

**DISEÑO HIDRÁULICO DE LOSAS EN PAVIMENTO POROSO RÍGIDO COMO
ESTRUCTURAS COMPLEMENTARIAS AL DRENAJE PLUVIAL DE BOGOTÁ**

Presentado por:

**ÁNGELA MARÍA POLANCO ANDRADE
ÁNGELA MARÍA SÁNCHEZ VEGA**

Trabajo de grado para optar por el título Ingeniero Civil

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**BOGOTÁ D.C.
JUNIO DE 2012**

Presentado por:

ÁNGELA MARÍA POLANCO ANDRADE
C.C.: 1.136.881.804 de Bogotá

ÁNGELA MARÍA SÁNCHEZ VEGA
C.C.: 1.088.275.205 de Pereira

Director:
ANDRÉS TORRES
I.C., M.S.C., P.H.D.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.
JUNIO DE 2012

“El futuro le pertenece a aquellos que creen en la belleza de sus sueños” Eleanor Roosevelt

Le agradecemos a Dios, a nuestros padres por su ayuda incondicional en el camino para alcanzar nuestras metas, al doctor Andrés Torres quien en su calidad de director, con una gran dedicación aportó todos sus conocimientos para la elaboración y ejecución de este trabajo de grado. A la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), quien facilitó la información hidrológica requerida en el marco del contrato administrativo celebrado entre la PUJ y la EAAB N° 9-07-25100-0763-2010. Y a todos aquellos sin los cuales no hubiese sido posible la realización de este trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1 Hidrología urbana	5
1.2 Conceptos hidrológicos	6
1.2.1 Ecuación fundamental de la hidrología (Monsalve Sáenz, 1995).....	6
1.2.2 Precipitación (Chow <i>et al.</i> , 2000).....	6
1.2.3 Relaciones Intensidad-duración-Frecuencia (IdF) (Chow <i>et al.</i> , 2000).....	9
1.2.4 Escorrentía superficial (Monsalve Sáenz, 1995).....	12
1.2.5 Método racional (Monsalve Sáenz, 1995).....	14
1.2.6 Hidrograma Sintético de Snyder (Chow <i>et al.</i> , 2000).....	14
1.3 Conceptos de hidráulica	17
1.3.1 Conductividad hidráulica (k).....	17
1.3.2 Porosidad.....	18
2. MATERIALES Y MÉTODOS	19
2.1 Metodologías de diseño	19
2.1.1 Método de la curva envolvente (Lopes da Silveira y Avruch Goldenfum, 2007) 19	
2.1.2 Metodología Chile (Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas [DICTUC], 1996).....	23
2.1.3 The SUDS manual, CiriaC697 (Woods-Ballard <i>et al.</i> , 2007).....	26
2.1.4 Método Digest 365 (Soakaway design Digest 365, 2012).....	29
2.1.5 Los métodos franceses (Azzout <i>et al.</i> , 1994).....	30
2.2 Modelo de pavimento poroso (Gómez <i>et al.</i>, 2010)	38
2.3 Zona de estudio	41
2.3.1 Información hidrológica horaria.....	43
2.3.2 Información hidrológica diaria.....	43
2.3.3 Curvas IdF	44
2.3.4 Curvas HdF	45
2.4 Herramientas computacionales	46

2.4.1	R Statistics.....	47
2.4.2	Get Data Graph Digitizer	48
2.4.3	Microsoft Excel Solver.....	48
3.	RESULTADOS AL APLICAR LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES.....	50
3.1	Aplicación del método de la curva envolvente	53
3.2	Aplicación de metodología Chile	54
3.3	Aplicación del método The SUDS manual, CiriaC697	59
3.4	Aplicación del Método Digest 365	64
3.5	Aplicación de los métodos franceses.....	69
3.5.1	Método de las lluvias.....	71
3.5.2	Método de los volúmenes.....	75
4.	MÉTODO PROPUESTO DE VALIDACIÓN.....	85
4.1	Hidrograma de entrada.....	85
4.2	Hidrograma de salida	87
4.2.1	Cálculo de C_t y C_p	88
4.3	Cálculo del espesor del pavimento.....	92
5.	ADAPTACIONES DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES.....	97
5.1	Adaptaciones de método de la curva envolvente.....	98
5.2	Adaptación de metodología Chile.....	99
5.3	Adaptación The SUDS manual, CiriaC697	103
5.4	Adaptación del Método Digest 365.....	106
5.5	Adaptación de los métodos franceses	110
5.5.1	Método de las lluvias.....	110
5.5.2	Método de los volúmenes.....	114
6.	COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	124
7.	CONCLUSIONES	128
8.	RECOMENDACIONES	130
9.	REFERENCIAS.....	132
10.	ANEXOS.....	136

INDÍCE DE FIGURAS	137
INDÍCE DE TABLAS	143

INTRODUCCIÓN

El proceso de urbanización implica la construcción de vías, las cuales permitan el desarrollo de las diferentes actividades características de la ciudad. Este desarrollo vial requiere la construcción de pavimentos, los cuales deben resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fueron diseñados, con el fin de garantizar tanto seguridad vial como durabilidad (Montejo, 1997).

Sin embargo, los pavimentos tradicionales presentan algunos inconvenientes relacionados con el drenaje y el escurrimiento sobre la capa de rodadura (Reyes y Torres, 2002), ocasionando impermeabilizaciones importantes en el espacio urbano, lo cual aumenta los riesgos de inundación y de contaminaciones diferidas a largo plazo de los cuerpos acuáticos receptores (ríos, acuíferos, humedales, *etc.*) (Chebbo *et al.*, 1997). Como respuesta a estos efectos nocivos hidráulicos y ambientales, desde los años 1980 se han venido concibiendo y probando una serie de técnicas alternativas de drenaje pluvial urbano. Estas técnicas intentan crear soluciones que generen la menor diferencia posible entre el ciclo hidrológico urbano y el ciclo hidrológico natural (sin urbanizar) (Torres, 2001), complementando e incluso sustituyendo en algunos casos los sistemas de drenaje convencionales aliviando las demandas excesivas que se presentan de manera puntual en el tiempo en las redes de alcantarillado pluvial y combinado (Torres *et al.*, 2009). Adicionalmente, se ha observado que las técnicas alternativas pueden presentar beneficios ambientales, ya que en algunos casos su presencia contribuye a la disminución de concentraciones y cargas de contaminantes (Matthews *et al.*, 1997; Colandini, 1997; Bratieres *et al.*, 2008) producidas en el proceso de la escorrentía sobre las superficies urbanas. En efecto, el agua arrastra numerosos contaminantes, los cuales pueden clasificarse de la siguiente manera, en orden de visibilidad decreciente (Thévenot, 1992): (i) sólidos flotantes y en suspensión; (ii) contaminantes oxidables; (iii) nutrientes; (iv) micro-contaminantes minerales; (v) micro-contaminantes orgánicos; (vi) microorganismos.

Una de las técnicas alternativas más utilizadas corresponde a los pavimentos porosos, los cuales son básicamente una mezcla de agregados gruesos uniformemente gradados, con muy bajo contenido de arena y un cementante, que puede ser una mezcla bituminosa o cemento portland, con el propósito de lograr un porcentaje de vacíos entre 15 % y 20 % (Reyes y Torres, 2002). Los pavimentos porosos o drenantes se dividen principalmente en dos grandes tipos: (i) pavimentos de inyección distribuida (revestimiento drenante); (ii) pavimentos de inyección localizada (revestimiento impermeable). Estos dos tipos de pavimentos porosos pueden a su vez dividirse según el mecanismo de evacuación: evacuación distribuida (pavimentos drenantes de infiltración) y/o de evacuación localizada (pavimentos drenantes de retención) (Azzout *et al.*, 1994).

Por otro lado, los pavimentos porosos permiten la percolación del agua a través de su estructura, lo que retarda la escorrentía generada por los eventos de lluvia, para posteriormente liberar de manera diferida el volumen de agua en el medio natural (río, acuífero, humedal, *etc.*) o en las estructuras de drenaje complementarias y/o convencionales (Colandini, 1997). Para el diseño de estas estructuras se han planteado diferentes metodologías (Azzout *et al.*, 1994; Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas [DICTUC], 1996; Lopes da Silveira y Avruch Goldenfum, 2007; Woods-Ballard *et al.*, 2007), las cuales serán abordadas en este trabajo.

Los pavimentos porosos han traído beneficios y resultados exitosos en cuanto al manejo de aguas lluvias, ya que es posible reducir gastos en obras de drenaje (Broviack, 2005), mejorando la calidad de estas aguas debido a la captura de sedimentos (Kadurupokune y Jayasuriya, 2009). Estos pavimentos son utilizados principalmente en zonas de alta densidad, donde el espacio es limitado y generalmente en superficies con pendientes menores o iguales al 5 % con el propósito de evitar estancamientos de agua en la superficie y dentro de la subbase (MDE, 2000).

En Colombia, se han realizado algunas investigaciones sobre las propiedades mecánicas en las cuales se han propuesto diseños de mezclas especiales para aumentar la porosidad sin sacrificar las resistencias (Reyes y Torres, 2002; Niño Rivera y Villamil, 2003). Adicionalmente, se han estudiado las propiedades hidráulicas (Lozano y Niño, 2003) y de retención de contaminantes (Torres *et al.*, 2011), así como el envejecimiento y colmatación

(Gómez González *et al.*, 2010) y aspectos económicos y financieros (Mora *et al.*, 2011) relacionados con la implementación de dichos pavimentos.

A pesar de lo anterior, los pavimentos porosos no se han implementado ampliamente en el país y por lo tanto su diseño e instalación no representa una práctica generalizada en la ingeniería colombiana. Una de las posibles razones a lo anterior es que los resultados obtenidos de los diferentes estudios en nuestro medio no se han integrado en procedimientos de diseño que contemplen consideraciones estructurales, geotécnicas, hidráulicas y ambientales. Adicionalmente, dichos resultados no han sido utilizados para estandarizar las prácticas de construcción de los pavimentos porosos. Este trabajo pretende contribuir a solucionar los vacíos anteriormente mencionados proponiendo, tras una revisión de los métodos de diseño existentes, la utilización de un método de diseño de pavimentos porosos rígidos adaptado a la carga hidrológica característica de una zona específica de Bogotá y teniendo en cuenta propiedades hidráulicas y de envejecimiento de una mezcla de pavimento probada en condiciones de laboratorio (Gómez *et al.*, 2011), con el fin de controlar las posibles inundaciones que se ocasionen en la zona. Se entiende por inundación el exceso de agua que se presenta sobre una estructura que normalmente está seca.

Este documento contiene ocho capítulos. El primer capítulo se refiere a un marco teórico, donde se presentan conceptos hidrológicos e hidráulicos necesarios para aplicar las teorías de diseño existentes y realizar su validación. Seguidamente, el segundo capítulo presenta los materiales y métodos, en particular la descripción de los métodos de diseño disponibles en la bibliografía, el modelo físico utilizado con sus características hidráulicas, el sitio de estudio con sus características hidrológicas, y las herramientas computacionales utilizadas; en el tercer capítulo se presentan los resultados, donde se desarrollan las metodologías de diseño aplicadas a las condiciones de la zona y al modelo físico utilizado por Gómez *et al.*, 2010. El cuarto capítulo explica el método propuesto de validación, donde se describen las razones por las que se decidió el uso de una herramienta computacional como método, así como la aplicación del mismo; en el quinto capítulo se describen brevemente las modificaciones a los métodos de diseño existentes, aplicados a las condiciones de la zona de estudio y al modelo físico utilizado; en el sexto capítulo se realiza una comparación y

discusión de los resultados obtenidos en el siguiente orden (i) resultados obtenidos al aplicar las metodologías de diseño originales Vs. resultados obtenidos mediante las metodologías de diseño adaptadas a la zona de estudio; (ii) resultados obtenidos por medio del método de validación Vs. resultados obtenidos mediante las metodologías de diseño originales; (iii) resultados obtenidos por medio del método de validación Vs. los resultados obtenidos mediante las metodologías de diseño adaptadas a la zona de estudio. Finalmente, en los capítulos siete y ocho se encuentran respectivamente las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo orientadas al diseño hidráulico de losas en pavimentos porosos rígidos como estructuras complementarias al drenaje pluvial de Bogotá.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Hidrología urbana

Según Lázaro (1990) la hidrología urbana es la ciencia interdisciplinaria del agua y su interacción con la ciudad: debido a la cantidad de áreas impermeables, tales como vías, se han generado una serie de problemas relacionados con el drenaje, y en consecuencia esta ciencia busca entender y solucionar dichos problemas. Por otro lado, la hidrología urbana puede ser abordada como una simple relación causa y efecto, donde la causa es definida como el cambio en el uso de la tierra producto de la urbanización. Dentro de este contexto las fuerzas motivadoras de la urbanización se describen, y los efectos físicos y la dirección de crecimiento de las ciudades analizadas.

Como respuesta a los problemas observados como producto de la urbanización, y con el propósito de mitigarlos, las llamadas técnicas alternativas a las redes de drenaje urbano intentan crear espacios que generen el máximo acercamiento posible entre el ciclo hidrológico en la ciudad y el ciclo natural del agua (sin urbanizar); estas soluciones se conocen como Técnicas Alternativas a las redes de alcantarillado, o lo que en inglés se conoce como Best Management Practices (BMP) y más recientemente Low Impact Development systems (LID) en Estados Unidos, Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) en Inglaterra o Water Sensitive Urban Design (WSUD) en Australia. Es así como en la concepción del diseño de cualquiera de estas técnicas se busca retardar la llegada del agua a la red y/o infiltrar las aguas de escorrentía (Chocat, 1997). Dado lo anterior, tradicionalmente la manera en que se han desarrollado estas técnicas ha sido con base en criterios de eficiencia en cuanto a cantidad, calidad y compatibilidad con los espacios urbanos (Altarejos, 2007).

Una de las técnicas alternativas son los pavimentos porosos, los cuales se componen de una mezcla de agregados gruesos uniformemente gradados, con muy bajo contenido de arena y un cementante. Tienen un porcentaje de vacíos entre 15 % y 20 %. Estos elementos permiten la percolación del agua a través de su estructura, lo cual retarda la escorrentía generada por los eventos de lluvia, para posteriormente liberar de manera diferida el

volumen de agua en el medio natural (suelo, acuífero, etc.) o en las estructuras de drenaje complementarias (Azzout *et al.*, 1994). Esta propiedad, aparentemente contradictoria con respecto a los principios tradicionalmente manejados en ingeniería de pavimentos, es lograda gracias a diseños especiales en los que la estructura de pavimento pasa a ser un objeto multipropósito al convertirse en un elemento de drenaje urbano pero sin perder sus capacidades portantes (Aguado y Vives, 1994; Brown, 1995; Reyes y Torres, 2002).

1.2 Conceptos hidrológicos

En este subcapítulo se presentan los conceptos hidrológicos empleados tanto en la aplicación de las metodologías de diseño existentes como en la elaboración del método propuesto de simulación, lo anterior debido a que el pavimento poroso es un complemento del sistema de drenaje urbano, y para su caracterización es necesario entender algunos principios hidrológicos.

1.2.1 Ecuación fundamental de la hidrología (Monsalve Sáenz, 1995)

La ecuación fundamental de la hidrología está dada por la relación de un sistema en el cual se consideran las entradas y las salidas dentro de un volumen de control, produciendo un cambio de almacenamiento, es decir lo que entra menos lo que sale es igual al cambio de almacenamiento. La siguiente ecuación se calcula para un determinado período de tiempo y para un volumen de control.

$$I - O = \Delta S / \Delta t \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

I: Entradas

O: Salidas

$\Delta S / \Delta t$: Cambio de almacenamiento en el tiempo

1.2.2 Precipitación (Chow *et al.*, 2000).

La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca. La formación de precipitación

requiere la elevación de una masa de agua a la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales para la elevación de masas de aire son la *elevación frontal*, donde el aire caliente es elevado sobre el aire frío por un pasaje frontal; la *elevación orográfica*, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa; y la *elevación convectiva*, la cual se produce cuando una masa de aire asciende por diferencias de temperatura a causa de un calentamiento local.

Las pequeñas gotas de agua crecen mediante la condensación e impacto con las más cercanas, hasta que son lo suficientemente grandes para que la fuerza de gravedad sobrepase la fuerza de fricción y empiezan a caer.

El ciclo de condensación, caída, evaporación y elevación se repite en promedio unas diez veces antes de que la gota alcance un tamaño crítico de alrededor 0.1 mm, que es suficientemente grande para que caiga a través de la base de la nube. Las gotas de lluvia normales que caen a través de la base de una nube tienen 0.1mm a 3 mm de diámetro. En la Figura 1 se ilustra la formación de precipitación en las nubes.

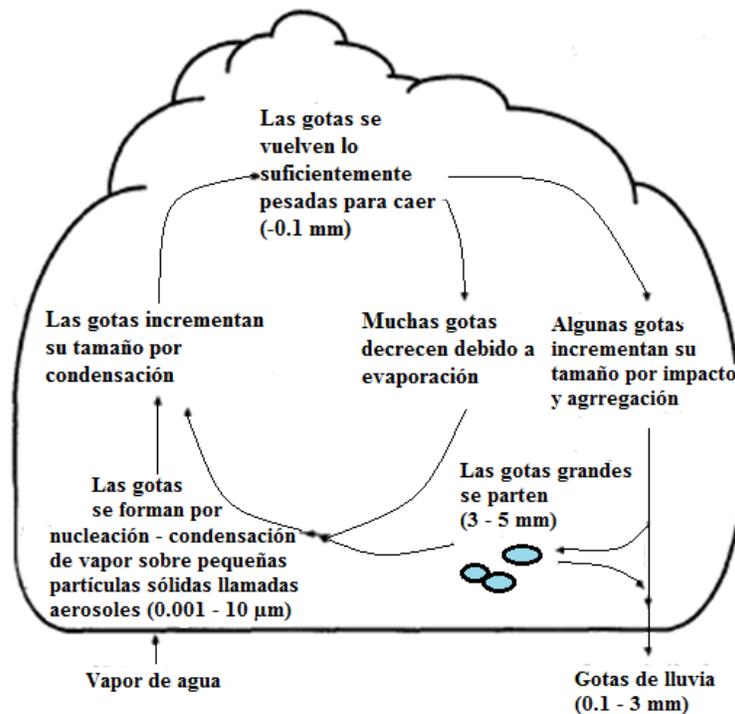


Figura 1. Formación de la precipitación en las nubes (Chow *et al.*, 2000)

a) Medición de la lluvia

La distribución espacio-temporal de las lluvias es uno de los aspectos que más desconoce el hombre y a su vez, uno de los más importantes para el hidrólogo, pues representa la entrada a cualquier modelo de hidrología.

La lluvia se mide utilizando dos tipos de medidores: *medidores sin registro* y *medidores con registro*. Un medidor con registro es un aparato que registra automáticamente la profundidad de lluvia en intervalos de más de un minuto de duración. Los medidores sin registro se miden manualmente en intervalos de tiempo mayores. Generalmente estos medidores consisten en receptáculos abiertos con lados verticales, en los cuales la profundidad de precipitación se mide usando un cilindro graduado o una vara de medición. Los tipos de medidores sin registro son los *medidores estándar* y los *medidores de almacenamiento*. Los medidores estándar se utilizan generalmente para la medición de precipitación diaria y están compuestos por un colector localizado encima de un embudo el cual lleva el agua a un tanque. Los medidores de precipitación, para lugares de los cuales sólo se utilizan mediciones semanales o mensuales tienen un diseño similar al del tipo diario pero poseen un tanque con mayor capacidad. Los medidores de almacenamiento se utilizan para medir la lluvia a lo largo de una estación completa, usualmente en áreas remotas y escasamente habitadas. Estos medidores están compuestos de un colector localizado encima de un embudo que conduce el agua a un área de almacenamiento lo suficientemente grande como para contener todo el volumen de lluvia de la estación. Los medidores estándar son los aparatos de medición de información de lluvia más utilizados en hidrología. Muchos miles de estos medidores son leídos por observadores voluntarios y su información es registrada por los servicios climatológicos.

Existen tres tipos de medidores con registro de uso general: el *pluviógrafo de balanza*, el *pluviógrafo de flotador* y el *pluviógrafo de cubeta basculante*.

El pluviógrafo de balanza registra continuamente el peso de un tanque receptor más la lluvia acumulada utilizando un mecanismo de resorte o un sistema de balanza. Estos medidores están diseñados para prevenir pérdidas excesivas por evaporación mediante la adición de aceite o cualquier otra sustancia supresora de evaporación para formar una

película sobre la superficie. Los pluviógrafos de balanza son muy útiles para los registros de nieve, granizo y mezclas de lluvia y nieve.

El pluviógrafo de flotador tiene una cámara que a su vez contiene un flotador que sube verticalmente a medida que el nivel de agua en la cámara aumenta. El movimiento vertical del flotador es convertido en la impresión de una tinta sobre un papel.

El pluviógrafo de cubeta basculante utiliza dos cubetas. La lluvia primero llena una de las cubetas, la cual se desbalancea dirigiendo el flujo de agua hacia la segunda cubeta. Este movimiento basculante de las cubetas es transmitido hacia el aparato de registro, lo que permite tener medición de la evolución temporal de la intensidad de la lluvia.

Los medidores de lluvia comúnmente tienen un aparato cortaviento construido alrededor de ellos con el fin de minimizar la distorsión en la medición de la lluvia causada por el patrón de flujo de viento alrededor del medidor (Chow *et al.*, 2000).

1.2.3 Relaciones Intensidad-duración-Frecuencia (IdF) (Chow *et al.*, 2000)

Uno de los primeros pasos que debe seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico, como el diseño de un drenaje urbano, es la determinación del evento o los eventos de lluvia que deben usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la *intensidad* de lluvia (o profundidad), la *duración* y las *frecuencias* o periodos de retorno apropiados para la obra y el sitio. En muchos casos existen curvas estándar de Intensidad-duración-Frecuencia (IdF) disponibles para el sitio, luego no se hace necesario realizar el análisis frecuencial de series de lluvia. En las curvas IdF usualmente los datos se presentan en forma gráfica, con la duración en el eje horizontal y la intensidad en el eje vertical, mostrando una serie de curvas, para cada uno de los periodos de retorno de diseño.

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h o pg/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia. Comúnmente se utiliza la intensidad promedio, que puede expresarse como:

$$i = \frac{P}{T_d}$$

Ecuación 2

Donde P es la profundidad de lluvia (mm o pg) y T_d es la duración, dada usualmente en horas. La frecuencia se expresa en función del periodo de retorno, T , que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño.

a) Curvas IdF mediante análisis de frecuencia

Cuando la información de lluvia local está disponible, las curvas IdF pueden obtenerse utilizando un análisis frecuencial de dicha lluvia. Una distribución comúnmente utilizada en el análisis de frecuencia de lluvia es la distribución de valor extremo tipo I o Gumbel. Para cada una de las duraciones seleccionadas, las profundidades de lluvias máximas anuales se extraen de los registros históricos de lluvias y luego se aplica el análisis de frecuencia a la información anual. En algunos casos, particularmente donde sólo están disponibles datos de algunos pocos años (menos de 20 ó 25 años), puede determinarse una serie de excedencia anual para cada una de las duraciones ordenando las profundidades y escogiendo los N valores máximos de un registro de N años. Las profundidades de precipitación de diseño determinadas mediante la serie de excedencia anual pueden ajustarse para igualar las profundidades encontradas mediante una serie máxima anual, multiplicando las precipitaciones por 0.88 para los valores con periodo de retorno de 2 años, por 0.96 para valores con periodo de retorno de 5 años y por 0.99 para los valores con periodo de retorno de 10 años (Hershfield, 1961). Para periodos de retorno mayores no es necesario ajustar los estimativos.

b) Ecuaciones para las curvas IdF

Las curvas de Intensidad-duración-Frecuencia también pueden expresarse como ecuaciones con el fin de evitar la lectura de la intensidad de la lluvia de diseño en una gráfica. Por ejemplo, Wenzel (1982) dedujo para algunas ciudades de los Estados Unidos, coeficientes para utilizarse en una ecuación de la forma:

$$I = \frac{c}{d^e + f} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde I es la intensidad de lluvia de diseño, d es la duración y c , e y f son coeficientes que varían con el lugar y el periodo de retorno. Es posible extender la ecuación para incluir el periodo de retorno T utilizando la ecuación:

$$i = \frac{cT^m}{T_d + f} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$i = \frac{cT^m}{T_d^e + f} \quad \text{Ecuación 5}$$

Por otro lado, según Azzout *et al.* (1994), es habitual aproximar estas curvas IdF por las relaciones del tipo:

$i(D, T) = C_1(X_0 + D)^{C_2}$	Fórmula de Montana	Ecuación 6
$i(D, T) = \frac{a \cdot T^b}{d + c}$	Fórmula de Talbot	Ecuación 7
$i(D, T) = a(T)(D + b(T))c(T)$	Fórmula de Keiffer y Chu	Ecuación 8

La primera (fórmula de Montana) es la utilizada en la instrucción técnica de Francia de 1977 para el dimensionamiento para el diseño de redes de tuberías.

c) Principio de establecimiento de curvas IdF o HdF (Torres, 2004)

Pasos para el establecimiento de las curvas: (i) se considera una muestra de N eventos lluviosos durante P años; (ii) se escoge un intervalo de observación de lluvia d ; por ejemplo, 10 minutos. Para simplificar los cálculos, d debe ser un múltiplo entero del intervalo de tiempo Δt de discretización de la lluvia; (iii) para cada evento lluvioso, recorriendo el conjunto del hietograma por intervalos de tiempo Δt , se busca el periodo de duración d durante el cual la intensidad I o la altura H es máxima; (iv) se dispone entonces

de N valores de intensidad o de altura máxima sobre la duración d ; (v) se ordenan esos N valores en orden decreciente; (vi) se atribuye a los N valores decrecientes las frecuencias empíricas de sobrepaso F , calculadas por la relación de Bos-Levenbach:

$$F = (r - 0.3)/(N + 0.4) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde: r es el rango, y con la hipótesis de que la variable tiene un comportamiento de tipo exponencial; el valor i tiene entonces una frecuencia de sobrepaso de $0.7/(N+0.4)$, el segundo valor tiene una frecuencia de $1.7/(N+0.4)$ y el valor j tiene una frecuencia de $(j-0.3)/(N+0.4)$.

Los periodos de retorno correspondientes, en años, se dan por la relación:

$$T = P(N + 0.4)/(N(N - 0.3)) \quad \text{Ecuación 10}$$

Finalmente, se desarrolla el mismo procedimiento para otras duraciones d ; por ejemplo 30 minutos, 1 hora, 2 horas.

1.2.4 Escorrentía superficial (Monsalve Sáenz, 1995)

Según Monsalve Sáenz (1995), la escorrentía superficial es el fenómeno más importante desde el punto de vista de ingeniería, y consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre.

De la precipitación que alcanza el suelo, parte queda retenida ya sea en depresiones o como película sobre partículas sólidas. Del excedente de agua retenida, parte se infiltra y parte escurre superficialmente. Se define como exceso de precipitación la precipitación total caída al suelo menos la retenida e infiltrada.

Los factores que influyen en la escorrentía superficial pueden ser de naturaleza climática (relacionados con la precipitación), de naturaleza fisiográfica (ligados a características físicas de la cuenca) y de naturaleza humana (relacionados con la intervención humana).

