2
0.075 mm	No. 200	2	2-4	

Tabla 3. Granulometría concreto de asfalto poroso (Adaptado de: Cahill *et al*, 2003).

Con el fin de mejorar la durabilidad y la estabilidad de la mezcla, los materiales pétreos deben tener las propiedades mostradas en la tabla 4:

Propiedades de agregados petreos para concreto de asfalto poroso	
Agregado Grueso	Agregado fino
Abrasión $\leq 30\%$	Angularidad agregado fino $\geq 45^\circ$
Caras fracturadas $\geq 90\%$ en dos caras fracturadas y el 100% una cara fracturada	
Planas y alargadas $\leq 5\%$ 5:1 $\geq 20\%$ de proporción 2:1	

Tabla 4. Propiedades de los agregados pétreos para asfalto poroso (Adaptado de NAPA, 2003).

- **Aditivos:**

Se recomienda el uso de aditivos que se caractericen por promover la cohesión cemento asfáltico-agregado, mejoren la susceptibilidad de la temperatura de la mezcla y ayuden a mejorar su rendimiento (NAPA, 2003), según cada fabricante el nombre varia.

6.4.3 Adoquines:

Los adoquines empleados en la capa de rodadura no deberán en lo posible, tener un espesor de menos de 8 cm. Es de entenderse que el espesor debe ser calculado de acuerdo al tipo de carga, a su uso y además debe ser fabricado bajo

la norma BS EN 1338:2003: 'Adoquines de concreto: requisitos y métodos de ensayo' BSI 2003, o su similar en Colombia la norma técnica colombiana NTC 2017 "Adoquines en concreto para pavimentos" del 2004. (Smith, 2006; Interpave, 2008, ICONTEC, 2004).

Las juntas de infiltración son la parte de los pavimentos adoquinados que tiene una capacidad de infiltración mayor. Los pavimentos de adoquín deben ser emboquillados con arena pasa tamiz No. 8 o con el mismo material de la capa de transición (ver numeral 4.5.1) (Smith, 2006), de tal manera que garantice la estabilidad de los adoquines y evite cualquier movimiento vertical u horizontal de los mismos (Ferguson, 2005; Interpave, 2008), la imagen 24 muestra las juntas de infiltración entre adoquines.

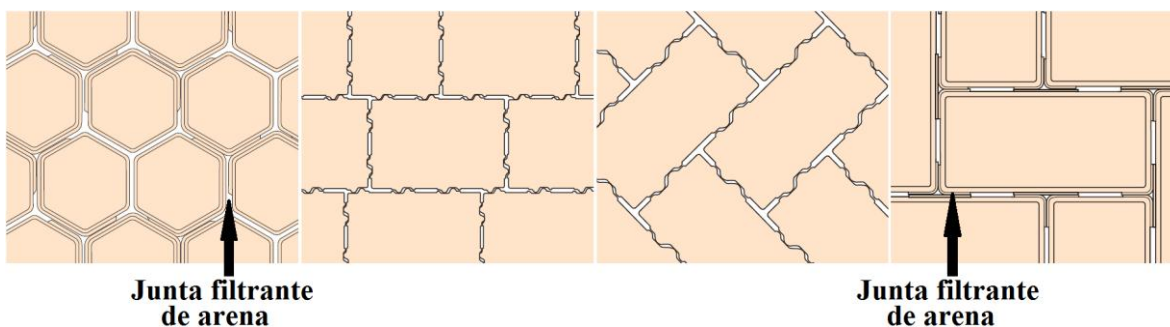


Imagen 24. Juntas filtrantes en pavimentos de adoquín. (Adaptado de: Interpave, 2008).

6.4.4 Módulos (Grasspave®, Gravelpave®, Turfstone™):

La superficie permeable de este tipo de pavimentos porosos son una marca registrada con su nombre, distribuidos y construidos bajo especificaciones de la empresa dueña de la patente, son elementos en plástico reciclado o concreto. El sistema lo compone en una malla con espacios que se rellenan con arena y en ocasiones se cubren con una capa vegetal. La norma ASTM C 1319 rige la producción de Turfstone™, en ella se especifica espesor, dimensiones, material, resistencia y absorción (Ferguson, 2005), en la imagen 25 se observa el perfil del

los pavimentos Grasspave® y Gravelpave® y la imagen 26 muestra el pavimento Turfstone™.



Imagen 25. Pavimento Grasspave® y Gravelpave® (Fuente: invisiblestructures.com)



Imagen 26. Pavimento Turfstone™ (Fuente: idealconcreteblock.com)

El material de llenado de las celdas de Grasspave® y Gravelpave® es establecido por la granulometría ASTM No. 89 y No. 8 (Tabla 1). Debe ser compactado con rodillo y su exceso retirado al momento de la nivelación (Ferguson, 2005). Otra propuesta de material llenante es suministrada por cada fabricante, un ejemplo se muestra en la tabla 5.

Tamaño del tamiz (mm)	Porcentaje que pasa %
25,4	100
19,05	90-100
9,53	70-80
4,75	55-70
2	45-55
0,425	25-35
0,075	3-8

Tabla 5. Material de llenado de celdas en pavimentos Grasspave® y Gravelpave® (Adaptado de www.invisiblestructures.com).

6.5 Materiales empleados en la capa de transición, sub-base permeable, geotextil, membrana impermeable:

6.5.1 Capa de transición:

La granulometría de la capa de transición debe permitir el flujo vertical del agua y a la vez garantizar la estabilidad del pavimento, debe buscarse un material granular fino que este dentro del rango de 2mm a 6mm y que cumpla con la norma BS EN 13242:2002. 'Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering works and road construction', como se muestra en la tabla 6 (Ferguson, 2005; Interpave, 2008).

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

Tabla 6. Granulometría capa de transición. (Adaptado de Interpave, 2008).

6.5.2 Sub-base permeable:

La granulometría de la sub-base debe garantizar la estabilidad del pavimento mediante la trabazón de agregados, tanto en estado seco como condición de humedad total, se recomiendan los agregados triturados con formas angulares e irregulares, no los redondeados. Debido a que este material también será usado para el almacenamiento, este debe ser resistente ante la presencia de agentes químicos que puedan venir disueltos en el agua y así evitar su meteorización y la pérdida de cohesión al interior de los pavimentos. Se recomienda el uso de granito, basalto o gabro (CIRIA, 2007), además debe cumplir con la especificación BS EN 13242:2002 'Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for

use in civil engineering work and road construction.' y con la granulometría que se muestra en la tabla 7. (Ferguson, 2005; Interpave, 2008).

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

Tabla 7. Granulometría sub-base permeable. (Adaptado de Interpave, 2008).

En caso de no usar geotextil se debe evitar la migración de finos de la capa de transición a la sub-base permeable, garantizando el cumplimiento de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Tamaño de partícula que pasa 15\% en la sub - base}}{\text{Tamaño de partícula que pasa 85\% en la capa de trans.}} \leq 5$$

Ecuación 1. Ecuación que garantiza la no migración de finos en caso de no tener geotextil superior. (Adaptado de Interpave, 2008).

Cuando la carga excede la capacidad portante de los agregados en la sub-base, esta se podrá reforzar con cemento cumpliendo con la norma BS EN 14227-1:2004. '*Hydraulically bound mixtures –Specifications – Part 1: Cement bound granular mixtures*' y garantizando una permeabilidad de más de 20.000 mm/hora (Interpave, 2008).

Actualmente también se puede reemplazar la matriz de agregados por los sistemas geo-celulares (ver numeral 5.2.5), que proporcionan una relación de vacíos del 94%, buena estabilidad y resistencia a altas cargas aplicadas y ante agentes químicos disueltos en el agua, almacenando un volumen igual con una excavación significativamente menor a la necesaria para la sub-base de agregados (CIRIA, 2007). En Colombia las geo-celdas "modular box" están siendo distribuidas por PAVCO bajo el nombre de "aquacell" (PAVCO, 2011).

6.5.3 Membrana impermeable:

En el caso de retención completa, para aprovechamiento de agua lluvia, en la subrasante (Imagen 21), se debe instalar una membrana impermeable de polietileno que detenga el agua dentro de la zona de almacenamiento, el calibre debe ser calculado de acuerdo a la carga aplicada y a la resistencia al punzonamiento, el fabricante deberá proveer esta información (Interpave, 2008).

6.5.4 Geotextil:

El geotextil es el filtro que evita la migración de finos a las capas de agregados gruesos (sub-base y subrasante) y contribuye a la estabilidad del pavimento. Este puede ser tejido o no tejido, capaz de resistir tanto a agentes químicos como bacterianos y cumplir con las normas ISO 10319. En su instalación se recomienda traslapar 30 cm por lo menos (Interpave, 2008).

6.6 Principios de diseño:

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 *et al*, 2004).

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 darán diferentes espesores el que sea mayor será escogido como el espesor de diseño (Interpave, 2008), a continuación la imagen 27 muestra un diseño general de pavimentos permeables que incluye aspectos hidráulicos y estructurales.

