DISEÑO DE UN CAMPO DE PRUEBA PILOTO DE PAVIMENTOS PERMEABLES EN LA CIUDAD DE CARTAGENA

BRIAN HERNÁNDEZ DÍAZ

OMAR MARTÍNEZ LLORENTE

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C

2014

DISEÑO DE UN CAMPO DE PRUEBA PILOTO DE PAVIMENTOS PERMEABLES EN LA CIUDAD DE CARTAGENA

Autores:

Brian Hernández Díaz

Omar Martínez Llorente

TRABAJO DE GRADO PARA OBTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Director:

Ing. Javier Mouthón Bello

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en modelación ambiental (GIMA)

Línea de investigación:

Saneamiento Ambiental

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C

2014

RESUMEN

El uso de pavimentos permeables ha tomado gran participación a nivel mundial como método alternativo para la disminución de caudales de escorrentía en un mundo que tiende a la urbanización y que de forma veloz acaba con las zonas permeables. El aumento de su uso se debe a la facilidad de construcción, ligeramente diferente al del pavimento normal, su simplicidad y economía.

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar un campo de prueba de pavimentos permeables con el fin de identificar beneficios en el manejo de aguas lluvias en la ciudad de Cartagena. Se realizó un estudio del material bibliográfico recolectado haciendo adaptaciones al medio, se hicieron estudios en campo, ensayos de laboratorio y se reunió información sobre estudios similares realizados en Chile, España, Inglaterra y Estados Unidos, entre otros. Se estudió la disponibilidad de materiales necesarios para el diseño disponibles en Colombia con el fin de diseñar un campo de prueba construible y económico.

Los datos de los resultados obtenidos, fueron usados en las distintas metodologías empleadas como son el método Mecanisista para diseño de pavimento asfaltico, el método de la PCA para hormigón, Método IPCI para pavimento adoquinado. Se usó además la ecuación de Manning para calcular el comportamiento del flujo del agua. Con los cálculos y estudios realizados se determinó el mejor sitio dentro de la universidad, para diseñar un parqueadero con tres diferentes tipos de pavimento permeable, cada uno con un área de 15 m^2 (5x3) cubriendo un área total de 45m^2. Las características del suelo son iguales para todos los pavimentos diseñados, se diseñó con una capa granular de características específicas, variando solamente el espesor del pavimento. El campo de prueba fue diseñado para una lluvia de una hora de duración con periodo de retorno de 10 años.

.

Los resultados más importantes de este proyecto se reflejan en el diseño de un campo de prueba piloto de tres tipos de pavimento permeable, donde los cálculos arrojaron espesores de losa variables de 10, 17 y 8 cm y además, bases de diseño de 40, 20 y 20 cm correspondientes a asfalto poroso, hormigón poroso y adoquines respectivamente, se usarán implementos complementarios a la estructura tales como tres tanques de almacenamiento para poder retener el agua de salida, así como un pluviómetro y un datalogger para registrar la precipitación .

Para concluir, el campo de prueba se usará para evaluar y comparar la presencia de componentes contaminantes en el agua lluvia de escorrentía respecto al agua de salida del campo de prueba, además de medir la capacidad de retención de volúmenes de la estructura, con el fin de verificar sus resultados como medida complementaria mitigante de grandes volúmenes de escorrentía.

ABSTRACT

The use of permeable paving has taken great interest worldwide as an alternative method for reducing runoff flows in use to it´s easy construction, slightly different from the normal floor, simplicity and economy in a world that tends to urbanization, which is ending very fast permeable zones.

The main objective of this work was to design a testing field of permeable paving in order to identify benefits in stormwater management in the city of Cartagena, it was necessary to use existing manual recommendations internationally, making adjustments to local in orther to gather information for future applications. A study of bibliographic material was collected , studies were done in the field, laboratory and information on similar studies in Chile, Spain , England and the United States were met . The availability of materials required for the design available in Colombia in order to design a buildable and economical field test was studied. The data of the results were used in the different methodologies used as are the mechanistic design method for asphalt paving , the PCA method for concrete paving and the IPCI method for Cobblestone paving. Furthermore the Manning´s equation were used to calculate the behavior water flow. With the calculations and studies was choosen the best place in the university , a parking lot with three different types of permeable pavement , each with an area of 15 m2 (5x3) covering a total area of 45m2. Soil characteristics are the same for all pavements, they were designed with a granular layer with specific characteristics , varying only the thickness of the pavement. The field test was designed for 30 minutes strorm with return period of 10 years.

The design is useful in order to analize the behavior of water permeable pavements and to measure runoff volumes stored, also offers the possibility to study the variation of pollutants before and after the field test.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 11

2. OBJETIVOS Y ALCANCE 13

2.1. Objetivo general 13

2.2. Objetivos específicos 13

2.3. Alcance 15

3. MARCO TEÓRICO 17

3.1. Sistemas urbanos de drenaje sostenible 17

3.2. Pavimentos permeables 19

3.3. Funcionamiento 23

3.4. Diseño del campo de prueba piloto 23

3.4.1. Localización y emplazamiento 23

3.4.2. Estimación de la intensidad de la lluvia 24

3.4.3. Relación entre la precipitación en 24 horas y una duración menor 25

3.4.4. Composición interna de las lluvias en Cartagena 26

3.4.5. Parámetros de diseño 30

3.4.6. geotextil 30

3.4.7. Control de salida de flujo 31

4. ANTECEDENTES 31

4.1. Absorción de agua de escorrentía 32

4.2. Hidrocarburos 33

4.3. Solidos suspendidos y metales 34

4.4. Estado actual de los pavimentos permeables en Colombia 36

4.5. Ámbito nacional 37

4.6. Ámbito local 38

5. ESTADO DEL ARTE 39

5.1. Pavimentos permeables 40

5.2. Pavimentos porosos 44

5.3. Hormigón permeable 46

5.4. Adoquines 48

6. MARCO LEGAL **50**
6.1. RAS-2000 50
6.2. Manual de drenaje para carreteras 2009 de INVÍAS 50
6.3. Resolución 6523 del 16 de diciembre de 2011 50
6.4. Guía de diseño para estructuras de pavimentos (1998) 51
7. METODOLOGÍA **52**
7.1. Material bibliográfico 52
7.2. Información local 53
7.3. Estudios en campo y laboratorio 53
7.3.1. Levantamientos topográficos 53
7.3.2. Pruebas de infiltración 55
7.3.3. Ensayo de granulometría 56
7.3.4. Ensayos de proctor y CBR 58
7.4. Cálculo de escorrentía y volúmenes de almacenamiento 60
7.4.1. Calculo de intensidad de lluvia 61
7.4.2. Calculo de caudal de diseño 62
7.5. Diseño hidráulico 62
7.6. Tipo de pavimento a seleccionar 64
7.7. Geometría interna 64
7.8. Conducción y desbordamiento 64
7.9. Capa de depósito 65
7.10. Drenajes 65
7.11. Mantenimiento 65
7.12. Diseño estructural 66
7.12.1. Ensayo de permeabilidad 66
7.12.2. Método ICPI para pavimentos en adoquines 67
7.12.3. Diseño de hormigón poroso 69
7.12.4. Método mecanicista para pavimentos asfáltico poroso 70
7.13. Diseño de tuberías internas 77
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS 78

8.1. Elección de ubicación adecuada.....78
8.2. Estudios en campo y laboratorio.....79
8.3. Clasificación del suelo.....80
8.4. Clasificación de la base..... 80
8.5. Análisis hidráulico e hidrológico..... 80
8.5.1. Calculo de intensidad de lluvia 81
8.5.2. Calculo del caudal de diseño.....84
8.5.3. Calculo de tuberías internas 91
8.6. Pavimentos permeables escogidos..... 91
8.7. Diseño..... 92
8.8. Guía de uso..... 94
8.9. Propuesta constructiva del campo de prueba piloto de pavimentos permeables.....96
8.10. Presupuesto.....96
9. CONCLUSIONES..... 98
9.1. Limitaciones del proyecto..... 101
9.2. Recomendaciones para trabajos futuros..... 101
10. Referencias bibliográficas..... 103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del Campus Piedra de Bolívar en Cartagena de Indias……15
Figura 2. Estructura de pavimento permeable en adoquín……..……22
Figura 3. Fracción de la precipitación de 24 horas vs duración t de la lluvia…….....26
Figura 4. Determinación del parámetro (a)…….....28
Figura 5. Determinación del parámetro (a)…….....29
Figura 6. Tendencia en Estudios de Pavimentos Permeables……..…….37
Figura 7. Construcción de estaciones experimentales.....42
Figura 8. Plazas de aparcamiento experimentales construidas con firmes permeables ocupadas por vehículos ligeros. (Rodríguez, 2008)…….... ...43
Figura 9. Esquema del campo de prueba piloto construida en la universidad Católica de Chile……..…47
Figura 10. Localización del campo de prueba piloto ……..…….…….52
Figura 11. localización del campo de prueba piloto de pavimento permeable……..……...54
Figura 12. Curva de compactación del suelo natural…….……59
Figura 13. Esquema de ensayo de permeabilidad……..……66
Figura 14. Gráfica del ICPI para el calculo del espesor de capa granular a partir del CBR.....68
Figura 15. Esquema de diseño para el pavimento permeable en adoquines……..69
Figura 16. Esquema de funcionamiento del método mecanicista en pavimentos flexibles.....71
Figura 17. Factor de ponderación para diferentes temperaturas.....73
Figura 18. Relación entre temperatura efectiva de las capas asfálticas y de la mezcla.....74
Figura 19. Datos arrojados por el programa Windepav para el cálculo de espesores de capas de la estructura.....76
Figura 20. Hietograma de precipitación con excedencias de lluvia variable entre 10 y 100%.....83
Figura 21. Histograma de precipitación con excedencia de lluvia del 10%.....84
Figura 22. Balance hidráulico en el campo de prueba piloto de pavimentos permeables.....85
Figura 23. Balance hidrológico del pavimento permeable en adoquines en los 6 primeros minutos.....87
Figura 24. Esquema de infiltración por capas.....88
Figura 25. Método por elementos finitos.....89
Figura 26. Caudal de entrada y de salida en el campo de prueba piloto.....90
Figura 27. Esquema de diseño.....93
Figura 28. Planos del campo de prueba piloto con sus cortes A-A' y B-B'.....94

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Precipitación acumulada para una probabilidad de excedencia……..27
Tabla 2. Datos de rendimiento de eliminación de constituyentes de 6 instalaciones de pavimentos permeables y 25 detenciones estanques. (Greenroads Manual v15, 2013)……35
Tabla 3. Parámetros de diseño de diferentes tipos de Pavimentos Permeables, elaborada con base a los estudios de la ASTM (Association of Chartered Treasury Managers) y las experiencias de los trabajos de Jackson y Smith en Estados Unidos……..40
Tabla 4. Pendiente media medida en el área seleccionada para realizar el proyecto……..54
Tabla 5. Relación aproximada entre la clasificación unificada y la permeabilidad. Manual de drenaje para carreteras INVIAS 2009…..55
Tabla 6. Análisis por tamizado del suelo del sitio seleccionado……...56
Tabla 7. Límite líquido del terreno natural……57
Tabla 8. Límite plástico del terreno natural……57
Tabla 9. Clasificación del suelo……58
Tabla 10. Determinación del contenido de humedad……58
Tabla 11. Determinación de densidad máxima seca……59
Tabla 12. Ensayo de CBR realizado al suelo del sitio seleccionado…….....60
Tabla 13. Vehículos aforados en dos horas y proyectados a 10 años……71
Tabla 14. Temperatura promedio mensual en la ciudad de Cartagena……72
Tabla 15. Cálculo del Stiffness de la Mezcla Asfaltica…..75
Tabla 16. Comparación de esfuerzos calculados y admisibles……76
Tabla 17. Precipitación no acumulada para una probabilidad de excedencia……..…83
Tabla 18. Balance hidráulico en la estructura de adoquines ……..……85
Tabla 19. Balance hidráulico en la estructura de hormigón poroso ……..……86
Tabla 20. Balance hidráulico en la estructura de asfalto poroso ……86
Tabla 21.Caudales de salida para cada tipo de pavimento……..……..…88
Tabla 22. Balance hidráulico de la estructura en asfalto poroso usando el método de elementos finitos……..……..91
Tabla 23. Parámetros de diseño de los diferentes tipos de pavimentos a emplear……..……93
Tabla 24. Resumen de presupuesto para la construcción del proyecto……97

1. INTRODUCCIÓN

Es notorio el crecimiento urbano que se ha desarrollado en los últimos años, las ciudades son cada vez más grises y se nota la gran disminución de zonas verdes. Esto tal vez sea índice de progreso económico, sin embargo, son muchas las consecuencias que trae un desarrollo que altera el ciclo natural del agua.

El crecimiento de la urbanización trae como consecuencia la pérdida de zonas permeables, que de manera natural, podían infiltrar el agua reduciendo los caudales de escorrentía. Al aumentar las zonas impermeables, también lo hace la escorrentía y trae como consecuencia inundaciones, transporte de residuos sólidos, minerales y químicos nocivos para los cultivos y la salud, deterioro de estructuras entre otros.

Como respuesta a la necesidad del crecimiento urbano y su consecuente disminución de zonas permeables, en muchas ciudades del mundo se han implementado los denominados sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS); países como España, Estados Unidos, Chile y Suecia han realizado investigaciones y creados diseños, demostrando la efectividad de estos sistemas.

De los muchos SUDS desarrollados en el mundo, uno de los más usados es el de pavimentos permeables, que satisface la necesidad estructural requerida para parqueaderos, senderos peatonales, ciclorutas, vías de bajo tráfico entre otras. El uso de pavimentos permeables permite la infiltración del agua a la subbase, ayudando a disminuir la escorrentía y mejorando la calidad del agua, Se ha demostrado que el volumen de agua retenida en los sistemas de pavimentos permeables fluctúa entre un 45% a 75%, además en el caso de no contar con suelos de buena permeabilidad, los pavimentos permeables de todas formas pueden emplearse. La capacidad de almacenamiento de la subbase y la carpeta pueden retener temporalmente un volumen de agua importante. (Rivera et al., 2003).

Los pavimentos permeables remueven del 65 al 100% de los sólidos suspendidos, del 65 al 100% de nitrógeno, del 30 al 65% de fosfatos, del 65 al 100% de agentes patógenos y del 65 al 100% de los metales. (Concretos Especiales S.R.L., 2011).

El proyecto a realizar radica en el diseño de un campo de prueba piloto de pavimentos permeables, para ubicarlo en la Universidad de Cartagena, en el campus de Piedra de Bolívar con el fin de identificar condiciones y beneficios para el manejo de las aguas lluvias, estudiar el cambio del caudal de escorrentía y remoción de contaminantes con el propósito de contribuir al desarrollo sostenible aplicable a la universidad y a la ciudad, recopilando información para futuros proyectos que consideren el uso de estos sistemas de drenaje sostenible, además de los fines académicos.

La primera etapa del proyecto consistió en la recolección de material bibliográfico y estudio de este, aquí se encontraron varios manuales muy completos como el manual de diseño para tratamiento de aguas de escorrentía de Virginia, manual de manejo de aguas lluvias Portland, manual de diseño de la universidad Católica de Chile, manual de estructuras hidráulicas y calidad de agua CIRIA, entre otros. Posteriormente se emplearon ecuaciones y parámetros recomendados en algunos de los manuales mencionados y se determinaron especificaciones de diseño para pavimento en adoquines espesores de base de 20 cm, espesor de adoquines de 8cm y permeabilidad de 7x10^-4 cm/s; pavimento en hormigón poroso con base de 20 cm, 15 cm de espesor de losa, porcentaje de vacíos de 20% , resistencia de 3500 PSI y permeabilidad de 1.5x10^-1 cm/s ; pavimento en asfalto poroso el cual constará con una subbase de 35 cm y base de 25 cm, capa de asfalto de 10 cm con porcentaje de vacíos de 30% y permeabilidad de 3.5x10^-3 cm/s.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

2.1. Objetivo general

Diseñar un campo de prueba piloto de pavimentos permeables para identificar beneficios en el manejo de las aguas lluvias en la ciudad de Cartagena, basándose en recomendaciones de manuales existentes internacionalmente, haciendo adaptaciones de estos al medio local con el fin de recopilar información para futuras aplicaciones.

2.2. Objetivos específicos

- Establecer las especificaciones técnicas y las variables necesarias para la elaboración del diseño del campo de prueba piloto de pavimentos permeables.

- Crear un diseño basado en el comportamiento natural del agua de escorrentía y su interacción con los firmes permeables con el fin de obtener resultados referentes a la disminución de caudal de escorrentía y a la remoción de contaminantes.

- Caracterizar los materiales a usar en el diseño.

- Determinar las especificaciones de los instrumentos de medición que permitan la obtención de información requerida para efectuar las investigaciones deseadas del campo de prueba piloto.

- Elaborar una propuesta de investigación para la construcción y monitoreo de un campo de prueba piloto de pavimento permeable siguiendo los lineamientos de COLCIENCIAS incluyendo el análisis de costos para su implementación, así

como las declaraciones de pertinencia social, aporte a la educación e impacto ambiental de la iniciativa.

2.3. Alcance

El Proyecto a desarrollar estará regido por las condiciones hidrológicas y de suelo del campus Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena, el cual está ubicado en la ciudad de Cartagena, capital del departamento de Bolívar (Colombia) con coordenadas 10° 24’ 10” Latitud Norte y 75° 30’ 21” Longitud Oeste, Temperatura promedio de 31°C, a 36 metros sobre el nivel del mar.

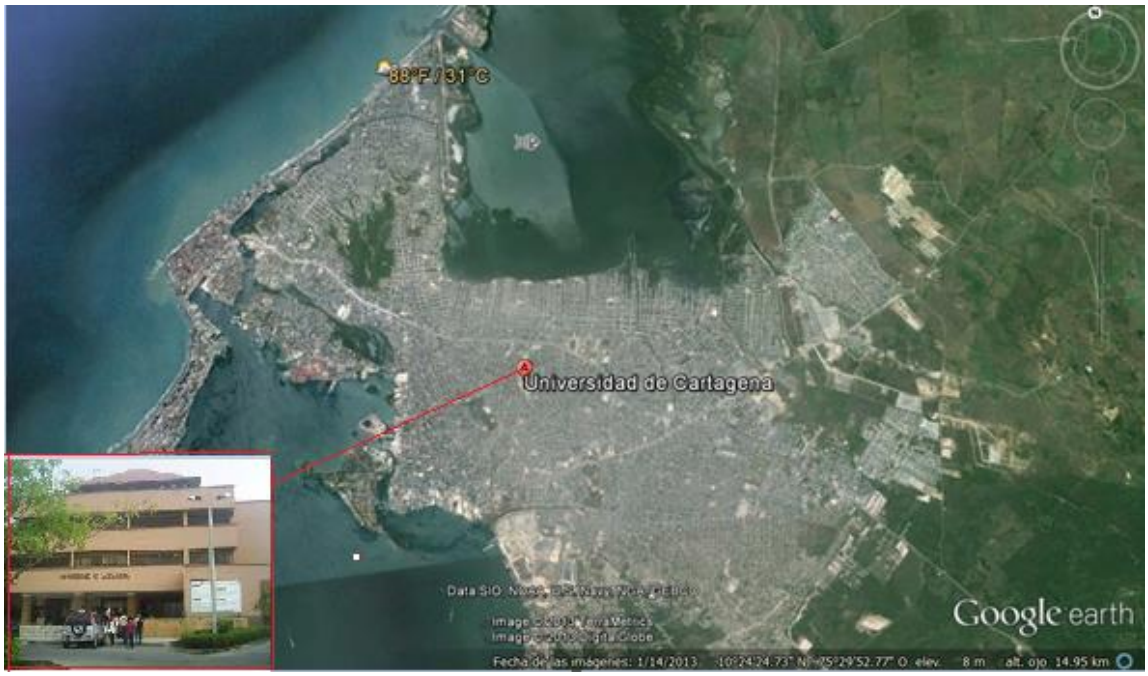


Figura 1. Ubicación geográfica del Campus Piedra de Bolívar en Cartagena de Indias.

Se utilizaron las herramientas de laboratorio necesarias para la obtención de datos e información en pro del diseño y cumplimiento de los objetivos, Se usaron tres tipos de pavimentos, entre los cuales encontramos adoquines, hormigón permeable y asfalto poroso, con fines de evaluar las ventajas de los pavimentos permeables

Las principales variables que se estudiaron fueron: capacidad de infiltración de los pavimentos, caudales generados tanto por el pavimento permeable como el impermeable, capacidad de almacenamiento en la estructura del pavimento permeable (carpeta,

subbase) considerando tanto suelos permeables como impermeables, espesor del pavimento, tamaño mínimo del lote, resistencia de los diferentes tipos de concreto.

Se hizo énfasis en realizar el diseño de tal manera que permita obtener resultados claros para la comparación de caudales generados por los distintos tipos de pavimentos, su capacidad de remoción de contaminantes y de almacenamiento de agua.

Se espera que el diseño sirva como inicio a la construcción y aplicación de nuevas soluciones de bajo impacto ambiental tanto en la universidad como la ciudad, y que en un futuro sirva como apoyo para la integración de varios de estos sistemas, de la misma forma que se viene realizando en países desarrollados. Con el estudio se realizará el diseño del campo de prueba piloto más no su construcción.

El proyecto se llevó a cabo en el primer periodo académico del año 2014 y se terminó a finales del mes de mayo.

3. MARCO TEÓRICO

3.1.Sistemas urbanos de drenaje sostenible

El continuo y rápido crecimiento de nuestras ciudades, que conlleva una progresiva impermeabilización del suelo, está alterando gravemente el ciclo hidrológico natural del agua. Cada vez necesitamos colectores más grandes, más largos, y una necesidad de depurar un agua de lluvia que en su origen era limpia. (ATLANTIS SUDS, 2013).

Las inundaciones en zonas urbanas por los sistemas de drenajes inadecuados se han convertido en un gran problema. Con el creciente desarrollo urbano, el daño potencial debido a inundaciones podría dar lugar a grandes pérdidas económicas (Scholz, 2006)

La necesidad de afrontar la gestión de las aguas pluviales desde una perspectiva diferente a la convencional, que combine aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales, está llevando a un rápido aumento a nivel mundial del uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. (ATLANTIS SUDS, 2013)

La principal regla de buena práctica en el drenaje urbano sostenible es reducir la escorrentía superficial minimizando las superficies impermeables de la ciudad y dividiendo las cuencas vertientes para evitar la concentración de grandes volúmenes de agua en un punto. Con este objetivo se debe procurar drenar hacia zonas verdes, parques y espacios abiertos. También es recomendable recoger en lo posible las aguas pluviales y reutilizarlas para el riego o el lavado de calles, obteniendo de este modo un doble beneficio al disminuir la cantidad de escorrentía superficial y al mismo tiempo ahorrar un consumo de agua potable (DICTUC & MINVU, 1996).

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible son conocidos con numerosas denominaciones en los diferentes países donde son empleados, así se pueden encontrar las siglas: (Rodriguez et al., 2008)

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

Para efectos de su uso en Latinoamérica, principalmente se usa el término SUDS. Dentro de los SUDS existen múltiples clasificaciones, atendiendo a su forma de funcionar, al tipo de sistema empleado o al lugar de aplicación. Así, como resultado del estudio y recopilación de las distintas clasificaciones, el grupo de investigación GITECO, propone la siguiente clasificación para los SUDS (Rodriguez et al., 2008): Medidas preventivas, sistemas de infiltración o control en el origen, Sistemas de transporte permeable, Sistemas de tratamiento pasivo

- Sistemas de Tratamiento pasivo

Se consideran sistemas de tratamiento pasivo a aquellos situados al final de la red para prolongar la estancia de las aguas pluviales por un periodo de tiempo, antes de su vertido al medio receptor, que permita proporcionar el tratamiento adecuado a las mismas. (Rodriguez et al., 2008).

Una de las alternativas técnicas de mayor atractivo para el desarrollo de urbanizaciones de bajo impacto hidrológico, es la utilización de pavimentos permeables. La

contaminación de fuentes urbanas no puntuales es uno de los motivos principales por las que la calidad de cuerpos de agua es afectada. En Escocia, por ejemplo, 20% de todos los los fallos de calidad del agua se atribuyen a fuentes urbanas no puntuales. Los pavimentos permeables son capaces de reducir esta contaminación integrando elementos de origen estructural y estéticos (University of Leeds., 2004). Es un componente clave en la reproducción de pre- desarrollo de los regímenes hidrológicos, ya que puede reducir la escorrentía superficial, mejorar la calidad del agua y la recarga de aguas subterráneas. (James et al., 2009)

3.2. Pavimentos permeables

Los Pavimentos permeables son una gama de materiales y técnicas para pavimentos con una base y sub-base que permite la circulación de las aguas pluviales a través de la superficie sostenible. Además de la reducción de la escorrentía, esta trampas eficazmente los sólidos en suspensión y filtros de contaminantes del agua. Los ejemplos incluyen las carreteras, caminos, jardines y lotes que están sujetos al tráfico de vehículos ligeros, como aparcamiento de autos, ciclo-rutas, servicio o carriles de acceso de emergencia, por carretera y los hombros al aeropuerto, y las aceras residenciales y vías de acceso (WebAcademia, 2013).