Las variables que caracterizan la escorrentía superficial son:

- a. Caudal, Q : El caudal definido como el volumen de escorrentía superficial por unidad de tiempo, $Q=V/t$, es la principal variable que caracteriza la escorrentía superficial. Se expresa en m^3/s o l/s .
- Caudal específico, q : Se define como el caudal Q dividido por el área de drenaje A de la cuenca. Se expresa en $m^3/s/km^2$ o $l/s/ km^2$.
Sirve como elemento comparativo entre cuencas.

$$q = Q/A \qquad \text{Ecuación 11}$$

- b. Coeficiente de escorrentía superficial, C : Es la relación entre el volumen de agua de escorrentía superficial total y el volumen total de agua precipitado, en un intervalo de tiempo determinado.

$$C = \left(\frac{V_{es}}{V_p} \right) \qquad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

V_{es} : Valor de escorrentía superficial, en un intervalo de tiempo.

V_p : Valor precipitado total, en un intervalo de tiempo.

Este coeficiente se puede definir como relativo a una lluvia aislada o a un intervalo de tiempo en donde ocurren varias lluvias. Se debe aclarar que conociendo el coeficiente de escorrentía para una determinada lluvia con cierta intensidad y cierta duración en un área dada, se puede determinar la escorrentía superficial de otras precipitaciones de intensidades diferentes, desde que la duración de la lluvia sea la misma.

- c. Tiempo de concentración, t_c : El tiempo de concentración mide el tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya con escorrentía superficial en una sección considerada. Es decir, es el tiempo que toma la lluvia que cae en el punto más distante de la corriente de agua de una cuenca para llegar a una sección determinada de dicha corriente. Se mide en minutos u horas.
- d. Periodo de retorno, T : Es el periodo de tiempo promedio, en años, en que un determinado evento, es igualado o superado por lo menos una vez.

1.2.5 Método racional (Monsalve Sáenz, 1995)

La Ecuación 13 es conocida como la fórmula racional, la cual es ampliamente empleada para el cálculo del caudal de escorrentía generado por un evento lluvioso de características particulares:

$$QE=0.278 C.I.A$$

Ecuación 13

Donde:

QE : Caudal de escorrentía directa, en m^3/s

C : Coeficiente de escorrentía

I : Intensidad de lluvia, en mm/h

A : Área de drenaje, en km^2

La fórmula racional arroja los valores de caudal QE pico, a causa de una intensidad de lluvia en un área de drenaje determinada. Dicho caudal, es producido por esa precipitación dada en un rango de tiempo conocido como tiempo de concentración, que es requerido para el recorrido de la escorrentía superficial desde la parte más lejana de la cuenca hasta el punto en cuestión. Una forma común para la determinación de la intensidad I de lluvia, es el uso de curvas de Intensidad-duración-Frecuencia (IdF), con las cuales se logran establecer las frecuencias f de los eventos lluviosos observados, a partir de su intervalo de observación d y su intensidad media I .

1.2.6 Hidrograma Sintético de Snyder (Chow *et al.*, 2000)

Según Monsalve (1995), un hidrograma de caudal es la representación gráfica de la variación del caudal en relación con el tiempo. El intervalo de tiempo puede variar de horas a años.

A continuación se explica la metodología propuesta por Snyder en 1938 basada en relaciones sintéticas para algunas características de un hidrograma unitario estándar.

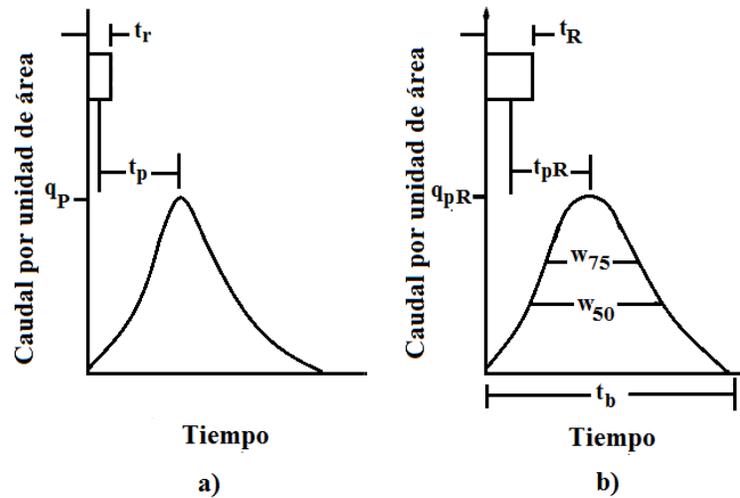


Figura 2. Hidrograma Unitario Sintético de Snyder (a) Hidrograma Unitario Estándar ($t_p = 5.5t_r$). (b) Hidrograma Unitario requerido ($t_p \neq 5.5t_r$) (Chow *et al.*, 2000)

Las variables requeridas en este método son las siguientes:

- t_R : Duración de la lluvia unitaria del hidrograma unitario requerido (horas).
- t_p : Tiempo de retardo o tiempo transcurrido, entre el centro de gravedad de la lluvia efectiva y el pico del hidrograma de escurrimiento directo (horas).
- t_b : Tiempo de base del hidrograma (horas).
- q_p : Caudal pico del hidrograma.
- L : Longitud de la corriente principal del río desde la estación de aforos o desembocadura al punto más alejado de la cuenca (km).
- L_c : Distancia entre la desembocadura y el centro de gravedad de la cuenca, medida sobre el cauce principal (km).
- C_t : Coeficiente de retardo de Snyder, dependiente de las características físicas de la cuenca. Varía entre 1.8 y 2.2
- C_p : Coeficiente de pico, es un término adimensional cuya variación está comprendida normalmente entre 0.56 y 0.69.
- W_{75} : Ancho del hidrograma unitario calculado como 0.75 de q_p , en horas.
- W_{50} : Ancho del hidrograma unitario calculado como 0.50 de q_p , en horas.
- t_r : Duración de la lluvia del hidrograma unitario estándar
- TT_R : Corrección de la duración de la lluvia

La duración de la lluvia t_r está relacionada con el retardo de la cuenca t_p por la siguiente expresión:

$$t_p = 0.75C_t(L.L_c) \quad \text{Ecuación 14}$$

$$t_r = \frac{t_p}{5.5} \quad \text{Ecuación 15}$$

Para el cálculo de t_{pR} existen las siguientes consideraciones:

a. Sí $t_p = 5.5 \cdot t_r$ entonces $t_{pR} = t_p$ **Ecuación 16**

b. En caso que a. no se cumpla, se aplica la siguiente ecuación:

$$t_{pR} = t_p + \frac{t_R - t_r}{4} \quad \text{Ecuación 17}$$

El caudal pico del hidrograma es:

$$q_p = \frac{2.75C_p \cdot A}{t_{pR}} \quad \text{Ecuación 18}$$

El tiempo base del hidrograma es:

$$t_b = \frac{5.56}{(q_p/A)} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$W_{50} = 2.14 \left(\frac{q_p}{A} \right)^{-1.08} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$W_{75} = 1.22 \left(\frac{q_p}{A} \right)^{-1.08} \quad \text{Ecuación 21}$$

W_{75} se encuentra a 1/3 del tiempo al pico del hidrograma calculado en la Ecuación 24 y W_{50} a 2/3 del mismo.

A continuación se debe calibrar el valor de t_R , teniendo en cuenta la siguiente consideración:

$$\text{Si } t_{pr} = t_p \text{ entonces } TT_R = t_r \quad \text{Ecuación 22}$$

En caso que esta consideración no se cumpla

$$TT_R = t_R \quad \text{Ecuación 23}$$

El tiempo correspondiente al caudal pico se calcula con la Ecuación 24:

$$\frac{T_R}{2} + t_{pR} = t_p \quad \text{Ecuación 24}$$

Finalmente se organizan los datos para graficar así

Tabla 1. Cálculos para la construcción del hidrograma unitario sintético

Tiempo (h)	Caudal (m ³ /s)
0	0
$T_p - (1/3 \cdot W_{50})$	$0.5 \cdot q_p$
$T_p - (1/3 \cdot W_{75})$	$0.75 \cdot q_p$
$T_p = TT_R/2 + t_{pR}$	q_p
$T_p + (2/3 \cdot W_{75})$	$0.75 \cdot q_p$
$T_p + (2/3 \cdot W_{50})$	$0.5 \cdot q_p$
T_b	0

1.3 Conceptos de hidráulica

El uso de conceptos hidráulicos, constituye para el presente trabajo de grado una herramienta fundamental a la hora de la aplicación de los métodos de diseño existentes y del método propuesto de simulación. A continuación, se explican los conceptos empleados:

1.3.1 Conductividad hidráulica (k)

La permeabilidad o conductividad hidráulica se puede definir como la propiedad que tiene un material poroso de permitir la filtración de fluidos a través de poros o vacíos interconectados.

La ley más utilizada que regula, en una primera aproximación, el movimiento de las aguas subterráneas, ley de Darcy, relaciona la velocidad media v y el caudal de agua que fluye a través de una sección de material poroso, con el gradiente hidráulico h/l (es decir la relación entre la diferencia de carga hidráulica entre dos puntos de recorrido h , y la longitud de ese recorrido l) y con una constante de proporcionalidad k , que recibe el nombre de coeficiente de permeabilidad (Carcedo y Posse, 2006):

$$v = k \frac{h}{l}$$

Ecuación 25

1.3.2 Porosidad

La porosidad se define como el porcentaje del volumen de material poroso que no está ocupado por material sólido. En un material poroso libre de agua, el espacio poroso está totalmente ocupado por aire. Los poros en un material poroso húmedo se encuentran ocupados por agua y aire. La mayoría de los cálculos de porosidad están basados en cálculos de densidad aparente del material poroso a cierto contenido de humedad y de la densidad de partículas de dicho material (Leiton Soubannier, 1985).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se describen las metodologías de diseño existentes para pavimentos porosos rígidos, las características y propiedades hidráulicas del pavimento poroso rígido utilizado, la zona de estudio con sus características físicas e hidrológicas y las herramientas computacionales que fueron empleadas para el desarrollo de este trabajo de grado.

2.1 Metodologías de diseño

A continuación se describen los métodos para el dimensionamiento de estructuras de retención, tales como trincheras de infiltración, pavimentos porosos, pozos de infiltración, entre otras; las cuales han sido estudiadas y desarrolladas por diferentes autores de diferentes países. En esta revisión se hizo especial énfasis en los métodos aplicables al diseño de pavimentos porosos.

2.1.1 Método de la curva envolvente (Lopes da Silveira y Avruch Goldenfum, 2007)

Mediante este método, la curva de masa (en el tiempo) de los volúmenes afluentes del dispositivo es comparada con la curva de la masa de los volúmenes efluentes, y la máxima diferencia entre las dos curvas corresponde al volumen de almacenamiento. El método puede ser adaptado para cualquier técnica alternativa (es decir pavimento poroso, trincheras de infiltración, depósitos de retención, entre otros) en el cual se prevea algún volumen de almacenamiento.

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

H_E : Lámina de agua de entrada acumulada sobre el área en planta de la estructura de

pavimento

H_s : Lámina de agua de salida acumulada, también medida sobre el área en planta del pavimento

H_E se construye tomando la IdF multiplicada por el tiempo (que viene a ser una HdF) y contemplando factores de escurrimiento y relaciones de áreas aportantes de la cuenca hacia el pavimento.

Teniendo en cuenta Ecuación 7 de Talbot, la cual permite solucionar explícitamente el volumen máximo se obtiene H_E , en mm.

$$H_E = R \frac{a \cdot T^b}{d + c} \frac{d}{60} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde R es la relación entre el área de drenaje y la zona de infiltración.

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

$$H_s = \gamma \cdot H_{\max} \cdot f \frac{d}{60} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

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

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

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

d : Duración de la lluvia (min)

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial(H_E - H_s)}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 28}$$

Utilizando las expresiones anteriores, se obtiene la siguiente ecuación:

$$R \frac{a \cdot T^b}{(d + c)} \left[1 - \frac{d}{t + c} \right] - \gamma \cdot H_{\max} \cdot f = 0 \quad \text{Ecuación 29}$$

Al simplificar la Ecuación 29, se obtiene:

$$R \frac{c \cdot a \cdot T^b}{(d + c)^2} - \gamma \cdot H_{\max} \cdot f = 0 \quad \text{Ecuación 30}$$

Despejando el tiempo, se tiene:

$$d = \sqrt{\frac{R \cdot c \cdot a \cdot T^b}{\gamma \cdot H_{\max} \cdot f}} - c \quad \text{Ecuación 31}$$

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

$$V_{alm} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{RT}^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma \sqrt{H_{\max}} \sqrt{f}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 32}$$

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

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

Se admite que las técnicas alternativas de infiltración (pavimentos porosos, micro reservorios infiltrantes, trincheras, *etc.*) permiten la infiltración en el suelo de todo el exceso pluvial que reciben, por lo tanto, las áreas por ellas controladas tendrán una escorrentía superficial nula para el periodo de retorno del proyecto.

Las técnicas alternativas de almacenamiento, las cuales no contemplan infiltración en el suelo (incluyendo los estanques de detención y retención con lechos impermeables) serán

dimensionadas a su vez para liberar el flujo máximo considerando una restricción de flujo en l/s por hectárea, por lo tanto las áreas por ellas controladas tendrán un escurrimiento superficial del proyecto igual a esa restricción de flujo, para el periodo de retorno.

Por último, las técnicas alternativas de almacenamiento con infiltración en el suelo (como los estanques de detención y retención con lechos permeables) serán dimensionadas para liberar una escorrentía máxima equivalente a la restricción de flujo, la cual corresponde a la infiltración en el suelo que se utiliza para reducir las dimensiones de la técnica alternativa, por lo tanto, incluso con esta infiltración, las zonas que controlan la escorrentía del proyecto tendrán la restricción de flujo correspondiente al periodo de retorno para el cual se está diseñando.

Para resumir, se debe analizar el flujo de escorrentía por zonas de manejo principales mediante técnicas alternativas y en las áreas no controladas se debe asegurar de que todo nuevo desarrollo genere como máximo el caudal correspondiente a la restricción de flujo local. Puede haber áreas no controladas, que generen más de la restricción de flujo, pero esto debe equilibrarse con las zonas controladas por las técnicas alternativas.

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

$$\sqrt{\gamma}\sqrt{H_{\max}} = 1 \quad \text{Ecuación 33}$$

Luego:

$$V_{alm} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{RT}^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{q_s} \right)^2 \quad \text{Ecuación 34}$$

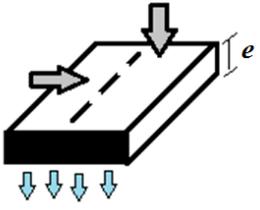
A partir de V_{alm} , el cálculo del espesor de la zona de reservorio del pavimento es obtenido fácilmente por:

$$e = \frac{V_{alm}}{\eta} \quad \text{Ecuación 35}$$

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

A manera de síntesis del método descrito anteriormente, se presenta la siguiente tabla:

Tabla 2. Ecuaciones de pre-dimensionamiento de pavimentos porosos rígidos (Lopes da Silveira y Avruch Goldenfum, 2007)

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

2.1.2 Metodología Chile (Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas [DICTUC], 1996)

La aplicación de la presente metodología inicia con la selección de una lluvia de diseño. La DICTUC recomienda dimensionar el volumen de almacenamiento de la subbase seleccionando una lluvia de diseño del mayor periodo de retorno entre los siguientes: T= 5 años si hacia aguas abajo existe una red de drenaje bien desarrollada o T= 10 años si no existe una red de drenaje bien desarrollada.

Sin perjuicio de lo anterior, la Municipalidad donde se ubique la obra podrá proponer periodos de retorno mayores a los indicados, de acuerdo a las condiciones del lugar o de servicio de la obra.

Dada una lluvia de diseño, el volumen de almacenamiento se estima como la máxima diferencia entre el volumen acumulado de aguas lluvias que recibe la subbase y el volumen acumulado infiltrado.

La tasa de infiltración del terreno debe estimarse con base en ensayos in situ, tomando el promedio de los valores obtenidos en diferentes lugares representativos de ensayos realizados al nivel de la subrasante de acuerdo al método estándar.

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

$$V_{afl}(d) = 1.25(0.001C \cdot I_d \cdot Ad) = 0.00125C \cdot A \cdot P_d^T \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde:

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

El valor de V_{afl} en función de d se denomina “curva de recarga”. Se recomienda multiplicar por un factor de seguridad de 1.25 el volumen acumulado para considerar la porción de lluvia que cae antes y después de la porción más intensa de la tormenta, no incluida en las curvas IdF.

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

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

Ecuación 37

Donde:

f : Capacidad de infiltración del suelo (mm/h)

A_{pav} : Área del pavimento poroso (m²)

d : Tiempo acumulado de lluvia (h)

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

Se recomienda calcular el coeficiente C_s según el siguiente procedimiento:

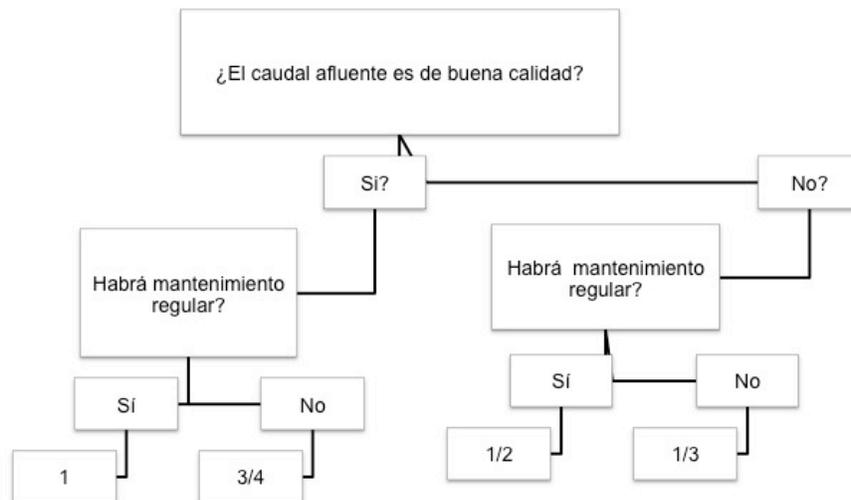


Figura 3. Metodología para el cálculo del C_s de acuerdo al mantenimiento y a la calidad del afluente (Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas [DICTUC], 1996)

El volumen de almacenamiento necesario se calcula como:

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

Ecuación 38

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

El espesor necesario de la subbase es:

$$e = V_{alm}/(\eta \cdot A_{pav})$$

Ecuación 39

Donde η es la porosidad del material de la subbase.

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

$$t_m = \frac{\eta \cdot e}{C_s f}$$

Ecuación 40

Donde:

- e : Espesor definitivo asignado a la subbase (mm)
- f : Tasa de infiltración del suelo o de la subrasante (mm/h)
- C_s : Coeficiente de seguridad adoptado
- η : Porosidad del relleno de la subbase

2.1.3 The SUDS manual, CiriaC697 (Woods-Ballard *et al.*, 2007)

Según The SUDS *manual*, en el diseño de sistemas de infiltración, una de las mayores incertidumbres es determinar el coeficiente de infiltración del suelo, ya que éste varía con el tiempo. Por esta razón se debe introducir un factor de seguridad en el procedimiento del diseño y así se podrá reducir el valor del coeficiente de infiltración. Los valores sugeridos para el factor se muestran en la tabla siguiente. Estos factores tienen en cuenta la posible pérdida de capacidad de infiltración del suelo a lo largo de la vida útil del sistema.

Tabla 3. Factores de seguridad sugeridos para el diseño de sistemas de infiltración

Tamaño de la zona que va ser drenada	Consecuencia de falla		
	Ningún daño o inconveniente	Inconvenientes de menor importancia (por ejemplo, aguas superficiales en estacionamientos)	Daños a edificios o estructuras, o inconvenientes mayores (por ejemplo, inundaciones en carreteras)
< 100 m ²	1.5	2.0	10.0
100 – 1000 m ²	1.5	2.0	10.0
> 1000 m ²	1.5	2.0	10.0

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

En el procedimiento establecido a continuación, se asegura que las aguas lluvias serán infiltradas a través de la superficie inferior del sistema en el suelo a la velocidad requerida. Para los sistemas tales como pavimentos porosos que tienen una superficie hecha de asfalto poroso o bloques de hormigón, la velocidad a la que el agua puede infiltrarse a través de la superficie, la falla puede ocurrir debido a una infiltración superficial pobre, mas no debido a la baja infiltración en el suelo circundante. El diseñador debe asegurar la capacidad de infiltración de la superficie del material seleccionado.

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

$$H_{max} = \frac{d}{\eta} (R \cdot I - f) \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde:

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

$$R = \frac{A}{A_{pav}} \quad \text{Ecuación 42}$$

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

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

A_{pav} : Área del sistema de infiltración (m²).

A : Área a ser drenada o área total de la cuenca (m²).

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

La porosidad puede ser obtenida en ensayos de laboratorio. A continuación en la tabla siguiente se presentan unos valores típicos:

Tabla 4. Porosidad de materiales (Woods-Ballard *et al.*, 2007)

Material	Porosidad	η
Sistemas geocelulares	0.90	0.95
Piedra limpia	0.40	0.50
Grava uniforme	0.30	0.40
Arena graduada o grava	0.20	0.30

A continuación se describe el procedimiento que se deberá seguir para el diseño de sistemas de infiltración: (i) Inicialmente se debe obtener el coeficiente de infiltración f (m/h) dividiendo la tasa de infiltración obtenida mediante ensayos de campo por un factor de seguridad apropiado; (ii) obtener la porosidad del material granular empleado para el relleno; (iii) Decidir el área a ser drenada A (m²) y el área superficial de infiltración A_{pav} (m²) y calcular la relación de drenaje, R , donde $R = A/A_{\text{pav}}$; (vi) seleccionar la duración de la lluvia, d (h) y determinar la intensidad de lluvia correspondiente I (m/h); (v) comprobar si f supera $R.I$. Si es así, la tasa de infiltración excede la tasa potencial de escorrentía, en cuyo caso $H_{\text{max}} = 0$, de lo contrario calcular el valor de H_{max} (m); (vi) Repetir los pasos (iv) y (v) para un rango de duración de las precipitaciones, y construir una hoja de cálculo o una tabla de resultados. Por último seleccionar el mayor valor de H_{max} .

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

$$H_{\text{max}} = \frac{d}{\eta} (I - f) \quad \text{Ecuación 43}$$

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

$$H_{\text{max}} = d(I - f) \quad \text{Ecuación 44}$$

2.1.4 Método Digest 365 (Soakaway design Digest 365, 2012)

El método de diseño para dimensionar una trinchera de infiltración está basado en la siguiente ecuación:

$$V_{afl} - V_{inf} = V_{alm} \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde:

V_{afl} : Volumen de entrada proveniente del área impermeable drenada por la trinchera de infiltración

V_{inf} : Volumen de salida que se infiltra en el suelo durante el evento de precipitación

V_{alm} : Tasa de almacenamiento temporal requerido por la trinchera de infiltración el cual balancea la entrada y la salida.

Para el cálculo del volumen de entrada a la trinchera de infiltración, se utiliza la siguiente expresión:

$$V_{afl} = A \cdot P \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde:

A: El área impermeable drenada a la trinchera de infiltración.

P: La precipitación total en una lluvia de diseño (se recomienda utilizar un periodo de retorno de 10 años).

Mediante la siguiente expresión se define el cálculo del volumen de salida desde la trinchera de infiltración:

$$V_{inf} = \alpha_{50} \cdot f \cdot d \quad \text{Ecuación 47}$$

Donde:

α_{50} : Área superficial interna de la trinchera de infiltración con una superficie efectiva del 50 % (esto excluye el área de la base, la cual se asume que se colmata con material fino, volviéndose ineficiente a largo plazo)

f : Tasa de infiltración del suelo determinada en campo

d : Duración de la tormenta

La tasa de almacenamiento temporal requerido de la trinchera de infiltración debe ser igual o mayor que el flujo de entrada menos el de salida, denotados en la Ecuación 46 y la Ecuación 47, y es el volumen efectivo disponible requerido en la estructura.

Es recomendable llevar a cabo la investigación del sitio con el fin de determinar la infiltración del suelo, definir la clase de construcción (trincheras de infiltración, o unidades de concreto con revestimiento granular), calcular el volumen de almacenamiento requerido V_{alm} de flujo de entrada menos de salida para un rango de duraciones de una tormenta de diseño de 10 años, con el fin de determinar el máximo almacenamiento para el tipo de trinchera escogido y revisar el diseño con el fin de asegurar su completa sostenibilidad, considerando los requerimientos de espacio, distribución espacial y el tiempo de vaciado.

Este método de diseño contiene supuestos, los cuales aumentan el factor de seguridad, evitando la inundación de la superficie de diseño. Estos supuestos son:

- El porcentaje de escorrentía es tomado como el 100 % del área drenada, por lo tanto no se hace ninguna reducción al volumen de escorrentía de diseño descargado a la trinchera por pérdidas debido a la humedad de las superficies o en detenciones superficiales durante la tormenta.
- Se asume una descarga instantánea a la trinchera de infiltración.
- El flujo de salida de la trinchera de infiltración es subestimado; las tasas de infiltración mayores se dan a mayores profundidades del almacenamiento en la práctica que las que son adoptadas en el diseño. Debido que el flujo de salida es calculado en base a la duración de la precipitación, y no en la duración de escorrentía, este podría ser considerado más largo dependiendo de la longitud de los drenes utilizados.

2.1.5 Los métodos franceses (Azzout *et al.*, 1994)

Según Azzout *et al.* (1994), estos métodos son simplificados en la medida en que sólo permiten hacer un dimensionamiento. Los dos métodos presentados (específico y método de los volúmenes), se basan en dos hipótesis: (i) el caudal de salida de la estructura de

almacenamiento es constante; (ii) hay una transferencia instantánea de lluvia a la estructura de almacenamiento.

Adicionalmente, los fenómenos de amortiguamiento debido a la escorrentía en la cuenca son ignorados. Esto significa que estos métodos serán aplicables sólo a cuencas hidrográficas relativamente pequeñas, es decir menores a 2 ha (Monsalve Sáenz, 1995).

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

El caudal de salida está generalmente dado por unas limitaciones establecidas por los servicios técnicos, en la presentación de los permisos de construcción. Algunas comunidades imponen como caudal límite aquel producido por la zona antes de haber sido urbanizada o en un estado de la urbanización muy por debajo del actual.

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

El caudal de salida Q_s se calcula como:

$$Q_s = C_s \cdot f \cdot A_{pav} \qquad \text{Ecuación 48}$$

Dónde.

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

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

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

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

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

En el cálculo de la superficie S_a se tiene en cuenta las superficies involucradas en la escorrentía y que son drenadas por la estructura de pavimento así como la estructura de almacenamiento que se está diseñando.

La superficie activa S_a se calcula como:

$$S_a = C \cdot A$$

Ecuación 49

Dónde.