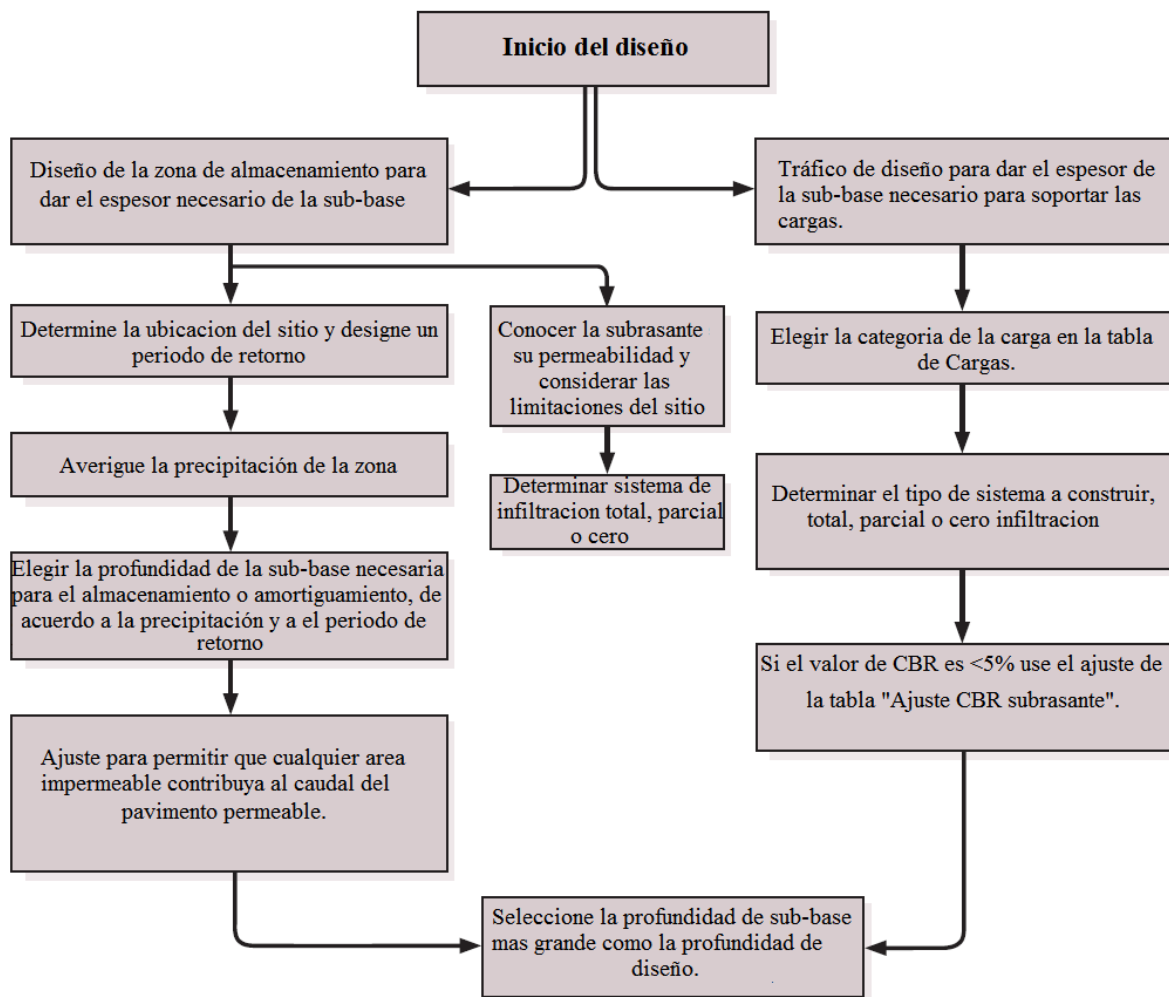


Imagen 27. Metodología de diseño de pavimentos permeables (Adaptado de Interpave, 2008).

6.6.1 Selección del tipo de sistema: infiltración total, parcial o cero:

La selección del tipo de sistema se lleva a cabo teniendo en cuenta las propiedades del material que compone la subrasante y el propósito con el que se desea diseñar el sistema. Este proceso se realiza mediante el seguimiento de la tabla 8 (CIRIA, 2007).

Características de la subrasante		Sistema 1: Infiltración total	Sistema 2: Infiltración parcial	Sistema 3: Infiltración cero
Permeabilidad de la subrasante definida por el coeficiente de permeabilidad k (m/s)	10^{-6} to 10^{-3}	✓	✓	✓
	10^{-8} to 10^{-6}	x	✓	✓
	10^{-10} to 10^{-8}	x	x	✓
El mas alto nivel esperado de agua entre 1000mm		x	x	✓
Contaminantes en la subrasante		x	x	✓

Tabla 8. Selección del tipo de sistema según características de la subrasante (Adaptado de: CIRIA, 2007).

La tabla 9 muestra datos de permeabilidad y de capacidad portante de los suelos.

Clasificación del suelo	Rango del coeficiente de permeabilidad k (m/s)	Rango del valor de CBR
Arcilla pesada	$10^{-10} - 10^{-8}$	2 – 5
Arcilla limosa	$10^{-9} - 10^{-8}$	3 – 6
Arcilla arenosa	$10^{-9} - 10^{-6}$	5 – 20
Arena pobremente gradada	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6}$	10 – 40
Arena bien gradada	$5 \times 10^{-6} - 10^{-4}$	10 – 40
Grava arenosa bien gradada	$10^{-5} - 10^{-3}$	30 – 80

Tabla 9. Datos de permeabilidad y capacidad portante de suelos (Adaptado de: CIRIA, 2007).

Es importante resaltar que estos datos (tabla 9) deben ser corroborados con pruebas de campo y laboratorio (Smith, 2006).

6.6.2 Diseño hidráulico:

Para llevar a cabo el diseño hidráulico es necesario tener en cuenta aspectos como: el volumen necesario para el almacenamiento de la precipitación de diseño, la capacidad de la subrasante a recibir o no agua (salida) y el manejo en caso de eventos superiores al de diseño, debido a que no es económicamente viable diseñar para el evento de mayor precipitación que haya ocurrido en la historia (CIRIA, 2007).

- **Aspectos importantes:**

1. La tasa de infiltración de la capa de rodadura debe ser mayor que la intensidad de la precipitación para evitar encharcamientos que contribuyan con el deterioro de la estructura y afecten la seguridad vial.
2. Se deben tener en cuenta los caudales aportantes de las zonas aledañas que escurran en el pavimento.
3. Debe entenderse que la tasa de infiltración de la capa de rodadura tiende a disminuir y estabilizarse con los años debido a la colmatación, para contrarrestar este efecto se sugiere en los cálculos incluir un coeficiente de colmatación.
4. La capacidad de almacenamiento dependerá de la precipitación, la relación de vacíos, el tiempo de retorno escogido para el diseño, las áreas aportantes al sistema, la infiltración y las salidas del sistema (CIRIA, 2007).

- **Evento de diseño:**

Se diseña no con el valor de precipitación antecedente más alto existente, sino que se selecciona un evento de importante magnitud que se repite cada cierto periodo de tiempo, a este se le llama periodo de retorno. Con este se garantiza que el sistema se vea excedido en su capacidad pocas veces durante su vida útil. A el periodo de retorno se le suma la intensidad de la lluvia y la duración, aspectos que complementan y permiten hacer la mejor selección de la precipitación de diseño, para dimensionar el volumen de almacenamiento (Interpave, 2008).

El MINVU propone dos periodos de retorno para la selección de la lluvia de diseño (MINVU, 1996):

T = 5 años, si hacia aguas abajo existe una red de drenaje bien desarrollada.

T = 10 años, si no existe una red de drenaje bien desarrollada.

Aunque dependiendo del régimen hidrológico de la zona o del servicio de la obra, se podrán tener periodos de retorno mayores a los anteriores (MINVU, 1996).

- **Calculo del volumen de lluvia de las zonas adyacentes al sistema (volumen aportado):**

El cálculo del volumen del agua que escurre de las zonas aledañas hacia el sistema, se puede realizar obteniendo la escorrentía de la zona aportante (E_s) mediante el método de la curva CN del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EEUU, o calculando el caudal de la zona adyacente (Q_c) través del Método Racional, a continuación se muestran las ecuaciones y tablas utilizadas para cada método (Interpave, 2008).

Método de la curva CN:

$$E_s = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Ecuación 2. Escorrentía zonas adyacentes (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).

Donde:

P = precipitación de diseño.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Ecuación 3. Retención potencial máxima S (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).

Donde:

CN = número que varía en el rango de 1 a 100 que se le asigna a un tipo de superficie según sus características para permitir o no la infiltración en el terreno.

En las siguientes tablas se puede encontrar el número de CN para cada tipo de superficie con una condición de humedad antecedente **AMC II** (precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración dentro del rango de 3.6 cm a 5.3 cm), para esto es necesario primero clasificar el suelo (A, B, C, D).

Clasificación hidrológica del suelo:

- A. Bajo potencial de escorrentía.
- B. Moderadamente bajo potencial de escorrentía.
- C. Moderadamente alto potencial de escorrentía.
- D. Alto potencial de escorrentía.