Con el crecimiento de las áreas urbanizadas se hace común el uso de materiales impermeables, tales como asfalto, hormigón, baldosas, etc., los cuales conllevan al aumento de la temperatura ambiental y aumento de áreas impermeables, alterando el ciclo natural del agua. Los firmes permeables se pueden definir como secciones compuestas de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través suyo, desde la superficie hasta el terreno natural o subrasante , y en conjunto ofrecen la capacidad portante necesaria para resistir un tráfico determinado(generalmente liviano). No son consideradas como firmes permeables aquellas secciones que cuentan con capas drenantes combinadas con capas impermeables, como por ejemplo mezclas bituminosas porosas sobre mezclas bituminosas cerradas o semicerradas. (Rodríguez,

2008). Sus aplicaciones se limitan a vías de bajo tráfico, ciclorutas, senderos peatonales, zonas residenciales e industriales y centros comerciales (Sharma, 2008) . Entre sus principales beneficios encontramos: reducción de Agua de escorrentía superficial (reducción de caudales pico), restaurar y crear hábitat, aumento de estética, disminución de contaminantes, etc. (Greenroads Manual v15, 2011).

Dentro de estas alternativas de pavimentos permeables, existe el pavimento de hormigón permeable, que consiste básicamente en una mezcla especial de hormigón de alta porosidad y una sub-base que requiere de una granulometría especial que la hace también permeable. Sin embargo, las materias primas necesarias para esta tecnología desarrollada son las mismas que las tradicionales para pavimentos de hormigón. Este pavimento permeable tiene una resistencia estructural suficiente para muchas aplicaciones típicas del pavimento de hormigón, como estacionamientos, pasajes y veredas. La metodología de instalación es ligeramente distinta al hormigón tradicional, fundamentalmente porque utiliza un método especial de compactación y porque se debe prevenir el deterioro de la permeabilidad del suelo natural durante la construcción.

El pavimento de hormigón desarrollado tiene una capacidad de infiltración superior a la de cualquier suelo. Esta capacidad es más que suficiente para absorber toda la lluvia que cae sobre él. Una superficie de pavimento permeable podría captar el agua de una zona aledaña, aunque no es recomendable que ésta sea superior a 3 veces su tamaño. De este modo se minimiza la colmatación del pavimento, debido a los sedimentos arrastrados por el escurrimiento, que disminuyen la porosidad y por ende la infiltración. (Bonifacio et al., 2003).

Se pueden aplicar en cualquier tipo de suelo, incluso en aquellos con baja permeabilidad. Su instalación permite o bien infiltrar el agua directamente al suelo o almacenarla en la sub-base y después drenarla a otro lugar.

Así mismo, se puede optar por la solución del uso de adoquines para pavimento permeable, este se caracteriza por su geometría, puesto que una vez instalado deja intersticios entre adoquines, sin perder por ello la trabazón, la rigidez y la fricción necesaria para la estabilidad del pavimento. Los intersticios entre adoquines, que son los que proveen de permeabilidad al pavimento, son rellenados con gravilla fina.

Bajo los adoquines se instala una cama de gravilla fina o arena gruesa de algunos centímetros de espesor, de modo que permita la infiltración y el almacenamiento y provean de una superficie lisa de apoyo. La sub-base es de granulometría gruesa y homogénea, que también permita la infiltración y el almacenamiento. (Bonifacio et al., 2003)

Una instalación típica de pavimentos permeables de adoquines, tiene un porcentaje de intersticios del 10% del área total. Esto es suficiente para que el pavimento en su conjunto no produzca escurrimiento durante las lluvias. Si bien es posible que la capacidad de infiltración del pavimento disminuya con el tiempo debido a la colmatación con finos de la gravilla de los intersticios, la recuperación es relativamente sencilla. Sin embargo, para evitar la colmatación, al igual que en los pavimentos permeables de hormigón, es recomendable restringir el área aportante. (Bonifacio et al., 2003)

Los desequilibrios del ciclo hidrológico estimulan la concentración de caudales picos de escorrentía que en muchos casos pueden convertirse en inundaciones (Estupiñan & Zapata, 2010).En comparación con los asfaltos convencionales, los firmes permeables proporcionan un flujo pico más eficaz, reducciones (hasta 42% de qué) y mayor tiempo de descarga. También hay una reducción significativa de la evaporación y salpicaduras de agua superficial (Scholz & Grabowiecki, 2006).

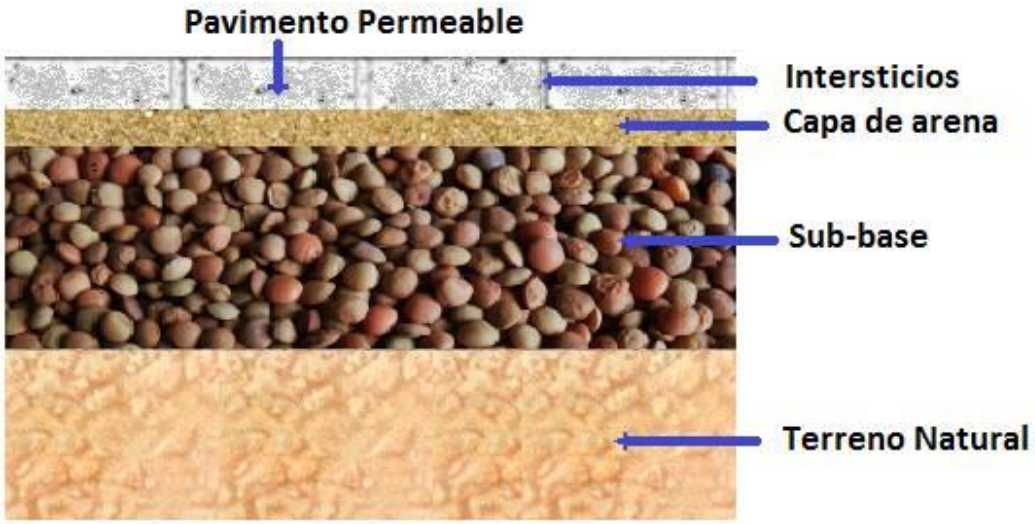


Figura 2. Estructura de pavimento permeable en adoquín.

Las capas superficiales ofrecen soluciones estéticas adecuadas a diversas aplicaciones (aparcamientos de vehículos ligeros, parques y jardines, calles peatonales, zonas residenciales, entre otros) mientras que las capas inferiores filtran el agua reteniendo los contaminantes y permiten el crecimiento de comunidades microbianas con capacidad para degradar hidrocarburos procedentes de las pérdidas de los vehículos (Rodriguez et al., 2009)

Esta solución tiene la gran ventaja que no requiere construir una obra especial para reducir la escorrentía, sino que basta con cambiar el tipo de elementos utilizados. Los pavimentos permeables, además de brindar el mismo servicio que los pavimentos tradicionales, en una gran cantidad de aplicaciones, contribuyen a reducir el área efectivamente impermeable de la urbanización. La idea básica es que no todo lo que se necesita pavimentar tiene que impermeabilizarse. Con la utilización de pavimentos permeables se consigue recargar los acuíferos y reducir el volumen y el caudal máximo de escorrentía, provocado por las lluvias. También se remueven algunos contaminantes, mejorando la calidad del escurrimiento. (Bonifacio et al., 2003).

3.3.Funcionamiento

Para el diseño de los pavimentos permeables, deben medirse diferentes procesos con la precisión adecuada y además se deben minimizar factores externos que afecten el comportamiento natural e ideal del campo de prueba, se recomienda que algunos de estos procesos sean monitoreados para realizar una descripción más detallada de su comportamiento, esto con el fin de obtener datos útiles para futuros diseños basados en los sistemas urbanos de desarrollo sostenible. Los siguientes procesos se consideran críticos para el diseño:

- **Intercepción**: Recolección o captura de la lluvia por la cuenca del campo de prueba.

- **Infiltración**: Migración descendente de la escorrentía a través del pavimento permeable y la base granular.

- **Capacidad de almacenamiento**: almacenamiento del agua infiltrada por el pavimento permeable y el suelo granular.

3.4. Diseño del campo de prueba de pavimento permeable

3.4.1. Localización y emplazamiento

Para integrar un sitio a la aplicación del campo de prueba se deben considerar las restricciones de construcción, para esto, debemos tener en cuenta las siguientes recomendaciones: presencia de: sótanos, cimientos de los edificios, límites de propiedad, punto de salida de drenaje, desagüe inferior, agua subterránea y pendientes. Para realizar un diseño adecuado, debe asegurarse que la fuente de agua a tratar sea la correspondiente a la cuenca del pavimento permeable. La subrasante debe tener una permeabilidad del

orden de magnitud de entre $1x10^{-5}$ a 1×10^{-7} cm/s , además de no ser un suelo expansivo. Para evitar infiltración a la subrasante se usarán geotextiles. (Geotecniaweb, 2012)

Una vez que se ha determinado la cantidad de área del sitio dedicada a la zona del pavimento permeable, a través de una inspección visual y de caracterizar un lugar con pendiente adecuada, sin influencia de otras cuencas y sin restricciones de construcción, se procede al cálculo del tamaño específico de la instalación. Para eso se siguen las siguientes recomendaciones:

- Disposición de áreas para la construcción de los pavimentos permeables
- Tamaño de vehículos a estacionar.
- Nivel freático
- Comportamiento de cuencas aledañas (no deben interferir)
- Registros de lluvia y eventos de lluvias máximas
- Capacidad portante e hidráulica del suelo

Con el volumen derivado de los cálculos hidrológicos y el área total del sitio, se halla el área ponderada aplicable para cada sub-área de drenaje. Así, se podrá saber el porcentaje de almacenamiento de agua de cada firme permeable y se podrá calcular el porcentaje retenido respecto a la precipitación en cada sub-cuenca.

3.4.2. Estimación de la Intensidad de la Lluvia

Para la determinación de la Intensidad se utiliza el método Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia, aplicando la expresión calibrada por el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena para la estación del Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena.

La información meteorológica utilizada se tomó de las estaciones más cercanas al área de estudio. Las estaciones son Aeropuerto Rafael Núñez, Estación Cañaveral, Estación

Bayunca, Estación Escuela Naval CIOH, Estación Santa Ana, Estación Arjona y la Estación ubicada en el corregimiento de Rocha.

La intensidad de la lluvia se calculó con la siguiente expresión (Velásquez Almanza y Martínez, 1995)

$$I\left(\frac{mm}{h}\right) = \frac{616.97 * T^{0.18}}{(tc+10)^{0.561}} \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

Donde:

T: Es el periodo de retorno en años.

t_c : Es el tiempo de concentración en minutos.

3.4.3. Relaciones entre la Precipitación en 24 horas y una duración menor

Se estudió para la estación del aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena, la relación existente entre la precipitación registrada en 24 horas y la precipitación caída en una duración t menor, Pt. Esta relación es importante porque en Colombia existen más estaciones pluviométricas que pluviográficas por lo cual son más abundantes los registros diarios de 24 horas y no se dispone en su gran mayoría de información sobre curvas de intensidad duración frecuencia. (Chang y Bolívar, 1997)

Los resultados de Chang y Bolívar mostraron que el período de retorno no era significativo en el establecimiento de la relación y propusieron la siguiente expresión para tiempos de duración inferiores a 4 horas 20 minutos.

$$\%P_t = -0.006t^4 + 0.0902t^3 - 0.423t^2 + 0.897t + 0.0026 \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

Donde:

t= Duración de la lluvia en horas.

%Pt= Fracción de la precipitación en 24 horas caída en una duración t de la lluvia.

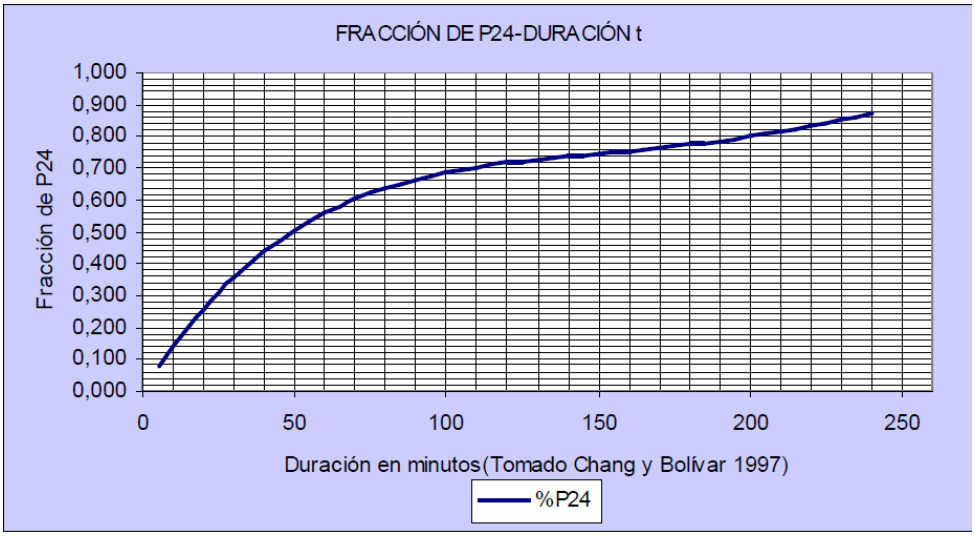


Figura 3. Fracción de la precipitación de 24 vs Duración t de la lluvia.

3.4.4. Composición Interna de las lluvias en Cartagena

Andrade en el año 2000, realizó el proyecto de obtención de las curvas de probabilidad de tormentas para el aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena.

Dentro de este trabajo se estudia la composición interna de las tormentas registradas en la estación del aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena. Las lluvias se estandarizaron tanto en la duración como en la precipitación, considerándose el tiempo de duración de una tormenta como el 100 por ciento, lo mismo que la precipitación registrada en ese tiempo.

Los resultados obtenidos para todas las tormentas analizadas se presentan en la tabla 1, en la cual se ha realizado una curva para los porcentajes de excedencia de 10, 20 ,30,40,50,60,70,80,90, por ciento. Por ejemplo la curva del 10 %, representa que el 10 % de las veces esa curva es excedida en cada uno de sus puntos; la curva del 50 %, implica que esa curva es excedida el 50% de las veces.

Cada curva presenta un patrón de distribución interna de la lluvia. De acuerdo con los resultados de este trabajo se aprecia que en la ciudad de Cartagena, la mayor cantidad de precipitación se presenta al inicio de la tormenta en un tiempo menor que el 20 por ciento de la duración de la lluvia. Los resultados muestran que entre menor es la probabilidad de excedencia, mayor es el valor pico que presenta el hidrograma.

Tabla 1. Precipitación acumulada para una probabilidad de excedencia.

Tiempo	Valores extremos de precipitaciones acumuladas en %								
%	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
90	99,72	99,62	99,51	99,44	99,33	99,05	98,64	98,32	97,34
80	99,34	98,83	98,53	98,18	97,71	97,37	96,41	94,8	93,07
70	98,01	97,43	96,68	96,07	95,21	94,22	92,65	90,96	89,14
60	96,68	95,75	94,18	93,28	91,04	89,19	87,61	85,2	83,33
50	94,47	92,68	90,72	88,44	85,27	82,42	80,99	78,44	73,83
40	89,97	87,54	84,76	81,26	78,55	75,74	71,9	69,58	63,84
30	84,59	79,64	76,44	72,8	68,58	66,31	62,27	57,68	53,57
20	80,32	70,08	65,57	61,47	56,07	52,83	48,14	43,35	40,38
10	72,53	62,46	53,08	47,59	39,37	34,94	31,54	28,88	25,46
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Una de las variables hidrológicas de mayor interés es la precipitación, para su estudio es Preciso conocer registros pluviométricos o pluviográficos, obtenidos mediante mediciones realizadas en estaciones ubicadas en la zona de interés. En la universidad de Cartagena se realizó un estudio donde se presentan los resultados de la regionalización de la precipitación máxima en 24 horas registradas en las estaciones pluviográficas y pluviométricas de los departamentos de la Costa Atlántica Colombiana. (Arrieta, 2002)
Las precipitaciones máximas en 24 horas en la Costa Atlántica Colombiana se pueden parametrizar mediante una función de tipo logarítmica de la forma $P24 = a \ln(x) + b$, donde: P24 =33,672Ln(x) + 63,584

p24, representa la precipitación máxima en 24 horas
x, representa el período de retorno.
a y b son parámetros de regionalización de la precipitación.

En las figuras 4 y 5 se pueden ver los valores de los parámetros a y b por regiones.

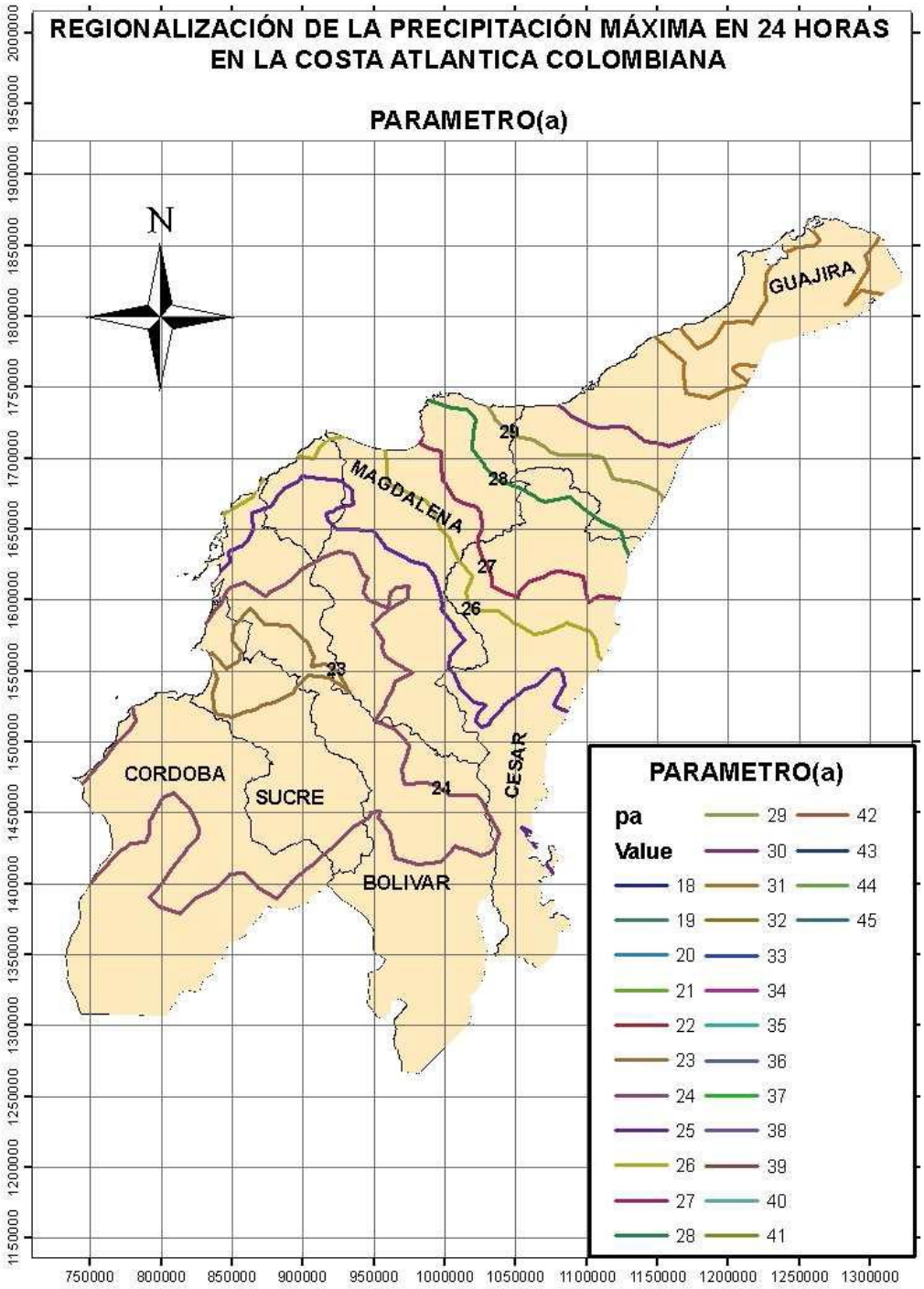


Figura 4. Determinación del parámetro (a). (Arrieta, 2002)

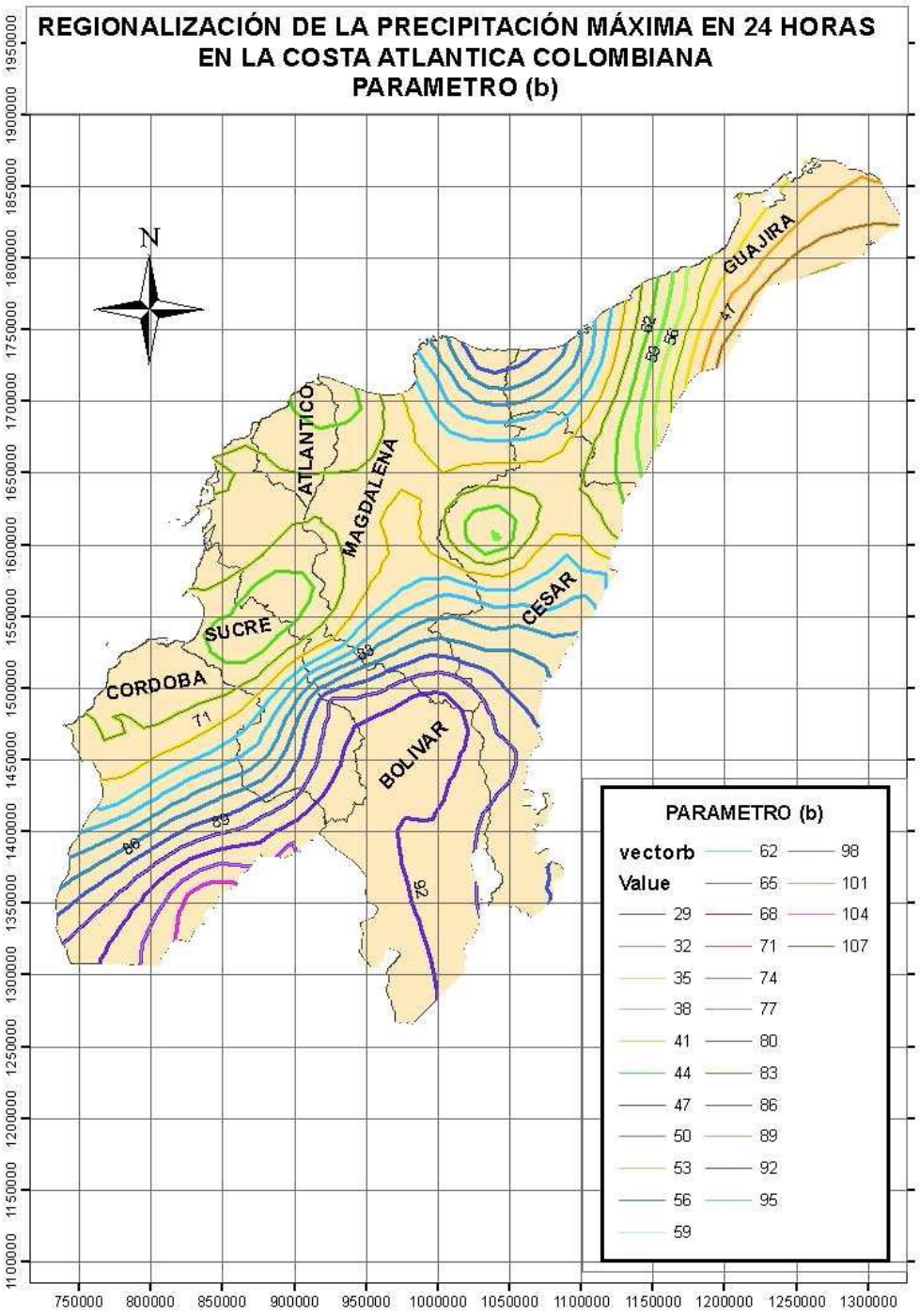


Figura 5. Determinación del parámetro (b). (Arrieta, 2002)

Luego, la ecuación correspondiente para la ciudad de Cartagena en la estación Rafael Nuñez es:

$$P24 = 33{,}672 Ln(x) + 63{,}584 \quad \textbf{Ecuación 3}$$

3.4.5. Parámetros de diseño

Volumen de agua almacenado: el volumen de agua que se almacenará depende de la permeabilidad del pavimento y de la base granular utilizada, además de la información sustraída de la curva IDF que nos indica el volumen de agua lluvia que tendrá la cuenca. No existen recomendaciones concretas para el diseño de una pista de prueba de este tipo en el manual RAS, sin embargo se tendrán en cuenta algunas condiciones aplicadas a diseños similares. Se diseñará para un periodo de retorno de 10 años y lluvias de 60 minutos de duración. Las cuales son las condiciones mínimas establecidas para diseñar estructuras de este tipo según Portland Stormwater Management Manual.

Base: se utilizará una base de agregado grueso de tamaño nominal entre ½" y 1" caracterizado por tener una permeabilidad mayor que la del pavimento y una capacidad estructural de acuerdo a la demanda de tráfico.