C : Coeficiente de aporte

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

Según Azzout *et al.* (1994), una de las dificultades de utilizar los métodos simplificados radica en la determinación del coeficiente de aporte C . Este es el coeficiente que se utiliza para tomar en cuenta únicamente la fracción de la lluvia que llega efectivamente a la salida de la cuenca considerada. Cuando en la alimentación de las cuencas hidrográficas la retención es altamente urbanizada, se puede asumir C como el coeficiente de impermeabilización (proporción de superficies impermeables que contribuyen a la escorrentía en toda la superficie de la cuenca). Pero cuando la cuenca es heterogénea y contiene áreas naturales, su estimación se dificulta: C en este caso difiere en gran medida del coeficiente de impermeabilización. La relación C es variable en función del tipo de suelo, del estado de humedad del suelo al comienzo de la lluvia. La literatura ofrece valores típicos promedio de estos coeficientes basados en los tipos de suelo (densidad tipo de espacio de vivienda, tipo de cubierta vegetal..., *etc.*). A falta de mediciones específicas, dichos valores pueden ser utilizados. Se da como ejemplo la Tabla 4, la cual puede utilizarse para el cálculo del coeficiente de aporte C en un área urbana heterogénea. A partir de coeficientes de escorrentía de 10 años C_i correspondientes a superficies homogéneas S_i para n áreas pertenecientes a la cuenca heterogénea:

$$C_a = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

Ecuación 50

Tabla 5. Coeficientes decimales de escorrentía de áreas homogéneas utilizados para calcular el coeficiente de aporte para zonas urbanas heterogéneas (Azzout *et al.*, 1994)

espacios verdes, paisaje, campos deportivos	0.25 a 0.35
<u>Vivienda individual (unidades/ha)</u>	
12	0.40
16	0.43
20	0.45
25	0.48
35	0.52
<u>Vivienda colectiva (unidades/ha)</u>	
50	0.57
60	0.60
80	0.70
Instalaciones públicas	0.65
Áreas de actividades	0.70
Supermercados	0.80 a 0.90
Estacionamientos, carreteras	0.95

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

a) El método de las lluvias

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

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

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

metodologías, se explican en el numeral 1.2.3, a continuación se muestra la representación gráfica de estas curvas.

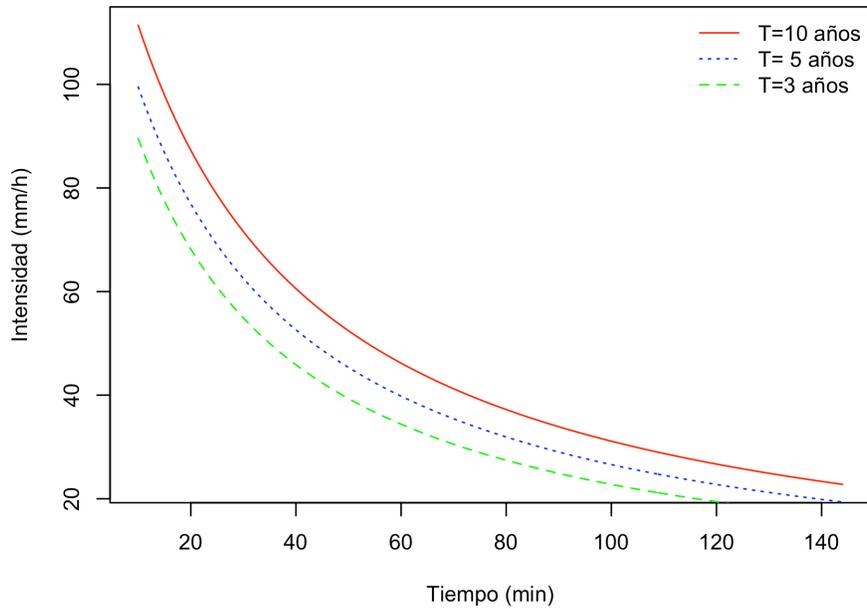


Figura 4. Curvas de Intensidad-duración-Frecuencia

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

$$H(d,T) = I(d,T) \cdot d \qquad \text{Ecuación 51}$$

La anterior expresión fue utilizada para las curvas IdF de la zona de estudio, arrojando la HdF que se muestra a continuación.

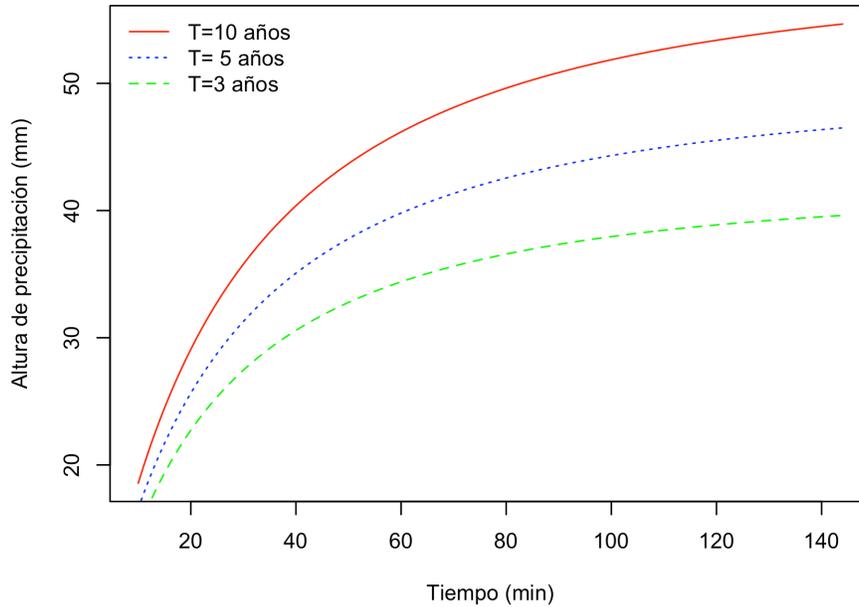


Figura 5. Curvas de Altura-duración-Frecuencia

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

Para construir curvas HdF a partir de series de lluvia, se pueden hacer directamente recuentos de alturas. En un conjunto de episodios de lluvias medidos para N años, se identifican las N alturas máximas anuales H_{\max} para diferentes intervalos de tiempo d . A partir de esta información es posible construir una clasificación de los valores de frecuencia H_{\max} para determinar directamente las curvas Altura-duración-Frecuencia. Esto evita hacer aproximaciones en el suavizado de las curvas IdF.

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

$$q_s = 360 Q_s / S_a \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde:

Q_s Caudal de salida, en m^3/s (ver Ecuación 48)

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

Con base en lo anterior, es posible extraer conjuntamente la altura de precipitación a un periodo de retorno dado $H(d,T)$ y la curva que describe la evolución temporal de la altura de descarga de agua $q_s.d$ en función de la duración de la evacuación d . Esto se evidencia a continuación en la Figura 6.

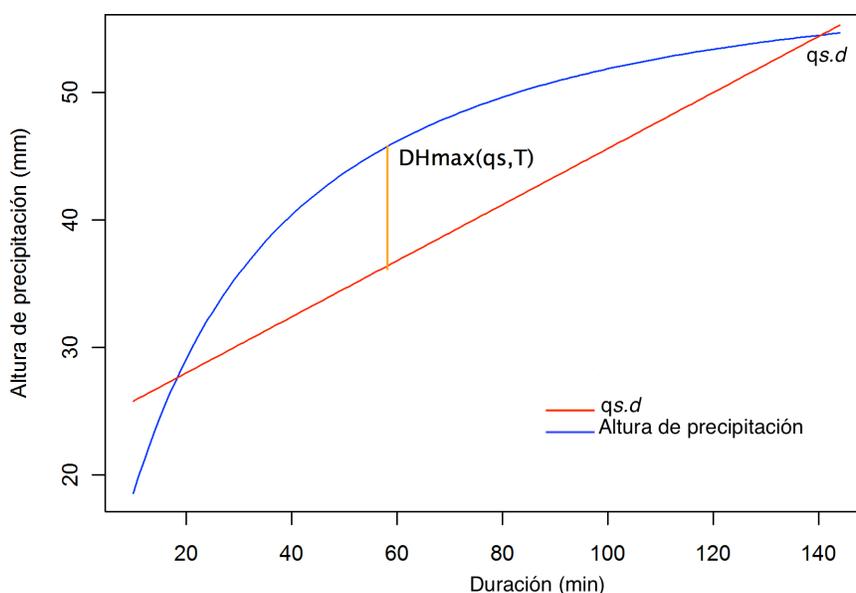


Figura 6. Superposición de la curva Altura-duración para una frecuencia elegida y la curva de evacuación

En la Figura 7 se evidencia que las diferencias $DH(q_s,T,d)$ entre la curva $q_s.d$ y $H(d,T)$, corresponden a las alturas a almacenar para diferentes duraciones d . La diferencia máxima $DH_{\max}(q_s,T)$ corresponde a la altura total de almacenamiento necesaria para evitar desbordamientos. El volumen de agua almacenada se determina por:

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

Ecuación 53

Donde:

S_a : Área activa en ha

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

b) Método de los volúmenes

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

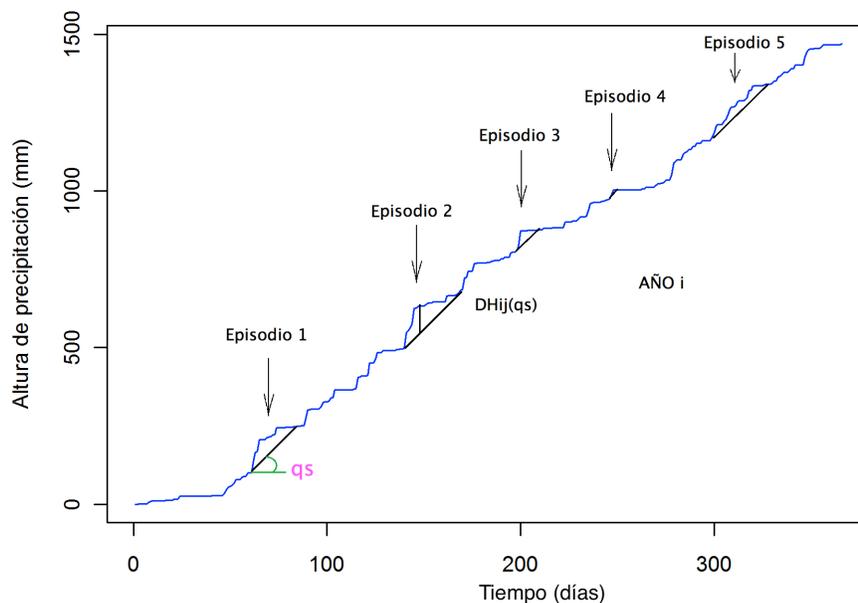


Figura 7. Curva de alturas acumuladas en un año

Para cada año i , para cada evento de lluvia j y para cada caudal específico q_s , se calcula la altura $DH_{ij}(q_s)$ que es la diferencia entre la curva de alturas acumuladas para cada episodio y la de evacuación $q_t.d$. Se determinan los valores máximos anuales y se realiza la clasificación frecuencial de estos valores máximos como se muestra a continuación.

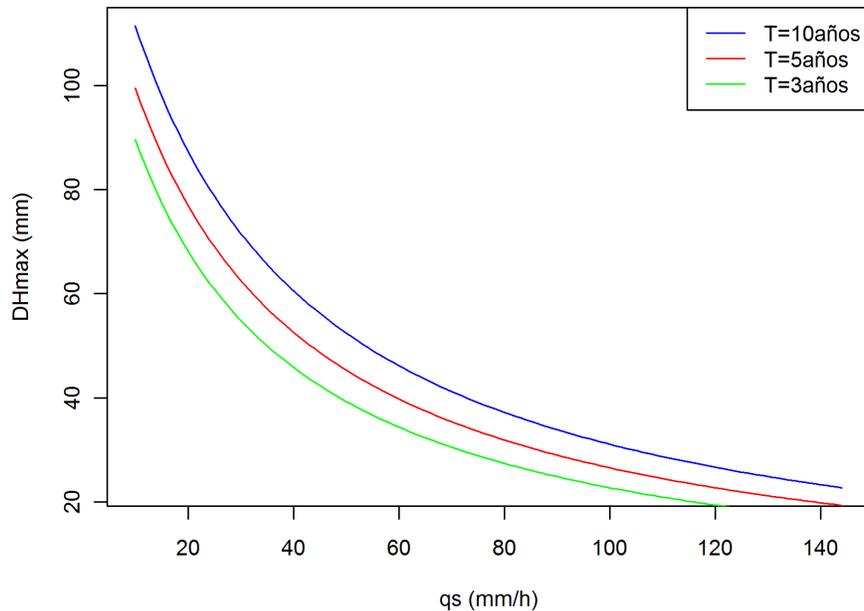


Figura 8. Curvas para la determinación de la altura específica

El volumen se determina mediante la Ecuación 53, al igual que para el método de las lluvias).

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

2.2 Modelo de pavimento poroso (Gómez *et al.*, 2010)

Este trabajo se desarrolló recolectando agua de escorrentía mediante dispositivos ubicados en sumideros seleccionados sobre la carrera 7ª entre calles 39 y 45 en la ciudad de Bogotá,

y determinando concentraciones de contaminantes asociados (Sólidos Suspendidos Totales – SST y Demanda Química de Oxígeno – DQO) antes y después de atravesar la muestra de pavimento poroso. Lo anterior permitió estimar las capacidades de retención de contaminantes asociadas a dicha estructura y los periodos de funcionamiento antes de la colmatación. Se halló que el modelo de pavimento ensayado retiene aproximadamente el 55 % en SST y 15 % en DQO. La durabilidad de las capacidades filtrantes del pavimento en cuestión es de ocho meses aproximadamente debido a la alta carga de contaminantes presentes en el agua de escorrentía muestreada.

Antes de realizar las pruebas hidráulicas y de calidad de aguas, fue necesario construir el modelo físico de la capa de concreto rígido poroso que simulara la capa de rodadura de un pavimento rígido con una superficie de 45 cm x 55 cm y un espesor de 20 cm. El modelo físico de la capa de concreto rígido poroso se basó en el diseño propuesto por Reyes y Torres (2002), el cual garantiza una porosidad del 18 %. Luego de obtener el modelo con la dosificación especificada, se selló el pavimento con láminas de acrílico por cada lado para asegurar que toda el agua que se vertía sobre la superficie iba a ser infiltrada dentro de la estructura de pavimento y así poder garantizar que el volumen total de entrada fuera igual al de salida. Se ubicó el modelo sobre cuatro soportes de concreto de tal forma que quedara en una posición elevada para colocar el recipiente plástico en la parte inferior que iba a recolectar el agua a la salida de la estructura como lo muestra la Figura 9.



Figura 9. Modelo físico de la capa de concreto rígido poroso y dispositivos de vertimiento y recolección (Gómez *et al.*, 2010)

En el modelo físico se realizaron una serie de pruebas con el propósito de estimar las capacidades hidráulicas del pavimento nuevo (y por lo tanto se utilizó agua potable), estimar la evolución de las capacidades hidráulicas del pavimento al ser sometido a muestras de agua lluvia de escorrentía hasta alcanzar su colmatación y evaluar la recuperación de las capacidades hidráulicas del pavimento como resultado de un lavado, el cual pretendía simular un mantenimiento.

Con las pruebas mencionadas anteriormente se obtuvieron caudales de salida para diferentes condiciones del pavimento y con un caudal de entrada 6 l/s. Los caudales de salida en l/s para colmatado, rehabilitado y nuevo son, 0.0082, 0.0541 y 0.207, respectivamente. Estos resultados ponen en evidencia que el pavimento nuevo presenta el mayor caudal de salida. Adicionalmente se demostró que después de la colmatación las propiedades hidráulicas pueden ser recuperadas mediante una rehabilitación, aunque no totalmente.

2.3 Zona de estudio

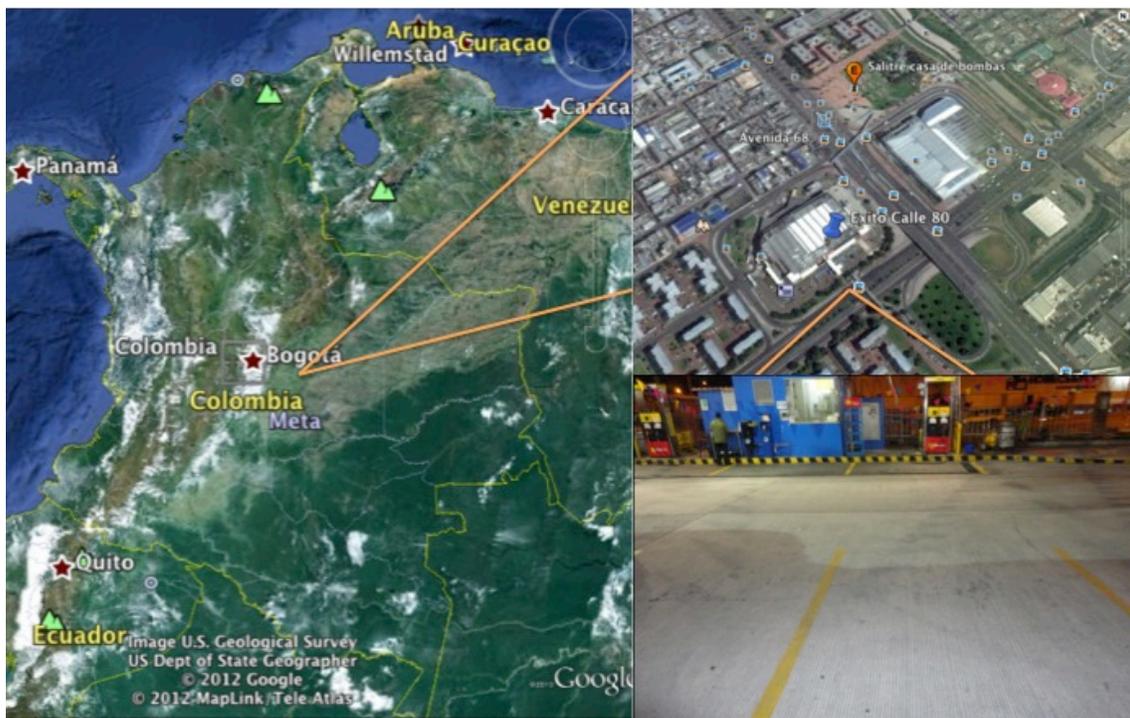


Figura 10. Localización Bogotá, Colombia, zona de estudio y estación pluviográfica (Google earth)

En este apartado se describirán las características del lugar de estudio que serán utilizadas en el desarrollo de las metodologías de diseño, al igual que en la aplicación del método propuesto de validación.

El lugar de estudio fue seleccionado arbitrariamente, éste corresponde al Éxito ubicado en la calle 80 con Av. 68 (Bogotá D.C.).

Como ejercicio académico en este trabajo de grado se planteó la posibilidad de realizar el diseño de un pavimento poroso a ser construido en la zona de parqueo del establecimiento comercial, que cuenta con un área de 172.80 m^2 (Ver Figura 11). Las características del diseño de mezcla empleadas para éste trabajo de grado, son aquellas encontradas mediante el modelo realizado por Gómez y Rodríguez las cuales se describen en el numeral 2.2.

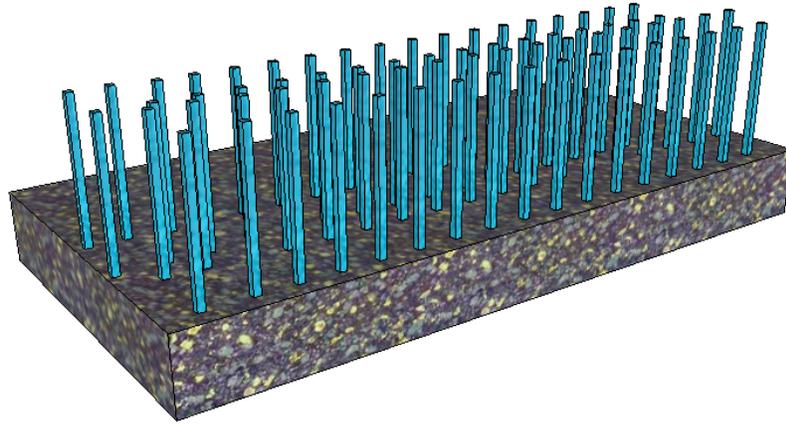


Figura 11. Estructura de pavimento poroso (No se considera una capa de almacenamiento inferior o suelo granular

Este parqueadero hace parte del supermercado de dos pisos, cuya área total aportante es de 801.80 m^2 que corresponde a la suma entre el área de techos igual a 619 m^2 , los pavimentos peatonales impermeables que aportan al pavimento poroso rígido y que en total suman 10 m^2 y la misma estructura de pavimento poroso de 172.80 m^2 .

Se podrían considerar dos formas de drenaje: evacuación localizada y evacuación distribuida (ver Figura 12). En el caso de evacuación localizada, ésta dependerá del diámetro de las tuberías de drenaje. A continuación se muestran los esquemas de la forma en que el pavimento con inyección distribuida sería drenado, es importante aclarar que la forma de drenaje dependerá del suelo que se encuentre en la cara inferior del pavimento. Para este caso de estudio se consideró un pavimento poroso rígido con evacuación distribuida donde son permeables su cara superior e inferior y el agua sale libremente por toda la superficie correspondiente a la cara inferior y donde no fue considerado el suelo bajo la estructura.

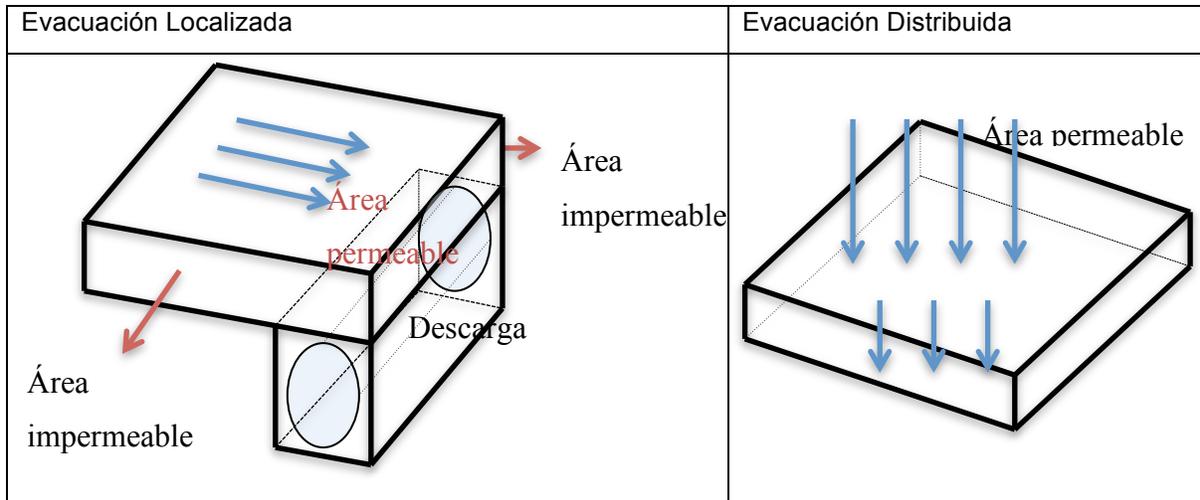


Figura 12. Formas de drenaje (Azzout *et al.*, 1994)

Los coeficientes de escorrentía utilizados son: 0.85 para techos, 0.95 para edificaciones y 1 para pavimentos porosos (Lopes da Silveira y Avruch Goldenfum, 2007).

La información hidrológica utilizada corresponde a la estación pluviográfica más cercana al sitio de estudio, correspondiente a Salitre Casa de Bombas, ubicada en la avenida 68 con calle 80 con coordenadas 1009100 N,1000100 E

2.3.1 Información hidrológica horaria

Los pluviogramas utilizados corresponden al periodo comprendido entre el 31 de marzo de 2008 y el 7 de septiembre de 2011. La anterior información fue suministrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en el marco del contrato administrativo celebrado entre la PUJ y la EAAB N° 9-07-25100-0763-2010.

Las fotos de los pluviogramas y las tablas de la información procesada, se encuentran en el Anexo 1.

2.3.2 Información hidrológica diaria

La información hidrológica diaria disponible comprende el periodo del 1 de enero de 2008 al 7 de septiembre de 2011. Esta información fue suministrada por la empresa de Acueducto y Alcantarillado en el marco del contrato administrativo celebrado entre la PUJ

y la EAAB N° 9-07-25100-0763-2010. La información hidrológica diaria se encuentra en el Anexo 2.

2.3.3 Curvas IdF

A continuación se muestran las curvas IdF de la zona, construidas a partir de la información hidrológica suministrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado.

Las curvas IdF fueron construidas para periodos de retorno típicos, 3, 5 y 10 años. A continuación se presentan las ecuaciones de Montana, explicadas en el numeral 1.2.3

Tabla 6. Ecuaciones IdF de Montana para la zona de estudio, estación Salitre Casa de Bombas

Periodo de retorno en años		
3	$I = 3773.7 \times (24.1 + d)^{-1.06}$	Ecuación 54
5	$I = 4493.5 \times (26.4 + d)^{-1.06}$	Ecuación 55
10	$I = 5354.5 \times (28.6 + d)^{-1.06}$	Ecuación 56

Donde:

I intensidad en mm/h

d duración en minutos

La representación gráfica de las ecuaciones de la Tabla 6, se muestran en la siguiente Figura, para periodos de retorno de 3, 5 y 10 años.

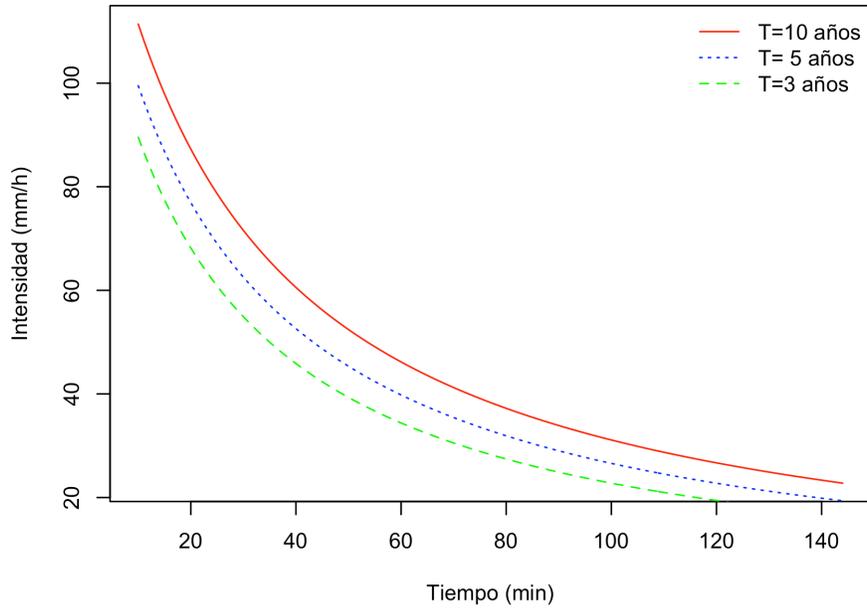


Figura 13. Curvas IdF para la estación Salitre Casa de Bombas

2.3.4 Curvas HdF

Las curvas HdF se construyeron a partir de las curvas IdF, multiplicando la intensidad por la duración. A continuación se encuentran las ecuaciones que describen estas curvas para periodos de retorno de 3, 5 y 10 años.

Tabla 7. Ecuaciones HdF para la zona de estudio, estación Salitre Casa de Bombas

Periodo de retorno en años		
3	$P = 3773.7 \times (24.1 + d)^{-1.06} \times D$	Ecuación 57
5	$P = 4493.5 \times (26.4 + d)^{-1.06} \times D$	Ecuación 58
10	$P = 5354.5 \times (28.6 + D)^{-1.06} \times d$	Ecuación 59

Donde:

P es la altura de precipitación en mm

d es la duración en minutos

D es la duración en horas

La representación gráfica de las ecuaciones de la Tabla 6, se muestran en la siguiente Figura, para periodos de retorno de 3, 5 y 10 años.