Tipo de cobertura y condición hidrológica	% Promedio áreas impermeables ²	Número de curvas para grupos de suelos hidrológicos			
		A	B	C	D
<i>Áreas urbanas totalmente desarrolladas (vegetación ya establecida)</i>					
Espacios abiertos (prados, parques, campos de golf, cementerios, etc) ³ :					
Condición pobre (menos del 50% cubierto de pasto)		68	79	86	89
Condición regular (del 50% al 75% cubierto de pasto)		49	69	79	84
Condición buena (más del 75% cubierto de pasto)		39	61	74	80
Áreas impermeables:					
Parqueaderos pavimentados, techos, autopistas, etc. (excluyendo derecho de vía)		98	98	98	98
Calles y caminos:					
Pavimentados		98	98	98	98
Pavimentadas; zanjas abiertas (incluyendo derecho de vía)		83	89	92	93
Grava (incluyendo derecho de vía)		76	85	89	91
Tierra (incluyendo derecho de vía)		72	82	87	89
Áreas desérticas urbanas occidentales:					
Paisajes desérticos naturales (solamente áreas permeables) ⁴		63	77	85	88
Paisajes desérticos artificiales (barrera impermeable de maleza, arbustos de desierto con 1 a 2 pulg de diámetro; cubierta de arena o grava y orillas de áreas húmedas)		96	96	96	96
Áreas urbanas:					
Comercial y de negocios	85	81	88	91	93
Industrial	72				
Áreas residenciales por promedio del tamaño del lote:					
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acre	12	46	65	77	82
<i>Áreas urbanas desarrolladas</i>					
Áreas recientemente conformadas (solamente áreas permeables, sin vegetación)		77	86	91	94

Tabla 10. Numero de la curva CN de escorrentía para áreas urbanas (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).

Uso de la Tierra	COBERTURA		GRUPO DE SUELOS				
	Tratamiento o Práctica	Condición Hidrológica	A	B	C	D	
Rastrojo	Hileras rectas	---	77	86	91	94	
Cultivos en hileras	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91	
		Buena	67	78	85	89	
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88	
		Buena	65	75	82	86	
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82	
		Buena	62	71	78	81	
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88	
		Buena	63	75	83	87	
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85	
		Buena	61	73	81	84	
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	61	72	79	82	
		Buena	59	70	78	81	
Leguminosas en ¹ hileras estrechas o forraje en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89	
		Buena	58	72	81	85	
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85	
		Buena	55	69	78	83	
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	63	73	80	83	
		Buena	51	67	76	80	
Pastos de pastoreo		Mala	68	79	86	89	
		Regular	49	69	79	84	
		Buena	39	61	74	80	
		Curvas de nivel	Mala	47	67	81	88
			Regular	25	59	75	83
			Buena	6	35	70	79
Pastos de corte		Buena	30	58	71	78	
Bosque		Mala	45	66	77	83	
		Regular	36	60	73	79	
		Buena	25	55	70	77	
Patios		---	59	74	82	86	
Caminos de tierra ²		---	72	82	87	89	
Pavimentos		---	74	84	90	92	

Tabla 11. Numero de curva de escorrentía para tierras agrícolas cultivadas (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).

Descripción y tipo de cobertura	Condición hidrológica	Número de curva para grupos de suelos hidrológicos			
		A	B	C	D
Pastos, forraje para pastoreo ²	Mala	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segado para heno.	---	30	58	71	78
Maleza mezclada con pasto de semilla, con la maleza como principal elemento ³	Mala	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Buena	30 ⁴	48	65	73
Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles) ⁵	Mala	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques ⁶	Mala	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	---	59	74	82	86

Tabla 12. Numero de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).

Condición de humedad antecedente:

En caso de tener un rango diferente de humedad antecedente los datos arrojados por las tablas se pueden acoplar a diferentes rangos de humedad, **AMC I** (precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración dentro del rango de 0 cm a 3.6 cm) y **AMC III** (precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración dentro del rango de más de 5.3 cm), mediante las siguientes ecuaciones:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.3 - 0.013CN_{II}}$$

Ecuación 4. Relaciona la curva CN_{II} con la humedad antecedente $AMC I$ y obtiene CN_I (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 + 0.0057CN_{II}}$$

Ecuación 5. Relaciona la curva CN_{II} con la humedad antecedente AMC_{III} y obtiene CN_{III} (Fuente: Hidrología En La Ingeniería: Monsalve, 1999).

Se reemplaza CN para hallar la retención potencial máxima (S), con S conocida se puede encontrar la escorrentía (E_s), si esta se multiplica por el área adyacente que aporta se obtiene el volumen aportante al sistema (Monsalve, 1999).

El Método racional:

Para la implementación del método racional es necesario conocer las curvas IDF correspondientes a la zona (MINVU, 1996).

$$V_{af}(t) = 1,25 * 0.001 C I_t A t = 0,00125 C A P_t^T$$

Ecuación 6. Volumen afluente aportado por la zona adyacente (Fuente: Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos: MINVU, 1996).

Donde:

V_{af} = Es el volumen de agua que aporta la zona adyacente al sistema, en metros cúbicos.

C = coeficiente de escurrimiento del área adyacente.

A = Es el área adyacente, en m^2 .

I_t = Es la intensidad de la lluvia en una determinada duración, en mm/hora.

T = Tiempo de retorno, en años.

t = Duración, en horas.

P_t^T = Precipitación acumulada en una determinada duración y para un determinado periodo de retorno.

1.25 es el factor de seguridad.

- **Calculo de espesores (volumen de almacenamiento):**

El MINVU, 1996 y Smith, 2006 proponen dos métodos de diseño hidráulico mostrados a continuación, estos métodos se basan en las guías de diseño planteadas por diferentes autores a través del tiempo, son las metodologías más recientes y las cuales no están sectorizadas a implementarse en una región determinada, sino que por medio de estas y conociendo el régimen hidrológico de la zona se pueden adaptar a cualquier sitio, en nuestro caso a Bogotá.

Método MINVU, 1996:

El volumen máximo de almacenamiento será la diferencia entre el volumen de entrada (volumen aportado) menos el volumen de salida (volumen infiltrado), en función del tiempo (MINVU, 1996).

$$V_{inf}(t) = 0,001 f C_s A_e t$$

Ecuación 7. Volumen infiltrado (Fuente: Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos: MINVU, 1996).

Donde:

f = La capacidad de infiltración de la subrasante, en mm/hora.

A_e = Área del pavimento permeable, en m².

t = Duración, en horas.

C_s = Coeficiente de seguridad de colmatación, este valor depende de la calidad del agua y del mantenimiento al sistema, la imagen muestra el grafico para seleccionar dicho valor.

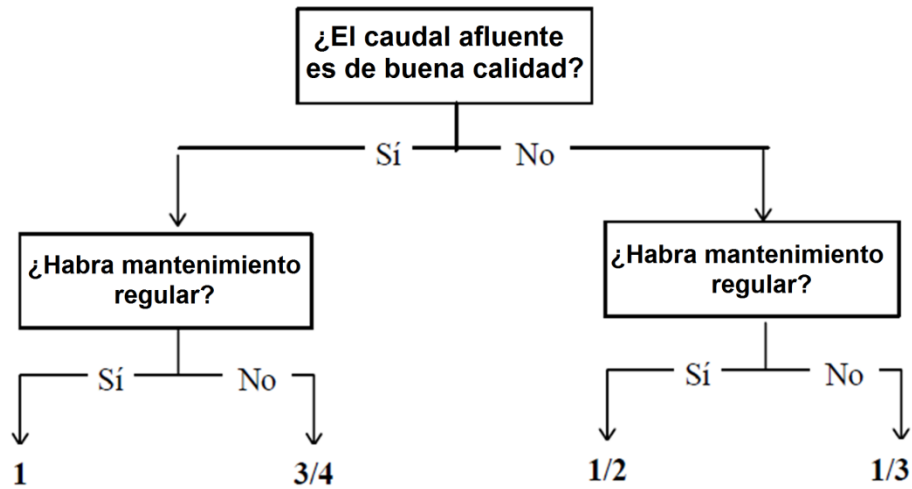


Imagen 28. Grafico para obtención del coeficiente de seguridad de colmatación (Fuente: MINVU, 1996).

Teniendo ya la entrada y la salida la ecuación 8 queda:

$$V_{alm} = Max (V_{af}(t) - V_{inf}(t))$$

Ecuación 8. Volumen máximo de almacenamiento (Fuente: Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos: MINVU, 1996).

El cálculo del espesor se obtiene mediante la ecuación 10:

$$e = V_{alm} / (pA_e)$$

Ecuación 9. Espesor del almacenamiento (Fuente: Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos: MINVU, 1996).

Donde:

p = Porosidad de la sub-base, usualmente 0,3.

A_e = Área del pavimento permeable, en m².

Para evitar la proliferación de microorganismos y malos olores, por el estancamiento del agua se debe garantizar un tiempo de drenaje inferior a 48 horas, para esto se calcula el tiempo de drenaje (t_m), mediante la ecuación 10 se puede calcular el tiempo de drenaje:

$$t_m = \frac{p e_s}{C_s f}$$

Ecuación 10. Tiempo de drenaje (Fuente: Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos: MINVU, 1996).

Donde:

e_s = Espesor de la sub-base, en mm.

f = La capacidad de infiltración de la subrasante, en mm/hora.

C_s = Coeficiente de seguridad de colmatación, este valor depende de la calidad del agua y del mantenimiento al sistema.

p = Porosidad de la sub-base, usualmente 0,3.

Método Smith, 2006:

El volumen de almacenamiento se calcula suponiendo una superficie de rodadura 100% permeable y se presume que durante el evento de lluvia no hay salida recreando así el peor de los casos.

El volumen de agua almacenada (V_w) se define como las entradas al sistema (volumen de lluvia que cae en las zonas adyacentes, más, volumen de lluvia que cae directamente sobre el sistema) menos la salida (volumen infiltrado) mediante la ecuación:

$$V_w = \Delta Q_c A_c + PA_p - fTA_p$$

Ecuación 11. Volumen de almacenamiento (Fuente: Permeable Interlocking Concrete Pavements: Smith, 2006).