3.4.6. Geotextil

En las zonas impermeables o superficies poco permeables se debe colocar una geotextil no tejido con espesor mínimo de 0.75 mm, en el fondo y lados del área de la bio-retención, llevándola hasta al menos la altura donde empieza la zona del drenaje. En la sección donde se ancla la membrana debe colocarse una cobertura mínima de 25 cm para protegerla de los rayos UV. Encima de la geomembrana debe colocarse el geotextil no tejido para evitar el punzonamiento cuando se esté vaciando el material que compone el suelo filtrante. Estas son medidas mínimas que recomienda el UDFCD 2010 deben tomarse en cuenta, sin embargo, que las empresas fabricantes de estos materiales ofrecen guías de instalaciones y especificaciones técnicas que deben seguirse.

3.4.7. Control de salida del flujo

Para el agua infiltrada se usarán tanques de almacenamiento, se deben usar 3 tanques, uno para cada firme permeable. Esto con el fin de garantizar la caracterización del comportamiento del agua en cada uno de los firmes. Los tanques se diseñarán considerando parámetros de diseño establecidos en el titulo D del RAS.

Es recomendable contar con un pluviómetro en el lugar, para tener datos específicos.

4. Antecedentes

Diversos estudios se han realizado a través del tiempo en los firmes permeables, los primeros estudios datan del año 1999 en Reino Unido donde se obtuvo información detallada del comportamiento hidrológico de estos a lo largo de 18 meses, un promedio de 55% de una tormenta de 15mm de precipitación durante una hora fue retenido por la estructura inicialmente seca, mientras que sólo 30% con la estructura húmeda inicialmente, que concluyó que el drenaje, evaporación y retención en la estructura eran fuertemente influenciados por gradación del material de las capas inferiores y capacidad de retención de agua de la capa principal. (Andersen et al., 1999).

Los estudios que se hacen para evaluar la eficiencia de pavimentos permeables se basan en disminución de caudales, remoción de contaminantes, metales y degradación de hidrocarburos. En Francia se tomaron los eventos provenientes de 30 lluvias, y se demostró que las aguas que pasaron como escorrentía a través de los pavimentos permeables contenían una carga notablemente inferior de contaminantes que los de la cuenca de referencia. (Legret et al., 1996); Mientras que en Reino Unido se realizaron investigaciones al respecto en 1999, centradas en la capacidad de los pavimentos permeables, como estructura de depósito para retener y tratar los contaminantes derivados del petróleo a través de una biodegradación microbiana in situ (Pratt et al., 1999).

4.1.Absorción de agua de escorrentía

Diversos estudios han mostrado los importantes resultados de los pavimentos permeables en cuanto a la absorción del agua de escorrentía, en ayuda al ciclo natural del agua y recarga de acuíferos, por ejemplo, con la aplicación del pavimento permeable se logró una reducción del grado de impermeabilidad de la cuenca de un 45% a un 3% (Rodríguez, 2008) . Numerosos ensayos a escala de laboratorio se han llevado a cabo. Mientras que Andersen et al., 1999 obtuvo una retención de 55% del caudal proveniente de una lluvia de 15 mm durante una hora, en estudios de la Universidad Católica de Chile se registraron lluvias de magnitud entre 9 y 25 mm, y de intensidad máxima en 5 min entre 7 y 19 mm/h, se verificó una importante capacidad de almacenamiento de la subbase, amortiguando la lluvia desde un 72% a un 40% del máximo registrado (Rivera et al., 2003); Por otra parte en Seatle, USA en un estudio llevado a cabo por Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Washington se registró una tormenta que duró 72 horas , produjo 121 mm de lluvia , y cedió 4 mm de escorrentía superficial en total, (se escurrió alrededor del 3% de la precipitación total) (Benjamin et al., 2004); Luego de probar la infiltración en 40 parqueaderos de pavimentos permeables en un estudio hecho en California, se concluyó que un pavimento permeable con infiltración en la superficie de 2.5 cm/h se comporta como si se tratara de una superficie de superficie conformada porcentualmente, 84% hierba y 16% impermeable. Aproximadamente el 90% de los sitios probados tuvieron estas características o eran más permeables (William et al., 2006).

También se ha mostrado interés en estudiar la importancia del mantenimiento de los pavimentos permeables para combatir la colmatación de estos. En España Se muestran los resultados de un análisis a un pavimento tipo adoquín en una simulación de mantenimiento, donde se aprecia la mejoría en cuanto a infiltración una vez tratados:

Para pavimentos permeables en adoquines la media de la tasa de infiltración superficial para los sitios afectados por los sedimentos fue de 8,1 cm / h (que van desde 1,63 hasta

230 cm / h), mientras que la tasa promedio para los sitios sin acumulación de sedimentos era de 2300 cm / h (que van desde 100-4000 cm / h); un aumento en la infiltración de más de 99% (William et al., 2006).

4.2. Hidrocarburos

Las superficies permeables ofrecen una depuración por filtrado y retención de parte de los sólidos en suspensión, metales pesados y hasta el 90% de los hidrocarburos presentes en la escorrentía superficial de una carretera (Rodríguez, 2008). El aceite mineral deposición y la contaminación de hidrocarburos en las superficies urbanas han sido efectivamente y eficientemente dirigida mediante el uso de estas tecnologías y los pavimentos permeables también pueden ser utilizado como un reactor in-situ aeróbico. (Sharma, 2008)

Investigaciones han incorporado la presencia de comunidades microbianas en los firmes permeables en ayuda a la degradación de hidrocarburos. En un proyecto llevado a cabo en la universidad de Coventry, el cual duró 300 días, se construyó un pavimento permeable a escala de laboratorio para tratarlo como un bioreactor in situ, se sometió a una contaminación moderada por tiempo prolongado, se midieron indicadores de calidad y se demostró que los firmes permeables pueden ser usados como un bioreactor aerobio efectivo in situ (Pratt et al., 1999). Posteriormente se demostró que una comunidad diversa eucariota puede fácil rápidamente establecerse dentro de pavimentos permeables en condiciones definidas, a largo plazo se demostró el éxito tanto como trampa y biodegradante de aceite que se libera accidentalmente sobre superficies de aparcamiento durante un largo período Esto es debido a una combinación de eficiente la retención y la descomposición biológica, los cuales son necesarios para que el proceso ha de ser factible (Newman et al., 2004).

La capacidad de retención de aceites medidas en tres estructuras de pruebas para 183 ml de aceites totales aplicados en 9 semanas, arrojó como resultado un 99.6% en pavimentos

porosos; 49.6% para pavimentos asfálticos y 70.2% en hormigón poroso, estas mediciones fueron tomadas a corto plazo. Lo cual demuestra que puede ser utilizado con éxito como trampa para el aceite biodegradado que se libera accidentalmente sobre superficies de aparcamiento. (Newman et al., 2002); Por otra parte se estudió la concentración de aceite de motor en varias muestras en pavimentos permeables, se detectó en el 89% de las muestras de la escorrentía asfalto, pero no en cualquier muestra de agua a través de la infiltraron pavimento permeable. Ni combustible diesel ni plomo se detectó en ninguna muestras. La límites de detección mínimos para constituyentes de la muestra fueron los siguientes: aceite de motor, 0,10 mg. En general, el escurrimiento superficial del asfalto mostró significativamente mayor concentraciones que el agua infiltrada de los componentes más medidos, es decir, aceite de motor, cobre, y zinc. (Benjamin et al., 2004).

También se ha experimentado el uso de geotextil para ayudar a degradar los hidrocarburos. Las pruebas han demostrado que puede contener de manera efectiva contaminación por hidrocarburos y metales proporcionando una mejor la calidad del agua. Los hidrocarburos son adsorbidos a la capa granular de base y subbase y el geotextil. Las pruebas de laboratorio de las aguas de flujo de salida tiene demostró que la calidad del agua cumple con los requisitos para una Clase 1 interceptor de aceite, excepto cuando se aplican detergentes (Wilson, et al., 2003)

4.3.Solidos Suspendidos y Metales

En la tabla 2 se puede apreciar el rendimiento en eliminación de contribuyentes de 6 campos de prueba piloto de pavimentos permeables y 25 estanques de retención, este informe fue elaborado por BMP internacional (Best Practice Managenment) y publicado por GeoSyntec Consultants and Wright Water Engineers en 2008, posteriormente expuesto en el artículo de Greenroads Manual V15 sobre pavimentos permeables. Los datos presentados pertenecen a quince estados de Estados Unidos, así como Reino Unido

y Suecia, no se especifica ni los lugares, ni los tipos de pavimentos, tampoco las condiciones de tormenta.

Tabla 2. Datos de rendimiento de eliminación de constituyentes de 6 instalaciones de pavimentos permeables y 25 detenciones estanques. (Greenroads Manual v15, 2013).

Constituyentes	Unidad	Valor	Efluente de Pavimentos Permeables	Efluente de Estanques de detención	Remoción Relativa (%)
			(6 informes)	(25 Informes)	
Sólidos en suspensión	(mg/l)	Media	16.96	31.04	183
		Rango	5.90 - 18.72	16.07 - 46.01	_
Cobre Total	(mg/l)	Media	2.78	12.1	435
		Rango	0.88 - 8.78	5.41 - 18.80	_
Plomo Total	(mg/l)	Media	7.88	15.77	200
		Rango	1.64 - 37.96	4.67 - 26.87	_
Zinc Total	(mg/l)	Media	16.6	60.2	363
		Rango	5.91 - 46.94	20.70 - 99.70	_
Fósforo	(mg/l)	Media	0.09	0.19	211
		Rango	0.05 - 0.15	0.12 - 0.27	_
TKN	(mg/l)	Media	1.23	1.89	154
		Rango	0.44 - 3.44	1.58 - 2.19	_

Nótese que a pesar de que no se especifica el tipo de pavimento permeable utilizado, se puede afirmar que la remoción de metales es bastante buena en comparación a los sistemas de tratamiento convencionales. Mostrando una alta eliminación de cobre y zinc. En Francia, Los resultados obtenidos a partir de 30 eventos de lluvia en Loire-Atlantique, fueron monitoreados en las capas de base y subbase de un pavimento poroso,

el efecto de filtración las aguas de escorrentía de la estructura del yacimiento disminuyeron las concentraciones de contaminantes de alrededor del 64% de sólidos en suspensión y 79% para el plomo, los contaminantes como el zinc, cobre, plomo y cadmio

se acumularon en su mayor parte en la capa de pavimento, y otra pequeña parte en el geotextil (Legret et al., 1996); esto concuerda con lo estudiado posteriormente en Scotland, Reino Unido, donde se estudió la escorrentía proveniente de firmes permeables durante 40 meses, donde las . Las concentraciones promedio de TKN, DQO, nitratos, nitritos y las formas disueltas de plomo, zinc, fósforo eran menores y de mejor calidad a las de un pavimento convencional. (Barrett & Stanard, 2008); por otra parte en Washington se corroboró que el escurrimiento superficial de un asfalto poroso en estudio, mostró significativamente mayor concentraciones en el agua retenida de los componentes más medidos, es decir, aceite de motor, cobre, y zinc, 72% de cobre y 22% de zinc fueron removidos (Benjamin et al., 2004).

En general los estudios realizados en cuanto a remoción de contaminantes, tales como cobre, zinc, plomo, cadmio, entre otros, muestras valores beneficiosos; entre los factores adversos con el paso de los años encontramos , la obstrucción de los poros en el pavimento probablemente, lo cual reducirá los otros beneficios tales como disminución de escorrentía, remoción de contaminantes e hidrocarburos. Máquinas de limpieza del pavimento podrían ser utilizadas para eliminar los contaminantes acumulados y prolongar los beneficios de calidad del agua. (Barrett & Stanard, 2008).

4.4. Estado actual de los Pavimentos Permeables en Colombia

En Colombia es casi nulo el uso y la implementación de SUDS para tratar los drenajes de las aguas pluviales, además que carece de normas o reglamentos que regulen el uso de estos, sin contar la falta de personal capacitado o empresas donde se fabriquen los materiales necesarios para su aplicación.

La tendencia de los estudios analizados en la revisión bibliográfica muestran más interés hacia la parte hidrológica y degradación de hidrocarburos, en la figura 6 se muestra dicha tendencia.

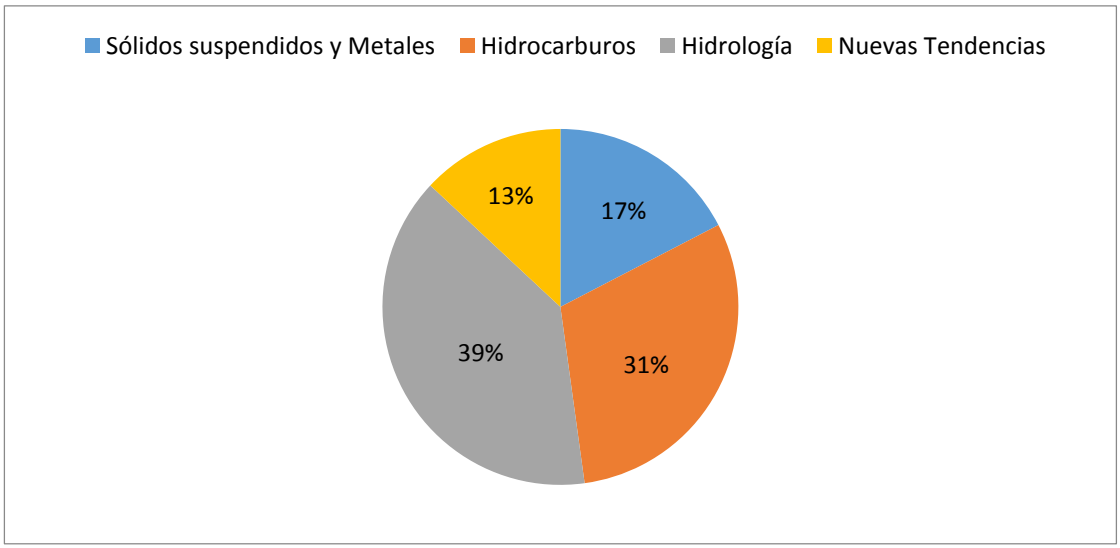


Figura 6. Tendencia en Estudios de Pavimentos Permeables.

4.5.Ámbito Nacional

En Colombia, la empresa Ingecotrol S.A., la cual tiene como política y visión mitigar el impacto ambiental, reducir niveles de CO_2 y promover el diseño sostenible, introdujo la marca de infraestructura verde urbana Ecotelhado, que cuenta con proyectos en Brasil, Chile, México y Colombia. Esta empresa tiene diseños basados en los sistemas de drenajes urbanos sostenibles, que son: Ecodrenos, ecoparedes, ecopavimentos y ecotejados, pero es la única en el país con suficiente experiencia en el tema, debido a la vasta experiencia de 35 años y certificados de calidad obtenidos, esta empresa está situada en Bogotá y hasta la fecha no ha realizado proyectos en la Costa Caribe. Por otra parte, cabe mencionar que la empresa mexicana creadores de Hidrocreto, un material que aguanta entre 40 y 60 toneladas y cuya implantación en la capital mexicana alcanza el 15 %., con su director comercial Alejandro Álvarez, buscaron socios comerciales en Colombia hacia el años 2011, pero no se llegó a ningún acuerdo. (Noticias Caracol, 2011). En Bogotá, se consideró ingresar estos al plan de ordenamiento zonal norte (POZN) de la ciudad, lo cual se concretó con la RESOLUCIÓN 6523 del 16 de diciembre de 2011, que busca darle solución a las inundaciones provocadas por los desbordamientos de los drenajes en las épocas de lluvia, todo a causa de la impermeabilización de la ciudad por

el desarrollo urbano, usando las tecnologías SUDS. Entre las medidas expuestas por la resolución se encuentran que el 50% de las áreas libres en las edificaciones deben ser permeables al agua de lluvia y la aplicación de techos verdes en un 50% del área total de las cubiertas. Estas novedades en nuestro país se deben a que mundialmente se han hecho muchos avances en las nuevas tecnologías de drenajes urbanos, entre ellas la aplicación de firmes permeables, que han dado exitosos resultados en las ciudades donde se han aplicado. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011).

4.6. Ámbito Local

Cartagena es una ciudad de zonas planas con sectores bajo el nivel del mar que se caracteriza porque la gran mayoría de su crecimiento ha sido mediante procesos informales, por ende sin planificación alguna ni cumplimientos de normas urbanísticas. Debido a esto se han venido dando soluciones a lo largo del tiempo de tipo hidráulico en zonas urbanizadas, las cuales en su mayoría ha sido deficientes. En 2008 el Concejo Distrital autorizó a la Alcaldesa Judith Pinedo la ejecución del Plan Maestro de Drenajes Pluviales, proyecto que se encuentra en ejecución hoy por hoy. El objetivo para el que se creó es diseñar y construir un adecuado sistema de evacuación de las aguas lluvias superficiales de la ciudad, que de fin a los problemas de inundación y sus secuelas negativas. Este consta de tres etapas, la solución a corto plazo, mediano plazo y largo plazo; hasta el momento solo se han hecho obras de la primera etapa, tales como Canal Ricaute, Canal Matute Canal Chicricoco, entre otros, motivo que aún tiene en peligro a los barrios con alto riesgo de inundación, tales como El Pozón y San Pedro. El 69% de las viviendas de la ciudad son afectadas por las lluvias, incluyendo los estratos desde el uno hasta el seis, esto 108.889 viviendas, esto representa al 71% de los habitantes, es decir, 716.295 habitantes (Alcaldía de Cartagena, 2008)

El cálculo inicial arrojó un costo de 268 mil millones de pesos para zonas urbanas en 2008, cuyas fuentes de ingreso principal fueron financiados por recursos obtenidos del presupuesto nacional, y de entidades descentralizadas de orden nacional o distrital y

aportes de empresas privadas. Por esto es que ha cobrado tanta importancia los SUDS, los cuales se pueden usar como complementos a las obras de drenaje urbano existentes en la ciudad, son formas más económicas y beneficiosas para ocuparse de las aguas pluviales.

Los firmes permeables forman parte de la tendencia de construcción sostenible como uno de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) más completos, en los estudios mostrados con anterioridad se puede corroborar los magníficos beneficios y resultados al implementar y/o estudiar estos, así como el estado actual y la tendencia de los países a enfatizar en el uso de soluciones de tipo verde. El avance en Latinoamérica reside en países como Brasil y Chile; en Norte américa (USA) incluso existen manuales de diseño y construcción por estado; en México están innovando en la creación y fabricación de nuevos tipos de concretos ecológicos, extendiendo su mercado a otros países; En Europa han venido usando firmes permeables desde mediados de 1970, siendo en Inglaterra y España donde el avance referente al tema ha crecido con mayor rapidez. (Perales, 2008)

Es momento de empezar a implementar soluciones de bajo impacto ambiental en el país, específicamente en Cartagena (existe Ecotelhajo en Bogotá). Con el diseño del campo de prueba piloto propuesto en este proyecto se daría inicio a la investigación de los firmes permeables y conjunto a otros trabajos referentes al tema a los SUDS en general en Cartagena, liderado por la Universidad de Cartagena, abriendo un camino a la implementación de políticas verdes a favor de la preservación y conservación del medio ambiente.

5. Estado del arte

Pese a la antigüedad del uso de los pavimentos permeables en distintas partes del mundo, tales como Estados Unidos, Francia, Alemania y Reino Unido, entre los años 1970 y 1990, en Colombia la práctica de la implementación de los pavimentos permeables y de los SUDS en general es escasa. En el caso de la ciudad de Cartagena su aplicación es

nula, y por tanto, el diseño del campo de prueba piloto en la Universidad de Cartagena en el campus Piedra de Bolívar, sería el primer intento de uso de estas tecnologías en la ciudad. Por lo anterior, la información obtenida en otros países tales como laboratorios, manuales, etc., serán fuente de información importante para llevar a cabo la realización del proyecto propuesto en este trabajo. La mayoría de la información a utilizar proviene del Reino Unido, Estados Unidos y España, que son los países donde se han elaborado la mayoría de los estudios y proyectos referentes a pavimentos permeables, también se tomará información de algunos estudios hechos en Chile.

5.1. Pavimentos Permeables

La elección de qué tipo de pavimento permeable se debe usar está influenciada por el diseño específico del sitio y el uso futuro previsto de la superficie permeable. Una comparación general de las propiedades de ingeniería de los tres principales tipos de pavimentos permeables se presentan en la Tabla 3. (Virginia DCR Stormwater Desing Specification No. 7, 2011)

Tabla 3. Parámetros de diseño de diferentes tipos de Pavimentos Permeables, elaborada con base a los estudios de la ASTM (Association of Chartered Treasury Managers) y las experiencias de los trabajos de Jackson y Smith en Estados Unidos.

Factor de Diseño	Hormigón Poroso	Asfalto Poroso	Adoquines
Escala de Aplicación	De pequeñas a gran escala	De pequeñas a gran escala	Micro, pequeñas y gran escala
Espesor de Pavimento	12.70 a 20.32 cm	7.62 a 10.16 cm	7.62 cm
Capa de Asiento	Ninguno	5.08 cm triturado No. 57	5.08 cm triturado No. 8

Capa de depósito	Piedra No. 57	Piedra No. 2	Piedra No. 2 10.16 cm de piedra No. 57
Propiedades de Construcción	Moldeado en lugar de disposición, a los 7 días debe ser curado y cubierto.	Moldeado en lugar de disposición, a las 24 horas se debe curar.	No hay periodo de curación. Manual o de instalación mecánica.
Diseño de Permeabilidad	33.048 m/d	1.83 m/d	0.6096 m/d
Costo de Construcción	$ 43.500 a $141.300 /m2	$10.870 a $21.740 / m2	$108.700 a 217.400 / m2
Tamaño mínimo de lote	540 m2		NA
Durabilidad	20 a 30 años.	15 a 20 años.	20 a 30 años.
Rebose	Caída de borde de entrada o desbordamiento.	Gota de Entrada o desbordamiento de borde.	Superficie de entrada o desagüe.
Reducción de Temperatura	Enfriamiento en capa de depósito.	Enfriamiento en capa de depósito.	Enfriamiento en la superficie de pavimento y en capa de depósito.
Colores/Texturas	Gama limitada de colores de textura.	De color negro o gris oscuro.	Amplia gama de colores, texturas y patrones.
Cargas de Tráfico	Puede manejar todas las cargas de tráfico, con un diseño apropiado capa de asiento.		

Otras consideraciones		Evitar revestimiento de sellado.	Daños por quitanieves.
Referencias de Diseño	(ASTM, 2003)	(Jackson, 2007)	(Smith, 2006)

En el trabajo de Investigación de Jorge Rodríguez Hernández "Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros" la cual tuvo como objetivo principal Estudiar la técnica constructiva de los firmes permeables y proponer nuevas secciones contemplando el uso de materiales reciclados. Así como Recoger las principales recomendaciones para el diseño y construcción de firmes permeables asegurando una adecuada calidad. Para esto fue necesario Analizar experimentalmente, en laboratorio y a escala real, el comportamiento de diferentes secciones de pavimentos permeables. Se tomaron cinco apartados para realizar los estudios.

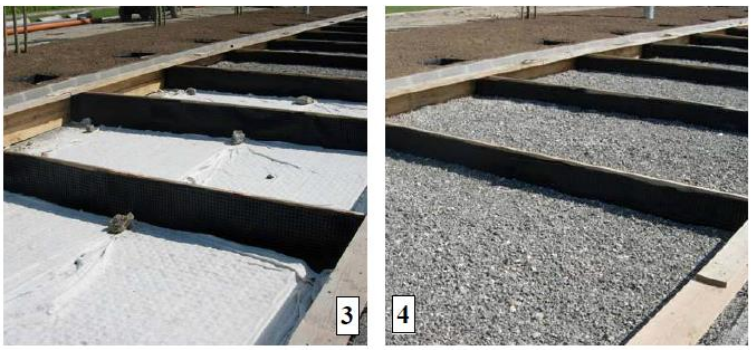


Figura7. Construcción de estaciones experimentales. (Rodríguez, 2008).

Figura 8. Plazas de aparcamiento experimentales construidas con firmes permeables ocupadas por vehículos ligeros. (Rodríguez, 2008).

A las principales conclusiones que se pudieron llegar, luego de realizar ciertos estudios tales como: Ensayo de resistencia a la colmatación en laboratorio; Ensayos de capacidad de infiltración en campo; Ensayos de resistencia de mezclas bituminosas porosas a los vertidos de hidrocarburos; Ensayo de funcionalidad de firmes permeables; ensayos de calidad y cantidad de agua, fueron las siguientes: La capacidad de infiltración disminuye, tanto al aumentar la carga de sedimentos sobre la superficie, como al aumentar la inclinación de la misma; Una carga ligera de sedimentos sobre una superficie permeable con inclinación puede llegar a tener un efecto beneficioso al retener el flujo de la escorrentía superficial, permitiendo un mayor tiempo de infiltración; Una carga ligera de sedimentos sobre una superficie permeable con inclinación puede llegar a tener un efecto beneficioso al retener el flujo de la escorrentía superficial, permitiendo un mayor tiempo de infiltración; el volumen de agua retenida en las capas inferiores fue de un 45 a 75 %, disminuyendo la escorrentía superficial.