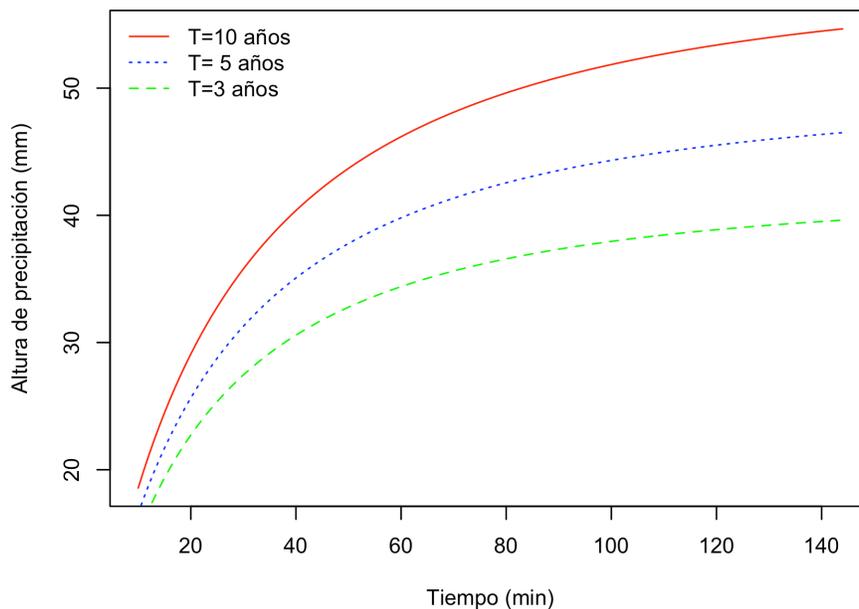


Figura 14. Curvas HdF para la estación Salitre Casa de Bombas

2.4 Herramientas computacionales

A continuación se definen las herramientas computacionales que fueron utilizadas para el desarrollo de este trabajo de grado. La primera herramienta, R statistics, fue utilizado para

realizar simulaciones de entrada y salida de agua en pavimentos porosos, simular la altura de almacenamiento y salida para diferentes métodos de diseño, en este apartado encontrarán su definición y las funciones que fueron utilizadas. Finalmente se define Get Data Graph Digitizer que se utilizó con el fin de optimizar la digitalización de los datos hidrológicos horarios obtenidos de los pluviogramas de la estación Salitre Casa de Bombas.

2.4.1 R Statistics

R es un conjunto integrado de servicios de software para la manipulación de datos, cálculo y representación gráfica.

R ofrece una amplia variedad de estadísticas (modelos lineales y no lineales, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series temporales, clasificación, agrupación,...) y técnicas gráficas. (<http://www.r-project.org/>)

Las funciones utilizadas de R se explican a continuación:

Función	Aplicación
read.table	Lee un archivo en formato de tabla y crea una serie de datos de este.
attach	La base de datos es conectado a la ruta de búsqueda de R. Esto significa que la base de datos es buscada por R cuando se esta evaluando una variable, por lo se puede acceder a los objetos en ésta, simplemente nombrándolos.
cumsum	Devuelve un vector cuyos elementos son las sumas acumuladas, productos, contenidos máximos o mínimos de los elementos del vector utilizado en el argumento.
c	Ésta es una función genérica que combina los argumentos. El método básico combina sus argumentos, formando un vector
tiff	Dispositivos para imágenes BMP, JPEG, PNG y TIFF en formato de mapa de bits.
plot	Función genérica para graficar los elementos u objetos de R
Lines	Adicionar una línea en una gráfica.
legend	Esta función puede ser utilizada para adicionar legendas a las gráficas.
While ,if	Estos son las estructuras básicas de control de flujos en el lenguaje de R
max	Entrega el valor máximo de unos datos de entrada

length	Calcula la longitud de vectores (incluyendo listas) , y factores y cualquier otro elemento de R para el cual un método haya sido definido.
seq	Genera secuencias regulares
approx	Entrega una lista de valores, los cuales interpolan unos datos inicialmente entregados o una función que se comporta como una interpolación lineal.
par	Se utiliza para establecer o cuestionar parámetros gráficos
matrix	Crea una matriz para un numero de valores
Is.na	Indica que elementos faltan (N/A)
rowSums	Suma las variables de una fila
Sum	Suma los valores de un vector o de variables
print	Muestra el valor de una variable

2.4.2 Get Data Graph Digitizer

Get Data Graph Digitizer es un programa que se utiliza para digitalizar gráficas, es usado normalmente con el fin de obtener las coordenadas (x,y) originales de las gráficas. Este programa permite obtener los valores numéricos de las gráficas cuando estos no se evidencian físicamente.

2.4.3 Microsoft Excel Solver

Solver es una herramienta para resolver y optimizar ecuaciones mediante el uso de métodos numéricos. Solver se puede utilizar para optimizar funciones de una o más variables, sin o con restricciones. Microsoft Excel Solver utiliza diversos métodos de solución, dependiendo de las opciones que se seleccionen. Para los problemas de programación lineal utiliza el método Simplex, para problemas lineales enteros utiliza “Branch and Bound” y para problemas no lineales utiliza el código de optimización no lineal (GRG2).

Con Solver, se puede buscar el valor óptimo para una celda, denominada celda objetivo, en donde se escribe la fórmula de la función objetivo $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Solver cambia los valores de un grupo de celdas, denominadas celdas cambiantes, y que estén relacionadas, directa o indirectamente, con la fórmula de la celda objetivo. En estas celdas se encuentran los valores de las variables de decisión x_1, x_2, \dots, x_n .

Los modelos más realistas tienen factores de restricción que es necesario aplicar a ciertos valores. Estas restricciones se pueden aplicar a las celdas de las variables de decisión (celdas cambiantes) o a cualquier otra celda que tenga una función (fórmula) de estas celdas.

Se puede agregar restricciones a Solver, escribiendo una fórmula $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ en una celda, y especificando que la celda deberá ser mayor o igual, igual, o menor o igual que otra celda que contiene la constante b_j .

También, de ser necesario, se pueden especificar que los valores sean enteros, para evitar resultados erróneos en algunos problemas (“Uso de solver”, 2012)

3. RESULTADOS AL APLICAR LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES

Para la aplicación de las metodologías fue necesario realizar dos cálculos preliminares que corresponden a: Interpolación de las curvas IdF para la zona de estudio (ver numeral 2.3) y cálculo de la capacidad de absorción por unidad de superficie del pavimento poroso rígido.

Inicialmente fue necesario interpolar las curvas IdF de 3, 5 y 10 años descritas en el numeral 2.3 para 2 y 4 años, lo anterior se realizó con el propósito de comparar los resultados de los diseños obtenidos mediante el método de validación que se describirá en el capítulo 4, el cual arroja espesores de pavimento asociados a periodos de retorno de 2, 3 y 4 años con las metodologías existentes de diseño que se aplicarán en este capítulo. Esta interpolación se realizó utilizando una regresión lineal para 2 y 4 años. Los valores obtenidos en la interpolación para diferentes duraciones se presentan en el Anexo 3. A continuación se muestran las curvas IdF iniciales y su interpolación:

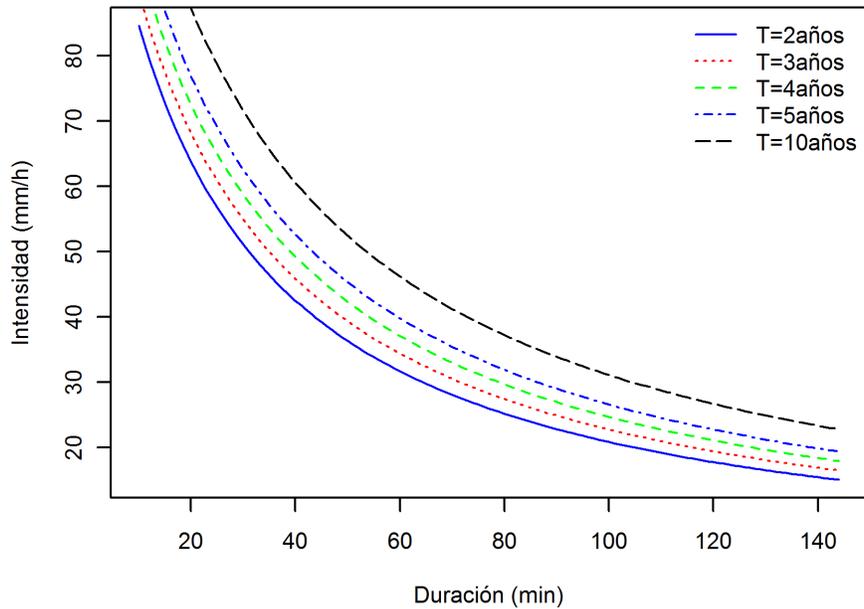


Figura 15. Curvas IdF de la zona de estudio para diferentes periodos de retorno

Esta interpolación fue ajustada a la ecuación de Montana, mediante la herramienta Solver de Excel, con la cual se ajustaron los parámetros C_1 , X_0 y C_2 a las curvas IdF interpoladas.

En la siguiente se encuentran los coeficientes que corresponden a la Ecuación 6 para periodos de retorno de 2 y 4 años.

Tabla 8. Parámetros ecuación de Montana de la zona de estudio para interpolaciones de IdF para 2 y 4 años

<i>T</i> (años)	Parámetros curva IDF		
	<i>C</i> ₁	<i>X</i> ₀	<i>C</i> ₂
2	3419.00	22.78	-1.06
4	4132.01	25.30	-1.06

Adicionalmente, para la aplicación de las metodologías existentes fue necesario calcular la capacidad de absorción del pavimento por unidad de superficie para cada condición (nuevo, rehabilitado y colmatado), de acuerdo a las características del modelo de pavimento. Esto se realizó a partir de los resultados mencionados encontrados por Gómez *et al.* (2010) el numeral 2.2. La capacidad de absorción del pavimento por unidad de superficie se calculó como el cociente entre el caudal de salida y la altura de precipitación por el área del modelo físico de Gómez *et al.*, 2010, multiplicado por cada altura de precipitación diaria y para cada condición del pavimento. Una vez realizado este cálculo se grafican los resultados y se busca la pendiente de la recta que más se ajusta a dichos resultados, la cual corresponde al valor promedio de la capacidad de absorción para cada condición. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

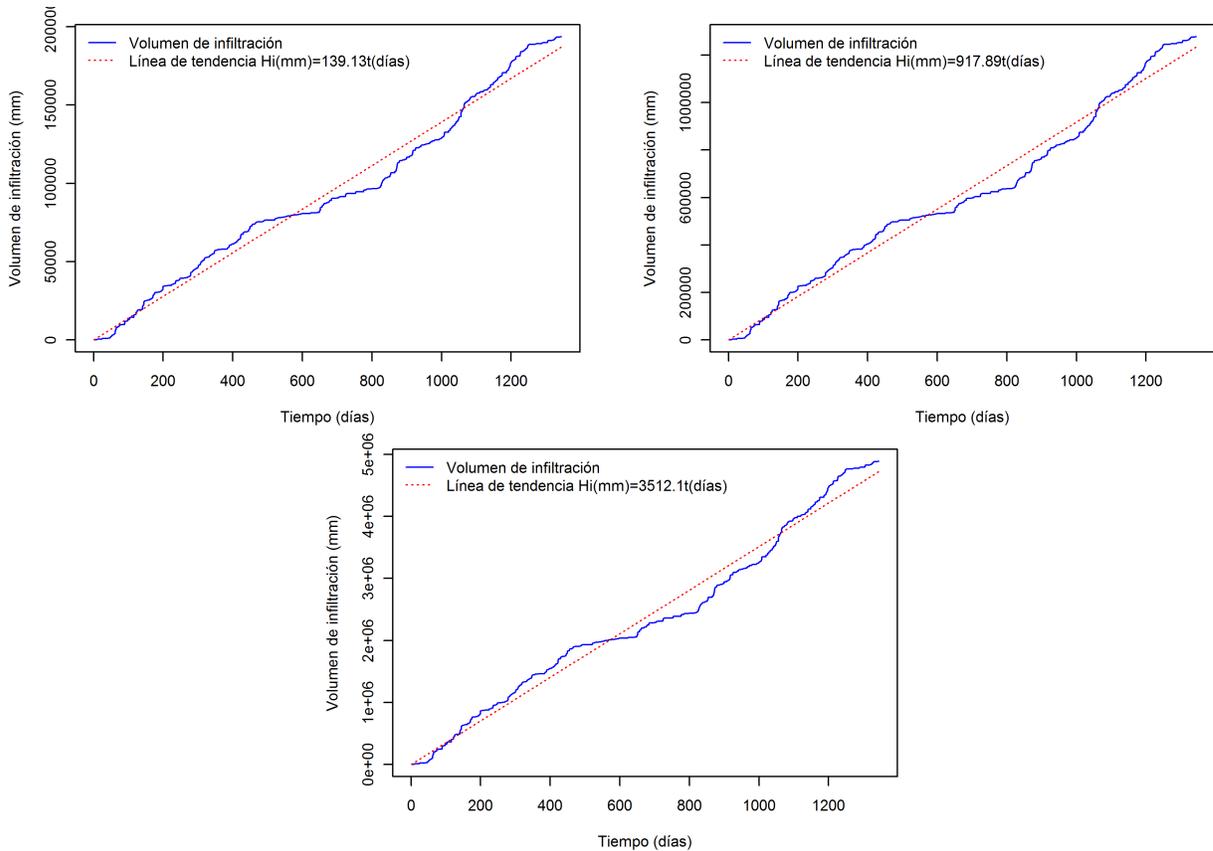


Figura 16. Cálculo de la capacidad de absorción para cada condición de pavimento: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Como se puede evidenciar en las gráficas anteriores, se halló la pendiente que describiera la capacidad de absorción promedio para diferentes condiciones del pavimento (colmatado, rehabilitado y nuevo). Los valores de capacidad de absorción promedio en mm/día son 139.13, 917.89 y 3512.1, respectivamente.

Para la condición de pavimento nuevo se obtuvo la mayor pendiente y por lo tanto la mayor capacidad de absorción, ya que la estructura de pavimento contaba inicialmente con todas sus propiedades filtrantes.

A continuación se describen los resultados obtenidos al aplicar las metodologías de diseño descritas en el numeral 2.1, teniendo en cuenta la zona de estudio seleccionada, así como el modelo de pavimento poroso utilizado.

3.1 Aplicación del método de la curva envolvente

Para la aplicación de este método es necesario conocer los factores a , b y c de Talbot, el valor del caudal de salida constante del pavimento, el valor de R el cual corresponde al producto del coeficiente de escorrentía C y la relación entre el área contribuyente y el área del dispositivo, y la porosidad η . Lo anterior se usa para determinar el volumen máximo de almacenamiento del pavimento poroso y finalmente su espesor o altura.

Usando las curvas IdF para la zona de estudio, las cuales fueron descritas en el numeral 2.3.3 (basadas en la ecuación de Montana), y su interpolación para periodos de retorno de 2 y 4 años se determinaron los factores de la ecuación de Talbot. Lo anterior se realizó mediante la herramienta Solver de Excel ajustando los parámetros a , b y c de Talbot a las curvas IdF de la zona de estudio para periodo de retorno entre 2 y 10 años (ver Figura 15). Los resultados se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Parámetros de Talbot ajustados para las curvas IdF de la zona de estudio

T (años)	Parámetro		
	a	b	c
2	2390.0	0.071	19.428
3	2395.0	0.131	20.642
4	2395.4	0.168	21.746
5	2395.0	0.196	22.754
10	4100.0	-0.021	24.778

Después se calculó el valor de R , los cálculos realizados se describen a continuación:

Tabla 10. Cálculo del valor del coeficiente de escorrentía C y la relación R

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(2)
A_{techos}	C_{techos}	A_{andenes}	C_{andenes}	A_{pav}	C_{pav}	$C = \frac{(1) \cdot (2) + (3) \cdot (4)}{(1) + (3)}$	$R = \frac{(5) \cdot (6) + (7) \cdot [(1) + (3) + (5)]}{(5)}$
619.0	0.85	10.0	0.95	172.8	1	0.85	4.1

Finalmente, conociendo los factores de Talbot, el valor de R , el valor de la porosidad del pavimento y el caudal de salida constante del pavimento, el cual se definió anteriormente en el numeral 2.2, se aplicó la Ecuación 34 y la Ecuación 35, para determinar el volumen máximo de almacenamiento (V_{alm}) y el espesor del pavimento (e), respectivamente. A

continuación se muestran los resultados obtenidos para cada condición del pavimento y para diferentes periodos de retorno.

Tabla 11. Resultados de volumen máximo de almacenamiento y espesor del pavimento para diferentes periodos de retorno y para cada condición del pavimento mediante el método de la curva envolvente

<i>T</i> (años)	Nuevo		Rehabilitado		Colmatado	
	<i>V</i> _{alm} (mm)	<i>e</i> (m)	<i>V</i> _{alm} (mm)	<i>e</i> (m)	<i>V</i> _{alm} (mm)	<i>e</i> (m)
2	38.597	0.214	91.724	0.510	137.505	0.764
3	44.228	0.246	102.382	0.569	152.116	0.845
4	50.302	0.279	113.465	0.630	167.070	0.928

Como se puede evidenciar en la Tabla 11, el máximo espesor de pavimento poroso rígido es de 92.8 cm, para un periodo de retorno de 4 años y una condición de pavimento colmatado. Para un pavimento nuevo y con el mismo periodo de retorno se obtiene una altura de 27.9 cm, y en caso de realizar una rehabilitación del pavimento la altura necesaria sería de 63 cm, lo cual evidencia la importancia de realizar el diseño teniendo en cuenta el mantenimiento que va a tener la estructura.

Los cálculos detallados de esta metodología se encuentran en el Anexo 4.

3.2 Aplicación de metodología Chile

La metodología Chile es empleada para dimensionar estructuras de pavimento utilizadas como estructuras complementarias al drenaje pluvial urbano. En este trabajo la presente metodología se aplicó con el fin de dimensionar un pavimento poroso para periodos de retorno de lluvias de diseño de 2, 3 y 4 años.

Para este caso, debido que la superficie de infiltración es el pavimento poroso rígido, se tomaron en cuenta los valores de la capacidad de absorción reportados en el numeral 2.2.

Para el cálculo del volumen afluente acumulado se debe calcular el coeficiente de escorrentía superficial para el área total aportante A (m^2) y la intensidad de lluvia para una duración d . Para el cálculo de la intensidad se utilizó la Ecuación 54 y la Ecuación 6, ambas ecuaciones de Montana para curvas IdF. Para la segunda se utilizaron los parámetros

presentados en la Tabla 8, correspondientes a los periodos de retorno de 2 y 4 años. Los valores de intensidad para algunas duraciones y los periodos de retorno se muestran en la Tabla 13, columna 3.

En la siguiente tabla se describe el cálculo del coeficiente de escorrentía superficial:

Tabla 12. Cálculo del valor del coeficiente de escorrentía C

(1) A_{techos}	(2) C_{techos}	(3) A_{andenes}	(4) C_{andenes}	(5) A_{pav}	(6) C_{pav}	(7) $C = \frac{(1) \cdot (2) + (3) \cdot (4) + (5) \cdot (6)}{(1) + (2) + (3)}$
619.0	0.85	10.0	0.95	172.8	1	0.88

A continuación se describe el procedimiento utilizado para el cálculo del espesor requerido para la estructura de pavimento poroso rígido:

Inicialmente, se calculó el volumen afluente para cada duración utilizando la Ecuación 36 y el valor obtenido para el coeficiente de escorrentía en la Tabla 12; posteriormente se calculó el volumen de infiltración mediante la Ecuación 37, utilizando los valores del coeficiente de absorción que se mencionaron en el numeral 2.2 y un coeficiente de seguridad de 1/3 debido a la baja calidad del agua y mantenimiento regular de la zona como se muestra en la Figura 3.

Para el cálculo del volumen de almacenamiento se utilizó la Ecuación 38, a continuación se calculó el valor del espesor del pavimento mediante la Ecuación 39 con el mayor valor del volumen almacenado para cada condición del pavimento poroso rígido. En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros descritos anteriormente.

Finalmente para el cálculo del tiempo de vaciado se utilizó la Ecuación 40, éste a su vez se evidencia en la Figura 17, Figura 18 y Figura 19 donde el volumen de infiltración corta con el volumen afluente.

Tabla 13. Resultados obtenidos para periodos de retorno de 2, 3 y 4 años

T= 2 años								
	(1) <i>d</i> (min)	(2) <i>I</i> (mm/h)	(3) <i>V_{añ}</i> (m ³)	(4) <i>V_{inf}</i> (m ³)	(5) <i>V_{alm}</i> (m ³)	(6) <i>V_{pav}</i> (m ³)	(7) <i>e</i> (m)	(8) <i>T_m</i> (h)
Colmatado	224.00	9.96	32.91	1.25	31.67	175.93	1.02	94.84
Rehabilitado	107.00	19.67	31.07	3.93	27.14	150.79	0.87	12.32
Nuevo	51.00	35.80	26.95	7.16	19.78	109.91	0.64	2.35
T= 3 años								
Colmatado	240.00	10.23	36.22	1.34	34.89	193.81	1.12	104.48
Rehabilitado	115.00	20.18	34.25	4.22	30.02	166.80	0.97	13.63
Nuevo	55.00	36.70	29.79	7.73	22.07	122.60	0.71	2.62
T= 4 años								
Colmatado	255.00	10.51	39.56	1.42	38.14	211.91	1.23	114.23
Rehabilitado	123.00	20.64	37.47	4.52	32.96	183.09	1.06	14.96
Nuevo	60.00	37.10	32.85	8.43	24.42	135.68	0.79	2.90

En la tabla anterior, columna 8 se observa que el tiempo de vaciado es menor para condiciones óptimas del pavimento poroso rígido, es decir para un pavimento nuevo los valores son significativamente menores a los obtenidos para un pavimento colmatado o rehabilitado, ya que estos han perdido a través del tiempo sus propiedades hidráulicas, esto a su vez está relacionado directamente con el espesor del pavimento el cual es menor para estructuras más eficientes.

En la tabla anterior se muestran únicamente los valores obtenidos para la duración en que se obtuvo el mayor volumen almacenado para cada condición del pavimento y periodo de retorno. Los cálculos en detalle se encuentran en el Anexo 5. A continuación se muestran las gráficas obtenidas al realizar los cálculos para cada duración.

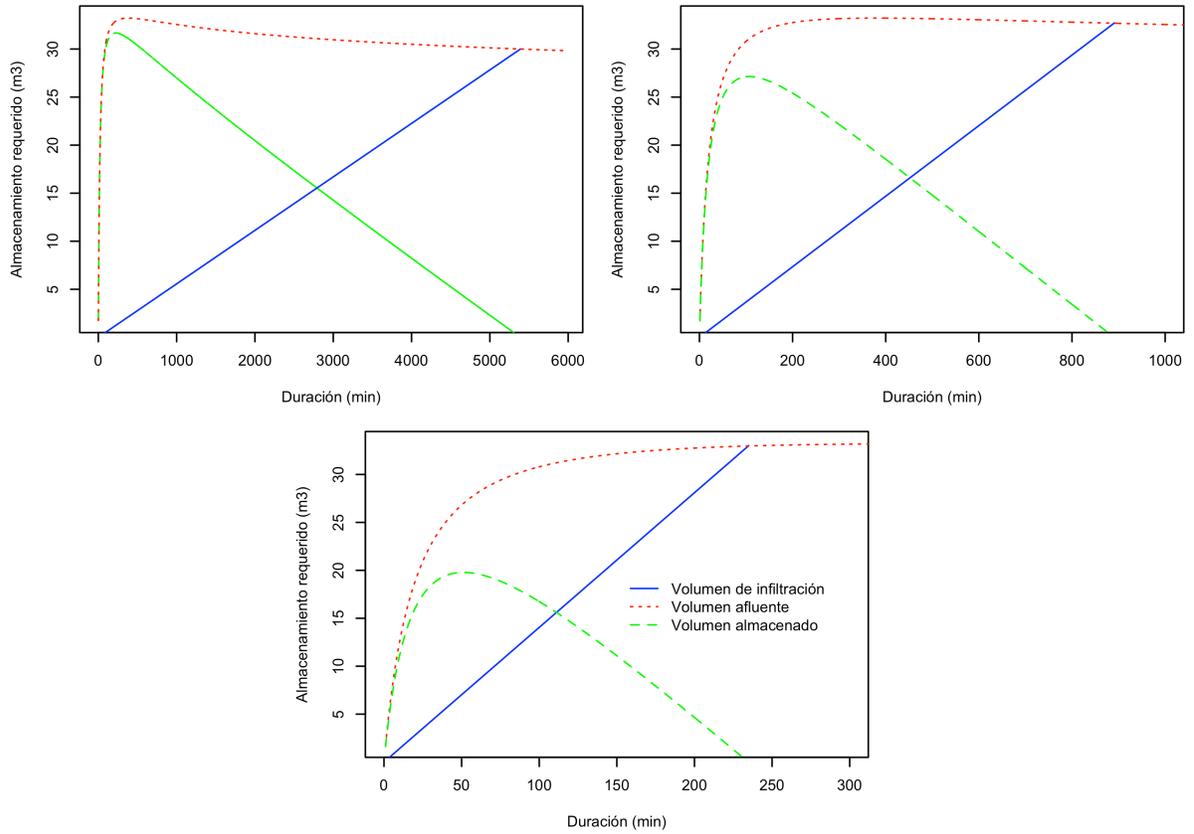


Figura 17. Almacenamiento requerido para T= 2 años y diferentes condiciones del pavimento para la metodología Chile: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

La diferencia entre el volumen afluente y el volumen de infiltración otorga el volumen de almacenamiento requerido. Para un periodo de retorno de 2 años y para la condición de pavimento colmatado, la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 224 minutos, mientras que rehabilitado se presenta en 107 minutos y para nuevo en 51 minutos.