Donde:

$\Delta Q_c A_c$ = Volumen de lluvia que cae en las zonas adyacentes al sistema.

PA_p = Volumen de lluvia que cae directamente sobre el sistema.

fTA_p = Volumen que se infiltra en el terreno (percolación).

f = percolación, valor que depende del material de la base.

T = tiempo de desagüe del sistema.

El volumen de material pétreo en la Sub-base permeable (V_p) se define como:

$$V_p = V_w/V_r = d_p A_p$$

Ecuación 12. Volumen del material pétreo (Fuente: Permeable Interlocking Concrete Pavements: Smith, 2006).

Donde:

d_p = Profundidad de la sub-base permeable más la capa de transición.

A_p = Área del pavimento permeable.

V_r = Relación de vacíos en la sub-base permeable y la capa de transición (usualmente 0.4).

Al igualar las dos ecuaciones se obtiene:

$$d_p A_p V_r = \Delta Q_c A_c + P A_p - f T A_p$$

Ecuación 13. Son las ecuaciones 11 y 12 igualadas (Fuente: Permeable Interlocking Concrete Pavements: Smith, 2006).

El área superficial del pavimento permeable (A_p) y la profundidad de la capa de almacenamiento (d_p) pueden definirse así:

$$A_p = \frac{\Delta Q_c A_c}{V_r d_p - P + f T}$$

Ecuación 14. Área superficial del pavimento permeable (Fuente: Permeable Interlocking Concrete Pavements: Smith, 2006).

$$d_p = \frac{\Delta Q_c R + P - f T}{V_r}$$

Ecuación 15. Profundidad capa de almacenamiento (Fuente: Permeable Interlocking Concrete Pavements: Smith, 2006).

Donde R es la relación entre el área adyacente que contribuye sobre el área del pavimento permeable (A_c/A_p).

Generalmente la ecuación 15 (d_p) es la más usada pues casi en todos los casos la incógnita es la profundidad y los demás términos son conocidos o asignados.

La profundidad de la zona de almacenamiento tiene un rango máximo en el cual se cumplen los criterios y ecuaciones de diseño, y es estipulado por la ecuación 16:

$$d_{\max} = f \times T_s / V_r$$

Ecuación 16. Profundidad máxima zona de almacenamiento (Fuente: Permeable Interlocking Concrete Pavements: Smith, 2006).

Además de lo anterior también debe esta estar como mínimo 0.6 m por encima del nivel freático, de no ser así se deberá alterar alguno de los otros términos en la ecuación (dp) tales como el área del pavimento permeable (Ap) o la precipitación de diseño (P).

En caso de infiltración parcial y de infiltración cero:

A las ecuaciones de volumen de almacenamiento, tanto del MINVU como de Smith, se les agregara el volumen de la tubería perforada como una salida más en el caso de la infiltración parcial, o como la única salida en caso de infiltración 0 (Galarza, 2011).

El caudal a través de la tubería perforada se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q = V \cdot A$$

Ecuación 17. Caudal de la tubería perforada

Donde:

V = la velocidad del agua, en m/s.

A = área de la tubería, en m².

A su vez la velocidad a través de la tubería se calcula por medio de Manning, ecuación 18:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 18. Velocidad del flujo según Manning.

Donde:

n = El coeficiente de rugosidad de la tubería.

S = La pendiente del tubo en porcentaje.

R_h = Radio hidráulico en m. El radio hidráulico es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado de la tubería (A/P).

6.6.3 Diseño hidráulico mediante de software de drenajes:

Los software de drenajes de Wallingford puede ser usado para diseñar y modelar pavimentos permeables, la manera más sencilla de llevarla a cabo es considerar los pavimentos permeables como un sistema de almacenamiento de infiltración (Interpave, 2008).

6.6.4 Manejo en caso de eventos excedentes:

Para el control en caso de eventos de excedencia es recomendable la combinación del sistema con otro tipo de SUDS para proteger la estructura y garantizar el servicio (CIRIA, 2007).

6.6.5 Diseño estructural:

Pese a que no hay normativas aprobadas para el diseño estructural de pavimentos permeables, mediante los siguientes pasos se han obtenido óptimos resultados por lo que es recomendada su aplicación (CIRIA, 2007). El diseño establecido ha sido generado por CIRIA mediante la recopilación de diferentes autores en el

tiempo, este se basa en los guías de diseño de diferentes autores desde los años 80. Se muestra por ser el más práctico y actual.

- ***Aspectos importantes:***

1. El suelo debe tener la capacidad de sostener las cargas de tráfico sin deformarse excesivamente.
2. La capa de transición y la sub-base permeable deben disipar el bulbo de esfuerzos y dar estabilidad a la superficie de rodadura.
3. La capa de rodadura, independientemente del material que se use, no debe sufrir fracturamiento bajo las cargas del tráfico (CIRIA, 2007).

El diseño estructural es un proceso que consta de tres etapas (interpave, 2008).

- 1. Se seleccione el tipo de carga de 1 a 6 (tabla 13), de acuerdo a la cantidad de vehículos grandes, a la carga expresada en ejes estándar (eje simple rueda doble de 80 KN o 8,16 Ton) o al uso.

1	2	3	4	5	6
Parqueaderos	Peatonal	Vehicular	Comercial	Industrial	Trafico pesado
No vehículos grandes	Vehículos grandes solo en caso de emergencia	Un vehículo grande por semana	Diez vehículos grandes por semana	Cien vehículos grandes por semana	Mil vehículos grandes por semana
Cero ejes estándar	100 ejes estándar	15000 ejes estándar	150000 ejes estándar	1500000 ejes estándar	15000000 ejes estándar
Patio	Bahías de estacionamiento y pasillos	Calles peatonales	Rutas de acceso a pequeños mercados	Locales industriales	Vía primaria
Vía privada	Plataforma en estación de tren	Acceso a guarderías	Vía de acceso a colegios o universidades	Vía secundaria	Bodega o centro de distribución
Con fines decorativos	Exposición de carros	Parqueaderos en áreas residenciales	Acceso a edificio de oficinas	Desarrollo Industrial ligero	Paradero de buses
Parques de recreación	Caminos peatonales en estadios	Viveros y áreas de demostración	Acceso a complejos residenciales	Mercados o industrias	Paradero de tractocamiones
Andenes	Andenes con ocasional entrada de vehículos	Cementerios	Acceso a viveros	Plaza de la ciudad	Paradero de camiones
	Intersección entre vías privadas y andenes	Parqueadero de hoteles	Estación de bomberos	Vía peatonal y vehicular a la vez	Glorietas
		Parqueadero de automoviles en aeropuertos	Parqueadero de vehículos en aeropuertos	Vías de acceso a aeropuertos	Vías para solo buses
		Centros deportivos	Acceso a estadios, antejardines		

Tabla 13. Selección del tipo de carga (Adaptado de Interpave, 2008).

- 2. Se selecciona de acuerdo al tipo de carga (Imagen 29 y 30), los espesores de los materiales:

Para caso de infiltración total o parcial:

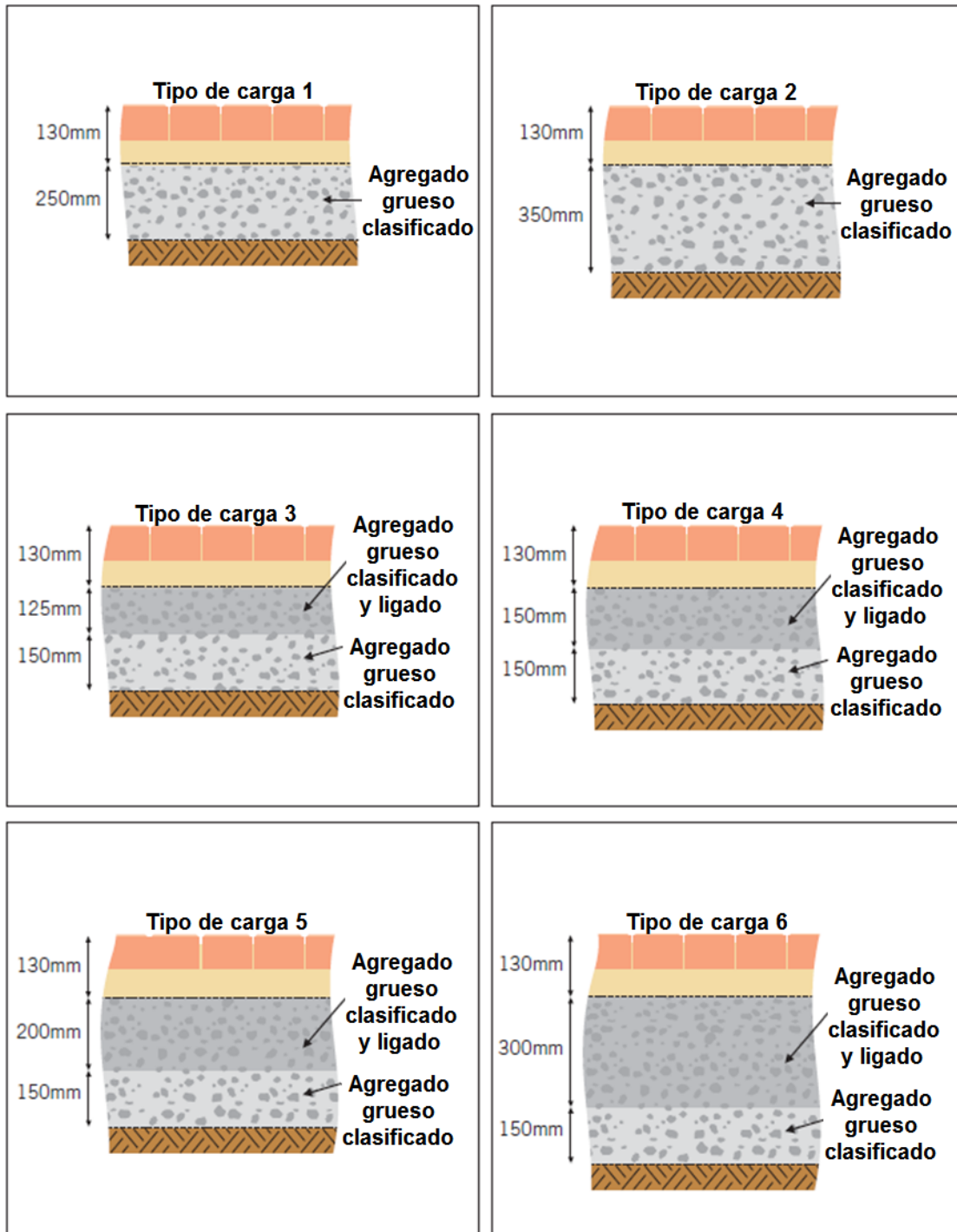


Imagen 29. Espesores de la capa de almacenamiento para el caso infiltración total y parcial (Adaptado de Interpave, 2008).

Para el caso de infiltración cero:

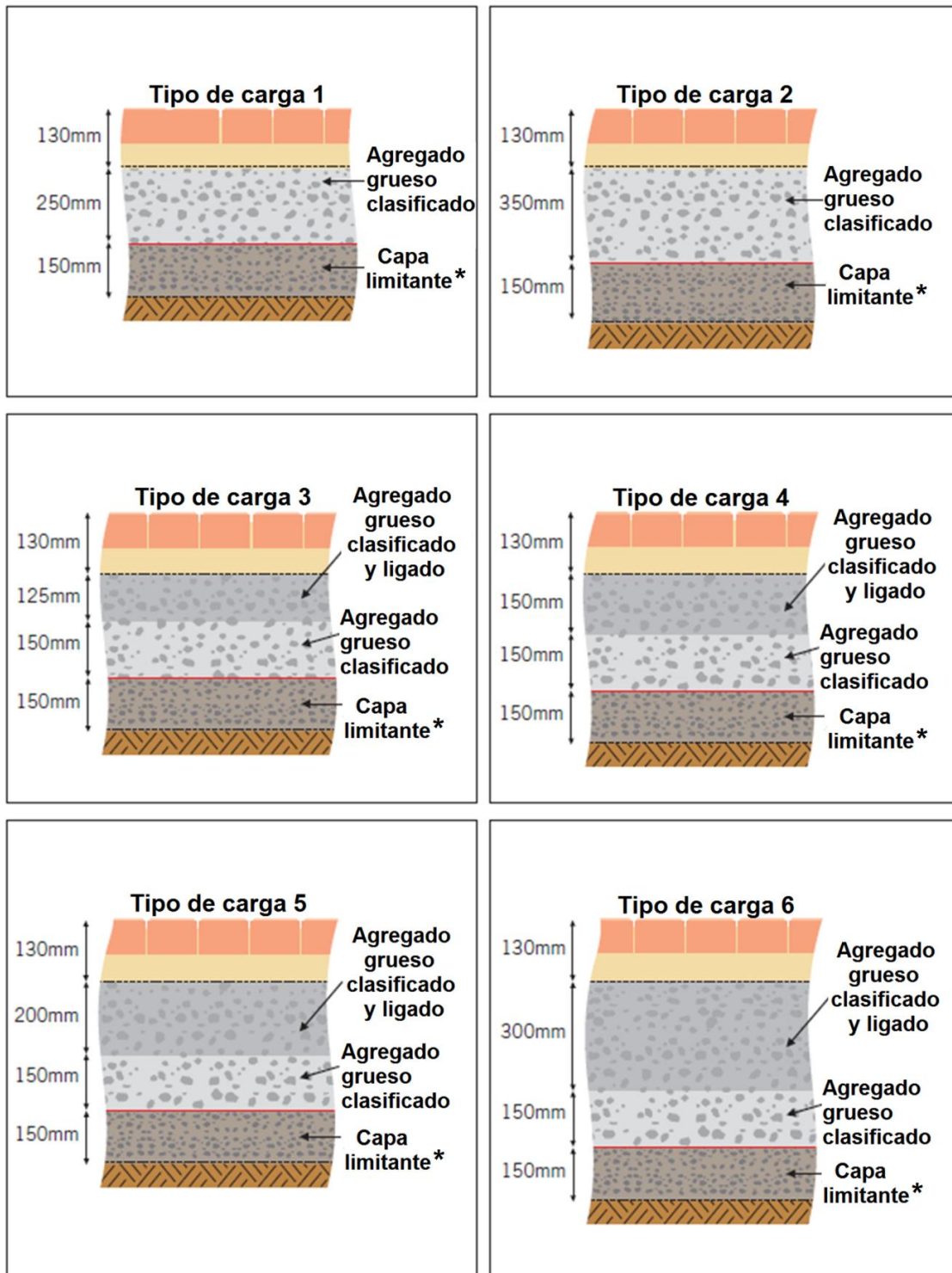


Imagen 30. Espesores de la capa de almacenamiento para el caso infiltración cero (Adaptado de Interpave, 2008).

- **La capa limitante:**

Se usa como base del sistema en el caso de infiltración cero, para poder instalar adecuadamente las demás capas. Este material a parte de formar una superficie firme y estable, protege la membrana contra el punzonamiento e impermeabiliza la subrasante debido al contenido partículas finas.

El material de la capa limitante es cualquier material de bajo costo, como por ejemplo, el desecho causado por el fresado del pavimento asfáltico. Los materiales que se excluyen para formar esta capa, son los materiales arcillosos y limosos, y aquellos que contienen alquitrán, betún y carbón (Interpave, 2008).

- 3. Se deben ajustar los espesores en caso de tener un CBR menor al 5%, de acuerdo a la tabla 14 (interpave, 2008).

CBR de la Subrasante	Ajuste al espesor de la capa de agregado grueso clasificado, en el caso de infiltración total o parcial (mm)	Espesor total de la capa limitante, en el caso de infiltración cero (mm)
1%	+300	600
2%	+175	350
3%	+125	250
4%	+100	200
5%	Use el espesor de la imagen 29	150
8%		
10%		
15%		

Tabla 14. Ajuste a los espesores en caso de CBR menor a 5% (Adaptado de Interpave, 2008).

El diseño estructural se basa en la experiencia obtenida en el Reino Unido. Debido a los buenos resultados esta se ha repetido, en la mayoría de los autores para la mayoría de los países. Su funcionamiento no está restringido a nivel mundial, pues las características de los materiales pétreos son los mismos. Por otra parte los diseños hidráulicos la mayoría de los autores los establece basándose en mapas hidrológicos de su país, por eso es que se retomaron las ecuaciones en las cuales

ellos se basaron para generar tablas y normas, y se adecuaron para poder ser utilizadas en cualquier sitio con cualquier régimen hidrológico.

6.7 Procesos constructivos:

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).

6.7.1 Información básica del lugar de aplicación:

Debe hacerse un reconocimiento preliminar y detallado del sitio de aplicación y conocer datos como:

Perfiles de suelo, geología, topografía y patrones de drenaje (hoyas hidrográfica o área aportante), clasificación hidrológica del suelo (A, B, C, D), antecedentes históricos de rellenos o compactaciones, humedales y pozos, etc. Entre más información preliminar se obtenga mejores resultados se tendrán al reducir la incertidumbre (Smith, 2006).

6.7.2 Durante la construcción:

Se recomienda mantener los sedimentos lejos del área de construcción, es necesario desviar o impedir la entrada de la escorrentía al sitio mediante canales de drenaje, porque esta podría traer partículas contaminantes. Si no se controla lo anterior la estructura podría colmatarse antes de tiempo, acortando su vida útil. Por otra parte durante el transporte y en el sitio de acopio es necesario proteger los materiales contra contaminantes (materia orgánica o metales) y evitar la entrada de partículas finas (CIRIA, 2007).

6.7.3 Preparación de la subrasante:

La clave de la estabilidad, tanto de los pavimentos permeables como de los convencionales, está en garantizar la uniformidad y resistencia de la subrasante (la compactación de la subrasante se requerirá cuando el sistema funcione como vía vehicular y tenga un CBR inferior a 5%, en el caso que su uso sea peatonal no será necesaria).

Se debe ser cuidadoso con la maquinaria pesada pues esta puede compactar la subrasante a medida que transita, este hecho se debe tener en cuenta en el diseño, pues una sobre compactación disminuirá la capacidad de infiltración de la subrasante (que para el caso de infiltración total debe ser mayor a 13 mm/hora (MINVU, 1996; Smith, 2006).