De la experiencia dejada por este proyecto , surgieron algunas posibles líneas de investigación tales como: Construir nuevos modelos experimentales a escala real, correctamente impermeabilizados, que permitan la monitorización simultánea de varias

réplicas sometidas a los mismos aguaceros, tanto naturales como simulados; Desarrollar sistemas de limpieza y mantenimiento para firmes permeables, adaptados a cada tipo de pavimento permeable de modo que aseguren la máxima recuperación posible de la capacidad de infiltración perdida; entre las más relevantes (Rodríguez, 2008).

Se ha mostrado interés en experimentar la capacidad de los firmes permeables en la remoción de hidrocarburos y aceites minerales expulsados por los autos. Estudios se han realizado en Inglaterra y han demostrado la factibilidad de los firmes permeables como trampas para degradar el aceite y evitar que vayan a los acuíferos, todos concuerdan con el uso de geotextiles entre la subbase y la sbrasante (Newman, Coupe, Puehmeier, Morgan, Henderson, & Pratt, 2004) (Newman et al., 2002) (Pratt, Newman, & Bond, 1999) (Wilson et al., 2003) (Newman et al., 2005) (Sharma, 2008).

5.2.Pavimentos Porosos

Los pavimentos porosos son un tipo especial de pavimento, que permiten la infiltración del agua a través de su superficie y el almacenamiento temporal de esta en la subbase, para su posterior disposición o infiltración en el terreno. Son utilizados principalmente en estacionamientos y calles de bajo tránsito, con el objeto de disminuir el escurrimiento superficial proveniente de las aguas lluvia y la incidencia de estas aguas abajo. (Solminihac & Castro, 2006). Las capacidad de carga e infiltración del suelo de la subrasante, la capacidad de infiltración del asfalto poroso, y la capacidad de almacenamiento de la base de piedra / subbase son los parámetros clave de su diseño. Para compensar la capacidad de soporte de la estructura inferior de suelos arcillosos, a menudo se requiere profundidad subbase adicional. Al aumentar la profundidad de subbase, también proporciona un volumen de almacenamiento adicional para compensar la tasa de infiltración inferior de la sub-base. Los drenajes se utilizan a menudo cuando los pavimentos permeables se instalan sobre arcilla. Además, un revestimiento impermeable se puede instalar entre la sub-base y la sub-base para limitar la infiltración de agua cuando los suelos de arcilla tienen un alto potencial de expansión-contracción, o si existe una alta profundidad a la mesa de lecho de roca o agua. (Hunt & Collins, 2008).

Existe preocupación por la obstrucción de los poros del asfalto debido a la acumulación de partículas finas en estos debido a la intemperie y escorrentía, disminuyendo a largo plazo su capacidad de infiltración y posteriormente se necesitará el reemplazo del pavimento. (Bean et al., 2007); en cambio no representa problemas en climas fríos, la penetración de las heladas no repercute negativamente en las tasas de infiltración de la superficie, la fusión de hielo y nieve se infiltra directamente en los poros del pavimento (Gunderson, 2008). Para pavimentos porosos la pérdida de permeabilidad que se puede producir en el primer año es recuperable en un 50% y manteniendo la frecuencia anual, las pérdidas del segundo año se pueden recuperar en un 70%. (Solminihac & Castro, 2006). Respecto a la remoción de metales, en un estudio relativamente reciente de un estacionamiento de asfalto poroso en Rhode Island (Nombre autor, 2008) investigaron la posibilidad de que los contaminantes se filtren en el lote en el nivel freático directamente debajo de la cama infiltración del lote. Se encontró una tasa de retención de más de 90% para los metales, no hay bacterias, y una tasa mucho más baja de nutrientes (27%). Sin embargo, se detectaron hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en cerca niveles mínimos permitidos. (Greenroads Manual v15, 2011); Esto puede explicarse por lo dicho por Newman en una de sus investigaciones al afirmar que las propiedades de retención de aceite, incluso en un geotextil ideal se superan rápidamente, y si es grande, se producen derrames de aceite. Un sistema de pavimento permeable con trampa de aceite integrado es capaz de reducir significativamente la cantidad de petróleo vertido de un pavimento permeable. (Newman et al., 2005)

En Brasil para el 2011 investigadores de la universidad de Sao Pablo desarrollaron un asfalto poroso como alternativa de solución a raíz de los problemas de inundación al que se ve sometida la ciudad debido a la creciente precipitación año tras año. Afonso Luis Virgillis, ingeniero hidráulico, fue el director de la investigación que se llevó a cabo en los parqueaderos de la universidad. Cuyo propósito fue aumentar los tiempos de almacenamiento en las capas granulares adyacentes a la carpeta asfáltica para conducirla lentamente al sistema de alcantarillado. Algunas de las limitaciones para implementar

este pavimento son el costo superior al pavimento convencional y la capacidad inferior para soportar tráfico vehicular pesado. Los beneficios detectados en el campo de prueba piloto fueron la disminución de ruido, disminución de escorrentías entre otros. El estudio continúa enfocado a desarrollar pavimentos para soportar tráfico pesado. El gobierno de Sao Pablo planeó iniciar las pruebas en áreas de tráfico liviano a finales de año. (Virgiliis, 2011).

5.3. Hormigón Permeable

El Hormigón permeable es un tipo de pavimento poroso el cual se caracteriza por su ausencia de finos y su mezcla con altos volúmenes de vacíos, para permitir el drenaje del agua hacia las capas inferiores. Su porosidad varía entre el 15 al 20%, Resistencia la compresión de 150 a 210 Kg/cm^2, densidad promedio de 1600 Kg/m^3 y permeabilidad de 120 a 700 $L/m^2/min$ (Canal Construcción, 2013). Es usado principalmente en áreas de estacionamiento, áreas de poco tráfico, pasos peatonales e invernaderos.

El concreto permeable funciona como laguna de retención de aguas lluvias y permite que esta se filtre en la tierra sobre un área mayor, de igual manera reduce el impacto del desarrollo en los árboles, permitiendo una transferencia de agua y aire a los sistemas de raíces dejando que los arboles florezcan incluso en ares urbanas. (NRMCA, 2013)

Su comportamiento respecto a retención de volúmenes de agua y disminución de contaminantes no varía mucho en comparación de los otros sistemas de pavimentos (adoquines y porosos), conservando resultados muy buenos en los experimentos realizados en todo el mundo.

En la Universidad Católica de Chile, año 2003, se realizó un estudio llamado “instalación piloto de pavimentos permeables para la gestión de aguas Lluvias” por Pedro Rivera; José Montt y Bonifacio Fernández, en el cual Se diseñó y construyó una instalación piloto de hormigón permeable para evaluar su comportamiento como solución de aguas lluvias. La

instalación se ubicó en el Campus San Joaquín de la Universidad, y correspondió a 4 sitios de estacionamientos, dotados de un sistema de monitoreo de lluvias y caudales. Siendo este el estudio pionero en todo el país.

Se presentaron los primeros resultados obtenidos en tres lluvias ocurridas durante Julio del 2003. Las lluvias fueron de magnitud entre 9 y 25 mm, y de intensidad máxima en 5 min entre 7 y 19 mm/h. No se observó escurrimiento superficial en el pavimento permeable para ninguna de estas lluvias. Además, se verificó una importante capacidad de almacenamiento de la subbase, amortiguando la lluvia desde un 72% a un 40% del máximo registrado. El esquema del montaje del diseño se muestra en la figura 6. (Rivera et al., 2003)

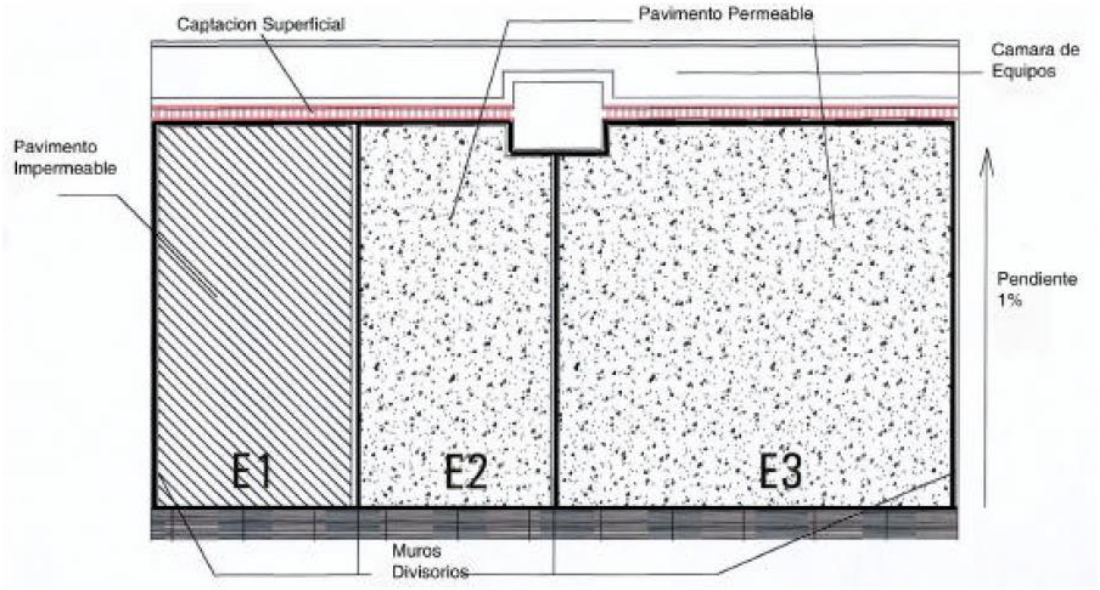


Figura 9. Esquema del campo de prueba piloto construida en la universidad Católica de Chile. (Rivera, Montt, & Fernandez, 2003).

A partir de entonces se han estudiado e implementando mezclas para ser aplicadas en el país. Por ejemplo, en 2011 la empresa Concretos Especiales S.R.L crearon lo que llamaron Hormigón Ecológico Permeable el cual tiene la particularidad de que es fabricado sin finos y altos contenidos de vacíos (del 15% al 25%) para permitir el

escurrimiento del agua a través de estos, permitiendo una resistencia final de 34.5 Mpa en 28 días y permitiendo permeabilidades de 5 a 14 cm/min. Las principales aplicaciones de este concreto las encontramos en ciclovías, estacionamientos y calles de tráfico ligero. Algunos de los beneficios de este concreto cabe nombrar la alta reflectancia que tienen, por lo tanto necesita menos iluminación, reducción de patinaje y reducción del ruido generado por el tráfico (aumenta la absorción del sonido). (Concretos Especiales S.R.L., 2011).

5.4. Adoquines

Los adoquines permeables al agua son una solución duradera y ecológica para impedir las escorrentías, minimizar el riesgo de inundación y aumentar la eficacia de la depuración del agua. La aplicación de adoquines permeables al agua sobre una base y/o subbase permeable permite laminar el agua de lluvia que entre en el firme y la infiltración o la salida retardada del caudal saliente hacia el terreno o el sistema de infiltración. (Beeldens & Vijverman, 2009).

Una instalación típica de pavimentos permeables de adoquines, tiene un porcentaje de intersticios del 10% del área total. Esto es suficiente para que el pavimento en su conjunto no produzca escurrimiento durante las lluvias. Si bien es posible que la capacidad de infiltración del pavimento disminuya con el tiempo debido a la colmatación con finos de la gravilla de los intersticios, la recuperación es relativamente sencilla. Sin embargo, para evitar la colmatación, es recomendable realizar mantenimiento. (Bonifacio et al., 2003). En un estudio de colmatación realizado en 2008 en España se demostró que para una superficie de pavimentos colmatada al 100%, las tasas de infiltración redujeron hasta un 17%, esto fue evaluado para una inclinación máxima del pavimento de 10%, donde la infiltración sin carga de sedimento fue de 91% y 79% con carga de sedimento de 2 kg/m^2 (Rodríguez, 2008).

Respecto al mantenimiento se demostró que para pavimentos de adoquines el índice de infiltración aumentó de 80 mm/h a 225 mm/h al aplicar mantenimiento y para pavimentos de grava reforzada sin mantenimiento presentaban índices de 71 mm/h y 50 mm/h, que aumentaron con la simulación del mantenimiento hasta 118 mm/h y 80 mm/h respectivamente. (Rodríguez, 2008). Por otra parte en Carolina del Norte se llevó a cabo un estudio en 15 aparcamientos, para evaluar el efecto del mantenimiento en las tasas de infiltración todos los aparcamientos tenían arena y parecían estar mezclado con material coagulado adicional, se retiró de 12,7 y 17,8 mm para similar un mantenimiento, De los 15 sitios analizados, 14 tenían presentaron mayor infiltración. La tasa de infiltración de la superficie existente media fue de 4,8 cm/h (que van 0,99 a 18,8 cm/h), la tasa de infiltración luego del ensayo fue de 8,6 cm / h (que van desde 1,62 a 33 cm / h); un aumento del 60% (William et al., 2006).

6. MARCO LEGAL

En este apartado se presentan las normativas, metodologías y manuales tenidos en cuenta en la elaboración de este proyecto.

6.1.RAS-2000

En Colombia, el RAS-2000 es la norma que rige a los sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales y pluviales. Aunque esta no especifica métodos o técnicas de diseño y construcción en cuanto a los sistemas urbanos de drenaje sostenible, si menciona a los sistemas no convencionales como una posible alternativa para poblaciones con niveles de complejidad bajo y medio, sin especificar algún tipo. Esto los podemos encontrar en la sección D.1.6.2.5. Pero en referencia a los cálculos hidrológicos y consideraciones generales para diseñar un sistema de recolección y evacuación de aguas pluviales, si es necesario seguir las recomendaciones que dice esta norma en la sección D.4.

6.2. Manual de drenaje para carreteras 2009 de INVIAS

A pesar de que éste es un manual dirigido a proyectos de carreteras, en donde también se aplican los SUDS, las metodologías expuestas allí sobre los cálculos hidrológicos son las mismas que se utilizan en cualquier otro tipo de proyecto. Además, presenta información importante sobre los suelos y estructuras hidráulicas que se pueden usar en sistemas de esta índole.

6.3. Resolución 6523 del 16 de diciembre de 2011

En Bogotá, se consideró ingresar los SUDS al plan de ordenamiento zonal norte (POZN) de la ciudad, lo cual se concretó con la RESOLUCIÓN 6523 del 16 de diciembre de 2011,

que busca darle solución a las inundaciones provocadas por los desbordamientos de los drenajes en las épocas de lluvia, todo a causa de la impermeabilización de la ciudad por el desarrollo urbano, usando las tecnologías SUDS. Entre las medidas expuestas por la resolución se encuentran que el 50% de las áreas libres en las edificaciones deben ser permeables al agua de lluvia y la aplicación de techos verdes en un 50% del área total de las cubiertas. Estas novedades en nuestro país se deben a que mundialmente se han hecho muchos avances en las nuevas tecnologías de drenajes urbanos, entre ellas el uso de pavimentos permeables, los cuales han dado exitosos resultados en las ciudades donde se han aplicado.

6.4. AASHTO Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos (1998)

Guía que suministra una herramienta adecuada para el diseño de estructuras nuevas y rehabilitadas de pavimentos, basada en principios mecánico-empíricos, la cual define varios niveles de complejidad en función del tránsito e importancia de la obra a realizar.

7. METODOLOGÍA

El enfoque usado en este proyecto de investigación es de tipo mixto, con una primera etapa cualitativa y una posterior cuantitativa. La primera etapa consiste en la recolección de información, tales como artículo, revistas y manuales, y análisis de factores importantes en el diseño por medio de observación; la segunda etapa abarca los estudios en campo, ensayos y cálculos de diseño.

Para el diseño del campo de prueba piloto en la Universidad de Cartagena, fue necesario reunir la información existente en el mundo sobre el tema y adaptarla al medio local, debido a que el uso de pavimentos permeables tiene pocos antecedentes en Cartagena. Esto implica, recolectar información hidrológica, meteorológica y de materiales, realizar estudios en campo, y realizar pruebas de laboratorio.

El campo de prueba piloto está localizado en las coordenadas (10°24'07.8"N, 75°30'19.6"W), consta de un área en planta de 45 $m^{2.}$

Figura 10. Ubicación del campo del prueba piloto.

7.1. Material bibliográfico

Para el material bibliográfico se recolectaron manuales, artículos, tesis, normas colombianas, libros y publicaciones en la web. Entre los manuales encontrados que incluyen a los pavimentos permeables, se tienen provenientes de Estados Unidos, España y Gran Bretaña.

Se cuenta en total con 15 artículos encontrados que hablan sobre las SUDS y otros 34 específicamente de los pavimentos permeables. Las normas colombianas tenidas en cuenta fueron el RAS2000 y el Manual de Drenaje para carreteras 2009 de INVIAS, la resolución 6523 del año 2011 expedida para la ciudad de Bogotá, se tomó solo como referencia en algunos aspectos. Todos los conceptos aprendidos que sirven para el cumplimiento de los objetivos trazados en este proyecto están expuestos en la sección del marco teórico.

7.2. Información Local

La Universidad de Cartagena no cuenta con los planos requeridos en este proyecto, solo posee los planos arquitectónicos, por esto, el drenaje de la sede Piedra de Bolívar tuvo que ser analizado en campo mediante la observación de la escorrentía y del sistema de aguas lluvia construido. Se ubicó el campo de prueba piloto por medio de inspección visual, en lugar donde la escorrentía proveniente de otras cuencas era nula. Como información hidrológica, se contó con las curvas IDF de la Universidad de Cartagena.

7.3. Estudios en campo y laboratorio

Los estudios realizados en campo se ejecutaron con el fin de obtener la altimetría, área disponible y capacidad de infiltración del sitio escogido en donde se ubicará el campo de prueba piloto de pavimentos permeables; mediante levantamientos topográficos y pruebas de infiltración. También se realizaron ensayos de proctor y CBR para saber la capacidad portante del suelo, lo cual es indispensable en el diseño de pavimentos.

7.3.1. Levantamientos topográficos

En el sitio seleccionado para localizar el campo de prueba piloto se determinó por medio de observación de las escorrentías, disponibilidad de espacio y dificultad del terreno. Las aguas lluvias de esta sede se evacuan principalmente a través de cuatro canales, el volumen de agua que no es transportado en estos canales queda dispuesto en áreas desconectadas, como espacios verdes, vías y parqueaderos.

A partir de lo anterior, se escogió el sitio adecuado donde el campo de prueba piloto no tuviera interferencia con escorrentías ya que se desea que esté aislado para poder calcular los volúmenes almacenados de manera más precisa.

El levantamiento se realizó usando mira de escala milimétrica, nivel de precisión y cinta de 30 metros, para saber la altimetría y área disponible. Los datos tomados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Pendiente media medida en el área seleccionada para realizar el proyecto.

Ubicación	Área levantada (m^2)	Pendiente media (%)
1	50	6

En la figura 11 se puede apreciar la ubicación geográfica donde se realizaron todas las pruebas de suelo y por ende la ubicación del campo de prueba piloto de pavimentos permeables en la Universidad de Cartagena.

Figura 11. Localización del campo de prueba piloto de pavimentos permeables.

7.3.2. Pruebas de infiltración

La velocidad con la que el agua es absorbida en el suelo se denomina la tasa de infiltración. Ésta mide la cantidad de tiempo que le toma a la tierra absorber un cierto volumen de agua. Se suelen medir en milímetros por hora o en pulgadas por hora.

En el lugar seleccionado se realizó una prueba de infiltración, en la cual se cavó un hoyo de 40 cm de diámetro y 40 cm de profundidad. La perforación fue llenado a tope con agua y se dejó drenar para crear condiciones de saturación del suelo, luego se volvió a llenar la perforación para tomar el tiempo en que tardaba en infiltrar 30 cm de agua, este proceso se llevó a cabo dos veces para promediar los resultados obtenidos. La tasa de infiltración promedio arrojada fue de $3.5x10^{-5}$ Pul/h, de acuerdo con la tabla 5 y los resultados arrojados por ensayos de granulometría, se concluye que el suelo del sitio seleccionado es de tipo arcilloso, por tanto se requerirá del uso de geotextiles en toda la extensión de la estructura, con el fin de impedir el contacto del agua filtrada con el suelo natural, evitando posibles daños estructurales pese al mal comportamiento del suelo.

Tabla 5. Relación aproximada entre la clasificación unificada y la permeabilidad. Manual de drenaje para carreteras INVIAS 2009.

CLASIFICACIÓN SEGÚN SISTEMA UNIFICADO	PERMEABILIDAD RELATIVA	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD - k (cm/s)
GW	Permeable	$10^{-3} – 10^{-1}$
GP	Permeable a muy permeable	$5*10^{-3} – 10$
GM	Semipermeable	$10^{-7} – 10^{-2}$
GC	Impermeable	$10^{-8} – 10^{-5}$
SW	Permeable	$5*10^{-4} – 5*10^{-2}$
SP	Semipermeable a permeable	$5*10^{-5} – 5*10^{-4}$
SM	Impermeable a	$10^{-7} - 5*10^{-4}$
SC	semipermeable	$10^{-8} – 5*10^{-4}$
ML	Impermeable	$10^{-8} – 5*10^{-4}$
CL	Impermeable	$10^{-8} – 10^{-6}$
OL	Impermeable	$10^{-8} – 10^{-5}$
MH	Impermeable	$10^{-9} – 10^{-7}$
CH	Muy impermeable	$10^{-10} – 10^{-8}$

7.3.3. Ensayo de granulometría

Las muestras de suelo se tomaron de las excavaciones hechas para las pruebas de infiltración, y se siguió el procedimiento indicado en las normas INVIAS E-123, AASHTO T 88 y ASTM D 422. Los resultados de las pruebas de granulometría se muestran en la tabla 6.

Se tomaron 3 muestras con el fin de caracterizar el tipo suelo, y determinar qué tipo de drenaje se debe usar.

Tabla 6. Análisis por tamizado del suelo del sitio seleccionado.

ANALISIS POR TAMIZADO				
P1 (gr) =	100.0			
P2 (gr) =	4.5			
Tamiz No.	W Ret.	% Ret.	% Ret.Acum.	% Pasa
4"	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	0.0	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	0.0	0.0	0.0	100.0
No. 4	0.0	0.0	0.0	100.0
No. 10	0.7	0.7	0.7	99.3
No. 40	0.6	0.6	1.3	98.7
No. 100	2.2	2.2	3.5	96.5
No. 200	1.0	1.0	4.5	95.5
FONDO	0.0	0.0		95.50
FINOS	95.5	95.5		

Los resultados de estos ensayos muestran que son suelos finos, debido a que más del 50% del material pasa el tamiz No. 200. Por consiguiente se necesitarán obras complementarias en el diseño del campo de prueba piloto de pavimentos permeables para drenar y/o aprovechar las aguas captadas en las capas de depósito. Se recomienda el uso de geotextiles en este caso.

Para determinar el tipo de suelo fino fue necesario realizar los ensayos de Atterberg, los cuales se muestran en las tablas 7 y 8. Para esto se siguió lo establecido en la norma INV E-126-07

Tabla 7. Límite líquido del terreno natural.

Limite Líquido			
No. Golpes	33	20	10
Recipiente #	7	16	51
Peso Rec. + Suelo Húmedo (gr)	38,85	39,58	41,77
Peso Rec. + Suelo Seco (gr)	33,86	34,10	35,20
Peso del Recipiente (gr)	24,1	24,12	24,16
Peso Agua (gr)	4,99	5,48	6,57
Peso Material Seco (gr)	9,76	9,98	11,04
% Humedad	51,1	54,9	59,5
L.L. Calculado	53,1	53,4	53,2
L.L.	53		

Tabla 8. Límite plástico del terreno natural.

Límite Plástico		
Peso Rec. + Suelo Húmedo (gr)	31,16	33,57
Peso Rec. + Suelo Seco (gr)	29,80	31,76
Peso del Recipiente (gr)	24,33	24,58
Peso Agua (gr)	1,36	1,81
Peso Material Seco (gr)	5,47	7,18
% Humedad	24,9	25,2
L.P.	25	

La tabla 9 muestra la clasificación del suelo según A.A.S.H.T.O. y U.S.C.S. de acuerdo con los ensayos de atterberg realizados.

Tabla 9. Clasificación del suelo.

C L A S I F I C A C I O N			
Límite Líquido	53	Índice de Grupo	18
Límite Plástico	25	A.A.S.H.T.O.	A-7
Índice Plasticidad	28	U.S.C.S.	CH

7.3.4. Ensayos de Proctor y CBR

Con fines de conocer la capacidad de compactación y resistencia que brinda el suelo natural del terreno, se procedió a realizar los ensayos de proctor y CBR respectivamente. Para esto se siguió lo descrito en la norma INV E-148-07. La tabla 10 muestra las humedades halladas para realizar el grafico correspondiente para determinar la densidad máxima seca.

Tabla 10. Determinación del contenido de humedad.

	1	2	3
No. Golpes	12	12	12
Molde No.	6	2	5
Peso muestra húmedo	100	100	100
Peso muestra seca	83.5	81.9	80.3
Peso agua	16.5	18.1	19.7
Peso suelo seco	83.5	81.9	80.3
Humedad, w	19.8	22.1	24.5

Posteriormente se muestran los datos del ensayo proctor realizado para determinar la densidad máxima seca del suelo del sitio seleccionado, la tabla 11 muestra los datos obtenidos, los cuales se graficarán:

Tabla 11. Determinación de densidad máxima seca.