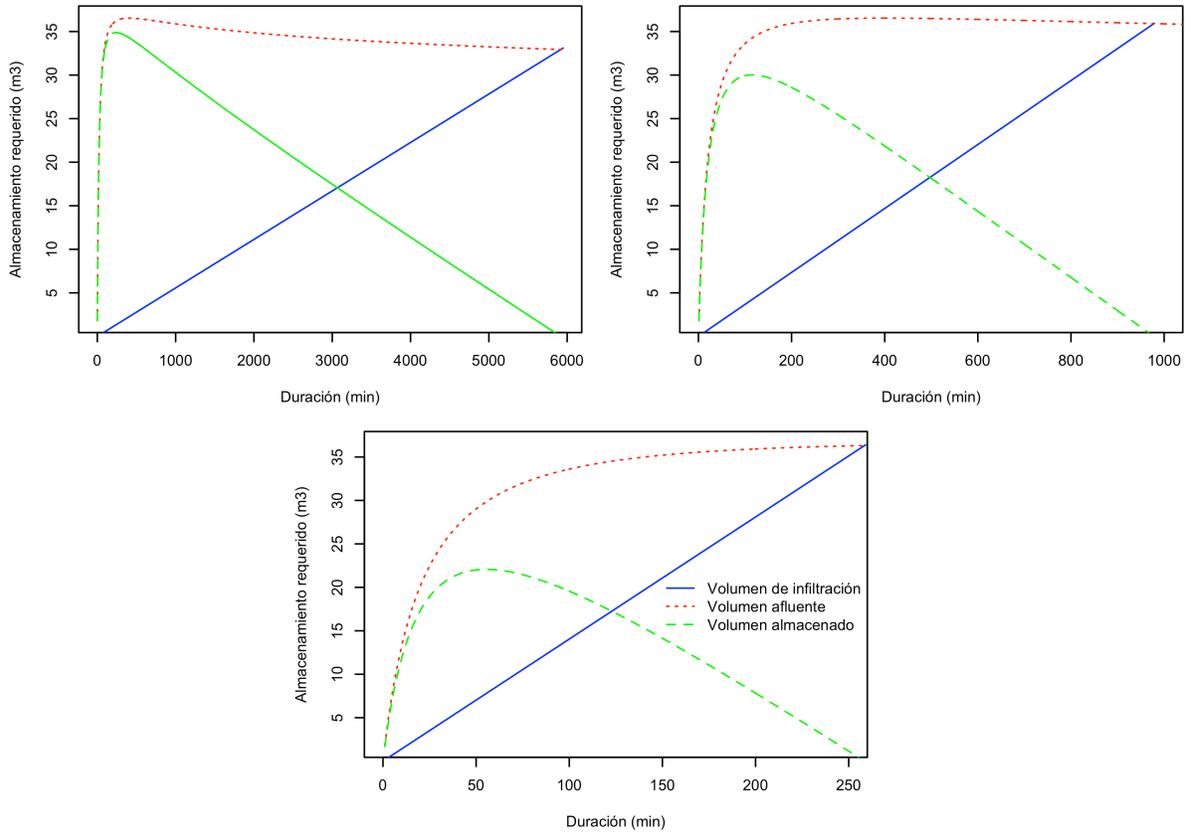


Figura 18. Almacenamiento requerido para T= 3 años y diferentes condiciones del pavimento para la metodología Chile: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Para un periodo de retorno de 3 años y para la condición de pavimento colmatado, la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 240 minutos, mientras que rehabilitado se presenta en 115 minutos y para nuevo en 55 minutos

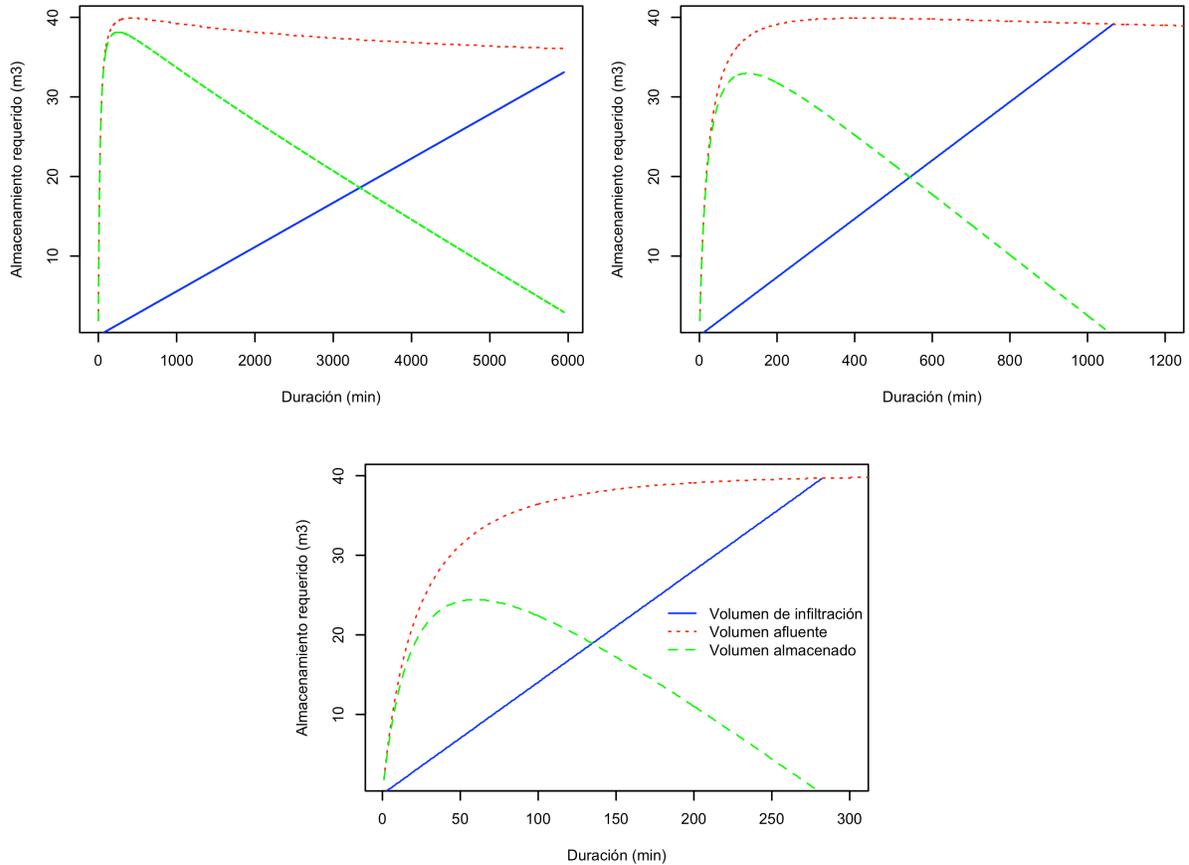


Figura 19. Almacenamiento requerido para T= 4 años y diferentes condiciones del pavimento para la metodología Chile: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Para un periodo de retorno de 4 años y para la condición de pavimento colmatado, la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 255 minutos, mientras que rehabilitado se presenta en 123 minutos y para nuevo en 60 minutos

De la Figura 17 a la Figura 19 se observa que al no hacer el mantenimiento adecuado a la estructura de pavimento, su rendimiento se ve afectado negativamente. En primer lugar el tiempo de vaciado es mucho mayor, adicionalmente los espesores requeridos son mucho mayores en todos los periodos de retorno.

3.3 Aplicación del método The SUDS manual, CiriaC697

En el presente método, se considera al pavimento poroso como un sistema plano de infiltración. El procedimiento para aplicar este método fue el siguiente:

Se obtuvieron los coeficientes de infiltración f (ver numeral 2.2). Este método recomienda el uso de factores de seguridad los cuales tendrán en cuenta la posible pérdida de capacidad de infiltración del pavimento. El valor del factor de seguridad seleccionado es igual a 2, teniendo en cuenta que la estructura diseñada es para un parqueadero, y si llegara a fallar su capacidad de retención se generarían aguas superficiales lo cual se clasifica como un inconveniente de menor importancia. Por lo anterior los coeficientes de infiltración para cada condición deben ser divididos a la mitad, obteniendo los siguientes coeficientes de infiltración para un pavimento nuevo, rehabilitado y colmatado en mm/h: 73.169, 19.123 y 2.899, respectivamente.

Se tuvo en cuenta la porosidad del modelo de pavimento poroso rígido de Gómez *et al.* (2010) la cual es de 0.18. De acuerdo a esta metodología, para un pavimento de infiltración, la relación R es igual a 1, lo cual significa que se considera que el área a ser drenada es igual al área de infiltración. El valor de la intensidad para diferentes duraciones y diferentes periodos de retorno, se obtuvo a partir de las curvas IdF de la zona de estudio: a partir de estas curvas se calcularon las alturas de precipitación multiplicando las intensidades por duraciones. Conociendo los valores de las alturas de lluvia y de infiltración para diferentes duraciones y periodos de retorno, se aplicó la Ecuación 43 para calcular las respectivas alturas de almacenamiento, y se seleccionó la altura máxima:

Tabla 14. Resultados de altura máxima de almacenamiento para diferentes periodos de retorno y para cada condición del pavimento mediante el método The SUDS manual

T= 2 años					
	d (min)	P (mm)	f (mm)	P-f (mm)	e (m)
Nuevo	8	12.059	9.756	2.303	0.013
Rehabilitado	34	26.780	10.836	15.944	0.089
Colmatado	118	35.497	5.700	29.796	0.166
T= 3 años					
Nuevo	8	12.729	9.756	2.974	0.017
Rehabilitado	38	30.042	12.111	17.931	0.100
Colmatado	123	38.981	5.942	33.039	0.184
T= 4 años					
Nuevo	10	15.752	12.195	3.557	0.020
Rehabilitado	40	32.828	12.748	20.080	0.112
Colmatado	133	42.698	6.425	36.273	0.202

En la tabla anterior se muestran únicamente los valores obtenidos para la duración en que se obtuvo el mayor volumen almacenado para cada condición del pavimento y periodo de retorno. Los cálculos en detalle se encuentran en el Anexo 6.

Según el presente método, para la condición de pavimento nuevo el almacenamiento requerido es muy pequeño: el máximo se presenta para un periodo de retorno de 4 años y es de 2 cm. La mayor altura de almacenamiento obtenida es de 20.2 cm, para un periodo de retorno de 4 años y una condición de pavimento colmatado.

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

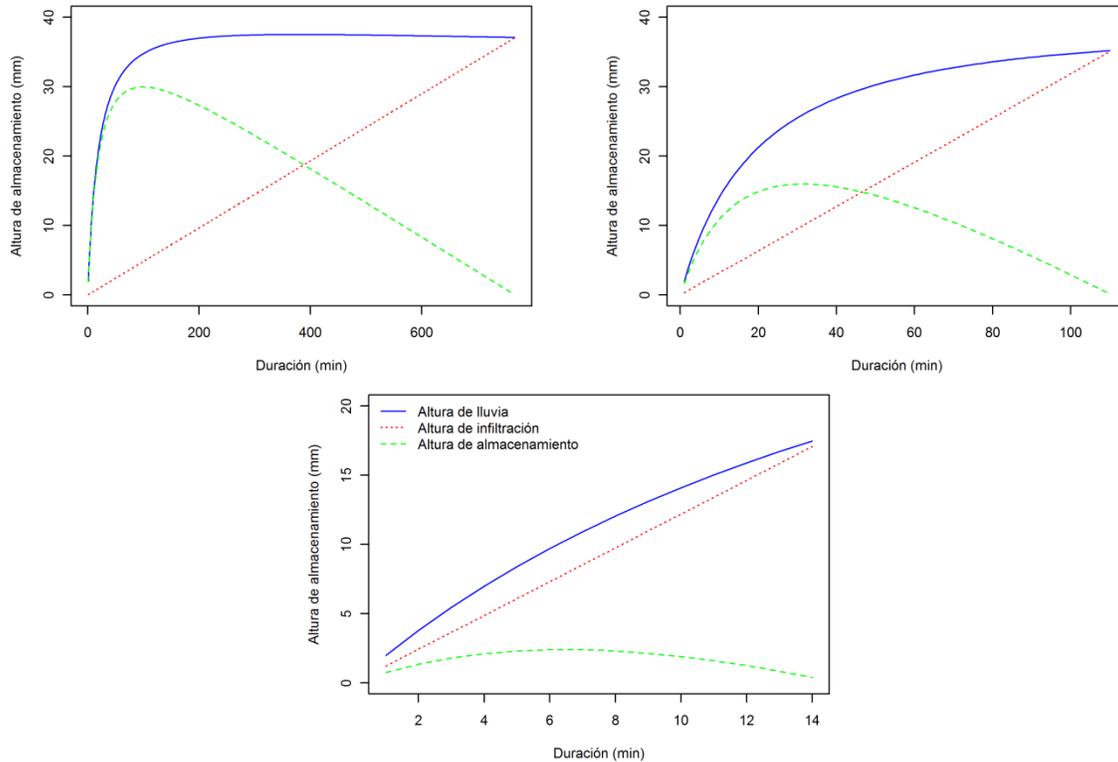


Figura 20. Almacenamiento requerido para T= 2 años y diferentes condiciones del pavimento para el método The SUDS manual: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

La diferencia entre la altura de lluvia y la altura de infiltración otorga la altura de almacenamiento, para un periodo de retorno de 2 años, para la condición de pavimento colmatado la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 118 minutos, para rehabilitado se presenta en 34 minutos y para nuevo en 8 minutos.

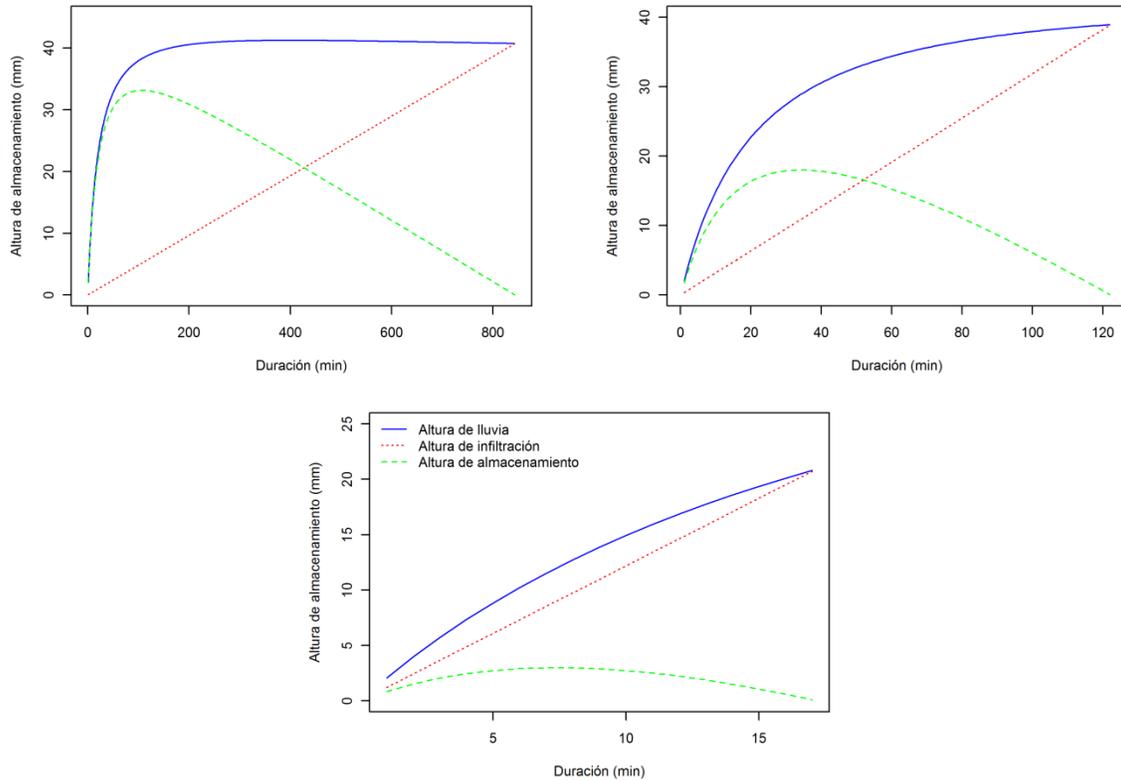


Figura 21. Almacenamiento requerido para T= 3 años y diferentes condiciones del pavimento para el método The SUDS manual: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Para un periodo de retorno de 3 años, para la condición de pavimento colmatado la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 123 minutos, para rehabilitado se presenta en 38 minutos y para nuevo en 8 minutos.

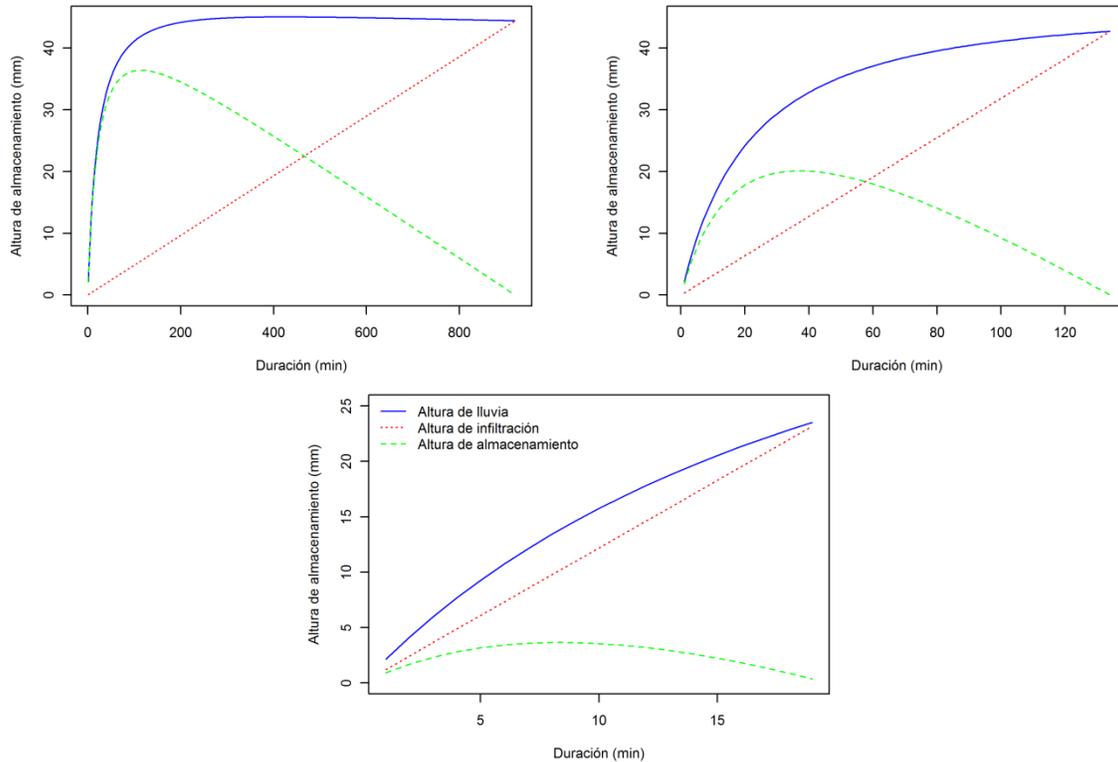


Figura 22. Almacenamiento requerido para T= 4 años y diferentes condiciones del pavimento para el método The SUDS manual: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Para un periodo de retorno de 4 años, para la condición de pavimento colmatado la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 133 minutos, para rehabilitado se presenta en 40 minutos y para nuevo en 10 minutos.

3.4 Aplicación del Método Digest 365

A continuación se describe la aplicación del método Digest 365, el cual es una metodología británica que dimensiona trincheras de infiltración. Para este trabajo de grado fue necesario modificar algunos de los parámetros de esta metodología con el fin de que fuera aplicable a un pavimento poroso rígido. Para esto se tuvo en cuenta que al ser esta metodología aplicada a estructuras complementarias al drenaje pluvial urbano, era viable realizar adaptaciones a estructuras con la misma función aunque tuvieran geometría diferente. Las consideraciones que fueron definidas son las siguientes.

Para el cálculo de la salida V_{inf} , el α_{s50} corresponde a la capa inferior del pavimento A_{pav} .

La tasa de infiltración del suelo es reemplazada por la capacidad de absorción por unidad de superficie f , ya que no se considera al suelo como parte de la estructura de drenaje.

Para el caso de un pavimento poroso el volumen efectivo de almacenamiento es igual a:

$$V_{efectivo} = A_{pav} \times \eta \times e \quad \text{Ecuación 60}$$

Donde:

A_{pav} : Área del pavimento poroso

η : Porosidad del pavimento

e : Espesor requerido del pavimento poroso

El almacenamiento del pavimento poroso rígido debe ser igual o mayor al volumen de entrada menos el de salida, definidos en la Ecuación 46 y la Ecuación 47 respectivamente, realizando los cálculos mencionados anteriormente se obtiene el volumen efectivo disponible requerido en la estructura.

Esta metodología está basada principalmente en la teoría descrita en el numeral 1.2.1. A continuación se describe como fueron calculadas las entradas y las salidas con el fin de calcular el almacenamiento necesario que debe tener la estructura de pavimento.

Para esta metodología se calcula el flujo de entrada como el producto entre el área total de drenaje, sin pérdidas por detención superficial, y la precipitación total en una lluvia de diseño (Ecuación 46). Los cálculos de la precipitación se realizaron con la Ecuación 54 para un periodo de retorno de 3 años y la Ecuación 6 con los coeficientes de la Tabla 8 para los periodos de retorno de 2 y 4 años.

Para el cálculo del caudal de salida se definió como área superficial interna la cara inferior del pavimento, la cual va a drenar las demandas hidrológicas de la zona. Para el cálculo del caudal de salida se utilizó la Ecuación 47. Los valores de la tasa de infiltración para todas las condiciones del pavimento poroso rígido se encuentran en el numeral 2.2. En la Tabla 15, columna 5 se encuentran los valores de flujo de salida para la duración en la que se presenta el mayor almacenamiento requerido para diferentes periodos de retorno y condiciones del pavimento.

Tabla 15. Resultados de volumen de almacenamiento requerido para diferentes periodos de retorno y para cada condición del pavimento mediante el método Digest 365

T= 2 años						
Condición	(1) <i>d</i> (min)	(2) <i>P</i> (mm)	(3) V_{afn} (m ³)	(4) V_{inf} (m ³)	(5) V_{alm} (m ³)	(6) <i>e</i> (m)
Colmatado	145	36.216	29.038	2.421	26.617	0.856
Rehabilitado	56	31.171	24.993	6.168	18.825	0.605
Nuevo	20	21.267	17.052	8.429	8.623	0.277
T= 3 años						
Colmatado	156	39.893	31.986	2.605	29.382	0.944
Rehabilitado	61	34.532	27.688	6.719	20.969	0.673
Nuevo	22	23.852	19.124	9.272	9.852	0.315
T= 4 años						
Colmatado	159	43.445	34.835	2.655	32.180	1.035
Rehabilitado	65	37.834	30.335	7.160	23.176	0.745
Nuevo	24	26.533	21.274	10.115	11.159	0.359

En la tabla anterior se muestran únicamente los valores obtenidos para la duración en que se obtuvo el mayor volumen almacenado para cada condición del pavimento y periodo de retorno. Los cálculos en detalle se encuentran en el Anexo 7.

En la tabla anterior, columna 5 se observa que el almacenamiento máximo es menor para condiciones óptimas del pavimento poroso rígido, es decir para un pavimento nuevo los valores son significativamente menores a los obtenidos para un pavimento colmatado o rehabilitado, ya que estos han perdido a través del tiempo sus propiedades hidráulicas, esto a su vez está relacionado directamente con el espesor del pavimento el cual es menor para estructuras más eficientes.

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

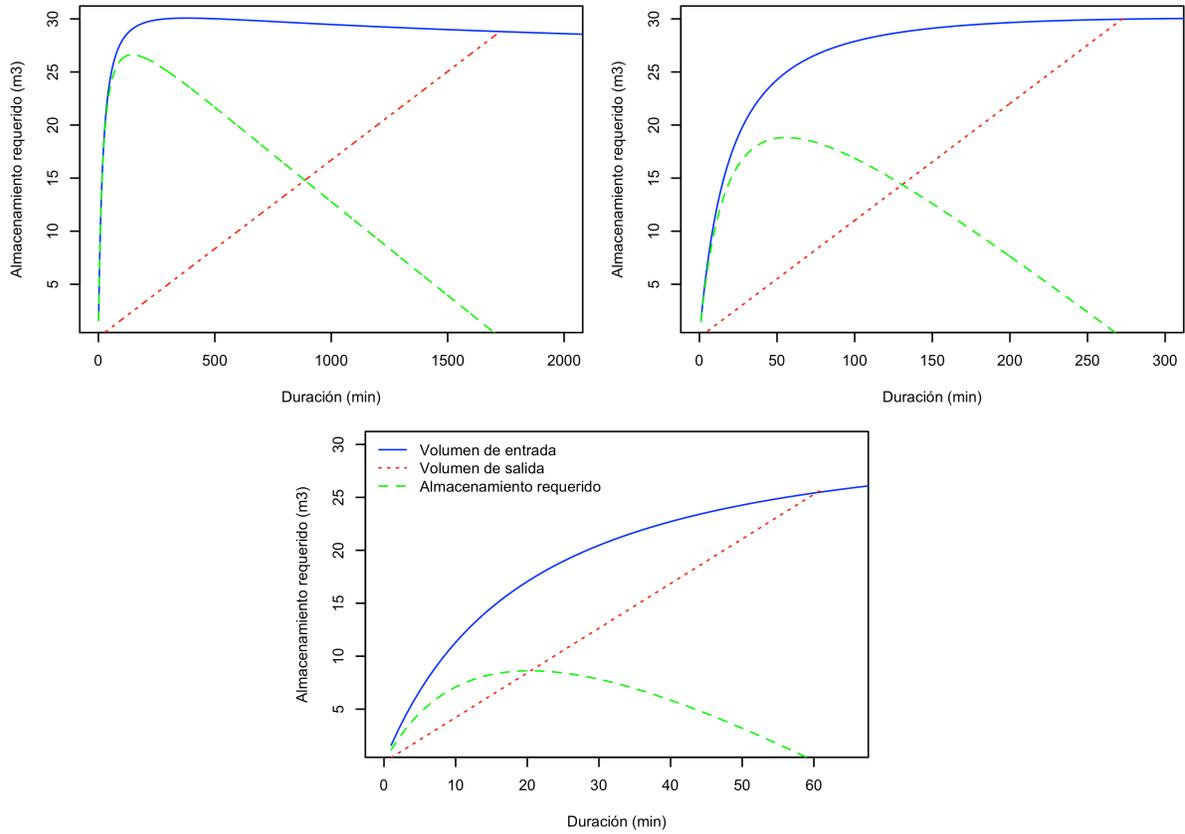


Figura 23. Almacenamiento requerido para T= 2 años y diferentes condiciones del pavimento para el método Digest 365: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

La diferencia entre el volumen afluente y el volumen de infiltración otorga el volumen de almacenamiento requerido. Para un periodo de retorno de 2 años y para la condición de pavimento colmatado, la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 145 minutos, mientras que rehabilitado se presenta en 56 minutos y para nuevo en 20 minutos.

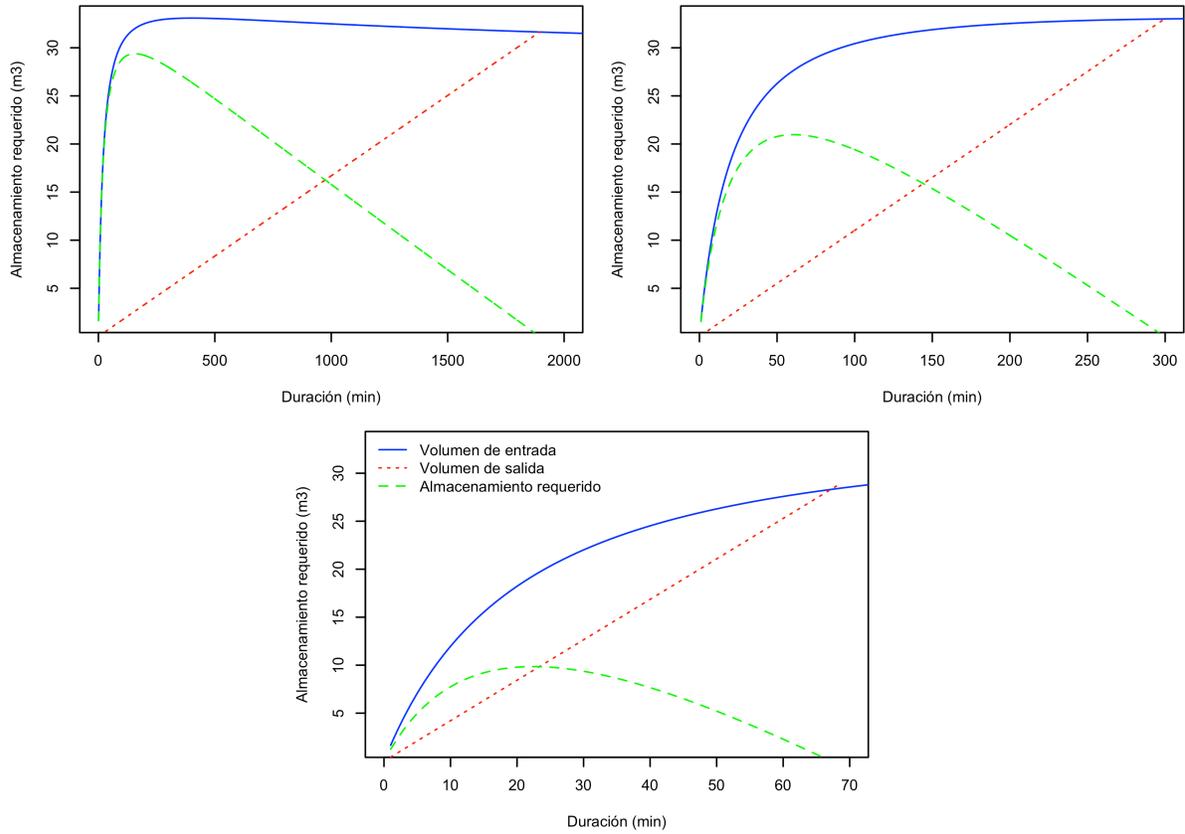


Figura 24. Almacenamiento requerido para T= 3 años y diferentes condiciones del pavimento para el método Digest 365: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Para un periodo de retorno de 3 años y para la condición de pavimento colmatado, la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 159 minutos, mientras que rehabilitado se presenta en 65 minutos y para nuevo en 24 minutos.