6.7.4 Cuidados de la membrana impermeable:

Debe asegurarse no rasgar ni romper la membrana impermeable durante los procesos de construcción, además se debe garantizar su longitud de traslapo de no menos de 60 cm, esto para el caso del sistema de infiltración cero (CIRIA, 2007).

6.7.5 Cuidados del geotextil:

Se recomienda un geotextil no tejido en material sintético con una permeabilidad de 10 veces la permeabilidad de la subrasante (MINVU, 1996) y que cumpla con las características expuestas en el capítulo 4.5.4, se establece un traslapo mínimo de 30 cm (Interpave, 2008).

6.7.6 Compactación de la sub-base permeable:

El material de la sub-base se debe ir incorporando mediante capas de 10 cm, compactándose hasta alcanzar su máxima densidad con un compactador estático con 10 Ton, sin excederse pues se podría aplastar o triturar el material generando partículas finas y cambiando la relación de vacíos (CIRIA, 2007).

6.7.7 Compactación de la capa de transición:

Se debe hacer el 60 % de la compactación con rodillo estático el 40% restante con vibro compactador. Para obtener el nivel óptimo de compactación el material debe estar húmedo (Interpave, 2008).

6.7.8 Cuidados de la capa de rodadura:

Según sea en concreto hidráulico o concreto asfáltico es necesario garantizar algunas de las mismas técnicas de colocación que para los pavimentos convencionales, estas son:

- En el caso del concreto hidráulico, evitar bombear el concreto, impedir la segregación, compactar mediante vibración sin exceso (pueden cerrarse los poros), hacer juntas de dilatación al momento de la colocación (nunca mediante cortadora después de secado porque los residuos de concreto pueden colmatar la estructura), vibrar inmediatamente después de la colocación (debido a su rápido secado un vibrado después de 15 minutos de haberse colocado contribuye a la rotura de los enlaces que desarrolla el cemento), y hacer el proceso de curado completo debido a que el concreto poroso es más susceptible a la evaporación (Smith, 2006).
- Manejar adecuadamente la temperatura de colocación y compactación del concreto asfáltico (Cahill *et al*, 2003).

En el caso de los adoquines y los modulares, se deben construir bajo los estándares y normas de calidad nombradas en el capítulo 6.4.3 y 6.4.4, y se debe ser cuidadoso con el llenado de las juntas, pues estas garantizan la estabilidad de las piezas (Interpave, 2008).

6.8 Mantenimiento:

El mantenimiento periódico de los pavimentos permeables ha demostrado una mejora en cuanto a su comportamiento y un aumento en su vida útil, 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).

7 Ejemplos de aplicación:

Pavimento permeable en asfalto poroso en la plaza principal de Soyalo en el estado de Chiapas, Mexico, se pinta como parte de la decoración urbanística.



Imagen 31. Pavimento permeable en la plaza principal de Soyalo en el estado de Chiapas, México (Fuente: Concreto Permeable: <http://www.concretopermeable.com/fichatecnicahidrocreto.pdf>)

Pavimento permeable en asfalto poroso en el estacionamiento de la planta de Schnyder Electric en Tlaxcala, México.



Imagen 32. Pavimento permeable en asfalto poroso en el estacionamiento de la planta de Schnyder Electric en Tlaxcala, México (Fuente: Concreto Permeable: <http://www.concretopermeable.com/fichatecnicahidrocreto.pdf>)

Pavimento permeable en asfalto poroso frente al hotel Intercontinental de Zapopan en Jalisco, México.



Imagen 33. Pavimento permeable en asfalto poroso frente al hotel Intercontinental de Zapopan, Jalisco (México) (Fuente: Eco Concreto: <http://www.ecologiaenconcreto.com.mx/aclaraciones.pdf>)

Pavimento permeable en asfalto poroso en un estacionamiento en Ontario Canadá.



Imagen 34. Pavimento permeable en asfalto poroso en Ontario Canadá (Fuente: Ministerio de Transporte de Ontario: <http://www.mto.gov.on.ca/english/transtek/roadtalk/rt15-2/>)

Contraste entre Pavimento permeable en asfalto poroso al fondo de la imagen, y pavimento convencional al frente, en la Universidad de Carolina del Norte, USA.



Imagen 35. Contraste entre Pavimento permeable en asfalto poroso al fondo de la imagen, y pavimento convencional al frente, en la Universidad de Carolina del Norte, USA (Fuente: Green Counsel: http://nylawline.typepad.com/greencounsel/2006/09/they_paved_para_1.html).

Pavimento permeable en adoquine en la escuela secundaria Benito Juárez en Chicago, Illinois.



Imagen 36. Pavimento permeable en adoquine en la escuela secundaria Benito Juárez en Chicago, Illinois (Fuente: Steven Can Plan: <http://www.stevencanplan.com/tag/bioswale/>)

Pavimento permeable en adoquin en *Stonehill private Catholic liberal arts college* en Boston, USA.



Imagen 37. Pavimento permeable en adoquin en Stonehill private Catholic liberal arts college, Boston (Fuente: Land Scape Online: <http://www.landscapeonline.com/research/article/15100>).

Pavimento permeable en adoquin en *St. Germain's – Diamond-Vogel Parking Lot*, 17th Ave East & London Rd Duluth, Minnesota, USA.



Imagen 38. Pavimento permeable en adoquin en St. Germain's – Diamond-Vogel Parking Lot, 17th Ave East & London Rd Duluth, Minnesota (Fuente: Lake superior Streams: <http://www.lakesuperiorstreams.org/stormwater/toolkit/pervPaveCase.html>)

Aplicación de pavimentos en concreto poroso para estacionamientos en el Campus San Joaquín de la Universidad Católica de Chile.



Imagen 39. Aplicación de pavimentos en concreto poroso para estacionamientos en el Campus San Joaquín de la Universidad Católica de Chile (Fuente: Centro de Aguas Urbanas: <http://www.centroaguasurbanas.cl/docimágenes-piloto.htm>)

Aplicación de pavimento permeable en adoquines de concreto poroso en el Centro de Eventos y Convenciones Espacio Riesco en Santiago de Chile.



Imagen 40. Aplicación de pavimento permeable en adoquines de concreto poroso en el Centro de Eventos y Convenciones Espacio Riesco en Santiago de Chile (Fuente: Centro de Aguas Urbanas: http://www.centroaguasurbanas.cl/documentos/Uso_de_Pavimentos_Permearbles_Revista_BIT.pdf)

8 Aplicabilidad para Bogotá:

Como ejemplo de las metodologías expuestas, se hará un diseño de pavimento permeable en una zona susceptible a inundaciones por el río Bogotá. Se usara para el diseño estructural la metodología de CIRIA por ser la más usada en la mayoría de casos debido a su practicidad y actualidad. Por otra parte el diseño hidráulico se basara en las características hidrológicas de la zona y el cálculo de espesores de la zona de almacenamiento se hará mediante la metodología del MINVU que proporciona datos usuales de la porosidad de la sub-base (desconocido si no se ha medido en campo, y necesario para el método de Smith).

8.1 Sitio de diseño:

El diseño se hace en el sector de Guaymaral en Bogotá, una zona cercana al río Bogotá y aledaña a humedales, en el condominio residencial Los Arrayanes.

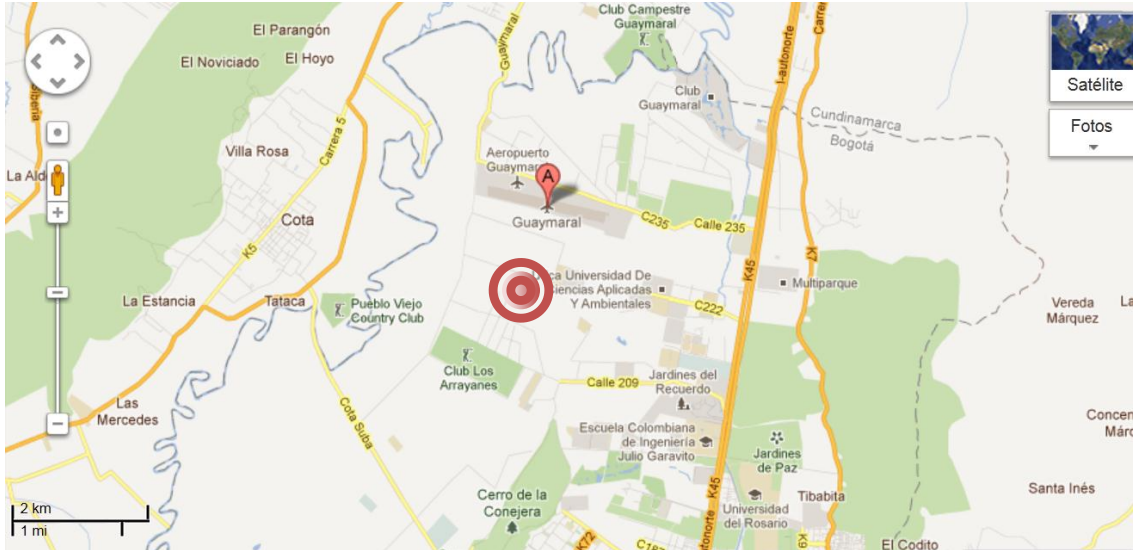


Imagen 41. Ubicación geográfica del sitio de diseño (Fuente: Googlemaps: <http://maps.google.com/>)

8.2 Características del sitio:

8.2.1 Tipo de suelo (subrasante):

La zona escogida hace parte de la llanura del río Bogotá que está formada por suelos blandos, limos orgánicos superficiales expansivos y arcillas plásticas (Pérez, 2000).