Contenido de humedad (%)	19.8	22.1	24.5
Peso de suelo húmedo + molde	8765	9115	8974
Peso del molde (gr)	4750	4865	4770
Peso de suelo húmedo	4015	4250	4204
Peso de suelo seco	3351	3481	3377
Volumen (cm3)	2305	2305	2305
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.742	1.844	1.824
Densidad seca (gr/cm3)	1.454	1.51	1.465
Densidad seca (Lb/pie3)	90.7	94.2	91.4

A partir de los tres puntos de densidad seca calculados anteriormente y humedad, se graficó la curva de compactación para determinar la humedad óptima y la densidad máxima.

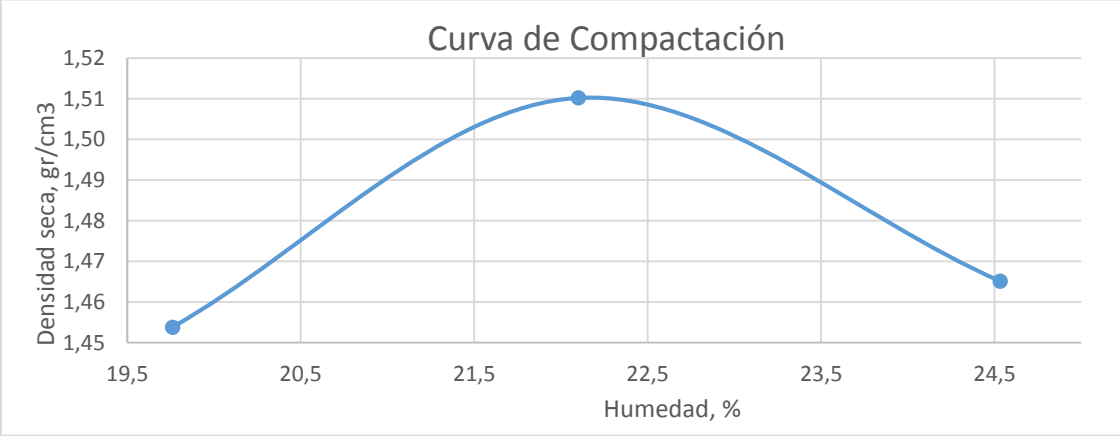


Figura 12. Curva de compactación del suelo natural.

Se puede apreciar que la densidad máxima seca de es 1.50 g/cm^3 con un contenido de humedad óptimo de 21.83%.

A continuación se muestran los resultados del ensayo de CBR realizado al suelo en estudio, en el cual se tomó el valor máximo entre 56, 26 y 12 golpes analizando las penetraciones por pulgadas entre 0.1" y 0.2" , el valor de CBR tomado se resalta en color rojo.

Tabla 12. Ensayo de CBR realizado al suelo del sitio seleccionado.

PROMEDIOS DE ENSAYOS SEGÚN NÚMERO DE GOLPES									
No. golpes	56			26			12		
Penetración	Dial	Carga	CBR	Dial	Carga	CBR	Dial	Carga	CBR
pulgadas	carga	libras	(%)	carga	libras	(%)	carga	libras	(%)
0.000	0	0.0		0	0.0		0	0.0	
0.025	14	9.6		11	7.4		5	3.4	
0.050	30	20.3		21	13.8		8	5.4	
0.075	44	29.3		32	21.2		12	8.3	
0.100	55	37.1	3.7	41	27.2	2.7	16	10.7	1.1
0.150	76	50.9		57	38.0		21	14.1	
0.200	96	64.1	4.3	69	46.0	3.1	27	17.9	1.2
0.250	101	67.7		74	49.6		31	21.0	
0.300	108	72.4		80	53.6		36	23.9	
0.400	113	75.7		85	57.0		39	25.9	
0.500	117	78.6		89	59.9		42	28.1	

El CBR hallado es de 4.3%, el cual es mayor de 3%, por tanto no se requerirá estabilizar la subrasante con fines de mejorar la capacidad portante de esta (Manual AASHTO, 1993).

7.4. Cálculo de escorrentía y volúmenes de almacenamiento

Para la estimación del caudal de diseño puede utilizarse el Método racional, el cual calcula el caudal pico de aguas lluvias con base en la intensidad media del evento de precipitación con una duración igual al tiempo de concentración del área de drenaje y un coeficiente de escorrentía. La ecuación del método Racional es

$$Q = C\ i\ A \qquad \textbf{Ecuación 4}$$

De acuerdo con el método racional, el caudal pico ocurre cuando toda el área de drenaje está contribuyendo, y éste es una fracción de la precipitación media bajo las siguientes suposiciones:

- El caudal pico en cualquier punto es una función directa de la intensidad i de la lluvia, durante el tiempo de concentración para ese punto.

- La frecuencia del caudal pico es la misma que la frecuencia media de la precipitación.

- El tiempo de concentración está implícito en la determinación de la intensidad media de la lluvia por la relación anotada en el punto 1 anterior.

Para determinar la intensidad i, se procedió a usar dos métodos propuestos por la Universidad de Cartagena para estimar este valor. Se tomaron lluvias de 60 minutos con periodo de retorno de 10 años. Las cuales son las condiciones mínimas para diseñar una estructura de esta índole (City of Portland,, 2008).

7.4.1. Calculo de intensidad de lluvia

Para calcular la intensidad máxima de lluvia en 1 hora, se procedió a utilizar la ecuación propuesta por Velásquez Almanza y Martínez, 1995 y el método descrito por Andrade, 2000. Se compararon los resultados obtenidos por ambos métodos y se procedió a elegir el valor mayor de intensidad para el diseño.

Posteriormente se estudió el comportamiento hidrológico de esa lluvia, teniendo en cuenta los valores extremos de precipitaciones acumulas para una probabilidad de excedencia descrito en el trabajo de investigación de Arieta, 2002.

7.4.2. Calculo de caudal de diseño

Luego de establecer cuál sería la intensidad de lluvia de diseño y conociendo el coeficiente de escorrentía(C) más desfavorable, de 0.9 perteneciente a pavimentos adoquinados (Ibañez & Moreno, 2004), y teniendo el área total del campo de prueba piloto de 45 $m^{2,}$ se determinó el caudal de diseño usando la ecuación propuesta por el método racional

Posteriormente se calculó el diámetro de tubería perforada necesaria para evacuar este volumen de agua de la estructura y transportar este caudal a los tanques de almacenamiento ubicados por fuera de la instalación piloto.

7.5. Diseño Hidráulico

Para el cálculo hidráulico del campo de prueba de pavimento permeable se usó la metodología descrita en el manual de diseño número 7 para pavimentos permeables de Virginia, en el cual se utilizaron los datos encontrados en los ensayos de laboratorio realizados. Los resultados obtenidos se compararon con distintos proyectos desarrollados por la universidad Católica de Chile y la universidad politécnica de valencia, así como manuales provenientes de Gran Bretaña y España.

La ecuación 5 se puede utilizar para aproximar la tasa de salida del drenaje inferior. La permeabilidad k de la grava es muy alta. Sin embargo, la capa de depósito del pavimento drenará cada vez más lento a medida que disminuye el volumen de almacenamiento (es decir, la carga hidráulica disminuye).

$$q_u = k * m \qquad \textbf{Ecuación 5}$$

Donde

q_u = Caudal de salida de drenaje

k = infiltración de la capa de reserva (base)

m= pendiente del drenaje

La pendiente del drenaje utilizada fue de 0.2%, mientras que la tasa de infiltración fue de 28.5 pies / día, de acuerdo con Northern Virginia Regional Commission, 2007

Una vez que el caudal de salida a través del drenaje inferior se ha aproximado, la ecuación 6 se utiliza para determinar la profundidad de la capa de depósito necesario para almacenar la tormenta de diseño.

$$dp = \frac{(d_c * R) + P - \left(\frac{i}{2} * t_f\right) - (q_u * t_f)}{V_r}$$ **Ecuación 6**

dp = profundidad de la capa de deposito

dc = Profundidad de la escorrentía del área de drenaje que contribuye (sin incluir la superficie del pavimento permeable) para el volumen de tratamiento (Tv / Ac), U otro diseño tormenta (pies)

R= La relación entre el área de drenaje que contribuye (Ac) (Sin incluir la superficie del pavimento permeable) y la zona de superficie de pavimento permeable (Up)

P= La altura de lámina de agua de la lluvia para el volumen de tratamiento (Nivel 1 = 1 pulgada; Nivel 2 = 1.1pulgada)

yo= tasa de infiltración del terreno natural (pies / día)

tf= El tiempo para llenar la capa de depósito (días) - por lo general 2 horas o 0,083 días

Vr= La relación de vacíos para la capa de depósito (0.4)

qu= Caudal de salida a través del desagüe inferior (pies / día)

Si la profundidad de la capa de depósito es muy grande, se puede aumentar el número de drenajes, lo que aumentará el caudal de salida. Teniendo en cuenta lo anterior:

$$dp = \frac{\left((0.0833 * 2) + 0.083 - \left(\frac{0.00285}{2} * 0.083\right) - (0.57 * 0.083)\right) * 30.38}{0.4} = 14.05 \text{ cm}$$

Hidráulicamente la capa debe tener un espesor mínimo de 15 cm, pero se optó por tomar 20 cm por seguridad y requerimientos constructivos. Este valor es similar a los recomendados por García et al, 2010 para valores mínimos en capas de depósito. (García et al, 2010).

7.6. Tipo de pavimento a seleccionar

El tipo de pavimento debe seleccionarse con base en una revisión de los factores en los Parámetros de diseño de diferentes tipos de Pavimentos Permeables elaborada con base a los estudios de la ASTM y deben ser diseñados de acuerdo con las especificaciones que proporcione el vendedor.

Las placas de diseño: hormigón permeable, adoquines y asfalto poroso, son los más usados en el control de escorrentía a nivel mundial, además se cuenta con una amplia gama de especificaciones técnicas a nivel constructivo, las cuales son fácilmente aplicables a nivel local. Además la obtención de la materia prima para su elaboración está disponible en la ciudad

7.7. Geometría interna

Drenaje subterráneo: para promover una mayor reducción de la escorrentía del pavimento permeable situada en suelos marginales, se debe instalar un drenaje inferior con recubrimiento de piedra para crear una capa de almacenamiento de profundidad variable entre 15 y 30 cm de espesor.

Factor de seguridad para el cambio de infiltración a largo plazo: Se debe disminuir la infiltración medida por un factor de 2 durante el diseño, para aproximar las tasas de infiltración a largo plazo debido a los taponamientos provocados por la colmatación los cuales reducen considerable la capacidad de infiltración de la estructura. (García et al, 2010).

7.8. Conducción y desbordamiento

Se deben considerar periodos de retorno no menores de 2 años ni mayores a 10. Para el agua de rebose, se puede añadir un tubo perforado en la parte superior de la capa de reserva, de esta manera el volumen de agua que no es drenado por las tuberías inferiores y que además

no se queda en la capa de depósito, es drenada y se debe conectar en el sistema de drenaje principal del lugar. Esto es aplicable como opción para controlar el agua que no puede ser absorbida por la estructura.

7.9. Capa de depósito

El depósito por debajo de la superficie del pavimento permeable debe estar compuesto por agregado con medidas específicas. Este agregado debe cumplir con los requerimientos estructurales e hidráulicos.

La capa de almacenamiento debe constar de material de tamaño nominal de ½ a 1 pulgada. Se prefiere usar piedra debido a su almacenamiento adicional y estabilidad estructural.

La parte inferior de la capa de depósito debe ser completamente plana para que la escorrentía sea capaz de infiltrarse de manera uniforme a través de toda la superficie. (Jackson, 2007).

7.10. Drenajes

Se recomienda el uso de drenajes inferiores cuando la tasa de infiltración es susceptible a cambiar a largo plazo (colmatación) o cuando los suelos deben ser compactados para conseguir una densidad Proctor deseada. En este proyecto es necesario usar drenajes inferiores puesto que el agua drenada se almacenará para ser evaluada.

7.11. Mantenimiento

El mantenimiento es un elemento fundamental para garantizar el rendimiento a largo plazo de pavimento permeable. El problema de mantenimiento más frecuentemente citado es la colmatación, que es básicamente la obstrucción de superficie causada por la materia orgánica y sedimentos. Puede reducirse tomando las siguientes medidas:

• Barrido periódico. La superficie del pavimento es la primera línea de defensa de retención y la eliminación de los sedimentos que de otra manera pueden entrar en la base de piedra y subrasante. El barrido se debe realizar al menos 2 veces por año. Esta frecuencia debe ajustarse de acuerdo a la intensidad de uso y velocidad de deposición en la superficie de pavimento permeable. (Schueler et al, 2007)

• La protección de la base o capa de depósito. Para proteger la capa de depósito o base, se recomienda cubrir la parte inferior con material no tejido, geotextil de polipropileno, el cual es permeable.

7.12. Diseño estructural

Para realizar el diseño estructural de los tres tipos de pavimentos a emplear, se procedió a utilizar las metodologías existentes y utilizadas a nivel mundial, tales como método ICPI y mecanicista, también se contó con manuales de diseño que brindan información concerniente.

Se tuvo en cuenta la capacidad del suelo (CBR = 4.7%) calculada en laboratorio y se tomó en como ejes de referencia 500.000 ejes equivalentes a 8.2 Toneladas con el fin de calcular el espesores de losas de los pavimentos permeables (AASHTO, 1993).

7.12.1. Ensayo de permeabilidad

Es indispensable realizar este ensayo a las muestras de pavimento a emplear, ya que permitirá conocer el parámetro más importante a la hora de trabajar con este tipo de pavimentos. Para esto será necesario contar con un permeámetro de carga variable, en el cual se ensayarán probetas de 10 cm de diámetro por 15 cm de alto (ACI.55R-06, 2006). En la figura 13 se puede apreciar un esquema del ensayo:

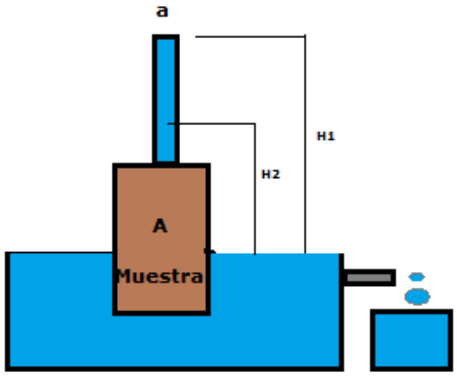


Figura 13. Esquema de ensayo de permeabilidad.

Para determinar el coeficiente de permeabilidad se hará uso de la ley de Darcy, descrita en la ecuación 4:

$$K = \frac{L}{t} * \frac{a}{A} * Ln\frac{H1}{H2} \qquad \textbf{Ecuación 7}$$

Dónde:

K= Coeficiente de permeabilidad.

L= Longitud de la muestra.

A= Área de la muestra.

a= Área de la tubería de carga.

t= Tiempo en demora en pasar (H1 – H2).

H1= Altura de agua medida del nivel de referencia (parte superior de la muestra).

H2= Altura de tubería de salida del agua con respecto al nivel de referencia (1cm).

7.12.2. Método ICPI para pavimentos en adoquines

Para aplicar este método se debe contar con ensayos de resistencia de la subrasante (obtenido del CBR), así como ejes equivalentes de 8.2 Ton en 10 años. Teniendo en cuenta el CBR obtenido de 4.7% se procedió a utilizar la ecuación 8 para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante:

$$M_R = 10.3 * CBR \qquad \textbf{Ecuación 8}$$

Donde M_R = 10.3*4.7 = 48.1 Mpa = $6.9x10^3$ PSI

Las cargas de tráfico calculadas en el aforo vehicular (mostrado posteriormente en la tabla 12) realizado fueron menores a las mínimas requeridas para el diseño de pavimentos en adoquines, por tanto se escogió el rango mínimo de ejes equivalentes (0 < Ejes equivalentes < 500.000), para el cálculo de la capa de depósito se utilizó la siguiente figura 14.

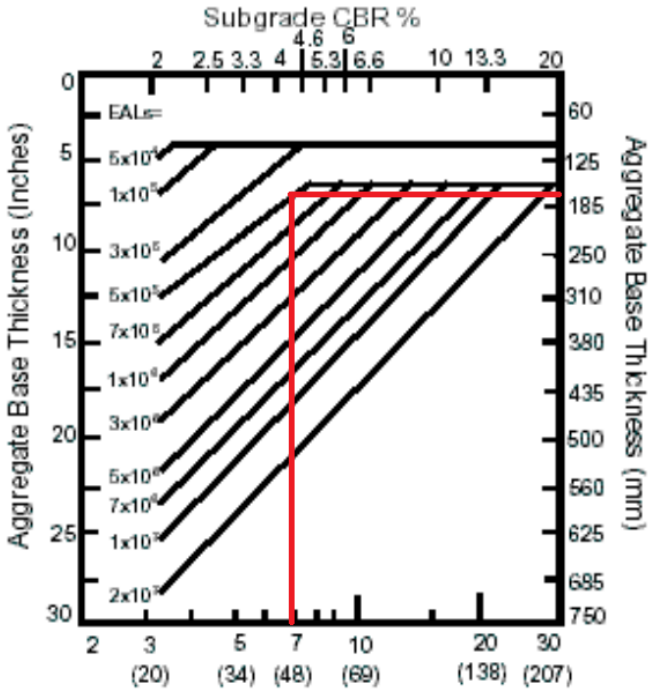


Figura 14. Gráfica del ICPI para el cálculo del espesor de capa granular a partir del % CBR.

Se optó por una base de 20 cm de espesor y no de 15 cm como recomienda este método de diseño, debido a que no cumple con los requerimientos hidráulicos y también por efectos constructivos.

- Espesor adoquines de concreto = 80 mm.
- Espesor capa de soporte de arena = 25 a 40 mm.

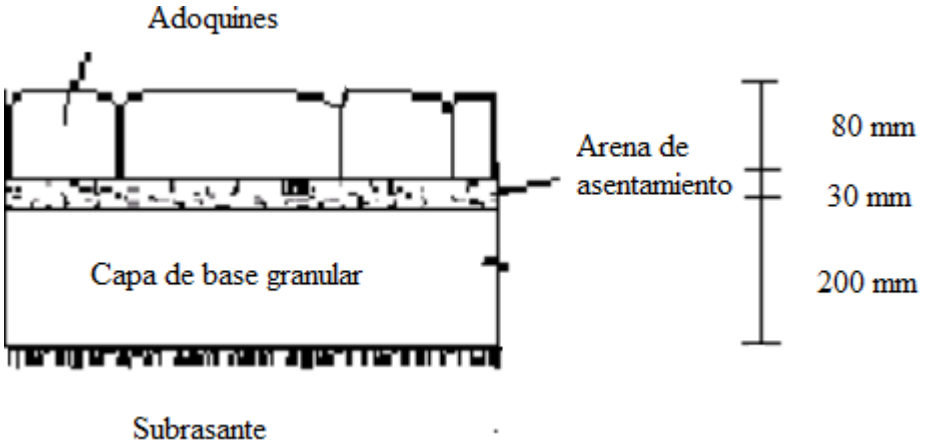


Figura 15. Esquema de diseño para el pavimento permeable en adoquines.

7.12.3. Diseño de hormigón poroso

Para que el hormigón sea considerado poroso debe tener un mínimo de 15% de huecos, sin sobrepasar el 25% para evitar problemas de estabilidad (De Solminihac & Castro, 2002), La resistencia y permeabilidad obtenidas con un pavimento poroso están determinadas por la mezcla que se va a utilizar. Las variables que afectan el comportamiento del hormigón poroso son: granulometría, dosis de cemento, razón agua/cemento y contenido de vacíos. Este tipo de pavimento es aplicable en caso de tráfico ligero y clima templado y generalmente se apoyan directamente sobre la sub-rasante (AASHTO, 1993).

Para la dosificación de la mezcla se tomará el valor de relación agua/cemento entre 0.35 y 0.38, los cuales arrojaron los mejores resultados en cuanto a resistencia a los 28 días, facilidad de compactación y generación de vacíos reales en un estudio realizado por la Universidad de Purdue y la Universidad Católica de Chile para determinar dosificaciones óptimas para hormigones porosos (Castro & Fernandez, 2009). El pavimento de hormigón poroso ofrece resistencias que oscilan entre los 15 y 25 Mpa y permeabilidades entre 0.5 y 5 cm/s. (Aguado, 1995).

La ecuación 9 fue deducida en el anterior estudio mencionado y se debe emplear para determinar la dosis de cemento a utilizar en función de la cantidad de vacíos conectados en la mezcla endurecida, dada la relación agua/cemento:

$$Mc = \frac{(10Va - 100)FC + 9615.48 - 11.14\,Vcon}{\left(\frac{1}{Yc} + \left(\frac{w}{c}\right) + \left(\frac{Dad}{100Yad}\right)\right)FC} \qquad \textbf{Ecuación 9}$$

Dónde:

Mc = Masa de cemento en Kg.

Va= Volumen inicial de vacíos en el agregado.

FC= Factor de compactación de la mezcla.

Vcon= Porcentaje de vacíos conectados o porcentaje de vacíos de la mezcla endurecida.

w/c = relación agua cemento, en este caso entre 0.35 y 0.38

Dad= Dosis der aditivo (% masa de cemento).

Yc y Yad = Peso específico del cemento y aditivo respectivamente.

Para el cálculo de espesores para pavimentos de hormigón se tomó como referencia el manual de diseño brindado por EUCLID CHEMICAL COMPANY, en el cual se recomienda un espesor mínimo de losa de 127 mm y concreto de 3500 PSI para tráfico de vehículos industriales, es decir, tráfico neumático, ruedas sólidas moderadamente suaves. Se debe contar con una subrasante buena y uniforme. En este caso se optará por espesor de 15 cm para la losa de pavimento de hormigón poroso.

7.12.4. Método Mecanicista para pavimentos de asfaltos

Para determinar la cantidad de vacíos necesarios para poder catalogar un pavimento asfáltico como poroso, se procedió a seleccionar 30% de vacíos, valor recomendado por Rodríguez, 2010, luego de haber analizado más de 200 probetas con betún al 4.5% y realizando estudios de permeabilidad, arrojando excelentes resultados. Se tomarán como referencia 500.000 ejes equivalentes a 8.2 Ton para pasajes y parqueaderos (Manual AASHTO, 1993).

Los factores tenidos en cuenta para diseño fueron: condiciones climáticas y número de ejes equivalentes a 8.2 toneladas. La tabla 13 muestra la distribución de vehículos contados en

un periodo de dos horas, para los cuales se proyectaron a 10 años para calcular el número de ejes equivalentes a 8.2 Ton:

Tabla 13. Vehículos aforados en dos horas y proyectados a 10 años.

TIPO	NUMERO VEHICULOS	FACTOR DAÑO	NUMERO DE EJES EQUIVALENTES A 8.2 TON
AUTOMOVILES	15	0.018	0
BUSES	1	0.4	0
C - 2P	6	1.14	7
		Ejes Equivalentes a 8.2 T	328,938

Para facilidad de cálculos y para tener un factor de seguridad se tomarán 500.000 ejes equivalentes como se mencionó anteriormente. Para facilitar los cálculos se usó el programa WINDEPAV, el cual simula el comportamiento de una estructura de pavimento flexible teniendo en cuenta los parámetros que rigen a cada capa que compone dicha estructura, relacionando así su resistencia, altura de capas y su relación de Poisson. En la Figura 16 se puede apreciar el esquema del modelo.

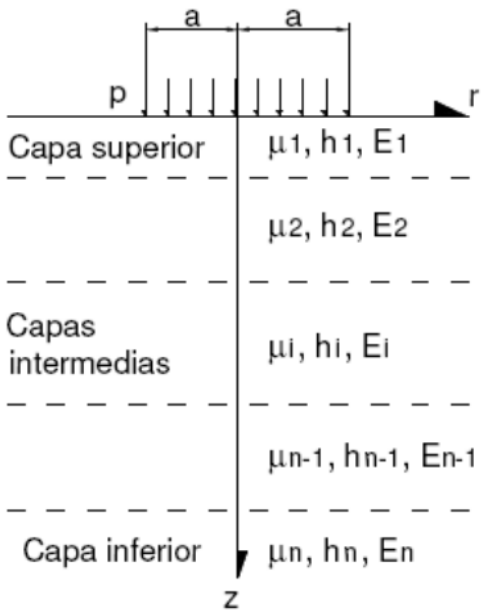


Figura 16. Esquema de funcionamiento del método mecanicista en pavimentos flexibles.

Las condiciones climáticas se tomaron de la estación del aeropuerto Rafael Núñez de Cartagena y se muestran en la tabla 14, las temperaturas mensuales serán utilizadas para hallar la temperatura de trabajo de la mezcla asfáltica con ayuda de la figura 17:

Tabla 14. Temperatura promedio mensual en la ciudad de Cartagena.