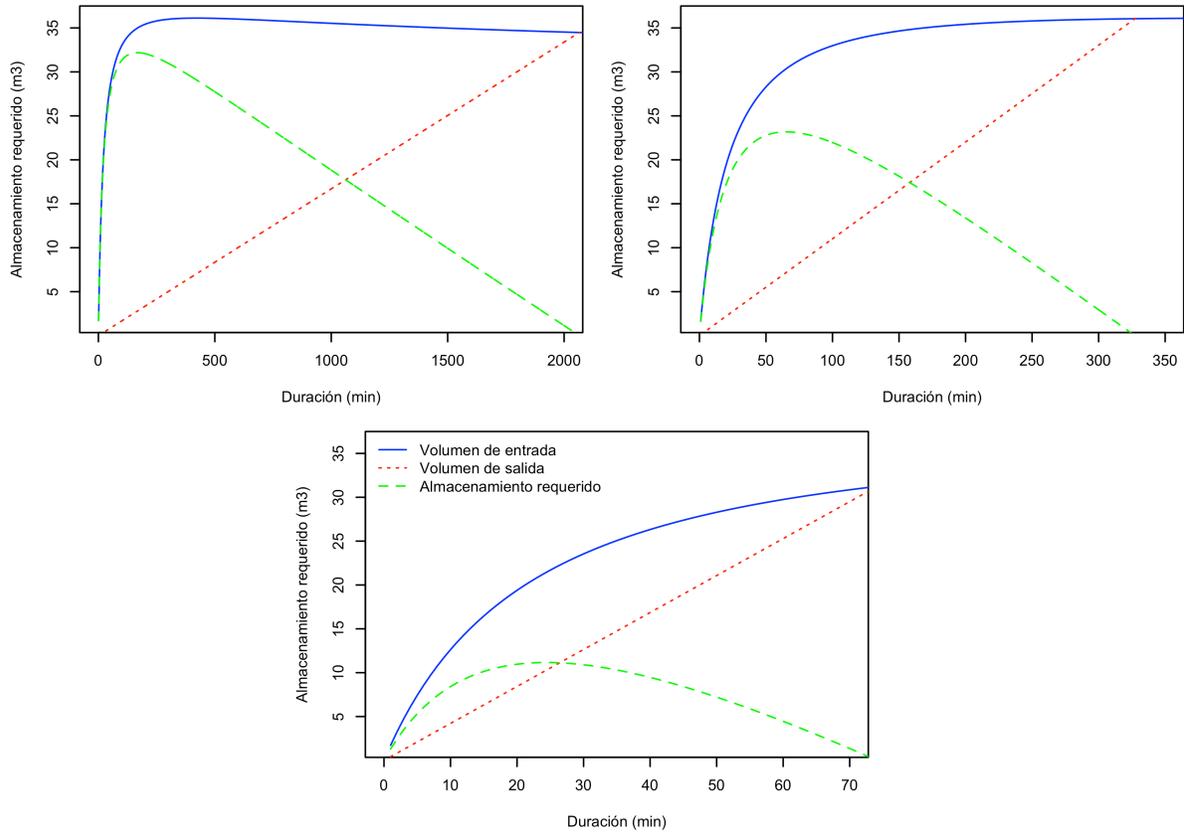


Figura 25. Almacenamiento requerido para T= 4 años y diferentes condiciones del pavimento para el método Digest 365: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Para un periodo de retorno de 4 años y para la condición de pavimento colmatado, la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 156 minutos, mientras que rehabilitado se presenta en 61 minutos y para nuevo en 22 minutos.

3.5 Aplicación de los métodos franceses

A continuación se describen los resultados obtenidos al aplicar el método de las lluvias y el método de los volúmenes para el dimensionamiento del pavimento poroso.

Para calcular la superficie activa se debe calcular el coeficiente de escurrimiento, se utilizó el mismo cálculo de la Tabla 12.

De acuerdo a la Ecuación 49, la superficie activa es igual al producto entre el coeficiente de escurrimiento y el área de todas las superficies que son drenadas por el pavimento, este cálculo se explica en la siguiente tabla.

Tabla 16. Cálculo de la superficie activa

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
A_{techos}	A_{andenes}	A_{pav}	C	$S_a = (4) \cdot [(1) + (2) + (3)]$
619.0	10.0	172.8	0.88	708.45

A diferencia de las metodologías descritas anteriormente, para los métodos franceses es necesario el cálculo del caudal de salida y el caudal específico mediante el uso de la Ecuación 48 y la Ecuación 52, respectivamente.

Inicialmente, Azzout *et al.* (1994) recomiendan utilizar 0.1 como coeficiente de seguridad, lo cual afecta directamente la capacidad de absorción del pavimento por unidad de superficie. El caudal de salida es el producto de la capacidad de absorción f (ver Figura 16), el coeficiente de seguridad y la superficie de infiltración del pavimento poroso rígido. Al realizar el cálculo se obtuvieron los siguientes valores para el caudal de salida para un pavimento nuevo, rehabilitado y colmatado en $\text{m}^3/\text{día}$: 60.689, 15.861 y 2.404, respectivamente.

Adicionalmente es necesario calcular los caudales específicos q_s asociados a la condición del pavimento que se calculan como el cociente entre los caudales de salida mencionados en el párrafo anterior y la superficie activa. Estos valores corresponden a las pendientes de las rectas que se muestran en las siguientes figuras y que representan el caudal específico en $\text{mm}/\text{día}$.

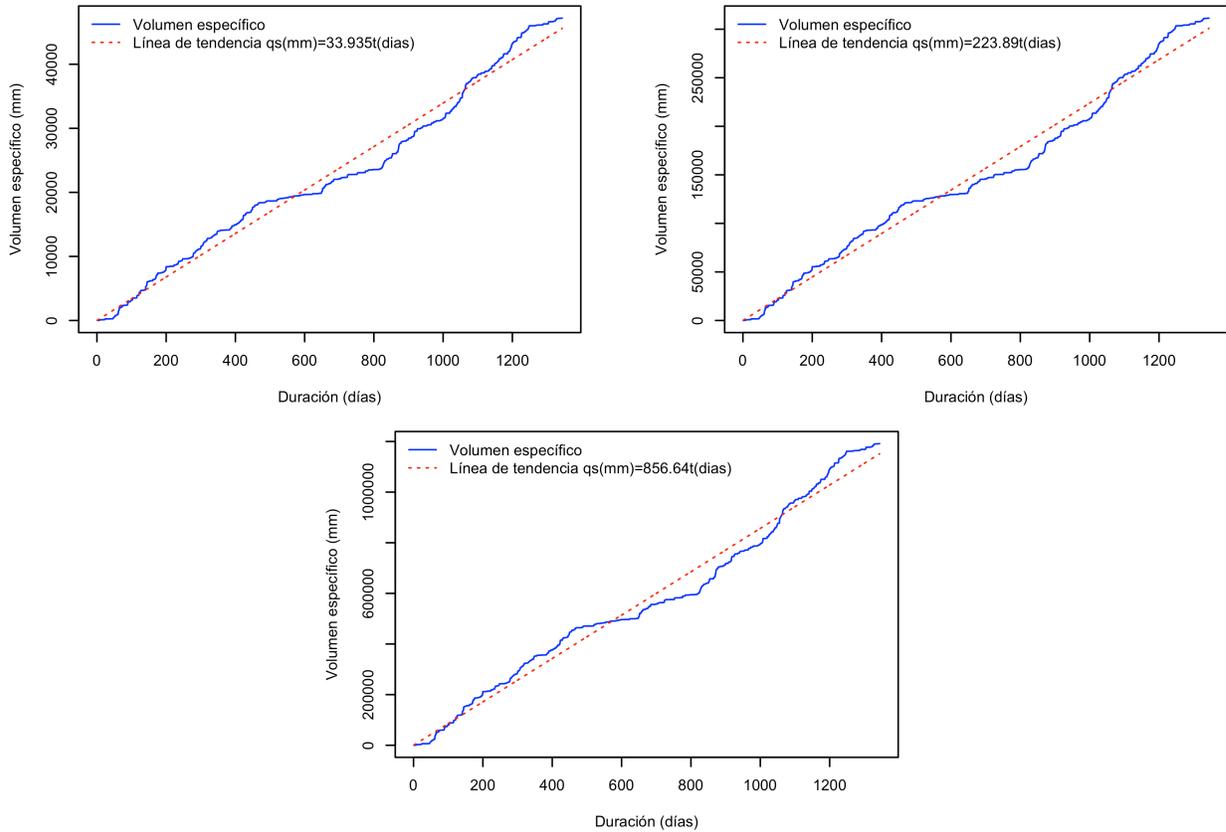


Figura 26. Cálculo del caudal específico para cada condición del pavimento: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Como se puede evidenciar en las gráficas anteriores, se buscó la pendiente de la recta que mejor se ajustara a los caudales específicos para cada condición del pavimento. Los valores obtenidos para el caudal específico para un pavimento nuevo, rehabilitado y colmatado en mm/día son 856.65, 223.89 y 33.94, respectivamente.

Con los valores obtenidos para el caudal específico se evidencia nuevamente que las propiedades filtrantes del pavimento disminuyen según la condición del pavimento. Conociendo el valor del caudal de salida y el caudal específico, se puede determinar la altura de almacenamiento, para lo anterior Azzout *et al.* (1994) propone los siguientes métodos:

3.5.1 Método de las lluvias

Para calcular la altura de almacenamiento se especificó la curva Altura-duración-Frecuencia (HdF) para cada periodo de retorno, y el caudal específico para diferentes

duraciones, y para cada condición del pavimento. Se realiza la diferencia entre la altura de lluvia y el caudal específico y se encuentra la altura, la cual corresponde a la máxima diferencia. Los resultados obtenidos para cada condición de pavimento y para diferentes periodos de retorno se muestran a continuación:

Tabla 17. Resultados altura máxima de almacenamiento para diferentes periodos de retorno y para cada condición del pavimento mediante el método las lluvias

T= 2 años						
	d (min)	P (mm)	q_s (mm)	H_{max} (mm)	V_{alm} (m³)	e (m)
Nuevo	90	34.248	5.354	28.894	20.470	0.658
Rehabilitado	165	36.574	2.565	34.009	24.094	0.775
Colmatado	291	37.430	0.686	36.745	26.032	0.837
T = 3 años						
Nuevo	97	37.779	5.770	32.009	22.677	0.729
Rehabilitado	178	40.284	2.768	37.517	26.579	0.855
Colmatado	306	41.169	0.721	40.448	28.656	0.921
T = 4 años						
Nuevo	103	41.316	6.127	35.189	24.929	0.801
Rehabilitado	187	43.982	2.907	41.075	29.100	0.936
Colmatado	325	44.956	0.766	44.190	31.306	1.007

En la tabla anterior se muestran únicamente los valores obtenidos para la duración en la cual se obtuvo el mayor almacenamiento requerido para cada condición del pavimento y periodo de retorno. Los cálculos en detalle se encuentran en el Anexo 8.

A partir H_{max} mostrado en la tabla anterior, se calculó el volumen de agua almacenado, éste se calculó utilizando la Ecuación 53. Finalmente se realizó el cálculo del espesor requerido, el cual corresponde al cociente entre el volumen de agua y el área efectiva del pavimento poroso.

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

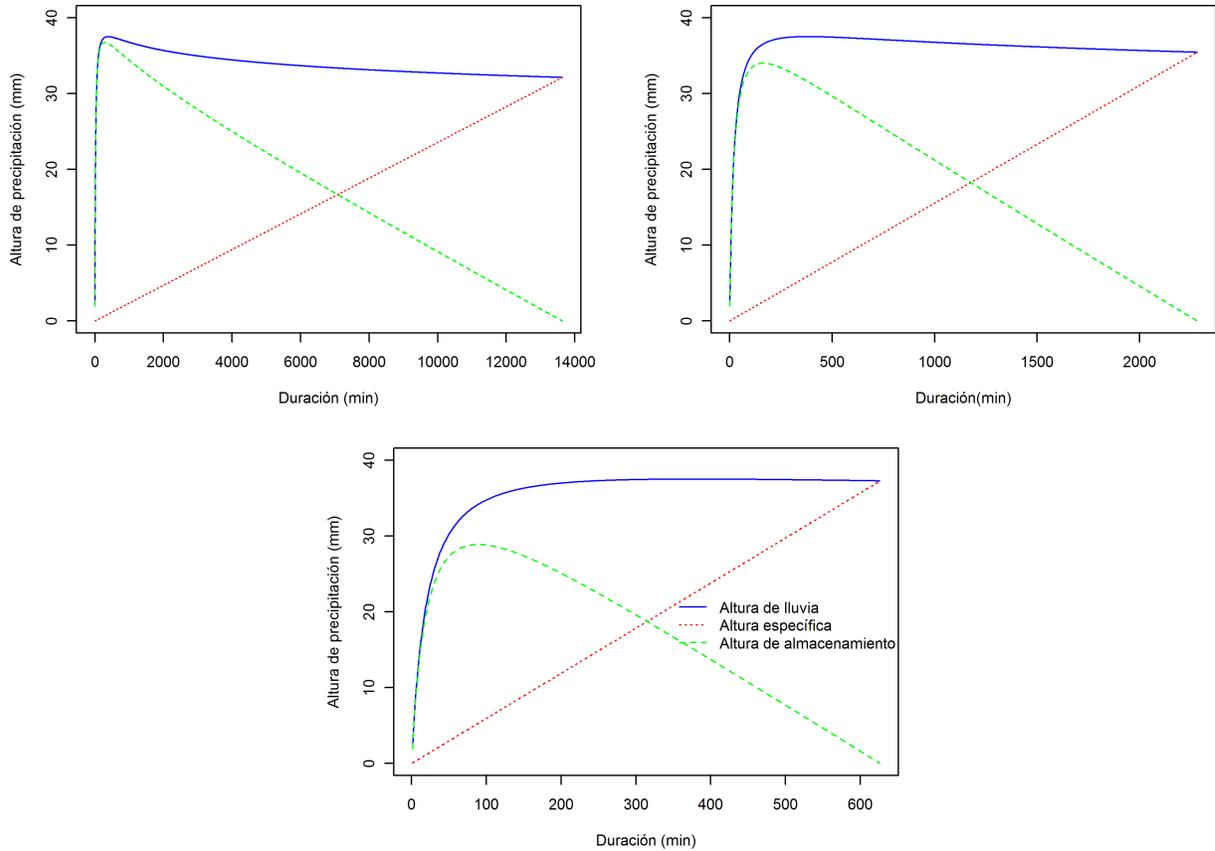


Figura 27. Almacenamiento requerido para T= 2 años y diferentes condiciones del pavimento para el método de las lluvias: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Como se puede evidenciar en la gráfica anterior, para un periodo de retorno de 2 años, la máxima altura de almacenamiento es de 36.745 mm, para una condición de colmatación del pavimento, la cual se presenta en una duración de 291 minutos. Con una rehabilitación del pavimento, la máxima altura de almacenamiento es de 34.009 mm en una duración de 165 minutos. Y la mínima altura de almacenamiento es de 28.894 mm para un pavimento nuevo.

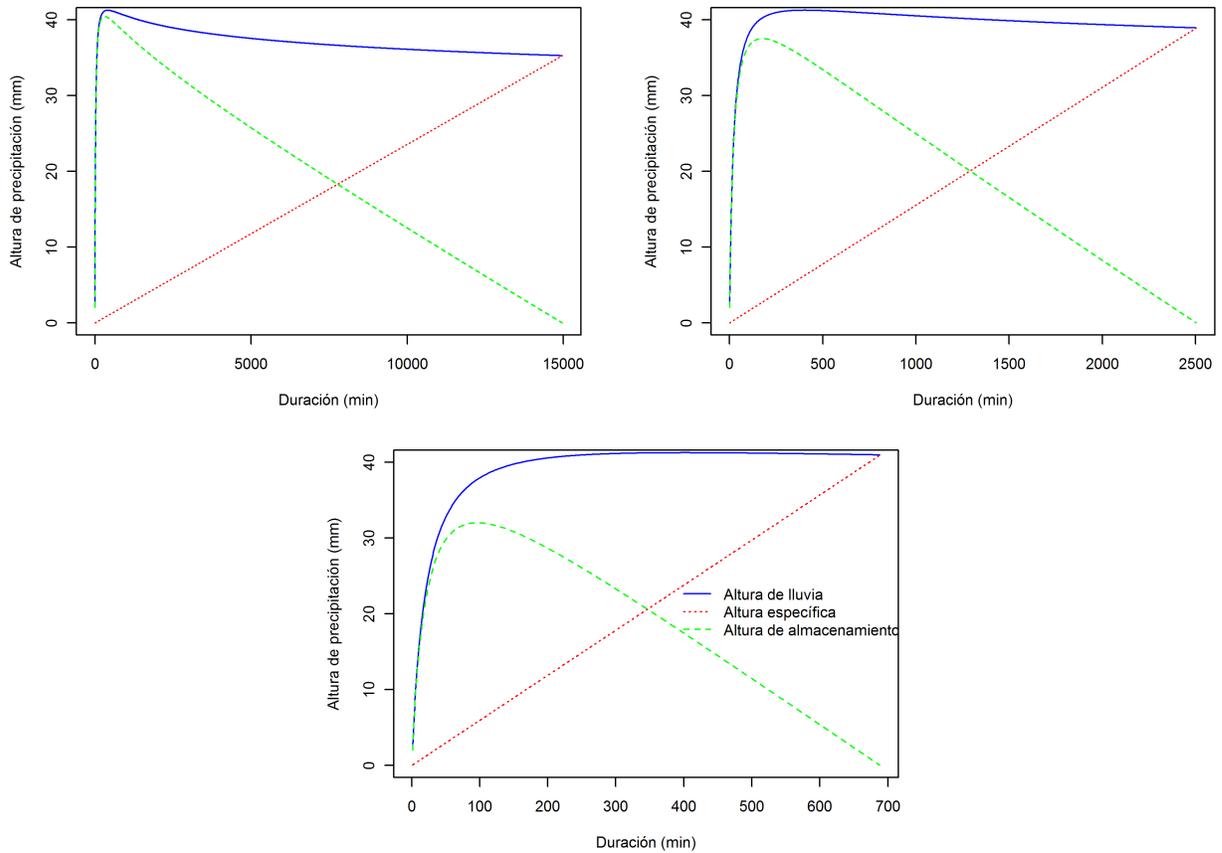


Figura 28. Almacenamiento requerido para T= 3 años y diferentes condiciones del pavimento para el método de las lluvias: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Para un periodo de retorno de 3 años, la máxima altura de almacenamiento es de 40.448mm, igualmente se presenta para una condición de colmatación del pavimento, la cual se presenta en una duración de 306 minutos. Con una rehabilitación del pavimento la máxima altura de almacenamiento es de 37.517mm en una duración de 178 minutos. Y la mínima altura de almacenamiento es de 32.009 mm para un pavimento nuevo.

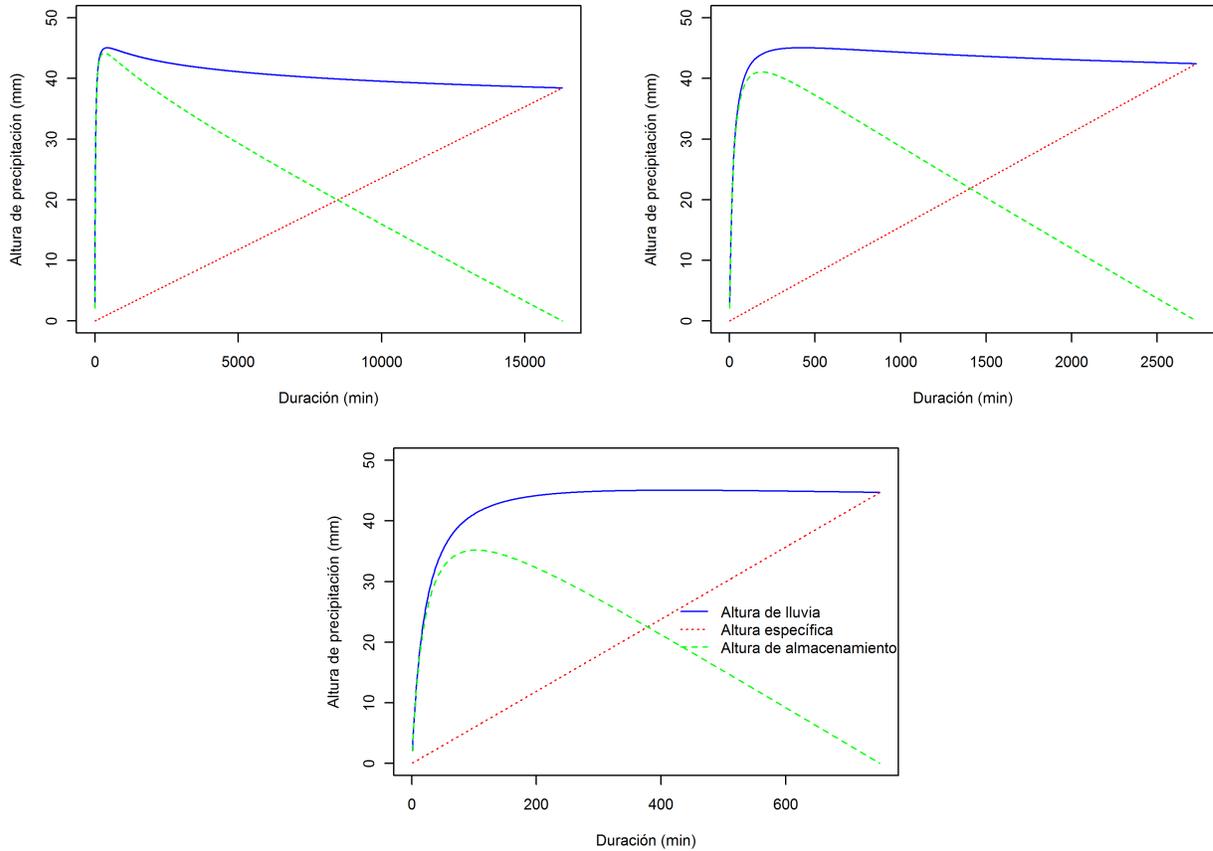


Figura 29. Almacenamiento requerido para T= 4 años y diferentes condiciones del pavimento para el método de las lluvias: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)

Finalmente, para un periodo de retorno de 4 años, la máxima altura de almacenamiento es de 44.190 mm, igualmente esta altura se presenta para una condición de colmatación del pavimento en una duración de 325 minutos. Con una rehabilitación del pavimento la máxima altura de almacenamiento es de 41.075 mm en una duración de 187 minutos. Y la mínima altura de almacenamiento es de 35.189 mm para un pavimento nuevo.

3.5.2 Método de los volúmenes

Se grafica el caudal específico para cada duración, para cada año i , para cada evento de lluvia j y para cada caudal específico q_s , se calcula la altura $DH_{ij}(q_s)$ correspondiente a la diferencia entre la curva de alturas acumuladas para cada episodio y la de evacuación $q_s.d$. Se determinan los valores máximos anuales y se realiza la clasificación frecuencial de dichos valores.

En la Figura 30, Figura 31, Figura 32, y Figura 33 se presentan los valores anuales de altura para un pavimento colmatado, rehabilitado, nuevo y un valor arbitrario tomado entre los valores mencionados anteriormente, debido a que en la presente metodología para un pavimento en estado nuevo el almacenamiento no fue necesario.

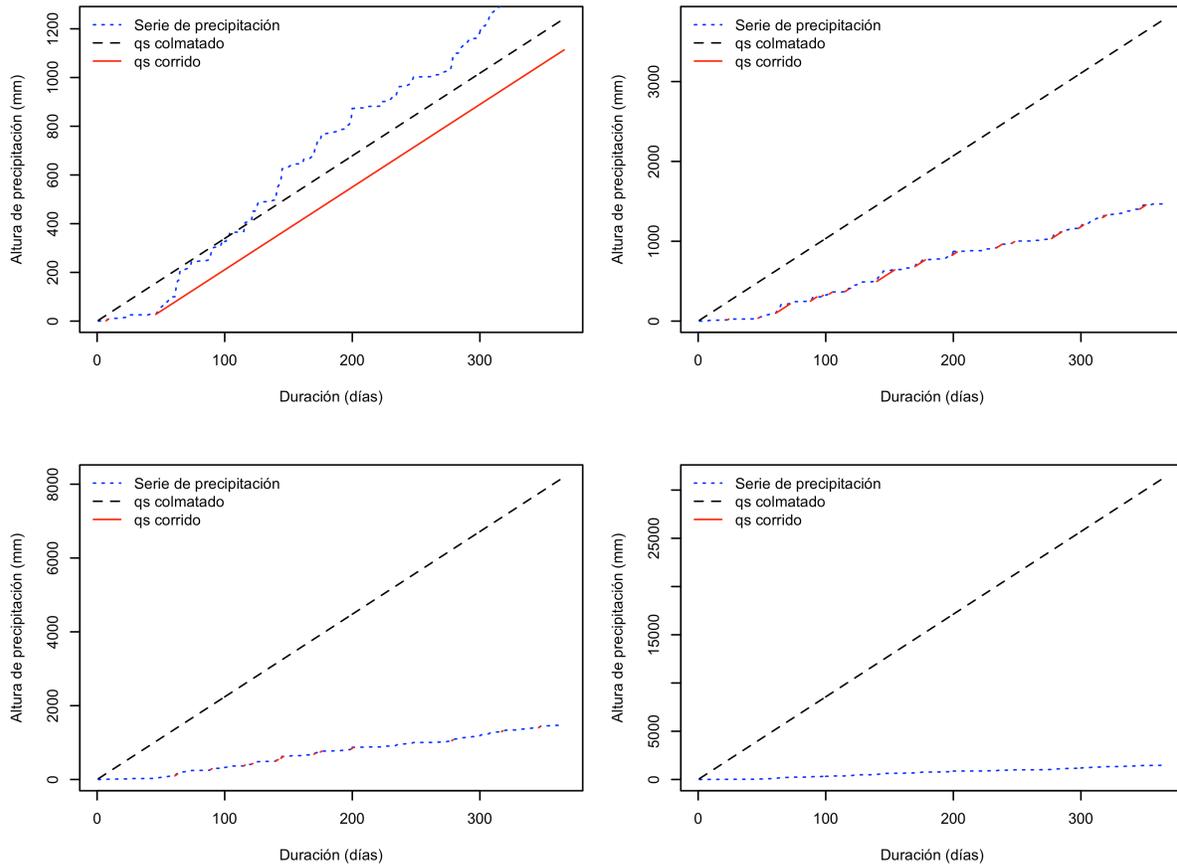


Figura 30. Altura máxima para el año 2008 y diferentes condiciones del pavimento para el método de los volúmenes: colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)

En la Figura 30 se muestran alturas acumuladas para el año 2008 para las diferentes condiciones del pavimento y para cada evento lluvioso para el cual debió calcularse la máxima altura corriendo el caudal específico (q_s corrido). Para colmatado la mayor altura de agua se evidencia en una duración de 352 días, en rehabilitado en 142 días, y finalmente para un caudal específico arbitrario, escogido entre el caudal específico para colmatado y rehabilitado, la mayor altura se evidenció en una duración de 145 días. Como se mencionó con anterioridad, para un pavimento nuevo no es necesario almacenamiento, esto puede observarse en la figura anterior donde el caudal específico es superior a la solicitud

hidrológica, evitando que la estructura de almacenamiento deba contar con un espesor definido desde el punto de vista hidráulico.