De la tabla 9 obtenemos los valores aproximados de CBR y de permeabilidad para este tipo de suelo:

Arcilla limosa:

$K = 10^{-9}$ a 10^{-8} m/s.

CBR = 3% a 6%.

- **Selección del tipo de sistema:**

Con el dato de la permeabilidad (k) se puede obtener el tipo de sistema que mejor se adapte, por medio de la tabla 8.

Tipo de sistema = Infiltración cero

Es decir un sistema de amortiguamiento.

8.2.2 Diseño hidráulico:

- **Evento de diseño:**

Para el cálculo del evento de diseño se usa en este caso el método racional, debido a que se tiene la curva IDF de la zona:

Estación:	Guaymaral
Código:	2120559

INTENSIDAD MÁXIMA OBTENIDA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE FRECUENCIA						
DURACION	Tr 3 Años	Tr 5 Años	Tr 10 Años	Tr 25 Años	Tr 50 Años	Tr 100 Años
15	48.70	57.00	67.40	80.60	90.40	100.10
30	34.80	40.20	47.00	55.50	61.80	68.10
60	23.10	26.30	30.40	35.60	39.40	43.20
120	13.40	15.50	18.00	21.30	23.70	26.10
360	4.90	5.70	6.70	7.90	8.80	9.70

PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE						
PARÁMETRO	Tr 3 Años	Tr 5 Años	Tr 10 Años	Tr 25 Años	Tr 50 Años	Tr 100 Años
C ₁	2149.83	2008.52	2001.97	2118.78	2209.43	2314.03
X ₀	25.80	22.10	19.30	17.20	16.00	15.10
C ₂	-1.02	-0.98	-0.96	-0.94	-0.93	-0.92

INTENSIDAD MÁXIMA OBTENIDA A PARTIR DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE						
DURACION	Tr 3 Años	Tr 5 Años	Tr 10 Años	Tr 25 Años	Tr 50 Años	Tr 100 Años
15	48.84	57.24	67.72	81.04	90.90	100.70
30	35.48	40.97	47.84	56.57	63.00	69.40
60	22.87	26.18	30.34	35.62	39.51	43.39
120	13.32	15.26	17.69	20.75	23.01	25.27
360	4.93	5.76	6.77	8.02	8.94	9.87

$$I(T) = C_1 (D + X_0)^{C_2}$$

I = Intensidad (mm/h)
T = Período de Retorno (Años)
D = Duración (min)
X₀, C₁ y C₂ = Parámetros de ajuste



	CONTRATO No. 2-02-26100-607-2003 ESTUDIO Y REVISIÓN DE LAS CURVAS IDF / PADF PARA LA SABANA DE BOGOTÁ	
ANEXO E Hoja 43 de 205	ESTACIÓN GUAYMARAL (2120559) CURVAS IDF Y PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE	REV. 0 JUNIO, 2005

Tabla 15. Datos de la curva IDF para la estación Guaymaral (Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá: ANEXO 4)

- Intensidad:**

Con la curva IDF de la zona de Guaymaral se calcula la intensidad de la lluvia para un periodo de retorno de 10 años (no existe una red de drenaje bien desarrollada) y una duración de 60 min (supuesto).

$$I = 30,34 \text{ mm/hora}$$

- Coeficiente de escurrimiento:**

La zona es una zona residencial con jardines por lo que el valor de coeficiente de escurrimiento es:

$$C = 0.5$$

- **Área:**

El sistema se implementara en el patio trasero y en el antejardín como se muestra en el plano.

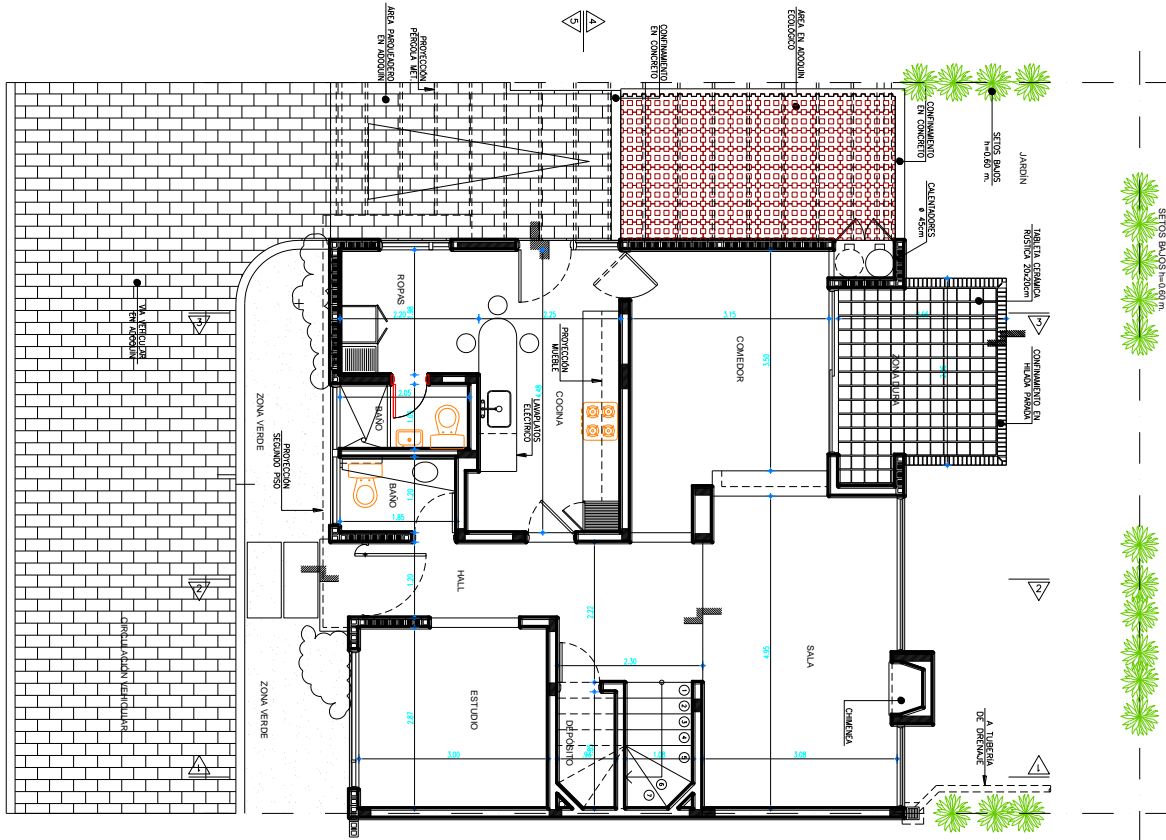


Imagen 42. Plano del sitio de aplicación. (Fuente: Pedro Gómez, ANEXO 5)

El área aportarte y el área propia del pavimento, obtenida mediante los planos arquitectónicos es:

$$A_{ady} = 197 \text{ m}^2$$

Que corresponde a la mitad de la vía que escurre debido al bombeo que presenta en el centro, más el área de la cubierta y la terraza.

$$A_p = 79 \text{ m}^2$$

Que corresponde al patio trasero más el antejardín.

- **Volumen afluente:**

$$V_{af} = 1,25 \cdot 0,5 \cdot 0,03034 \cdot 197 \cdot 1 = 3,73 \text{ m}^3$$

- **Volumen sobre el pavimento:**

$$V_p = 0,03034 \cdot 1 \cdot 79 = 2,39 \text{ m}^3$$

- **Volumen en la tubería:**

Como el sistema es de infiltración cero el volumen de salida será el caudal través de una tubería perforada (supuesta 2"), multiplicado por la duración del evento de precipitación da el volumen:

$$V_{ol} = t_{dur} \cdot Q_{tub}$$

Se desconoce Q_{tub} .

$$Q_{tub} = V_{el} \cdot A_{tub}$$

Para hallar la velocidad se usa la formula de Manning.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Se supone la pendiente de 1%.

El coeficiente de rugosidad de Manning es generalmente un dato entregado por el propio fabricante, como especificación técnica del producto, lo suponemos igual a 0,02.

El radio hidráulico se calcula como si el tubo fuera un canal circular, debido a que la tubería perforada viaja a flujo libre, para esto se supone un ángulo de 180° que indica que la tubería se llena hasta la mitad.

$$R_h = 0,0031 \text{ m}$$

Entonces:

$$V_{el} = 0,2721 \text{ m/s}$$

$$A_{tub} = 0,00202 \text{ m}^2$$

$$Q_{tub} = 0,00055 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{ol} = 1,98 \text{ m}^3$$

- ***Volumen de almacenamiento:***

Teniendo las entradas y la salida la diferencia entre estas será el volumen de almacenamiento (V_{alm}).

$$V_{alm} = 3,73 + 2,39 - 1,98 = 4,14 \text{ m}^3$$

Espesor de la sub-base:

$$e = V_{alm} / (pA_e)$$

$$e = 4,14 / (0,3 \cdot 79) = 0,174 \text{ m}$$

El dato de espesor obtenido por el diseño hidráulico debe ser comparado con el dato de espesor que se obtendrá por medio del diseño estructural, el mayor entre estos dos será el espesor de diseño.