MES	TEMP. °C	Factor de Ponderación
ENERO	29	3.10
FEBRERO	29	3.10
MARZO	29.5	3.25
ABRIL	30	2.88
MAYO	30.5	3.50
JUNIO	31	3.60
JULIO	31	3.60
AGOSTO	30.5	3.50
SEPTIEMBRE	29.5	3.25
OCTUBRE	29	3.10
NOVIEMBRE	29	3.10
DICIEMBRE	28	2.85
Promedio		3.24
Temperatura de Trabajo		28.5

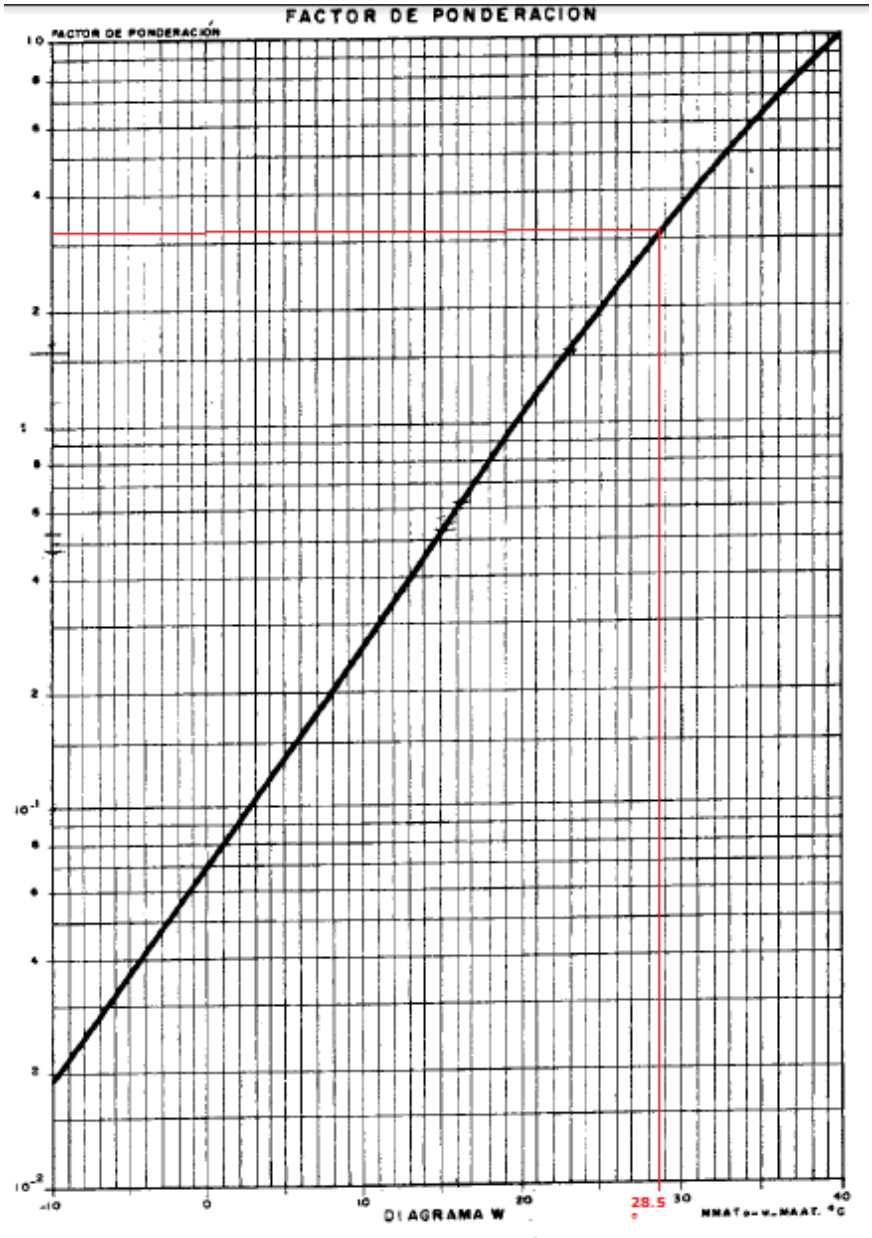


Figura 17. Factor de ponderación para diferentes temperaturas.

Posteriormente se determinó la temperatura de la mezcla haciendo uso de la figura 18, en la cual se intercepta la temperatura de trabajo con el espesor de placa de pavimento asfáltico de diseño (en este caso 10 cm). Se puede apreciar que la temperatura de la mezcla es igual a 41º centígrados.

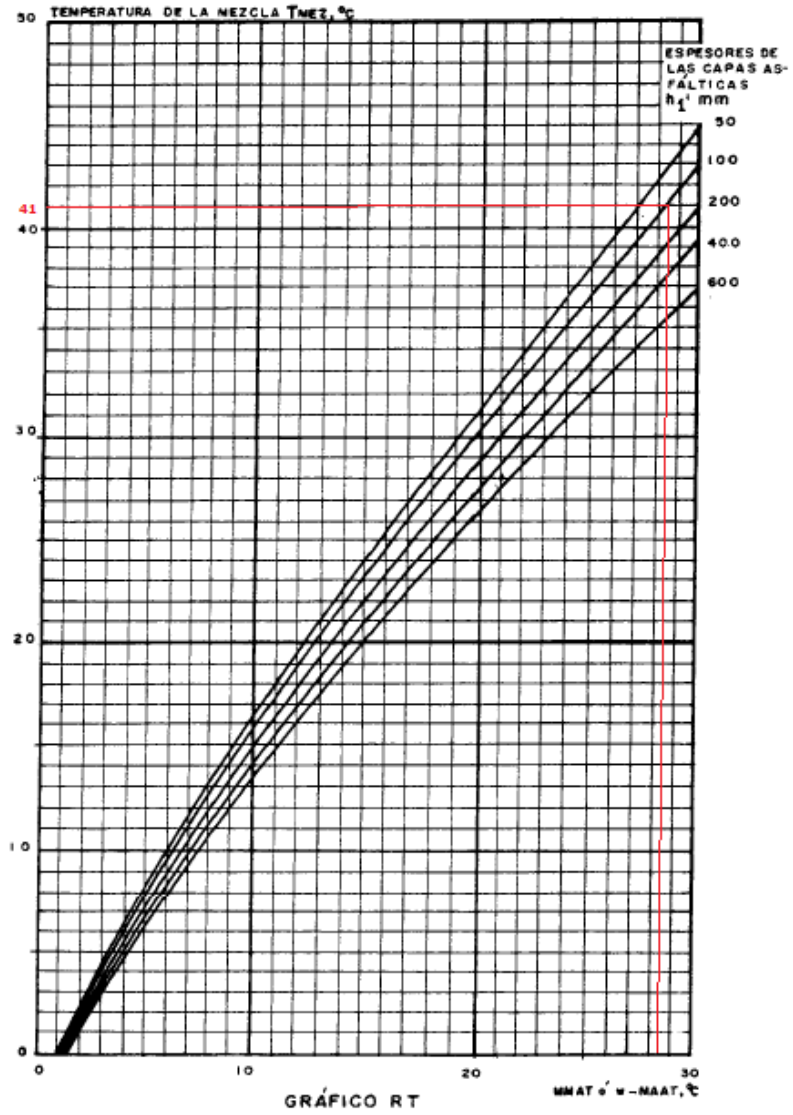


Figura 18. Relación entre temperatura efectiva de las capas asfálticas y de la mezcla.

Por último se calcula el S_{mix}, el cual no es más que la resistencia de la carpeta asfáltica en Kg/cm^2, para ello se hizo uso de la ecuación 10, el porcentaje en Betún de asfalto a emplear fue de 4.5% y 30% de vacíos

$$S_{mix} = S_{asfalto} \times \left[1 + \frac{2.5}{n} \times \frac{C_v}{1-C_v}\right]^n \qquad \textbf{Ecuación 10}$$

Dónde:

$$C_v = \frac{V_{ag}}{V_{ag} + V_{asf}} \quad ; \quad n = 0.83 \times log\left[\frac{400000}{S_{asfalto}\ (kg/cm^2)}\right]$$

$S_{asfalto}$: Stiffness del asfalto.

V_{ag}: Volumen de agregado.

V_{asf}: Volúmen de asfalto.

Los cálculos se muestran en la tabla 15:

Tabla 15. Cálculo del Stiffness de la Mezcla Asfaltica.

IP	-1
T800(°C)	50
T Mezcla(°C)	41
Espesor de Capa Asfáltica(cm)	10
ΔT (°C)	9
Stiffness del Asfalto(Kg/cm2)	10
V Agregados (%)	65.5
V Asfalto (%)	4.5
Stiffness de la Mezcla Asfaltica(Kg/cm2)	10215

Estos datos se corrieron en el programa Windepav elaborado por la Universidad del Cauca, para evaluar los espesores de base y subbase adecuados para no sobrepasar los esfuerzos admisibles de tensión por debajo de la carpeta asfáltica (Et) y por compresión en la subsante (Ez), para determinar los valores admisibles se usaron las ecuaciones 11 y 12:

$$Et = (0.85Vb + 1.08) * {S_{mix}}^{-0.36} * (\frac{N}{k})^{-0.2} \qquad \textbf{Ecuación 11}$$

$$Ez = 1.79^{-2} * N^{-0.25} \qquad \textbf{Ecuación 12}$$

Dónde:

Vb= Volúmen de asfalto en %.

N= número de ejes equivalentes a 8.2 Ton.

K= factor de calge = 10.

Luego de un proceso iterativo se determinaron los espesores para las capas de subbase (40 cm) y base (25 cm), los cálculos se muestran en la figura 19 y en la tabla 16 se comprueba que sí cumple con los valores de esfuerzos admisibles.

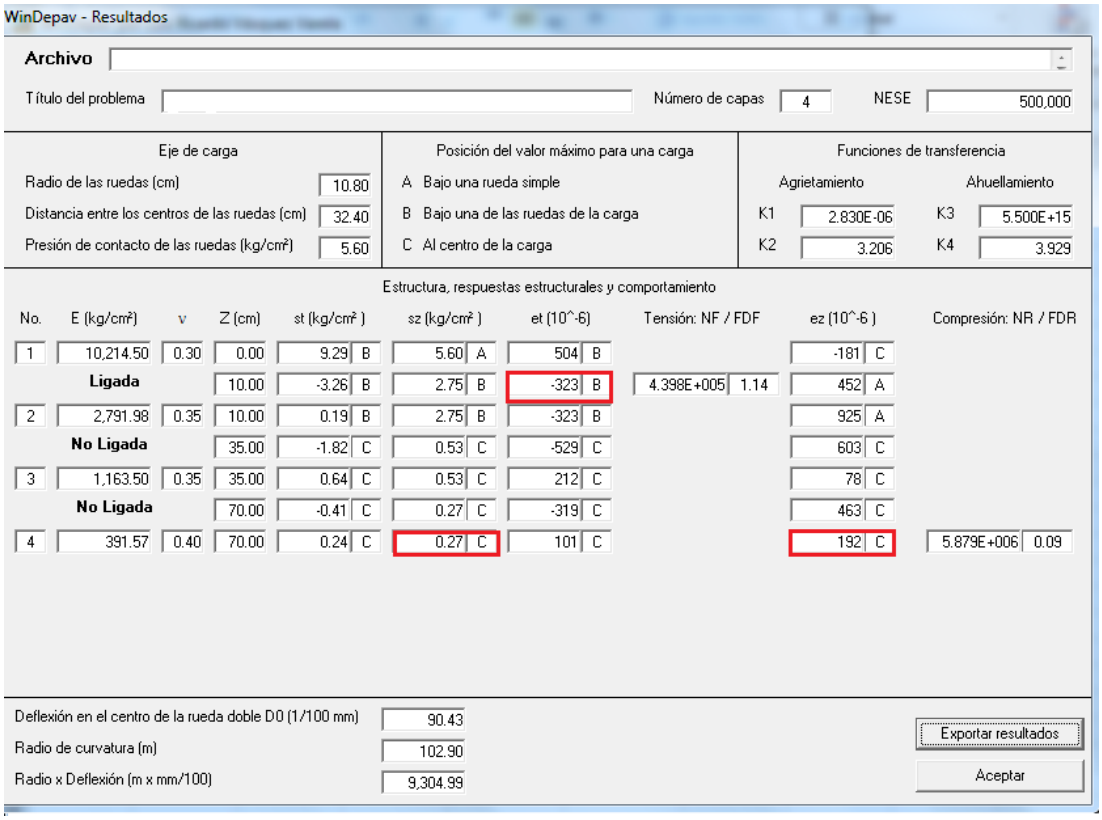


Figura 19. Datos arrojados por el programa Windepav para el cálculo de espesores de capas de la estructura.

Tabla 16. Comparación de esfuerzos calculados y admisibles.

Et Admisible	Et Calculado
3.30E-04	3.23E-04
Ez Admisible	Ez Calculado
6.70E-04	1.76E-04
δzAdmisible	δzCalculado
0.49	0.24

7.13. Diseño de tuberías internas

La pendiente mínima recomendada por el manual CIRIA 2007 es de 0.2%, para garantizar que el caudal fluya a una velocidad mínima permisible de 0.75m/s se recomienda una pendiente de 2% (RAS , 2000). Ya que el sistema tiene un sistema de capas de infiltración y geotextil tejido, la presencia de sedimentos es casi nula, por tanto se empleará la pendiente de 0.2%

Se debe considerar que la permeabilidad del pavimento podría restringir el caudal en caso de que su permeabilidad permita un ingreso de volumen de agua menor que el que aporta la lluvia. Para esto se comprara la lluvia de diseño, que consta de una precipitación de 631 mm/h, con la permeabilidad de propuesta para cada uno de los pavimentos, $7x10^{-4}$ cm/s, $2.1x10^{-3}$ cm/s y $3.5x10^{-3}$ para adoquines, asfalto poroso y hormigón poroso respectivamente (Smith, 2006).

El caudal en el interior de la estructura será igual al coeficiente de permeabilidad de la base ($1x10^{-}$2cm/s), multiplicado por el área total:

($1x10^{-}$2cm/s)*(0.01)*(3600)*($45m^2$)= $16.2m^3$/h, se puede apreciar que en el interior de la estructura el caudal de diseño podría ser evacuado en su totalidad si no lo restringiera la capa de pavimento.

Se utilizó tubería perforada corrugada de Novafort para los drenes inferiores. Se usó la ecuación de Manning para el cálculo del área requerida de acuerdo a los parámetros de diseño a usar:

$$Q= \frac{A*R^{0.66}*S^{0.5}}{n}$$ **Ecuación 13**

Utilizando la ecuación 13 se determinó el área necesaria para denar un caudal de 0.000525 m^3/s (1.89 m^3/h), con una pendiente de 0.2% y un diámetro de 0.1m; siendo A = 0,000386 m^2

Luego se comparó el área hallada con el área aportante de un tubo perforado en 3 metros de longitud, utilizando tuberías comerciales de pavco, las cuales aportan 150 cm^2/m, equivalentes a un área de 0.045m^2, por tanto se puede comprobar que usando una tubería perforada con pendiente de 2%, diámetro de 0.1m satisface al sistema (0.045> 0,000386).

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUCIÓN

De acuerdo a los procedimientos descritos en el anterior capitulo, los resultados que se obtuvieron se muestran y se analizan en esta sección del documento. También se exponen las especificaciones del diseño definitivo, junto con los costos y aplicabilidad del sistema.

Como resultados de la investigación, se diseñó un campo de prueba piloto de pavimento permeable estableciendo su localización y dimensiones, calculando su capacidad de volumen de almacenamiento, así como las especificaciones técnicas de cada pavimento permeable y tuberías de drenaje, al igual que el tamaño de los tanques de almacenamiento.

El diseño y las especificaciones técnicas están definidos en planos de diseño adjuntos a este trabajo.

8.1. Elección de ubicación adecuada

Con base a la información obtenida, se ha elegido a la ubicación mostrada en la figura 8 Este sitio posee el área necesaria disponible para el diseño de un estacionamiento de 3 puestos, cada uno de un área de 15m^2 (3x5). No existe influencias de cuencas adyacentes sobre el campo de prueba piloto de pavimentos permeables, y las restricciones de construcción no afectan el diseño propuesto.

8.2. Estudios en campo y laboratorios

El suelo del sitio seleccionado muestra una tasa de infiltración baja de $3.5x10^{-5}$ Pul/h. Los ensayos de granulometría demuestran el alto contenido de arcilla, debido a que posee un contenido de finos superior al 90%, catalogándolo como un suelo arcilloso de alta plasticidad, se debe evitar que el terreno natural tenga contacto con el agua almacenada en la capa de depósito, puesto que este estaría susceptible a cambios volumétricos, causando daños a la estructura.

La construcción de pavimentos permeables no se restringe a utilizar algún tipo de suelo en particular, puesto que con cualquier tipo de suelo puede ser usado. En suelos donde la permeabilidad es muy baja y además son susceptibles a cambios de volúmenes con el contacto del agua, se recomienda el uso de elementos complementarios como geotextiles con el fin de aislar la subrasante de la estructura.

Hubiese sido de gran ayuda haber podido realizar la prueba de infiltración a muestras de pavimentos con el permeámetro de carga variable, puesto que el cálculo para la estructura hubiera sido mucho más preciso, no obstante, se tomaron los valores de permeabilidad estudiados en diferentes partes del mundo, a partir de pruebas de laboratorios realizadas.

Mientras que en investigaciones concernientes al concreto poroso en Perú el coeficiente de permeabilidad para un hormigón poroso oscila entre $2x10^{-3}$ cm/s y $1x10^{-3}$ cm/s (Calderón & Charca, 2013); en el documento "Low Impact Development Supplement to the Northern Virginia" se determinó un valor de $3.5x10^{-3}$ cm/s

Por otra parte para asfalto poroso y adoquines encontramos valores de $2.1\ x10^{-3}$ $7\ x10^{-4}$ cm/s respectivamente. (NVRC, 2007). Este valor respeta los valores recomendados por Pérez et al. (1982), al indicar que la permeabilidad para un pavimento permeable debe ser mayor de $1x10^{-3}$ cm/s, siendo deseable mayor de $1x10^{-2}$ cm/s.

Como se mencionó en el anterior capítulo, se tomó la menor permeabilidad de todas y se igualó todo el campo de prueba piloto a este valor, esto con el fin de ver si se infiltraba la totalidad del caudal generado por la lluvia de diseño seleccionada.

8.3. Clasificación del suelo

El terreno natural clasificado por el sistema unificado como CH, (arcilla de alta plasticidad) con una permeabilidad baja de $3.5x10^{-5}$ Pul/h, la cual se tuvo en cuenta para los cálculos del diseño. El suelo consta de una humedad natural de 30.1% y un CBR de 4.7% el cual es mayor que el mínimo necesario para no recurrir a ningún tipo de estabilización del suelo.

8.4.Clasificación de la base

Se ha escogido una base granular con tamaño nominal de entre ½ a 1 pulgada debido a que aporta características de almacenamiento de agua y soporte estructural. Es importante resaltar que el almacenamiento de agua por parte de la base es importante para reducir la cantidad de agua emitida hacia el drenaje central de la universidad, aumentando el tiempo de drenado y reduciendo picos en el hidrógrafa causando una cantidad de agua de escorrentía menor.
En Cartagena se pueden encontrar diferentes canteras que ofrecen la posibilidad de adquirir canto rodado, el cual cumple con las características de diseño.

8.5. Análisis hidráulico e hidrológico.

Para la estimación del caudal se usó la ecuación del método racional, previamente la intensidad fue calculada utilizando métodos de la universidad de Cartagena, haciendo un análisis para el caso puntual del campo de prueba. Se empleó el método probabilístico planteado por Andrade, para una excedencia del 10 %.

Se notó que para el 20% del tiempo inicial de la lluvia, que corresponden a los primeros 12 minutos, precipitó el 80% total de la lluvia, se consideró diseñar con esta intensidad pico.

Si bien se calculó la intensidad de la lluvia con otros métodos, se escogió usar el método probabilístico debido a que presentaba el caso más desfavorable, sin embargo, al notar que la gran mayoría de la precipitación ocurre en los primeros 12 minutos, se procedió a realizar un análisis cada 6 minutos, con el fin de estudiar el comportamiento hidráulico en la estructura.

Para la estimación del caudal de diseño puede utilizarse el Método racional, el cual calcula el caudal pico de aguas lluvias con base en la intensidad media del evento de precipitación con una duración igual al tiempo de concentración del área de drenaje y un coeficiente de escorrentía.

El coeficiente de escorrentía C tomado fue de 0.9 perteneciente a pavimentos adoquinados (Ibañez & Moreno, 2004). De acuerdo con el método racional, el caudal pico ocurre cuando toda el área de drenaje está contribuyendo, y éste es una fracción de la precipitación media bajo las siguientes suposiciones:

Se tomaron lluvias de 60 minutos con periodo de retorno de 10 años. Las cuales son las condiciones mínimas para diseñar una estructura de esta índole (City of Portland,, 2008).

8.5.1. Calculo de intensidad de lluvia

Para calcular la intensidad máxima de lluvia en 1 hora, se procedió a utilizar la ecuación propuesta por Velásquez Almanza y Martínez, 1995.

$$I\left(\frac{mm}{h}\right) = \frac{616.97 * T^{0.18}}{(tc+10)^{0.561}} \qquad \textbf{Ecuación 14}$$

Donde:

T: Es el periodo de retorno en años.

t_c : Es el tiempo de concentración en minutos.

Para un periodo de retorno de 10 años y una duración de lluvia de 1 hora, se calculó una precipitación de 87,33 mm/h.

Además, se usó la ecuación propuesta por Chang y Bolivar en 1997 en donde se relaciona la precipitación en 24 horas y una duración menor.

$$\%P_t = -0.006t^4 + 0.0902t^3 - 0.423t^2 + 0.897t + 0.0026 \qquad \textbf{Ecuación 15}$$

Donde:

t= Duración de la lluvia en horas.

%Pt= Fracción de la precipitación en 24 horas caída en una duración t de la lluvia.

Para una duración de lluvia de 1 hora se calculó una fracción de precipitación de 56%. A continuación procedemos a calcular la precipitación en 24 horas con la ecuación:

$$P24 = 33{,}672\,Ln(x) + 63{,}584 \qquad \textbf{Ecuación 16}$$

P24, representa la precipitación máxima en 24 horas

x, representa el período de retorno.

a y b son parámetros de regionalización de la precipitación.

Usando la ecuación, encontramos una precipitación máxima de 141.12mm; esta se debe multiplicar por 56%, dando como resultado la precipitación en una hora, calculado como 79.04mm.

Andrade en el año 2000, realizó el proyecto de obtención de las curvas de probabilidad de tormentas para el aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena. Utilizando las tablas de excedencia, se procedió a calcular la precipitación con los diferentes porcentajes de excedencia, se debe tener un cuenta que la tabla de excedencias está normalizada, y para éste estudio en particular se multiplicó por la mayor intensidad calculada anteriormente, es decir, 87mm/h, además, se usaron los valores extremos de precipitaciones (no acumulados).

Tabla 17. Precipitación no acumulada para una probabilidad de excedencia.

Tiempo	Valores extremos de precipitaciones								
%	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	0,2436	0,3306	0,4263	0,4872	0,5829	0,8265	1,1832	1,4616	2,3142
90	0,3306	0,6873	0,8526	1,0962	1,4094	1,4616	1,9401	3,0624	3,7149
80	1,1571	1,218	1,6095	1,8357	2,175	2,7405	3,2712	3,3408	3,4191
70	1,1571	1,4616	2,175	2,4273	3,6279	4,3761	4,3848	5,0112	5,0547
60	1,9227	2,6709	3,0102	4,2108	5,0199	5,8899	5,7594	5,8812	8,265
50	3,915	4,4718	5,1852	6,2466	5,8464	5,8116	7,9083	7,7082	8,6913
40	4,6806	6,873	7,2384	7,3602	8,6739	8,2041	8,3781	10,353	8,9349
30	3,7149	8,3172	9,4569	9,8571	10,8837	11,7276	12,2931	12,4671	11,4753
20	6,7773	6,6294	10,8663	12,0756	14,529	15,5643	14,442	12,5889	12,9804
10	63,1011	54,3402	46,1796	41,4033	34,2519	30,3978	27,4398	25,1256	22,1502
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Con base a los datos mostrados en la tabla 17 se realizó el hietograma de precipitación para determinar cuál caso era más desfavorable para el diseño. Los resultados se muestran en la figura 20.

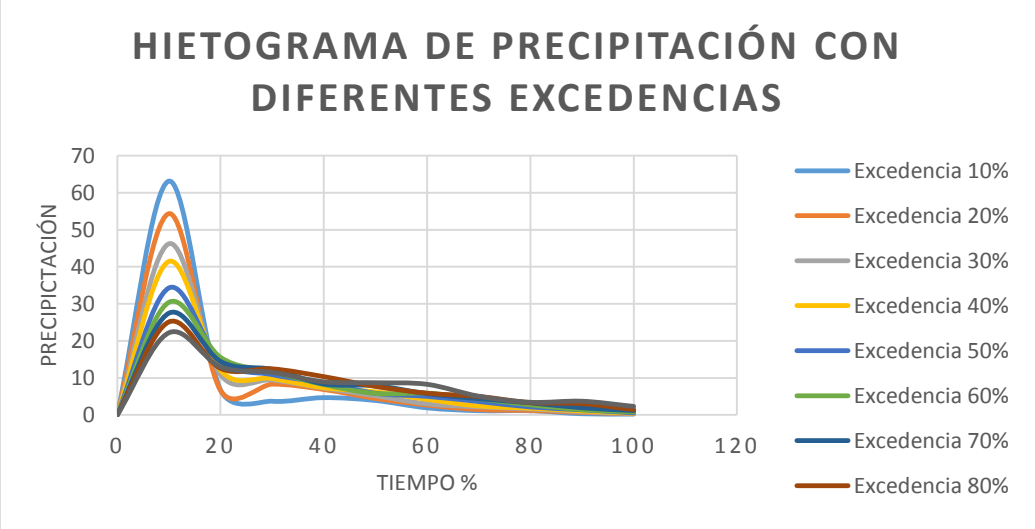


Figura 20. Hietograma de precipitación con excedencias de lluvia variable entre 10 y 100%

Para hacer un análisis específico del problema presentado en el campo de prueba, se escogió la precipitación correspondiente a una excedencia del 10% ya que presenta la mayor precipitación. En la figura 21 presenta un histograma distribuido en intervalos de 6 minutos

donde se muestra claramente que la mayor precipitación se presenta durante los primeros 12 minutos, correspondientes al 20% inicial del tiempo total de la lluvia.