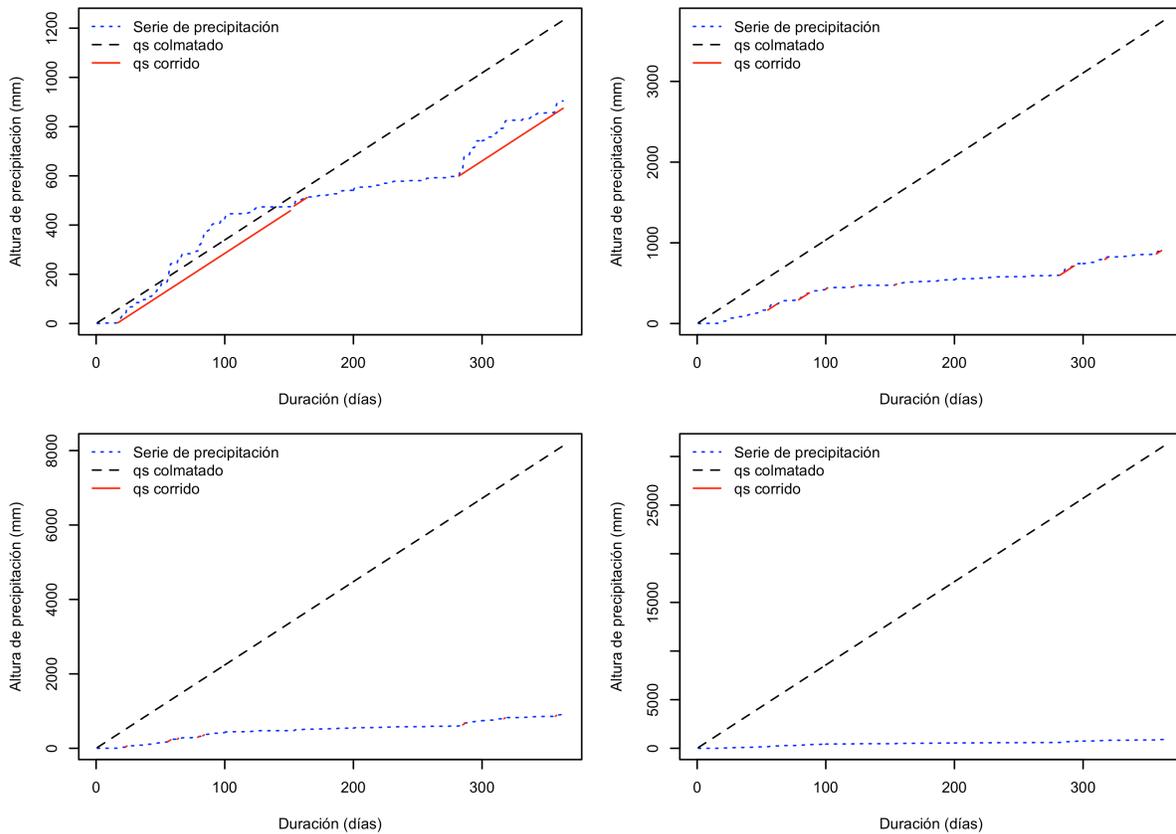


Figura 31. Altura máxima para el año 2009 y diferentes condiciones del pavimento para el método de los volúmenes: colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)

En la Figura 31 se muestran alturas acumuladas para el año 2009 para las diferentes condiciones del pavimento. En colmatado la mayor altura de agua de evidencia en una duración de 101 días, en rehabilitado en 58 días, y finalmente para un caudal específico arbitrario, escogido entre el caudal específico para colmatado y rehabilitado, la mayor altura se evidenció en una duración de 286 días. Como se mencionó con anterioridad, para un pavimento nuevo no es necesario almacenamiento, esto puede observarse en la figura anterior donde es indiscutible que el caudal de salida es superior, evitando que la estructura de almacenamiento deba contar con un espesor definido.

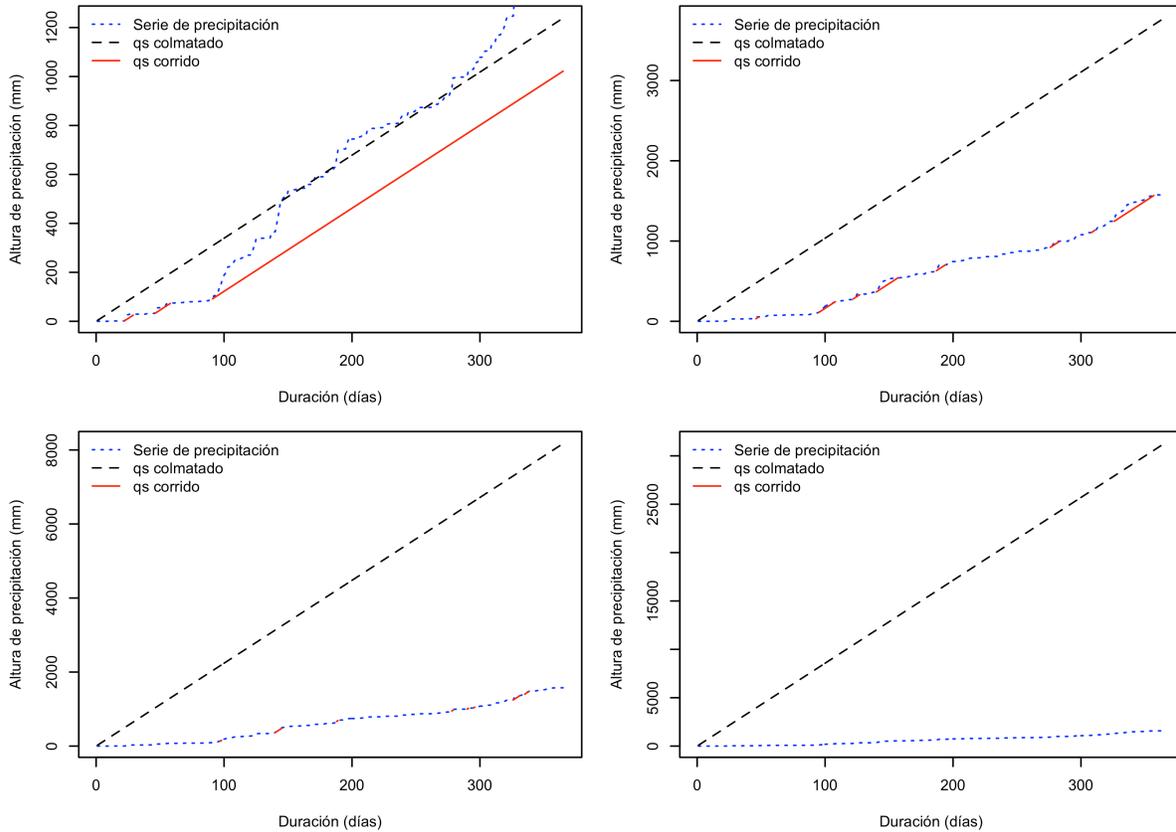


Figura 32. Altura máxima para el año 2010 y diferentes condiciones del pavimento para el método de los volúmenes: colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)

En la Figura 32 se muestran alturas acumuladas para el año 2010 para las diferentes condiciones del pavimento. En colmatado la mayor altura de agua de evidencia en una duración de 357 días, en rehabilitado en 327 días, y finalmente para un caudal específico arbitrario, escogido entre el caudal específico para colmatado y rehabilitado, la mayor altura se evidenció en una duración de 341 días. Como se mencionó con anterioridad, para un pavimento nuevo no es necesario almacenamiento, esto puede observarse en la figura anterior donde es indiscutible que el caudal de salida es superior, evitando que la estructura de almacenamiento deba contar con un espesor definido.

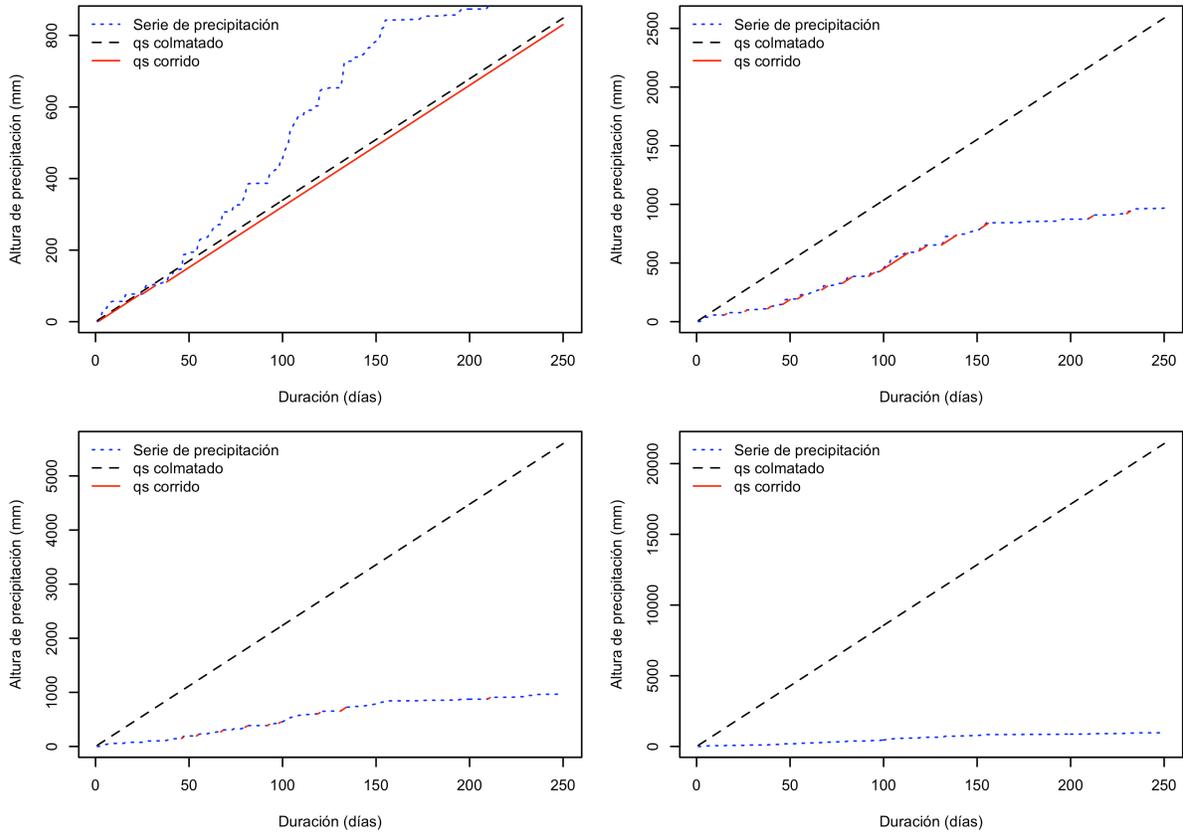


Figura 33. Altura máxima para el año 2011 y diferentes condiciones del pavimento para el método de los volúmenes: colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)

En la Figura 33 se muestran alturas acumuladas para el año 2011 para las diferentes condiciones del pavimento. En colmatado la mayor altura de agua de evidencia en una duración de 158 días, en rehabilitado en 120 días, y finalmente para un caudal específico arbitrario, escogido entre el caudal específico para colmatado y rehabilitado, la mayor altura se evidenció en una duración de 133 días. Como se mencionó con anterioridad, para un pavimento nuevo no es necesario almacenamiento, esto puede observarse en la figura anterior donde es indiscutible que el caudal de salida es superior, evitando que la estructura de almacenamiento deba contar con un espesor definido.

Las alturas máximas que se encontraron al realizar los cálculos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 18. Alturas acumuladas máximas obtenidas para cada año y condición del pavimento

Años	$H_{\max} q_s$colmatado (mm)	$H_{\max} q_s$arbitrario (mm)	$H_{\max} q_s$rehabilitado (mm)
2008	359.18	77.05	27.83
2009	143.07	44.05	23.23
2010	545.63	107.8	51.83
2011	320.76	50.8	25.15

Se deben calcular curvas HdF con los valores de la Tabla 18; en este caso se utilizó la metodología descrita en el numeral 1.2.3. Se utilizaron 8 y 4 como valores de P y N , respectivamente, donde P es el promedio del número de eventos para cada año i y condición del pavimento y N el número de años para los cuales se contaba con series prolongadas de lluvia. A continuación se muestran los resultados obtenidos después de aplicar dicha metodología.

Tabla 19. Resultados de análisis de frecuencias

r	$H_{\max} q_s$colmatado (mm)	$H_{\max} q_s$arbitrario (mm)	$H_{\max} q_s$rehabilitado (mm)	F	T (años)
1	545.63	107.8	51.83	0.08	6.00
2	359.18	77.05	27.83	0.20	2.47
3	320.76	50.8	25.15	0.32	1.56
4	143.07	44.05	23.23	0.44	1.14

En la tabla anterior se observa que para las alturas más importantes, el periodo de retorno es mayor debido que presentan la menor frecuencia. A continuación se muestra la gráfica que relaciona el caudal específico, las alturas máximas de agua acumulada y el periodo de retorno.

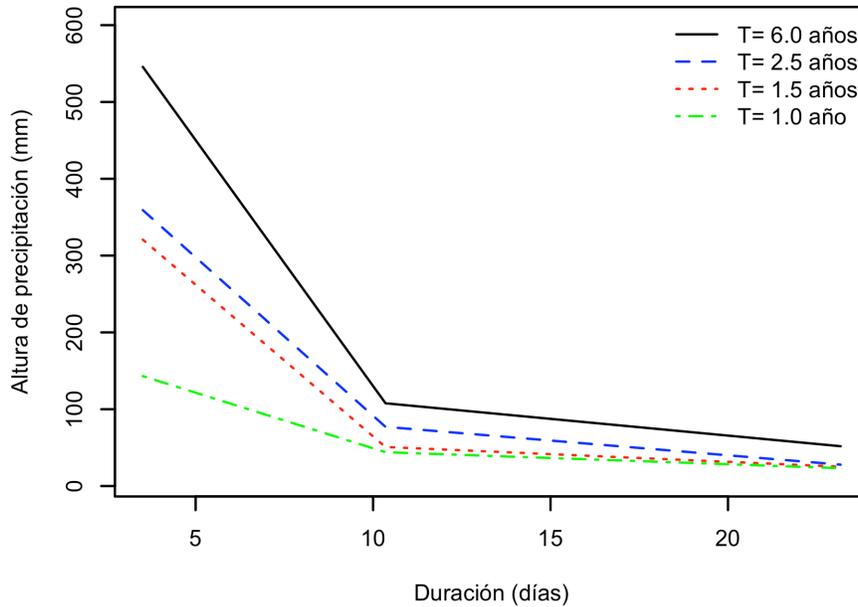


Figura 34. Curvas del análisis frecuencial obtenidas para el método de los volúmenes para la determinación de la altura específica

Después de encontrar la curva de altura específica, se calcula, mediante la Ecuación 53, el volumen de agua que debe ser almacenado por la estructura, en este caso la capa de pavimento poroso rígido. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada periodo de retorno y condición del pavimento.

Tabla 20. Volumen de agua acumulada para diferentes periodos de retorno y condiciones del pavimento para el método de los volúmenes

T (años)	V_{alm} (m^3) colmatado	V_{alm} (m^3) arbitrario	V_{alm} (m^3) rehabilitado
6.0	386.55	76.37	36.72
2.5	254.46	54.59	19.71
1.5	227.24	35.99	17.82
1.0	101.36	31.21	16.46

En la tabla anterior se observa que el volumen de agua que debe ser almacenado es mucho mayor cuando el pavimento se encuentra colmatado, debido a que éste ha perdido sus propiedades filtrantes, causando que la evacuación de las demandas de agua sea más lenta, y provocando la acumulación de ésta en la estructura de pavimento poroso rígido. El pavimento no requiere almacenamiento en condición nuevo, ya que la evacuación es más rápida que en las otras condiciones.

Puesto que para el objetivo de este trabajo de grado es primordial el cálculo del espesor del pavimento, se calculó como el cociente entre los volúmenes de agua almacenada y el área efectiva del pavimento requerido en la zona de estudio.

Tabla 21. Espesor del pavimento para diferentes periodos de retorno calculado a partir del análisis frecuencial del método de los volúmenes

T (años)	e (m) colmatado	e (m) arbitrario	e (m) rehabilitado
6.0	12.43	2.46	1.18
2.5	8.18	1.75	0.63
1.5	7.31	1.16	0.57
1.0	3.26	1.00	0.53

En la Tabla 21, se demuestra que para periodos de retorno más altos es necesario un dimensionamiento mayor de la estructura. Por otro lado se observa que es necesario garantizar el buen mantenimiento de las estructuras ya que en estado colmatado éstas requerían aproximadamente cinco veces el espesor de una estructura en estado rehabilitado.

Debido a que los periodos de retorno de diseño necesarios para poder realizar la comparación con el método de validación son 2, 3 y 4 años se realizó una interpolación lineal de los datos obtenidos en la Tabla 21, con el fin de obtener los resultados que se presentan a continuación.

Tabla 22. Espesores de pavimento obtenidos a partir de la interpolación de los periodos de retorno obtenidos mediante el método de los volúmenes

T (años)	e (m) colmatado	e (m) rehabilitado	e (m) arbitrario
4	10.00	2.06	0.87
3	8.79	1.86	0.71
2	7.74	1.46	0.60

En la tabla anterior, es evidente que los espesores requeridos para un pavimento colmatado son demasiado altos, haciéndolos poco viables tanto económica como urbanísticamente. Sin embargo, cabe resaltar que en este tipo de inversiones se hace necesario contemplar la limpieza permanente de los mismos con el fin de evitar la colmatación de las estructuras.

Los cálculos detallados de esta metodología se encuentran en el Anexo 9.

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

Tabla 23. Resultados de espesores de pavimento poroso rígido al aplicar las metodologías existentes

Metodología	T (años)	e (m)		
		Colmatado	Rehabilitado	Nuevo
Curva envolvente	2	0.76	0.51	0.21
	3	0.85	0.57	0.25
	4	0.93	0.63	0.28
Chile	2	1.02	0.87	0.64
	3	1.12	0.97	0.71
	4	1.23	1.06	0.79
The SUDS manual	2	0.17	0.09	0.01
	3	0.18	0.10	0.02
	4	0.20	0.11	0.02
Digest 365	2	0.86	0.61	0.28
	3	0.94	0.67	0.32
	4	1.04	0.75	0.36
Lluvias	2	0.84	0.77	0.66
	3	0.92	0.85	0.73
	4	1.01	0.94	0.80
Volúmenes	2	7.74	1.46	-
	3	8.79	1.86	-
	4	10.00	2.06	-

En la tabla anterior se evidencia una variación en los espesores obtenidos a través de la aplicación de las metodologías existentes, esto se debe principalmente a que cada una de ellas utiliza diferentes factores de seguridad y consideraciones individuales.

El método que más difiere es The SUDS manual, ya que considera que el único aporte a la estructura corresponde a la precipitación efectiva que cae sobre ella, sin tener en cuenta la escorrentía superficial proveniente de las áreas aferentes. Adicionalmente esta metodología no considera un factor de seguridad que contemple la frecuencia de mantenimiento de la

estructura, por lo tanto la capacidad de absorción de este método siempre es mayor que la de los anteriores.

Adicionalmente, el método de los volúmenes arroja los mayores espesores de pavimento poroso rígido, lo anterior se debe a que a diferencia de los otros métodos éste considera series prolongadas de lluvia anuales, sin embargo se observó que al contar con caudales específicos muy grandes, el método es ineficiente a la hora de encontrar las alturas máximas de agua acumulada, ya que no permite el cálculo de éstas para diferentes eventos pertenecientes a un año.

4. MÉTODO PROPUESTO DE VALIDACIÓN

Una vez aplicadas las metodologías de diseño existentes, fue necesario encontrar una herramienta que validara los resultados obtenidos. Normalmente la validación de resultados se realiza a partir de su aplicación, sin embargo, debido a que experimentalmente no fue posible construir un pavimento poroso rígido real y monitorearlo durante periodos prolongados de operación, se decidió realizar una simulación, utilizando la herramienta computacional R (R Development Core Team, 2012), la cual se introdujo en el numeral 2.4.1.

Esta simulación contempla datos hidrológicos de la zona de estudio y características reales del pavimento que fueron obtenidos experimentalmente mediante el modelo descrito en el numeral 2.2. Por otro lado, fueron utilizadas teorías hidrológicas e hidráulicas clásicas existentes, que permitieron simular el hidrograma de salida del pavimento como respuesta a un hidrograma de entrada impuesto según series históricas de lluvias registradas en la zona de estudio.

A continuación se describe detalladamente el cálculo tanto del hidrograma de entrada como del de salida.

4.1 Hidrograma de entrada

Para construir el hidrograma de entrada a la estructura de pavimento poroso rígido se utilizaron los datos horarios de precipitación comprendidos entre los años 2008 y 2011 de la estación Salitre Casa de Bombas (ver Anexo 1). Para utilizar esta información hidrológica fue necesario seleccionar un intervalo de tiempo de un minuto con el fin de aumentar la precisión de la validación. Una vez organizados los datos de precipitación se realizó la curva de masas, la cual representa gráficamente el comportamiento de la lluvia (Monsalve, 2001) (Ver Figura 35).

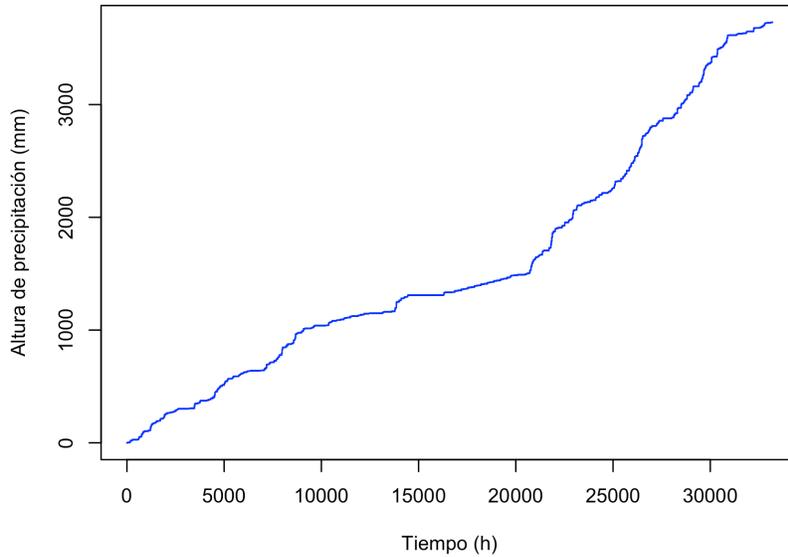


Figura 35. Curva de masas para la estación Salitre Casa de Bombas, del periodo comprendido entre los años 2008 y 2011

Después de realizar la curva de masas, se desacumulan los datos de precipitación y se calcula el caudal como el cociente entre el producto del área en metros cuadrados (m^2) y la precipitación en metros (m) y el intervalo de tiempo en segundos (s). Finalmente se grafica el hidrograma de entrada (ver Figura 36)

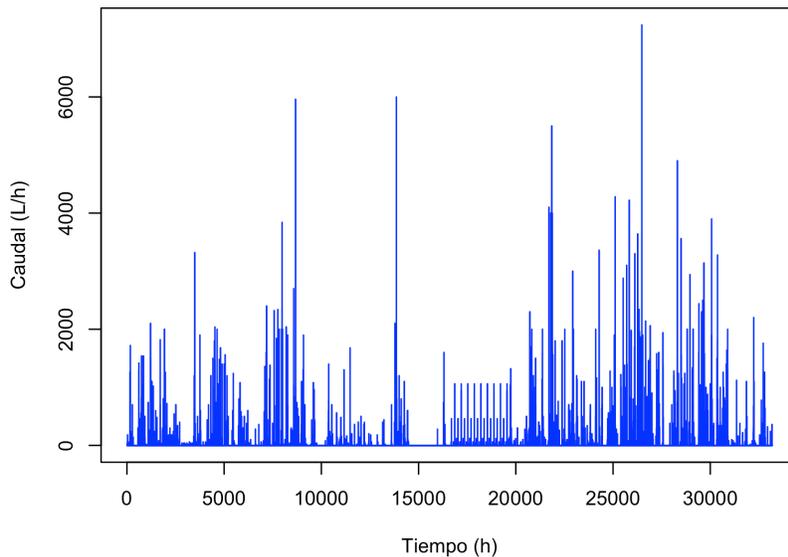


Figura 36. Hidrograma de entrada para la estación Salitre Casa de Bombas, del periodo comprendido entre los años 2008 y 2011

En la figura anterior se evidencia que las condiciones hidrológicas de la zona producen un caudal de entrada variable en el tiempo. El objeto de esta validación es por lo tanto hacer

uso de esta información hidrológica para simular el comportamiento de la estructura de pavimento poroso rígido teniendo una serie de precipitaciones prolongadas y continuas en el tiempo, obteniendo resultados del desempeño hidráulico del pavimento poroso rígido teniendo en cuenta la continuidad de las lluvias.

4.2 Hidrograma de salida

Para realizar el hidrograma de salida de la estructura de pavimento poroso rígido es necesario utilizar un hidrograma unitario sintético como herramienta hidrológica: el método seleccionado fue el hidrograma unitario sintético de Snyder, explicado en el numeral 1.2. A continuación se describe el procedimiento para el cálculo de este hidrograma de salida para las condiciones hidrológicas de la zona, descritas en el numeral 2.3.

Los procedimientos de hidrograma unitario sintético se utilizan para desarrollar hidrogramas unitarios para otros puntos en la corriente dentro de la misma cuenca o para cuencas adyacentes de carácter similar (Chow *et al*, 2000). Para la aplicación del hidrograma unitario para un pavimento poroso rígido se tuvieron en cuenta los siguientes elementos: (i) Las dimensiones utilizadas para el cálculo del hidrograma unitario son las correspondientes a la zona de estudio definidas en el numeral 2.3. Los datos de entrada para el cálculo del hidrograma unitario sintético son un área de 0.0002 km^2 , una longitud L de 0.04 km y una distancia entre la desembocadura y el centro de gravedad de la cuenca, medida sobre el cauce principal L_c de 0.02 km . A continuación se explica el procedimiento utilizado para el cálculo de estos valores:

Tabla 24. Cálculo de las dimensiones utilizadas en el hidrograma de Snyder

(1) $b_{pav} \text{ (km)}$	(2) $h_{pav} \text{ (km)}$	(3) $A_{pav} \text{ (km}^2\text{)}$ (1).(2)	(4) $L \text{ (km)}$ (2)	(5) $L_c \text{ (km)}$ (4)/2
0.00432	0.04	0.00017	0.04	0.02

Donde b la base de la calzada y h es el valor de la longitud del pavimento poroso rígido. t_R se definió con el mismo valor del intervalo de tiempo del hidrograma de entrada, es decir cada minuto. Los factores t_p , t_r , t_{pr} , t_b , t_R , TT_R en horas; q_p en m^3/s ; y W_{50} y W_{75} se calcularon de acuerdo a las ecuaciones del hidrograma sintético de Snyder.