8.2.3 Diseño estructural:

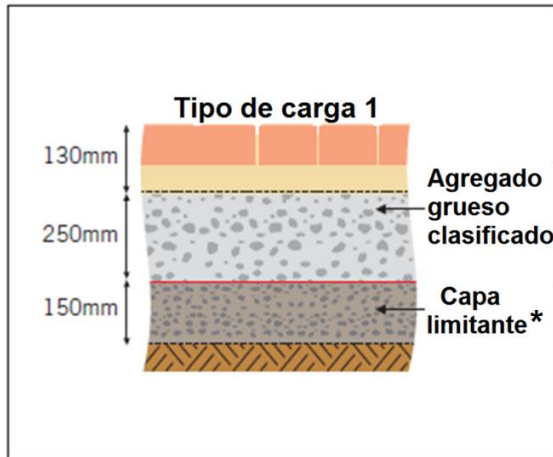
- ***Selección del tipo de carga de acuerdo al uso:***

Tipo de uso = Jardín/Patio

Por lo tanto el tipo de carga obtenido de la tabla 10, será 1.

- **Selección del espesor de acuerdo con el tipo de carga y sistema:**

Tipo de carga 1, sistema de infiltración cero.



- **Ajuste por CBR menor a 5 en la subrasante:**

Con un CBR promedio de 4%, se aumentan 200 mm a la capa limitante según la tabla 11.

8.2.4 Espesores de diseño:

8 cm de superficie en Turfstone™ (supuesto ya que se cuenta con el conocimiento a la normatividad ASTM para producirlo en el país)

5 cm de capa de transición.

25 cm de Sub-base permeable (este es el espesor de diseño definitivo por que el espesor de diseño hidráulico dio menor).

35 cm de capa limitante.

8.2.5 Observación:

Con la metodología obtenida estas se realizo un diseño en la zona de Guaymaral (zona con alto riesgo de inundación) en Bogotá, en el cual se combinaron y se complementaron los métodos de diseño, por una parte el método de Smith no tiene en cuenta el factor de seguridad en cuanto al volumen de agua de las zonas adyacentes, y el MINVU no tiene en cuenta el volumen que se precipita directamente sobre el área del pavimento permeable, por lo cual se decidió combinar los métodos y calcular el volumen afluyente de las zonas adyacentes por medio del método racional que propone MINVU y el volumen que se precipita directamente sobre el pavimento permeable mediante método de Smith, estos dos se sumaron y se les resto el volumen que viaja a través de la tubería propuesto por Galarza y de esta manera se obtuvo el volumen de almacenamiento. Por ultimo con la ecuación de MINVU se hallo el espesor.

9 Conclusiones:

Con el desarrollo de esta monografía sobre los pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano se realizó el estado del arte a cerca de los pavimentos permeables como alternativas de drenaje. Lo anterior se realizó a partir de una buena cantidad de referencias y recomendaciones norteamericanas, europeas y latinoamericanas cada una de estas con diseños hidráulicos diferentes, en su mayoría asociados a la hidrología de sus países, pero todas compartiendo la forma en el diseño estructural.

Este trabajo recopila las normas establecidas actualmente basadas en experiencias y diseños anteriores, es por eso que se enfatizó en estas para generar un documento práctico, confiable y actual. Dichas normas se obtuvieron a través de la comparación de mejores resultados y el mejor desempeño en anteriores experiencias, estas se fundamentan en las prácticas corregidas en el tiempo según los ensayos de aplicación y la práctica desde los años 80. Además son las metodologías aplicables a cualquier zona, y no restringen su aplicación a una zona en particular, su uso es general siempre y cuando sean conocidas las características hidrológicas.

El documento cuenta con todo lo necesario para llevar a cabo un sistema de pavimentos permeables, a diferencia de las principales guías de diseño, en este escrito se encuentra, el tipo de materiales, la granulometría de los agregados pétreos, las especificaciones y normativas, y el sistema constructivo.

Con el diseño se obtuvieron buenos resultados pese a que el terreno de la zona no permitió la percolación (no recarga de acuíferos), por medio de estos resultados obtenidos se observa que los pavimentos permeables son una alternativa viable cuya aplicación de manera masiva mejoraría sustancialmente el control de inundaciones en las zonas aledañas al río Bogotá, debido a que los tiempos de concentración aumentarían, con la retención de la escorrentía en el lugar donde se producen y no se trasladaría el problema aguas abajo. Caso

contario con lo que sucede con los sistemas convencionales de drenaje (tuberías y canales).

10 Referencias:

- ASTM. (2011). *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM C33 / C33M - 11a. *American Society for Testing and Materials. International Standards Worldwide*. USA.
- Azzout, Y., Barraud, S., Cres, F.N., Alfakih, E. (1994). *Techniques alternatives en assainissement pluvial. Choix, conception, réalisation et entretien*. En: *Lavoisier-Tec. et Doc. ed.*, Paris, 372pp.
- Brattebo, B. y Booth, D. (2003). *Long-term storm water quantity and quality performance of permeable pavement systems*. En: *Water Research*. 37(26): 4369–76.
- Cahill, T., Adams, M., y Marm, C. (2003). *Porous Asphalt, Hot Mix Asphalt Technology, Issue: September/October*, <http://www.asphaltalliance.com>.
- Cahill. T., Adams. M., y Marm, C. (2005). *Stormwater Management with Porous Pavements. Gov. Engin.*, <http://www.govengr.com>, pp 14–19.
- Centro de aguas urbanas. (2011) <http://www.centroaguasurbanas.cl> (Consultado 26 Septiembre 2011).

CIRIA (2007). *The SuDS Manual*. CIRIA, Londres: CIRIA.

Delleur, J. (2003). *The evolution of urban hydrology: Past, present and future*. En: *Journal of hydraulic engineering*. Vol 129, No. 8.

Durrans, S. (2003). *Stormwater Quality Management, Capitulo 15*. En: *Stormwater Conveyance Modeling and Design*. Estados Unidos: Haestad Methods.

EPA (*Environmental Protection Agency*). (1999). *Studies Preliminary Data Summary of Urban Stormwater Best Management Practices*, EPA-821-R-99-012.

Ferguson, B. K. (2005). *Porous pavements*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Fletcher, T., Deletic, A., Mitchell, G. y Hatt, B. (2008). *Reuse of Urban Runoff in Australia: A Review of Recent Advances and Remaining Challenges*. En: *Journal of Environmental Quality* Vol 37:116–127.

Galarza, S. (2011). Desarrollo de una herramienta de análisis multi-criterio para el soporte de toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Tesis Magister en Hidrosistemas. Pontificia Universidad Javeriana.

ICONTEC. (2004). Adoquines en concreto para pavimentos. NTC 2017 Segunda actualización, Colombia.

Interpave. (2008). *Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements. Interpave The Precast Concrete Paving & Kerb Association, 60 Charles Street, Leicester.*

Jiménez, B. (1999). Contaminación por Escorrentía Urbana. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; Colección SEINOR No. 22. Madrid, España. 495 pp.

Legret, M., Nicollet, M., Miloda, P., Colandini, V., and Raimbault, G. (1999). *Simulation of Heavy Metal Pollution from Stormwater Infiltration Through a Porous Pavement with Reservoir Structure*, En: *Water Science Technology*, 39 pp, 119-125.

Mays, L. (2001). *Stormwater Collection Systems Design Handbook*, USA, McGraw Hill.

Metropolitan Council. (2003). *Urban Small Sites Best Management Practice Manual.*

http://www.metrocouncil.org/environment/Watershed/BMP/CH1_Factors.pdf.

(Consultado 15 Agosto 2011)

MINVU. (1996). Manual de Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de Diseño. Ministerio de la Vivienda y el Urbanismo del Gobierno de Chile, Santiago.

Monsalve, G. (1999). Hidrología en la ingeniería, Edición: 2a ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, 382 p. Bogotá

NAPA. (*National Asphalt Pavement Association*). (2003). *Porous Asphalt Pavement, National Asphalt Pavement Association*. Lanham, Maryland.

PAVCO (2011). Sistema AquaCell para el manejo de aguas lluvias. <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=147>. (Consultado 19 de octubre 2011)

Pérez, A. (2000). La estructura ecológica principal de la sabana de Bogotá. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Disertación en los "Martes del Planetario", Primer Semestre de 2000, evento organizado por la sociedad geográfica de Colombia, academia de ciencias geográficas, www.sogeocol.edu.co.

Prince George's County. (2011). *Bioretention. Portable document format*. http://www.goprincegeorgescounty.com/government/agencyindex/der/ppd/lid/pdf/intro_bioretention.pdf. (Consultado 28 septiembre 2011).

Reyes, F. y Torres, A. (2002). Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes. En: Revista de Ingeniería de Construcción, Vol. 17, No. 2, 93-102.

Smith, D. (2006). *Permeable Interlocking Concrete Pavements: Selection, Design, Construction, Maintenance*. Tercera edición. *Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI)*. Canada.

Tennis, P., Leming, L., y Akers, D. (2004). *Pervious Concrete Pavements, EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2004, 36 pag.*

Thelen, E., y Howe, L. (1978). *Porous Pavement, the Franklin Institute Press, Philadelphia, Pennsylvania, 98pp.*

Torres, A. (2004). Apuntes de clase sobre Hidrología Urbana. Colombia, ed: Editorial Pontificia Universidad Javeriana ISBN: 9586837130 v. 1 pags. 377.

Watanabe, S. (1995). *Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes*. En: *Water Science Technolgy*, 32 pp: 25–32.