Al revisar el comportamiento de la lluvia para una excedencia del 50% se puede apreciar que alcanza una precipitación de 40mm en los primeros cuatro intervalos de tiempo (48 min), por tanto notamos que la excedencia del 10% es más crítica y será usada para el diseño.

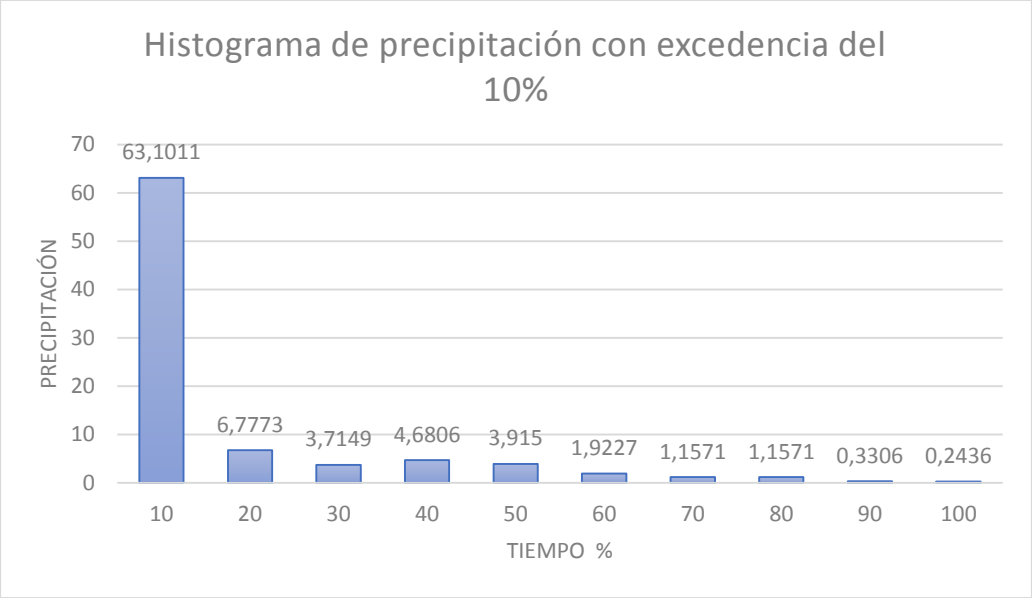


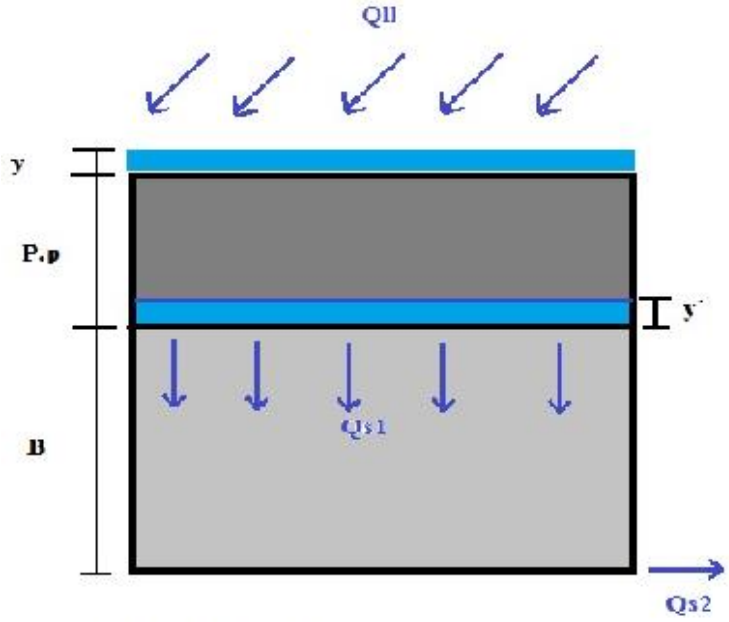
Figura 21. Histograma de precipitación con excedencia de lluvia del 10%

En los primeros 12 minutos se realiza el 80.3% de la precipitación total, por tanto será éste el intervalo crítico de lluvia, se realiza un análisis de éste periodo de tiempo para entender mejor su comportamiento.

8.5.2. Calculo del caudal de diseño

Para el diseño, la intensidad correspondiente para la lluvia de diseño elegida es la proveniente de una excedencia del 10% la cual varía cada 6 minutos. Por otra parte el coeficiente de escorrentía C tomado fue de 0.9 ya que la cuenta es muy pequeña, lo cual implica tiempos de concentración mínimos, el área será el área superficial del campo de prueba piloto, es decir ($45m^2$). En la figura 22 se ve un esquema del comportamiento en el campo de prueba piloto, además, En las tablas 18,19 y 20 se puede ver el resultado una vez

analizado el comportamiento del agua en el campo de prueba cada 6 minutos para cada pavimento permeable, siendo el adoquín en único que no permite el 100% de la infiltración en los primeros 6 minutos:



y= altura de lamina de agua.
P.p= altura del pavimento permeable.
B= altura de la base.
QLL= cantidad de lluvia (m3).
Qs1= cantidad de agua que sale del pavimento permeable.
Qs2= Cantidad de agua que sale de la base o campo de prueba.
y´= altura de lamina de agua retenida en el pavimento permeable

Figura 22. Balance hidráulico en el campo de prueba piloto de pavimentos permeables.

Tabla 18. Balance hidráulico en la estructura de adoquines.

tiempo (min)	lluvia m3/h	lluvia (m3)	efluente (m3)	retenida (m3)	y(m)	salida base (m3)
6	0,631	0,0631	0,042525	0,020575	0,0151	0,042525
12	0,0677	0,00677	0,00677	0	0	0,00677
18	0,0371	0,00371	0,00371	0	0	0,00371
24	0,0468	0,00468	0,00468	0	0	0,00468
30	0,0391	0,00391	0,00391	0	0	0,00391
36	0,0192	0,00192	0,00192	0	0	0,00192
42	0,0115	0,00115	0,00115	0	0	0,00115
48	0,0115	0,00115	0,00115	0	0	0,00115
54	0,0033	0,00033	0,00033	0	0	0,00033
60	0,00243	0,000243	0,000243	0	0	0,000243

Tabla 19. Balance hidráulico en la estructura de hormigón poroso

tiempo (min)	lluvia (m3/h)	lluvia (m3)	efluente (m3)	retenida (m3)	y (m)	salida base (m3)
6	0,631	0,0631	0,0631	0,000	0	0,0631
12	0,0677	0,00677	0,0068	0,000	0	0,00677
18	0,0371	0,00371	0,0037	0,000	0	0,00371
24	0,0468	0,00468	0,0047	0,000	0	0,00468
30	0,0391	0,00391	0,0039	0,000	0	0,00391
36	0,0192	0,00192	0,0019	0,000	0	0,00192
42	0,0115	0,00115	0,0012	0,000	0	0,00115
48	0,0115	0,00115	0,0012	0,000	0	0,00115
54	0,0033	0,00033	0,0003	0,000	0	0,00033
60	0,00243	0,000243	0,0002	0,000	0	0,000243

Tabla 20. Balance hidráulico de la estructura en asfalto poroso.

tiempo (min)	lluvia (m3/h)	Lluvia (m3)	efluente (m3)	retenida (m3)	y(m)	salida base (m3)
6	0,631	0,0631	0,12474	0	0	0,0631
12	0,0677	0,00677	0,12474	0	0	0,00677
18	0,0371	0,00371	0,12474	0	0	0,00371
24	0,0468	0,00468	0,12474	0	0	0,00468
30	0,0391	0,00391	0,12474	0	0	0,00391
36	0,0192	0,00192	0,12474	0	0	0,00192
42	0,0115	0,00115	0,12474	0	0	0,00115
48	0,0115	0,00115	0,12474	0	0	0,00115
54	0,0033	0,00033	0,12474	0	0	0,00033
60	0,00243	0,000243	0,12474	0	0	0,000243

En agua que sale de la base, es decir, el que sale del campo de prueba siempre será igual al total que entra, puesto que su infiltración es dos órdenes de magnitudes mayor a la del pavimento permeable. En único caso donde se puede observar una retención de agua por parte del pavimento permeable es en los primeros 6 minutos de lluvia en el adoquín, siendo este el pavimento permeable con menor infiltración.

El caudal de diseño calculado bajo las condiciones dadas fue de 86 litros, siendo esta la suma de la cantidad de agua acumulada cada 6 minutos con los valores de precipitación correspondientes a cada intervalo de tiempo. Posteriormente se calculó el diámetro de tubería perforada necesaria para evacuar este volumen de agua de la estructura y transportar este caudal a los tanques de almacenamiento ubicados por fuera de la instalación piloto.

La permeabilidad del pavimento podría restringir el caudal en caso de que su permeabilidad permita un ingreso de volumen de agua menor que el que aporta la lluvia. Para esto se compararó la lluvia de diseño, que consta de una precipitación específica para cada intervalo de tiempo, con la permeabilidad de propuesta para cada uno de los pavimentos, $7x10^{-4}$ cm/s, $2.1x10^{-3}$ cm/s y $3.5x10^{-3}$ para adoquines, asfalto poroso y hormigón poroso respectivamente (Smith, 2006).

La capacidad de almacenamiento de la base, la cual es igual a la altura promedio de la base (20 cm) por el área total de $45m^2$, por el coeficiente de vacíos del material de empleado en la base (0.4), nos muestra la estructura sería capaz de contener 3.6 m^3, no obstante el pavimento en adoquines no absorberá el 100% de la precipitación, ya que su coeficiente de infiltración es menor al valor de la precipitación. En la figura 23 se puede apreciar el fenómeno en el único caso en donde uno de los pavimentos tiene menor infiltración que la intensidad de lluvia. Debido a esto, el 33% de la precipitación se convertirá en caudal de escorrentía.

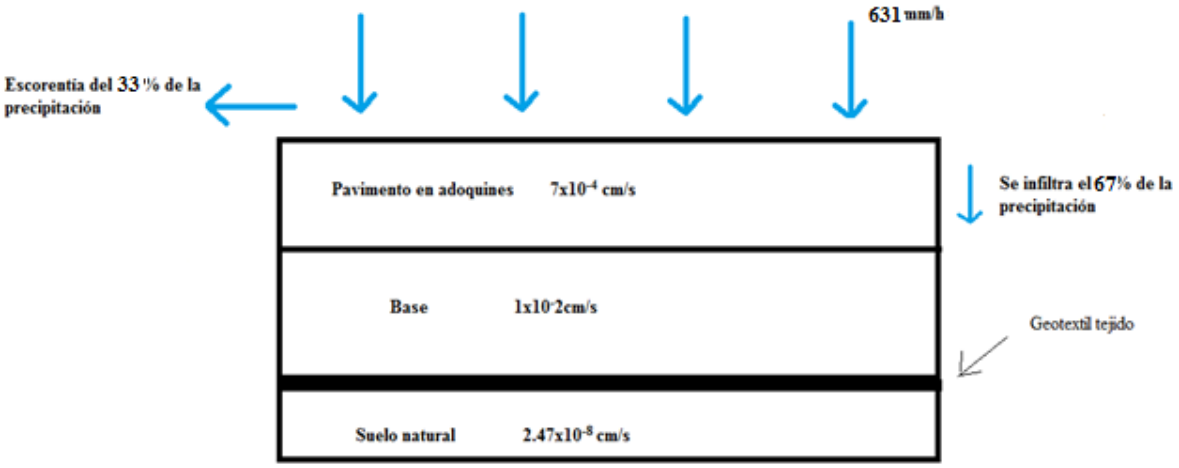


Figura 23. Balance hidrológico del pavimento permeable en adoquines en los 6 primeros minutos.

Para calcular el volumen de agua entrante, se debe sumar la cantidad de agua saliente del campo de prueba en cada uno de los pavimentos permeables, datos mostrados en las tablas 18, 19 y 20.

Va= 240.3 litros

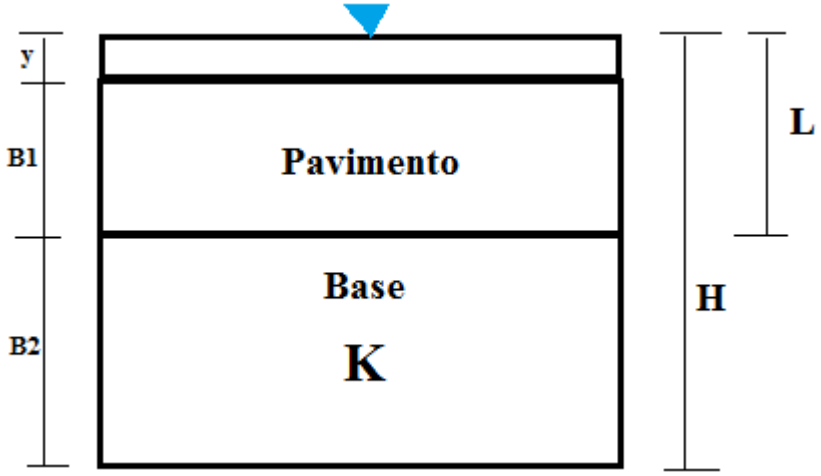


Figura 24. Esquema de infiltración por capas.

En la figura 24 se puede apreciar la configuración de las capas de la estructura de pavimento permeable, con esto se calcula el caudal de salida hacia los tubos perforados utilizando la ecuación 17:

$$Q_{salida} = \frac{(y + B1 + B2\,) * K * A}{B2} \qquad \textbf{Ecuación 17}$$

Tabla 21. Caudal de salida para cada tipo de pavimento.

	Q de salida(l/h)
Asfalto poroso	87
Hormigón poroso	87
Adoquines	66

Haciendo un análisis por capas y teniendo en cuenta el gradiente hidráulico para cada una de estas, se concluyó que el caudal de salida se verá restringido por la intensidad de la lluvia y no por el coeficiente de infiltración del material empleado para la base (todos los valores obtenidos son mayores al de la precipitación a excepción de los primeros 6 minutos).

Se realizó además un análisis por métodos finitos, trabajando directamente con el caudal y no con la cantidad de agua, con fines de comprar resultados con el procedimiento anterior. En análisis por elementos finitos nos da un resultado con mejor rigor matemático, debo a que se hace un mejor análisis puntual en cada momento del comportamiento agua-campo.

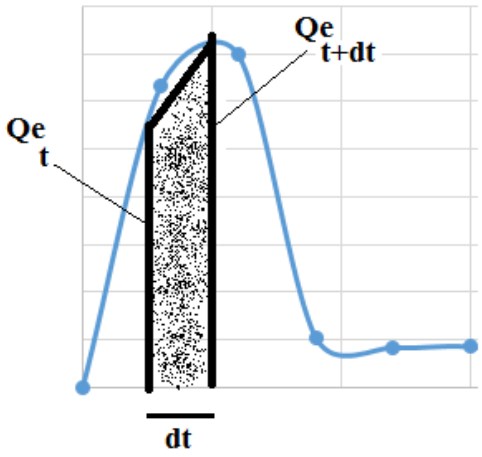


Figura 25. Método por elementos finitos

Donde:

Qe= caudal de entrada al pavimento permeable

t= tiempo inicial

dt= diferencial de tiempo.

A partir de esta gráfica y de los estudios anteriores se rescata la siguiente ecuación:

Qe- Qs = Almacenamiento

$$Vs = \frac{Qs^{t}+Qs^{t+dt}}{2} * dt$$

$$Ve - Vs = dy * As$$

$$\frac{Qe^{t} + Qe^{t+dt}}{2} * dt - \frac{Qs^{t} + Qs^{t+dt}}{2} * dt = dy * As$$

$$Qe^{t} + Qe^{t+dt} - Qs^{t} - Qs^{t+dt} = 2\frac{As*dy}{dt} \qquad \textbf{Ecuación 18}$$

Se realizó un análisis en Excel en el cual se tomó un tamaño de paso de 0.1 horas, los resultados se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. Balance hidráulico de la estructura en asfalto poroso usando el método de elementos finitos.

tiempo	Qll (m3/h)	Qe prom (m3/h)	Ve (m3)	Qs (m3/h)	Qs prom (m3/h)	Δy(m)	Δy*k
0	0	0	0	0	0		
0.1	0,631	0,3155	0,03155	0,42525	0,2126	7E-04	0,008
0.2	0,0677	0,34935	0,034935	0,0677	0,2465	7E-04	0,008
0.3	0,0371	0,0524	0,00524	0,0371	0,0524	0	0,000
0.4	0,0468	0,04195	0,004195	0,0468	0,0420	0	0,000
0.5	0,0391	0,04295	0,004295	0,0391	0,0430	0	0,000
0.6	0,0192	0,02915	0,002915	0,0192	0,0292	0	0,000
0.7	0,0115	0,01535	0,001535	0,0115	0,0154	0	0,000
0.8	0,0115	0,0115	0,00115	0,0115	0,0115	0	0,000
0.9	0,0033	0,0074	0,00074	0,0033	0,0074	0	0,000
1	0,00243	0,002865	0,0002865	0,00243	0,0029	0	0,000

Posteriormente se procedió a graficar el caudal de entrada y el caudal de salida del campo de prueba piloto vs el tiempo, con fines de observar la disminución de picos del hidrograma.

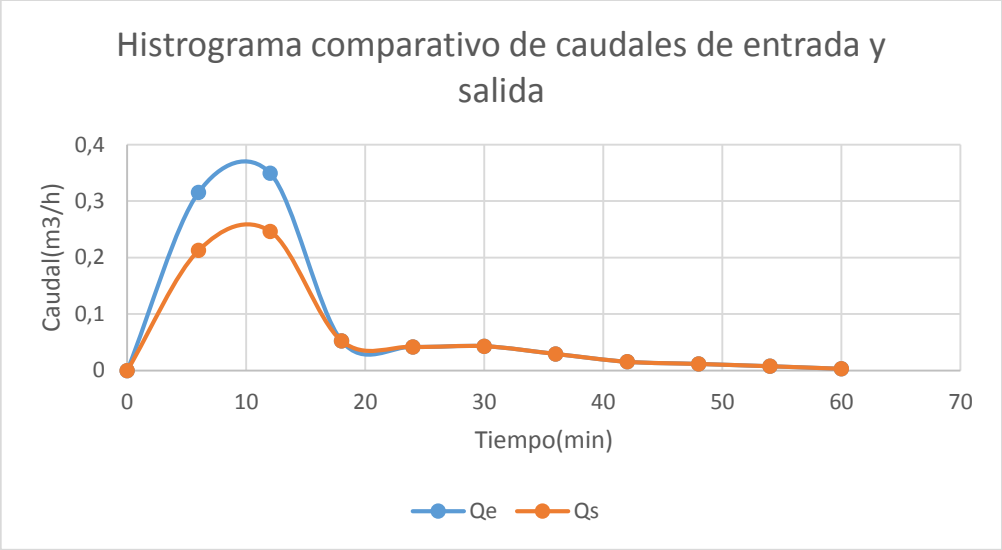


Figura 26. Caudal de entrada y de salida en el campo de prueba piloto

Es notoria la disminución del caudal en los dos primeros intervalos de tiempo, pasando de 0,3155 m^3/h a 0,2126 m^3/h y 0,34935 m^3/h 0,2465 m^3/h respectivamente, mientras que en el resto del fenómeno el caudal es absorbido en su totalidad debido a la gran porosidad del material empleado en la base.

8.5.3. Calculo de tuberías internas

Se utilizó tubería perforada corrugada de Novafort para los drenes inferiores. Se usó la ecuación de Manning para el cálculo del área requerida de acuerdo a los parámetros de diseño a usar:

$$Q= \frac{A*R^{0.66}*S^{0.5}}{n} \qquad \textbf{Ecuación 19}$$

Utilizando la ecuación 18 se determinó el área necesaria para denar un caudal de 240 m^3/h, con una pendiente de 0.2% y un diámetro de 0.1m; siendo A = 0,000044522m^2.

Luego se comparó el área hallada con el área aportante de un tubo perforado en 3 metros de longitud, utilizando tuberías comerciales de pavco, las cuales aportan 150 cm^2/m, equivalentes a un área de 0.045m^2, por tanto se puede comprobar que usando una tubería perforada con pendiente de 0.2%, diámetro de 0.1m satisface al sistema (0.045> 0,000044522).

8.6. Pavimentos permeables escogidos

Se escogieron tres tipos de pavimentos permeables para el diseño: hormigón permeable, asfalto poroso y adoquines. La permeabilidad de cada uno de los pavimentos permeables es diferente, pero se mantienen en el mismo orden de magnitud, por lo tanto su diferencia no marca un cambio significativo en el diseño. La diferencia más importante de los pavimentos permeables usados es el precio. La vida útil también varía considerablemente, característica que debe ser tenida en cuenta al momento de construir obras con estos pavimentos. Se tuvo en cuenta la disponibilidad local de los materiales necesarios para la obtención de estos pavimentos, resultando práctico y económico.

8.7. Diseño

Para el cálculo hidráulico del campo de prueba de pavimento permeable se usó la metodología del manual de diseño número 7 para pavimentos permeables de Virginia, en el cual se utilizaron los datos encontrados en los ensayos de laboratorio realizados. Los resultados obtenidos se compararon con distintos proyectos desarrollados por la universidad Católica de Chile y la universidad politécnica de valencia, encontrando que el valor obtenido de espesor de capa de depósito concordaba con los recomendados en trabajos realizados en la universidad de Cantabria, entre 20 cm y 45 cm (García et al, 2010). Las recomendaciones mencionadas por el manual RAS se tuvieron en cuenta. Se comparó el comportamiento del campo de prueba con el método racional para el cálculo de caudales que propone el RAS, mostrando que el campo de prueba puede almacenar en su base lluvias con duración de una hora y periodo de retorno de 10 años, siendo esta la condición mínima para el diseño hidráulico.

Se emplearon tubos perforados de 10 cm de diámetro, con pendiente de 2%, para el drenaje interno, el agua acumulada se almacenará en tanques de 1 m^3 de capacidad ubicados por fuera del campo de prueba piloto.

Para el diseño estructural se usaron los métodos ICPI, PCA y Mecanicista para diseñar los pavimentos en adoquines, hormigón y asfalto respectivamente. Para el parqueadero en adoquines se necesita una capa de depósito igual a 20 cm, una capa de arena (capa no estructural) de 4 cm de espesor y adoquines de concreto de 8 cm de espesor. Para toda la estructura se usará material de canto rodado de tamaño nominal de ½” a 1”.

El aparcamiento de hormigón poroso contará con una base de 20 cm de espesor y una loza de hormigón poroso de 15 cm, la cual tendrá un porcentaje de vacíos de 20% y resistencia de 3500 PSI.

En cuanto al asfalto poroso es necesario un espesor de capa de subbase de 35 cm y posteriormente base con espesor de 25 cm, 10 cm de carpeta asfáltica porosa (porcentaje de

vacíos de 30%), con porcentaje de betún de 4.5% y porcentaje de agregados de 65.5%, resistencia de 11250 Kg/cm^2, suficiente para soportar la carga de tráfico de diseño. Se puede apreciar en la figura 27 un esquema detallado del diseño, donde se muestran todos sus componentes:

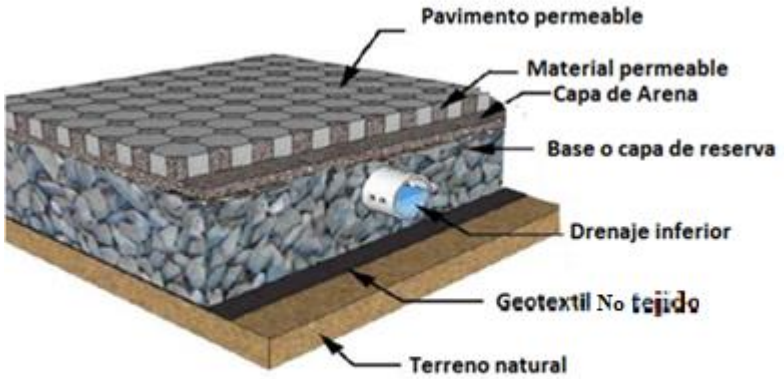


Figura 27. Esquema de diseño.

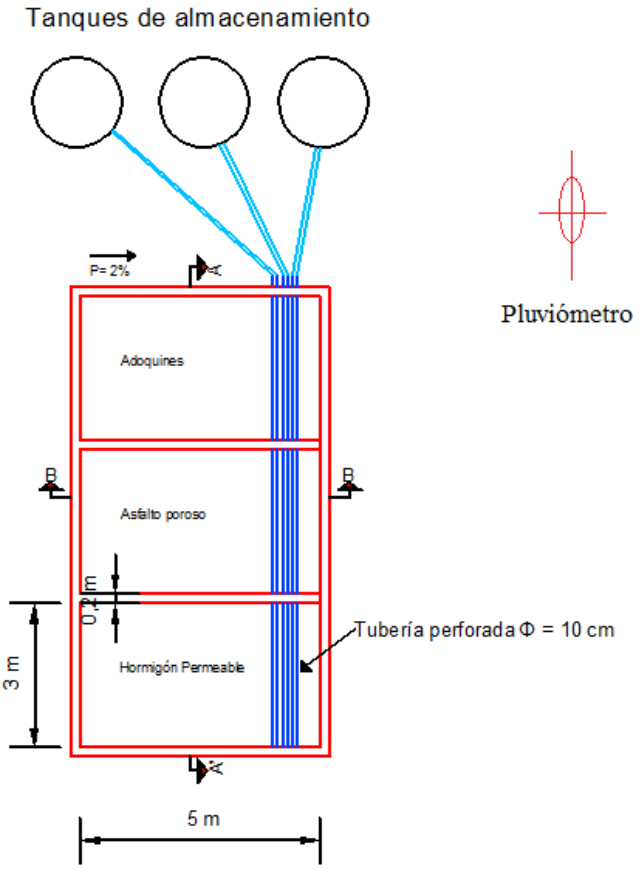
.

Tabla 23. Parámetros de diseño de los diferentes tipos de pavimento a emplear.

Factor de diseño	Asfalto poroso	Hormigón Poroso	Adoquines
Geotextil	Si	Si	Si
Base (cm)	Sub-Base: 40 Base: 25	20	20
Espesor de losa (cm)	10	17	8
Permeabilidad(cm/s)	3.5x10^-3	1.5x10^-1	7x10^-4
Porcentaje de vacíos (%)	30	20	10
Vida útil (años)	10	20	20
Capacidad de tráfico	Bajo a medio	Bajo a medio	Bajo

8.8. Guía de uso

Se debe instalar un pluviómetro en el campo de prueba para poder comparar el volumen de agua entrante con el volumen saliente del campo de prueba. Para el volumen saliente, se usan 3 tanques de almacenamiento correspondientes a cada uno de los pavimentos, para así comparar el volumen de agua saliente. En el pluviómetro y en los tanques se deben instalar medidores, para así poder tomar medidas precisas en horas, minutos y segundos. La información leída por los medidores será enviada en tiempo real a un computador que posea el software adecuado. El caudal de entrada y de salida deberá diferenciarse por un periodo de tiempo. Mientras mayor sea este desfase, mayor es la disminución de caudal de escorrentía.



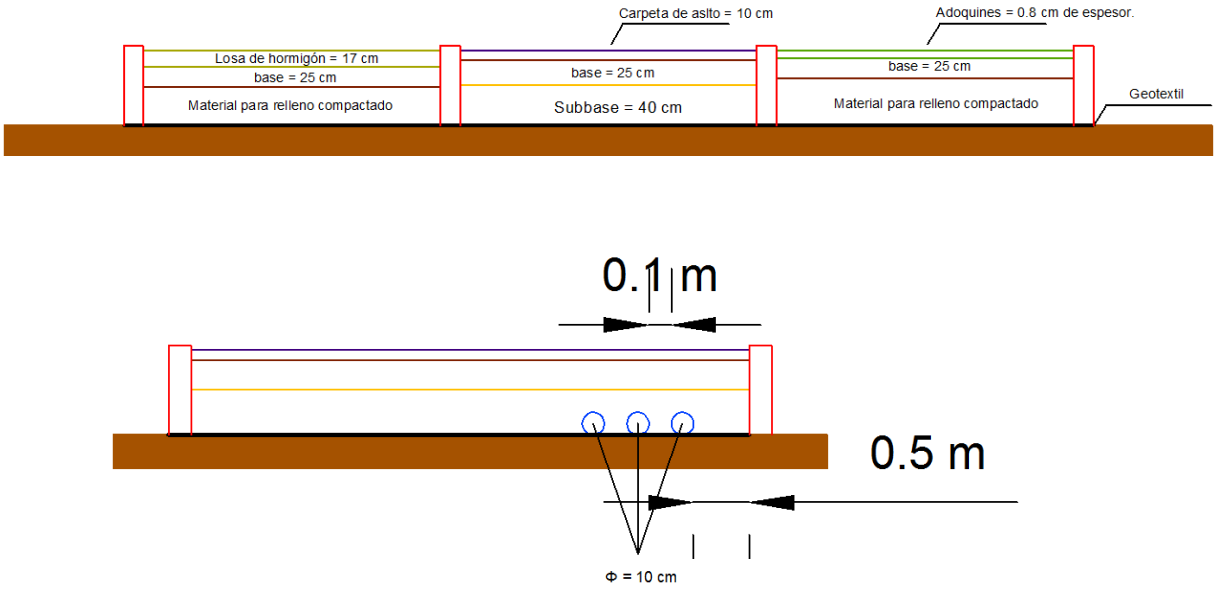


Figura 28. Planos del campo de prueba piloto con sus cortes A-A' y B-B'

El sistema de monitoreo permite obtener las alturas de precipitaciones por medio de un pluviómetro calibrado a 0.01 pulgadas que almacena los datos en un datalogger (dispositivo para guardar información) para luego ser traspasados a un computador. Para el estudio de calidad de agua, se deben tomar dos muestras por cada tanque de almacenamiento y dos muestras del agua lluvia antes de pasar por el campo de prueba. Luego se deben analizar las muestras por medio de ensayos de laboratorio. El investigador puede realizar todos los estudios que desee sobre las condiciones de contaminación.

En esta campo de prueba se harán estudios en remoción de contaminantes y reducción de escorrentías. Algunas de las variables que pueden ser analizadas son:

Rendimiento en remoción de elementos contaminantes de las escorrentías como nitrógenos y fósforos. A través de estudios en laboratorio de las muestras recogidas en la instalación.

- Efecto que tiene cada uno de los pavimentos permeables en la descontaminación y disminución de volúmenes de agua. Cual configuración presenta mejor comportamiento.

- Aplicabilidad en nuestro medio de las recomendaciones de los manuales seguidos. Son efectivas y eficaces en el tratamiento en calidad y cantidad de las aguas lluvias, o deben ser notablemente alteradas.

- Posibles ventajas que puede ofrecer el uso de pavimento permeable respecto a la disminución de contaminantes y volúmenes de escorrentía.

- La configuración que tiene mejor comportamiento hidráulico e hidrológico y la que retiene mayor cantidad de contaminantes.

8.9. Propuesta constructiva del campo de prueba piloto de pavimentos permeables.

Se elaboró una propuesta a COLCIENCIAS cuyo objetivo principal es el de construir y monitorear el campo de prueba piloto de pavimentos permeables en la universidad de Cartagena, en los aspectos de comportamiento en disminución de escorrentías y remoción de nutrientes, a través de instrumentos de medición y pruebas de laboratorio sobre muestras recolectadas periódicamente en un lapso de un año. La duración total sería de 15 meses, donde se emplearían 3 meses en su construcción y 12 en monitoreo, el costo total es de $ 112.253.000. Para ver en detalle la propuesta ver anexo 1.

8.10. Presupuesto

Con base a los resultados de diseño se procedió con el cálculo del presupuesto necesario para la construcción de la estación experimental. El costo total del proyecto es de $ 62.236.300,00, el costo en cuanto a equipos necesarios y redes hidráulicas fue de 4.75%, mientras que el 95.25% pertenece a costos de construcción, equivalentes a $ 59.281.300,00. Se muestra un resumen del presupuesto en la tabla 24.

Tabla 24. Resumen de presupuesto para construcción del proyecto.

Actividad	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
Movimientos de Tierra				
Localización y replanteo	m2	70	$ 4.250,00	$ 297.500,00
Excavaciones	m3	33,6	$ 18.000,00	$ 604.800,00
Cargue y transporte	m3	33,6	$ 6.000,00	$ 201.600,00
			Valor total	$ 1.103.900,00

Materiales				
Material Tamaño nominal entre 1/2" y 1" lavado	m3	17,25	$ 86.600,00	$ 1.493.850,00
Material para subbase (Zahorra)	m3	9,75	$ 70.000,00	$ 682.500,00
Hormigón poroso + mano de obra	m2	15	$ 380.000,00	$ 5.700.000,00
Ladrillos (0,2x0,1x0,08) + mano de obra	m2	15	$ 862.500,00	$ 12.937.500,00
Asfalto poroso + mano de obra	m2	15	$ 315.000,00	$ 4.725.000,00
			Valor total	$ 25.538.850,00

Equipos Necesarios				
Pluviometro digital + datalogger	und	1	$ 3.260.000	$ 120.000,00
Tanques de almacenamiento 1000 L	und	3	$ 870.000	$ 2.610.000,00
Tubería perforada de Φ 10 cm	m	30	$ 7.500	$ 225.000,00
			Valor total	$ 2.955.000,00

Obras complementarias				
Black No 4	un	504	$ 750,00	$ 378.000,00
Mortero 2500 PSI	m2	33,6	$ 16.000,00	$ 537.600,00
Mano de obra	m2	33,6	$ 18.000,00	$ 604.800,00
			Valor total	$ 1.520.400,00
	Valor total del proyecto			$ 34.258.150

9. CONCLUSIONES

- El diseño del campo de prueba piloto de pavimento permeable consta de un parqueadero de tres tipos de pavimentos permeables con medidas de 3m por 5m cada uno, con espesores de losa variables de 10, 17 y 8 cm y además, bases de diseño de 40, 20 y 20 cm correspondientes a asfalto poroso, hormigón poroso y adoquines respectivamente, se usarán implementos complementarios a la estructura tales como tres tanques de almacenamiento de 1 m^3 para poder retener el agua de salida, así como un pluviómetro y un datalogger para registrar la precipitación
- Para elaborar el diseño de un campo de prueba se requieren conocer variables tales como granulometría del suelo, resistencia a corte (usando CBR), permeabilidad del suelo, caracterización de los materiales a emplear (resistencia, porosidad, tasa de infiltración), cargas de tráfico, precipitación local y registros históricos de lluvia.
- Las variables determinadas fueron dimensiones de los parqueaderos, espesores de losa, espesores de base, volúmenes de agua a retener, diámetros de tubería de drenaje y pendientes de drenaje.
- Se caracterizó cada material de diseño a usar siendo esto expuesto en detalle en el análisis de resultados, haciendo énfasis su porosidad, resistencia, tasa de infiltración, durabilidad, costos y disponibilidad local realizando análisis de laboratorio pertinentes y recopilando información de estudios existentes.
- El diseño del campo de prueba piloto de pavimento permeable es exclusivo para la universidad de Cartagena y la zona seleccionada, puesto que se han tomado han sido tenidos en cuenta para el diseño sus características específicas y exclusivas de suelo y precipitaciones, además de su historial de lluvias.
- Se encontraron los siguientes resultados inesperados: el cálculo de espesor de losas varía muy poco cuando la permeabilidad cambia siempre y cuando se mantenga en el mismo tipo de suelo; la base del campo de prueba tuvo que ser modificada para que los pavimentos queden al mismo nivel, cumpliendo siempre con requerimientos de diseño.

- Los resultados obtenidos en cuanto a espesores de base y los espesores seleccionados para las capas de pavimento son similares a los propuestos en diferentes investigaciones, manuales y trabajos citados en este proyecto, conservando siempre los mismos rangos, para espesores de base se pueden destacar: Virginia: entre 20 cm y 60 cm; García et al (2010) entre 25 cm y 50 cm; Rodríguez (2010) entre 25 cm y 35 cm; en la instalación piloto realizada por la Universidad Católica de chile tomaron 30 cm; en la tabla 16 se pueden apreciar los resultados de este proyecto.
- La precipitación ocurre en un 80% de su totalidad al 20% inicial del tiempo de lluvia, en este caso 12 minutos en una tormenta de 1 hora. El caudal de evacuación está determinado por la intensidad de la lluvia, debido a que la permeabilidad del pavimento permeable y de la base están en la capacidad de infiltrar una mayor cantidad de agua de la que se precipita.
- El campo de prueba tiene un rendimiento del 93%, es decir, permite el ingreso del 93% para una lluvia con el 10% de excedencia en Cartagena.
- Realizando un análisis por elementos finitos al comportamiento del sistema agua-campo de prueba, se disminuyó el caudal pico al principio de la lluvia, resultando útil para la disminución del caudal de escorrentía. Para un mejor rendimiento del campo de prueba piloto se recomiendo emplear material menos filtrante en la base(un orden de magnitud menor), aumentando así la lámina de agua retenida en la capa de pavimento y por ende la eficiencia del sistema en cuanto al almacenamiento de agua.

En la actualidad, existen graves problemas de inundaciones debido a que se ha extendido la impermeabilización de la ciudad a causa del crecer de las zonas urbanas, las zonas permeables son cada vez menores, lo que contribuye al aumento del caudal de escorrentía. Debido a este problema, surge el interés de usar sistemas de drenaje sostenibles, que han sido usados con anterioridad en diferentes países, arrojando excelentes resultados.

Este proyecto se concentró en elaborar un diseño de un campo de prueba de pavimentos permeables en la sede Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena, con el fin de identificar beneficios en el manejo de las aguas lluvias en la ciudad de Cartagena, basándose en recomendaciones de manuales existentes internacionalmente, haciendo adaptaciones de

estos al medio local con el fin de recopilar información para futuras aplicaciones, esto para contribuir al enfoque de desarrollo sostenible de la ciudad de Cartagena.

El lugar escogido cuenta con un área disponible de 50 m^2 adecuada para el diseño, se realizó un levantamiento topográfico de altimetría para 50m^2; allí los ensayos de infiltración y granulometría mostraron que el suelo predominante es arcilloso con alta plasticidad, con una permeabilidad de $3.5x10^{-5}$ pulg/h. La base del diseño fue cambiada por un suelo granular de ½ a 1 pulgadas de diámetro. El diseño se realizó para un evento de periodo de retorno de 10 años con duración de una hora, con 3 tanques de almacenamiento de 1 m^3 de almacenamiento para el agua de salida del campo con el fin de comparar la diferencia de calidad del agua entrante con el agua de salida, además de comparar el caudal efluente entre los diferentes tipos de pavimento usados, con esto, el diseño servirá para evaluar su capacidad de remoción de contaminantes utilizando las herramientas de laboratorio necesarias para llevar a cabo laboratorios de saneamiento.

El diseño realizado cuenta con 3 parqueaderos de 15m^2 (3x5) cada uno con diferente tipo de pavimento permeable: pavimento en adoquines con espesor de base de 20 cm, espesor de adoquines de 8cm y permeabilidad de 7x10^-4 cm/s; pavimento en hormigón poroso con base de 20 cm, 15 cm de espesor de losa, porcentaje de vacíos de 20% , resistencia de 3500 PSI y permeabilidad de 1.5x10^-1 cm/s ; pavimento en asfalto poroso el cual constará con una subbase de 35 cm y base de 25 cm, capa de asfalto de 10 cm con porcentaje de vacíos de 30% y permeabilidad de 3.5x10^-3 cm/s. Cada parqueadero consta de un drenaje independiente con tubos perforados que conducen el agua infiltrada a cada uno de los tanques. Cada parqueadero se diseñó usando manuales diferentes, teniendo en cuenta las consideraciones del título D del RAS. Estos pavimentos permeables reciben agua lluvia de su propia cuenca, aislando completamente a las cuencas aledañas.

Para poder realizar la comparación de volumen entrantes con volumen de salida, se usará un pluviómetro que medirá el volumen entrante, mientras que con el uso de los tanques se puede medir el volumen salida. Respecto a estudios referentes a calidad de agua, se procederá a estudiar ambos volúmenes en el laboratorio con fines de comparar resultados hallados

(DQO, DBO, turbidez, sólidos suspendidos, color, PH, entre otros). Empleando las herramientas necesarias para esto, tales como embudos, papel filtro, probeta de 100 ml, matraces de aforo de 250 ml y 100 ml, sulfato de hidracina, recipientes de muestreo, agua destilada, entre las más importantes.

Para evitar infiltración desde un tipo de pavimento a otro, se usaran muros divisorios con ladrillos tipo block #4 y mortero de 2500 PSI. Las especificaciones de cada uno de los pavimentos se encuentran en la tabla 16. El costo total del proyecto es de $ 34.258.150

9.1. Limitaciones del proyecto

Las principales limitaciones que se presentaron en el desarrollo del proyecto son las siguientes:

- La Universidad de Cartagena tiene disponible únicamente los planos arquitectónicos de la Sede Piedra de Bolívar, los planos que muestran las redes hidráulicas no se encontraron.

- la escasez de muestras de pavimento permeable para realizar ensayos de laboratorio.

- Escasez los equipos de laboratorio necesarios para realizar pruebas en los pavimentos permeables. Tales como el permeámetro de carga variable.

9.2. Recomendaciones para trabajos futuros

- Recolección exhaustiva de información local con intención de relacionar el comportamiento de pavimentos permeables y características del medio local. Con fines de elaborar a largo plazo un manual de construcción para este y otros tipos de sistemas urbanos de drenajes sostenibles.

- Realizar un estudio dependiendo al uso y requerimientos de tráficos, cual material es conveniente emplear. Teniendo en cuenta su exposición a hidrocarburos y fuentes contaminantes.

- Enfatizar un estudio a los problemas de colmatación presentes principalmente en estos pavimentos a largo plazo debido a los aportes de sedimentos, para determinar periodos de mantenimiento

- Realizar modelaciones matemáticas teniendo en cuenta las condiciones locales y los parámetros estructurales del diseño, con fines de conocer de antemano el comportamiento hidráulico esperado del sistema. Para esto se puede emplear el software SWMM 5.0

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Northern Virginia Regional Commission NVRC. (2007). *Low Impact Development Supplement to the Northern Virginia BMP Handbook.* Virginia.

Virginia DCR Stormwater Desing Specification No. 7. (03 de 2011). Recuperado el 26 de 08 de 2013, de http://vwrrc.vt.edu/swc/april_22_2010_update/DCR_BMP_Spec_No_7_PERMEABLE_PAVEMENT_Final_Draft_v1-7_03082010.htm

Canal Construcción. (2013). Recuperado el 14 de 10 de 2013, de http://www.canalconstruccion.com/hormigon-permeable.html

NRMCA. (2013). Recuperado el 14 de 10 de 2013, de http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP38es.pdf

Andrade Quintero Enith Marina. Obtención de las Curvas de Probabilidad de Tormentas para el Aeropuerto Rafael Núñez de la Cuidad de Cartagena. Tesis de grado como requisito para optar el título de ingeniero civil de la Universidad de Cartagena. Cartagena, 2000.

WebAcademia. (2013). Recuperado el 22 de 08 de 2013, de http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article_80425.html

Arrieta,A (2002). Hidrología Práctica para Ingenieros. Universidad de Cartagena

AASHTO. (1993). Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

ACI.55R-06. (2006). *Farmington Hills: American Concrete Institute.*

Aguado, A. (1995). Nuevas tendencias en los hormigones porosos. *VII Jornada del Hormigón del Gremi de Constructors d'Obres de Barcelona i Comarques*.

Alcaldía de Cartagena. (2008). *Plan Maestro de Drenajes Pluviales.* Cartagena.

Andersen, C., Foster, I., & Pratt, C. (1999). The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment. *Hydrological Processes*, 13, 597-609.

ASTM. (2003). *Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction.* # 522.1.08.

ATLANTIS SUDS. (2013). *Atlantis SUDS.* Recuperado el 25 de 08 de 2013, de http://drenajesostenible.com/app/download/5779362944/SISTEMAS+URBANOS+DE+DRENAJE+SOSTENIBLE.pdf

Beeldens, A., & Vijverman, L. (2009). *Asociación Española de la Carretera*. Recuperado el 14 de 10 de 2013, de http://www.aecarretera.com/servicios/publicaciones/revista-carreteras/articulos-publicados/137-revista-carreteras-n-166/544-adoquines-de-hormigon-permeables-al-agua-estructuras-duraderas-para-una-politica-integrada-del-agua

Calderón, Y., & Charca, J. (2013). *Investigación en Concreto Poroso.* Arequipa, Perú.

Castro, J., & Fernandez, B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para ppavimentos porosos de hormigón. *Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 N°3*, 271-284.

City of Portland,. (2008). *Portland Stormwater Management Manual.*

Concretos Especiales S.R.L. (29 de 05 de 2011). *Hormigón Ecológico Permeable.* Obtenido de http://www.slideshare.net/concretosespeciales/hormigon-ecologico-permeable-smart-crete

Chang Nieto Gustavo y Bolívar Lobato Marta. Establecimiento de Relaciones entre las Precipitaciones de 24 horas y las precipitaciones de una duración diferente Pt, para la estación del Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena. Tesis para optar el título

de Ingeniero Civil de la Universidad de Cartagena. Cartagena 1997

De Solminihac, H., & Castro, J. (2002). Pavimentos porosos de hormigón: una opción para mitigar los efectos de las aguas lluvias.

DICTUC, & MINVU. (1996). Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos. Santiago, Chile.

Estupiñan, J., & Zapata, H. (2010). *Requerimientos de Infraestructura para el Aprovechamiento Sostenible del Agua Lluvia en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá.* Bogotá.

García, E., Monparler, S., & Doménech, I. (2010). *Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables.* Valencia: Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA). Área de Hidráulica e Hidrología. Universitat Politècnica de València. Cno. de Vera s/n 46022 Valencia.

García, E., Perales, S., & Doménech, I. (2010). *Control de Escorrentías urbanas meiante pavimentos permeables: aplicación en clias fríos.* Valencia.

Geotecniaweb. (2012). Obtenido de http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/permeabilidad.pdf

GITECO. (2013). *Giteco, Grupo de investigación de la Universidad de Cantabria*. Obtenido de http://www.giteco.unican.es/

Greenroads Manual v15. (11 de 09 de 2011). *Pavement Technologies.*

Gunderson, J. (2008). Pervious Pavements: New Findings About Their Functionality and Performance in Cold Climates. *Stromwater*.

Hunt, W., & Collins, K. (2008). Permeable Pavement: Research Update and Design Implications. *North Carolina State University Cooperative Extension, Raleigh, NC. Publication # AGW-588-14*.

Ibañez, S., & Moreno, R. (2004). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía.* VAlencia: Universidad politecnica de Valencia.

Jackson, N. (2007). *Design, Construction and Maintenance Guide for Porous Asphalt Pavements.* National Asphalt Pavement Association. Information Series 131. Lanham, MD.

Manual AASHTO. (1993). *AASHTO - 93.*

Newman, A., Coupe, S., Puehmeier, T., Morgan, J., Henderson, J., & Pratt, c. (2004). *Microbial Ecology of Oil Degrading Porous Pavement Structures.* WArwick: Horticulture Research International, Wellesbourne, Warwick, UK.

Noticias Caracol. (2011). Obtenido de Caracol Radio: http://www.caracol.com.co/noticias/ecologia/panales-ecologicos-o-pavimento-permeable-proyectos-del-green-solutions-2011/20111124/nota/1582983.aspx

Perales, S. (2008). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.* Valencia.

Pérez, F., Kraemer, c., & Lacleta, A. (1982). *Mezclas Bituminosas Porosas .* Madrid: Dirección General de Carreteras, Servicio de Tecnología. .

RAS . (2000). *Título D.4.3.10.*

Rodríguez, J. (2008). *ESTUDIO, ANÁLISIS Y DISEÑO DE SECCIONES PERMEABLES DE FIRMES PARA VÍAS URBANAS CON UN COMPORTAMIENTO ADECUADO FRENTE A LA COLMATACIÓN Y CON LA CAPACIDAD PORTANTE NECESARIA PARA SOPORTAR TRÁFICOS LIGEROS.*

Rodriguez, J., Gómez, E., Castro, D., & Rodriguez, J. (26 de 08 de 2013). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.* Obtenido de http://www.ciccp.es/biblio_digital/Urbanismo_I/congreso/pdf/040505.pdf

Rodriguez, J., Rodriguez, J., Gomez, E., & Castro, D. (2008). *Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenibles*. Recuperado el 12 de 08 de 2013, de http://www.ciccp.es/biblio_digital/Urbanismo_I/congreso/pdf/040505.pdf

Scholz, M. (2006). *Wetland Systems to Control Urban Runoff*, Cap 30, Pag 269 - 290.

Schueler et al. (2007). *Urban Stormwater Retrofit Practices.* Ellicott City,: Center for Watershed Protection.

Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). *SISTEMA URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE.* Bogotá.

Smith, D. (2006). *Permeable Interlocking Concrete Pavement-selection design, construction and.* Third Edition. Interlocking Concrete Pavement Institute. Herndon, VA.

Solminihac, H., & Castro, J. (2006). *Pavimentos Porosos de Hormigón: Una Opción para Mitigar los Efectos de las aguas lluvias.* Depto. de Ingeniería y Gestión de la Construcción, PUC.

Virgiliis, A. (25 de 04 de 2011). Obtenido de youtube: http://www.youtube.com/watch?v=9vori51xb_U