4.2.1 Cálculo de C_t y C_p

Las dimensiones usadas para realizar la calibración del método de validación son las correspondientes al modelo físico definido en el numeral 2.2. Con este modelo fue posible llevar a cabo una simulación con datos reales de infiltración en un pavimento poroso rígido. Los datos de entrada para el cálculo del hidrograma unitario sintético son un área de $2.475E^{-7}$ km², una longitud L de 0.0005 km y una distancia entre la desembocadura y el centro de gravedad de la cuenca, medida sobre el cauce principal L_c de 0.000275 km, obtenidas a partir del modelo físico de Gómez *et al.* (2010). A continuación se describen los cálculos realizados para obtener los parámetros mencionados:

Tabla 25. Cálculo de las dimensiones utilizadas para el cálculo de los parámetros C_t y C_p

(1) Ancho _{modelo} (km)	(2) Largo _{modelo} (km)	(3) A_{modelo} (km ²) (1).(2)	(4) L (km) (2)	(5) L_c (km) (4)/2
0.00055	0.00045	$2.475E^{-7}$	0.00055	0.000275

Para el cálculo de C_t y C_p en el modelo físico de laboratorio se consideró el caudal de entrada como un impulso de 18 litros que se vierte sobre el modelo de pavimento en 3 segundos, lo cual al calcular el cociente entre el impulso y el tiempo, da como resultado un caudal de entrada de 6 l/s (Gómez *et al.* 2010). Fue necesario convertir 18 litros de impulso, equivalente a una altura de precipitación con el fin de obtener un hidrograma de salida unitario, éste se calculó como el cociente entre el impulso de 18 litros en m³ y el área del modelo físico del pavimento poroso rígido del numeral 2.2. La precipitación equivalente obtenida mediante la conversión descrita fue 7.2 cm, la cual se calculó como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 26. Cálculo de la precipitación equivalente para convertir el convertír el hidrograma de salida del modelo físico en un hidrograma unitario

(1) V_e (l)	(2) V_e (m ³)	(3) A_{modelo} (m ²)	(4) P_m $\frac{(2)}{(3)} \cdot 100$
18	0.018	0.25	7.2

Donde:

V_e : Volumen de entrada al modelo físico de pavimento poroso rígido de Gómez *et al.* (2010)

A_{modelo} : Área del modelo físico de pavimento poroso rígido de Gómez *et al.* (2010)

P_m : Precipitación equivalente del caudal de entrada

Considerando que tanto los datos empíricos obtenidos con el modelo físico debían ser iguales a los del hidrograma de salida sintético propuesto por Snyder, los valores de C_t y C_p para un pavimento poroso fueron calibrados, con el fin de acercar la simulación al comportamiento real de la estructura del pavimento poroso rígido.

Para la calibración de estos parámetros era necesario tomar valores de C_t y C_p iniciales entre los rangos de valores típicos para éstos, y calcular el hidrograma de salida por el método de Snyder y compararlos con los caudales obtenidos para las tres pruebas realizadas por Gómez *et al.*, 2010. Esta calibración se realizó mediante la herramienta solver de Excel.

A continuación se muestran las gráficas del máximo ajuste encontrado al calibrar los parámetros C_t y C_p entre el hidrograma unitario de Snyder y el hidrograma unitario del modelo, el cual fue construido a través de pruebas de laboratorio.

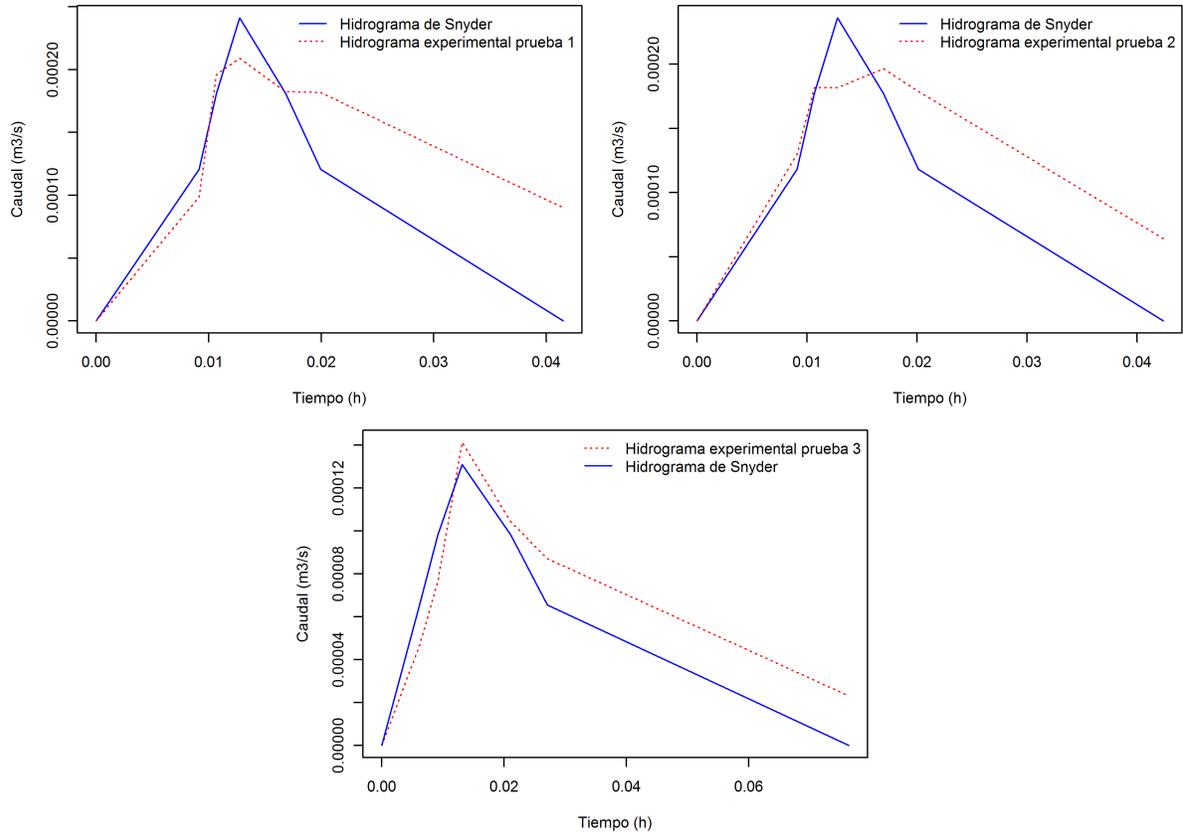


Figura 37. Calibración de los parámetros C_t y C_p del hidrograma sintético de Snyder a partir de las pruebas de laboratorio de Gómez *et al.* (2010): Prueba 1 (izquierda superior), Prueba 2 (derecha superior) y Prueba 3 (inferior)

Para comparar estos valores es necesario interpolar los caudales de salida del modelo de Gómez *et al.* 2010, en los tiempos obtenidos por el método de Snyder. Se realizó el cálculo hasta que los valores para C_t y C_p convergieron. Los resultados de las iteraciones se encuentran en el Anexo 10.

Al realizar los cálculos mencionados anteriormente se obtuvieron los siguientes valores para C_t y C_p , el promedio de estos valores fueron utilizados en la simulación.

Tabla 27. Valores C_t y C_p

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
C_t	1.9998	2.0031	2.0699	2.0243
C_p	0.6008	0.5894	0.3381	0.5951

Después de calibrar el modelo hidrológico a las condiciones de la estructura, se utilizaron las series horarias de precipitación que se encuentran en el Anexo 1 y las características de

la zona de estudio, que se encuentran en el numeral 2.3. El hidrograma de salida obtenido para las condiciones hidrológicas de la zona y las características del pavimento rígido poroso colmatado, rehabilitado y nuevo se muestran en la siguiente figura.

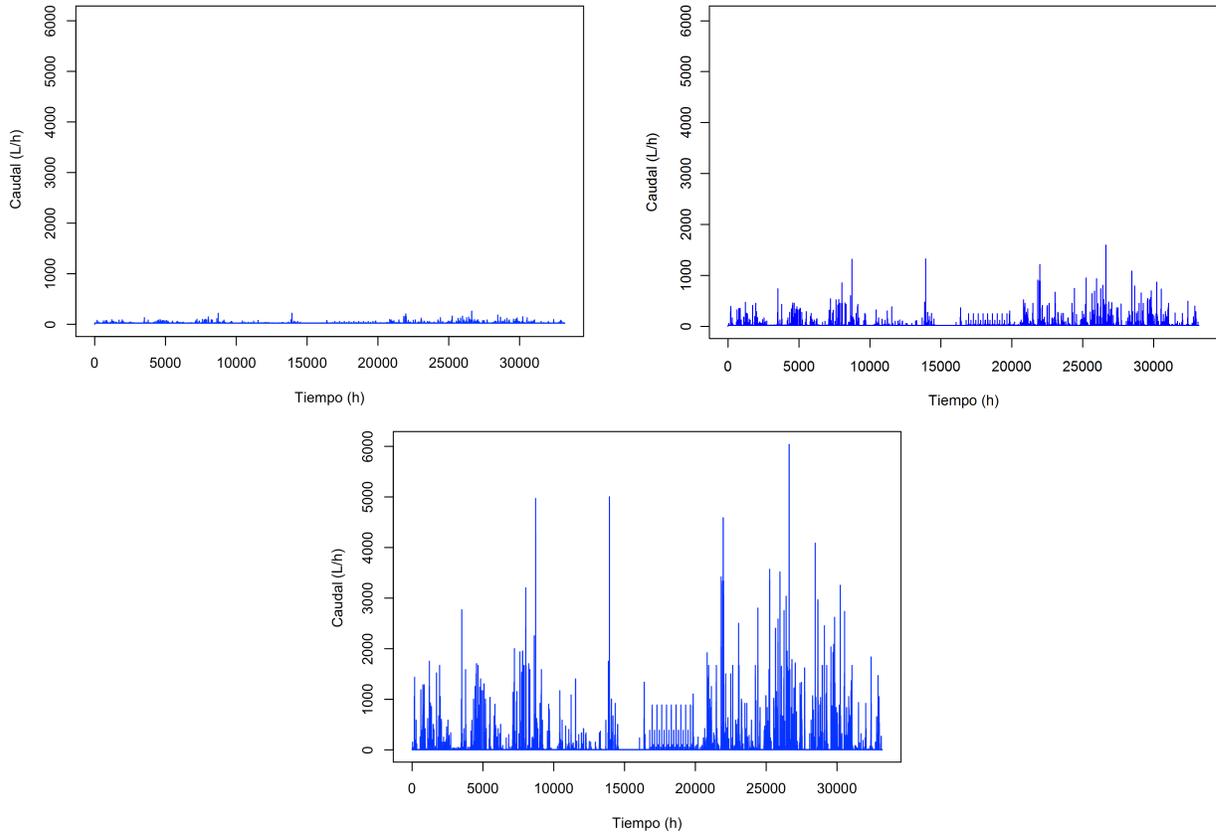


Figura 38. Hidrogramas de salida utilizando el método de Snyder según mantenimiento para el método de validación: sin mantenimiento (izquierda superior), con mantenimiento (derecha superior) y nuevo (inferior)

Al graficar el hidrograma de salida, se evidencia que la condición del pavimento poroso rígido influye considerablemente en la eficiencia de la evacuación de las demandas hidrológicas de la zona: mientras que para un pavimento nuevo la mayor evacuación es mayor de 40000 l/s, para un pavimento colmatado este no supera los 3000 l/s.

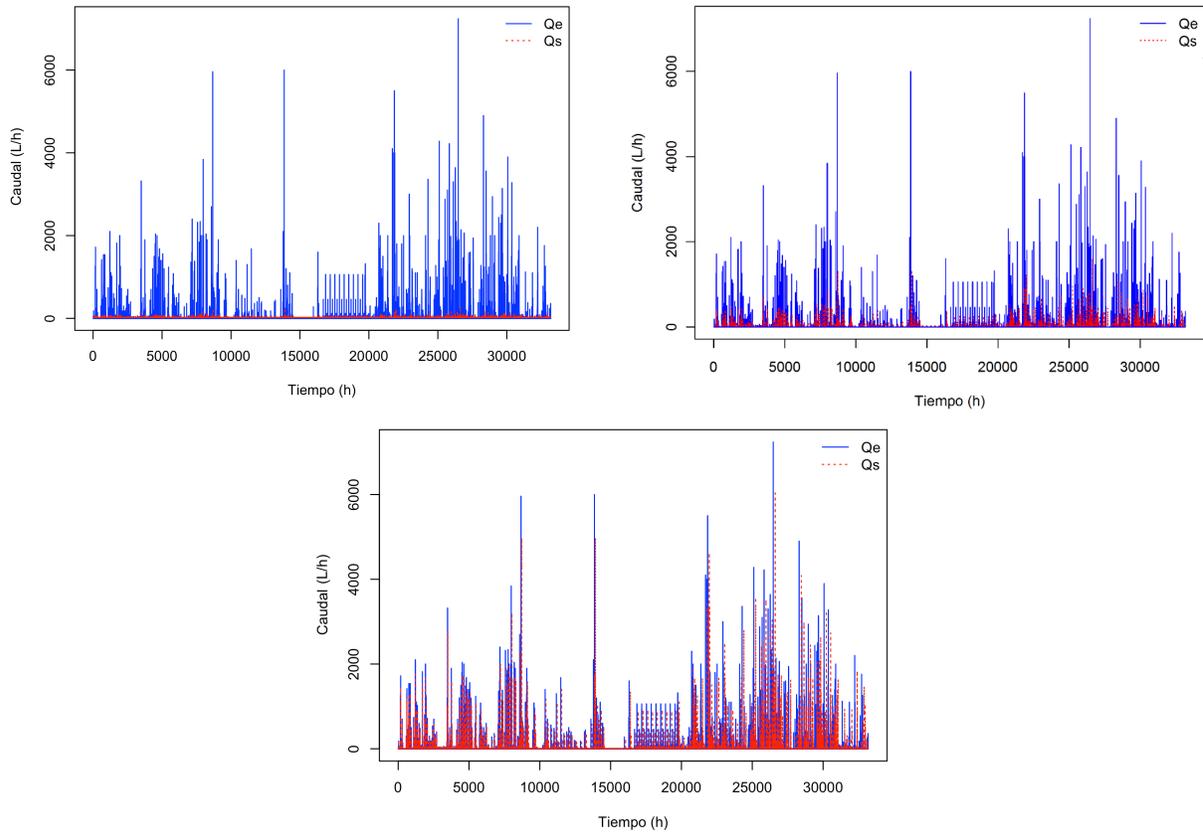


Figura 39. Hidrogramas de entrada y salida para la zona de estudio según mantenimiento para el método de validación: sin mantenimiento (izquierda superior), con mantenimiento (derecha superior) y nuevo (inferior)

En la Figura 39 se evidencia que una estructura de pavimento disminuye los picos ya que la descarga es diferida en el tiempo. Con el fin de asegurar que el volumen de entrada sea igual al volumen de salida se contempló un caudal base distribuido en el tiempo. Este caudal base fue calculado como el cociente entre la diferencia del volumen de entrada y el de salida y el tiempo máximo resultante del hidrograma de salida de Snyder.

4.3 Cálculo del espesor del pavimento

Para el cálculo del espesor, primero es necesario calcular el volumen de entrada y salida como se describió en los ítems anteriores. Se debe calcular el volumen de almacenamiento para cada intervalo de tiempo con la siguiente ecuación:

$$V_{alm(i)} = (Q_{e(i)} - Q_{s(i)}) \cdot (\Delta T) \quad \text{Ecuación 61}$$

Donde:

Q_e : Caudal de entrada

Q_s : Caudal de salida

ΔT : Intervalo de tiempo

Luego se deben acumular los volúmenes de almacenamiento para cada delta de tiempo con el fin de obtener el espesor del pavimento.

$$V_{acum} = V_{alm(i)} - V_{alm(i-1)} \quad \text{Ecuación 62}$$

Donde:

V_{acum} : Volumen almacenado acumulado

V_{alm} : Volumen almacenado

Cada vez que el caudal de salida es mayor que el caudal de entrada es necesario asignar al V_{alm} el valor de cero con el fin de no subestimar el espesor del pavimento.

Para calcular la altura de almacenamiento en (m) se utiliza la siguiente expresión:

$$H = \frac{(V_{acum(i)}/1000)}{A_{eff}}$$

Donde:

$V_{acum(i)}$: en l

A_{eff} : en m²

A_{eff} : $b_{pav} \cdot h_{pav} \cdot \eta$

Al aplicar la metodología expuesta anteriormente se encontraron las alturas para las diferentes condiciones del pavimento. Las alturas máximas calculadas para colmatado, rehabilitado y nuevo son 5.18, 4.27, 1.25 metros, respectivamente. En la Figura 40 se evidencian los espesores obtenidos cada minuto, los cuales corresponden a la

variación del almacenamiento a medida que se evacua el caudal de entrada desde la estructura de pavimento.

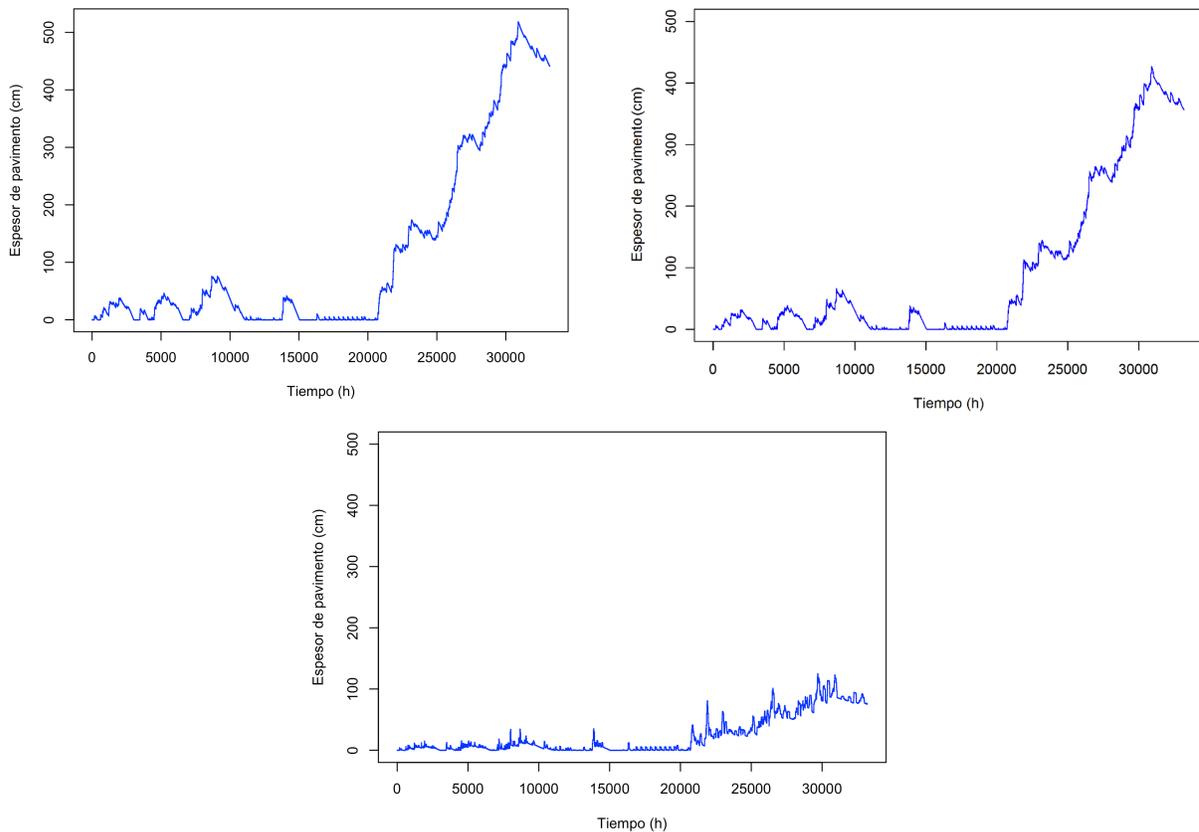


Figura 40. Espesor del pavimento según mantenimiento para el método de validación: sin mantenimiento (izquierda superior), con mantenimiento (derecha superior) y nuevo (inferior)

Al realizar la validación por medio de la simulación se observó que al estar el pavimento colmatado es necesario un mayor espesor para la estructura que para una condición de rehabilitado o nuevo, ya que la evacuación depende de la frecuencia de mantenimiento que éste tenga durante su funcionamiento. Adicionalmente se observa que cuando el pavimento es nuevo la descarga se da a menores intervalos de tiempo y con mayor frecuencia, debido a que el pavimento cuenta con todas sus capacidades de descarga.

Después de calcular el espesor del pavimento para cada minuto, es necesario asignar un periodo de retorno a estos valores: para su cálculo se asumió que el máximo periodo de retorno $Max(T)$ que se podría obtener corresponde al número total de años de información hidrológica disponible y éste fue asignado al máximo espesor encontrado por medio del

método de validación, el cual tendría una ocurrencia de uno sobre el número total de espesores encontrados (P_a en

Figura 41). Adicionalmente se consideró que cuando la ocurrencia es de 0.5 el periodo de retorno corresponde a la mitad del máximo periodo de retorno posible $Max(T)$. Con lo anterior, y conociendo la frecuencia de ocurrencia (P en Figura 41) para cualquier espesor es posible encontrar su periodo de retorno.

Para el cálculo de la ocurrencia P fueron seleccionados tres umbrales de altura los cuales corresponden a ocho novenos, tres novenos y un noveno de la altura máxima encontrada a través del método de validación, a los cuales se les calculó el inverso del número de veces que éstos fueron sobrepasados en el tiempo simulado, con el fin de encontrar la frecuencia de ocurrencia P .

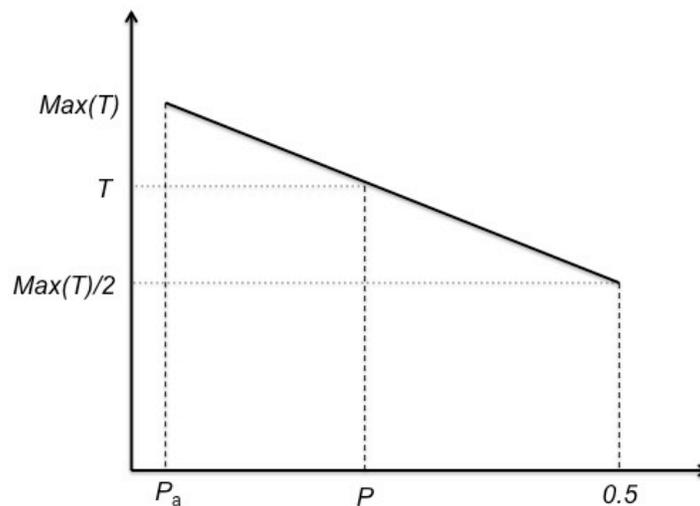


Figura 41. Relación de frecuencias para el cálculo del periodo de retorno correspondiente a diferentes espesores encontrados mediante el método de validación

Para el cálculo del periodo de retorno de acuerdo a la Figura 41 se considera una relación lineal, donde la ocurrencia aumenta a medida que el periodo de retorno disminuye (inversamente proporcional).

$$T = \frac{\max(T) \cdot (0.5 - P)}{0.5 - P_a} + \frac{\max(T)}{2} \quad \text{Ecuación 63}$$

Donde:

T : Periodo de retorno en años

P : Frecuencia de ocurrencia para cualquier espesor

P_a : Frecuencia de ocurrencia para el máximo espesor obtenido

Al utilizar la Ecuación 63, se calcularon alturas de pavimento asociadas a diferentes periodos de retorno y para las diferentes condiciones del pavimento (colmatado, rehabilitado y nuevo). A continuación se presentan estos resultados.

Tabla 28. Espesor de pavimento poroso rígido en metros a partir del método de validación

Condición T (años)	Colmatado	Rehabilitado	Nuevo
2	0.58	0.47	0.14
3	1.73	1.42	0.42
4	4.61	3.80	1.11

Al igual que en la aplicación de las metodologías de diseño existentes, en la Tabla 28 se evidencia que los mayores espesores de pavimento se obtienen para la condición de colmatado y para periodos de retorno mayores.

5. ADAPTACIONES DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES

Teniendo en cuenta que las metodologías de diseño existentes están contempladas para las condiciones del país en el cual fueron desarrolladas, en el presente capítulo se busca realizar adaptaciones de estas metodologías a las características de la zona de estudio descrita en el numeral 2.3, sin embargo es necesario aclarar que el método podría replicarse para otras zonas en caso que se contara con la información hidrológica suficiente para realizar la validación descrita en el capítulo anterior.

Debido a que el pavimento poroso rígido es una superficie infiltrante, la capacidad de absorción por unidad de superficie está determinada por las propiedades del mismo. Para el cálculo de la capacidad de absorción, se tuvo en cuenta las propiedades hidráulicas encontradas en el modelo físico descrito en el numeral 2.2. Sin embargo, teniendo en cuenta que tanto las condiciones hidrológicas como físicas del modelo de pavimento difieren de las condiciones reales, se realizaron las siguientes adaptaciones para la aplicación de las metodologías de diseño con base en los resultados obtenidos por medio del método de validación propuesto en el capítulo 4.

Teniendo en cuenta que los espesores de pavimento poroso rígido arrojados por el método de validación están en función de la condición en la que éste se encuentre (nuevo, rehabilitado, colmatado), a partir de estos resultados se proponen factores de seguridad que adicionalmente respondan a las condiciones hidrológicas específicas de la zona de estudio: esta adaptación se realizó con el fin de garantizar el buen funcionamiento hidráulico de la estructura, con base en series reales de precipitación registradas en la estación Salitre Casa de Bombas de Bogotá D.C.

El uso de los factores de seguridad depende de la frecuencia de mantenimiento del pavimento. Es decir, es necesario conocer si el pavimento que se está diseñando tendrá un mantenimiento periódico o no tendrá mantenimiento, lo cual lo llevará a su colmatación. Se propone calcular este factor de seguridad como el cociente entre el espesor obtenido para un pavimento colmatado o rehabilitado, según sea el caso, y el espesor de un pavimento nuevo. Adicionalmente éste fue calculado para periodos de retorno de 2, 3 y 4 años. Los

factores de seguridad obtenidos para un pavimento poroso rígido sin mantenimiento y con mantenimiento (colmatado, rehabilitado) son 4.148 y 3.418, respectivamente para todos los periodos de retorno.

En el párrafo anterior se evidencia que el factor de seguridad requerido depende de la frecuencia de mantenimiento realizada a la estructura más no del periodo de retorno para el que ha sido diseñado. La frecuencia de mantenimiento garantiza la recuperación de parte de las propiedades filtrantes de la estructura, por esta razón se observa que para una condición más desfavorable, colmatado, se requieren factores de seguridad mayores.

Cabe resaltar que en este numeral será utilizado únicamente la capacidad de absorción por unidad de superficie para un pavimento nuevo afectada por su factor de seguridad, el cual depende únicamente de la frecuencia de mantenimiento. Teniendo en cuenta lo anterior, la capacidad de absorción del pavimento calculada en el numeral 3 fue reducida, multiplicándola por los factores de seguridad del capítulo 5 (párrafo 4). La capacidad de absorción obtenida para un pavimento con mantenimiento es de 35.28 mm/h y para uno sin mantenimiento es de 42.81 mm/h, con estos resultados se evidencia que la capacidad de absorción por unidad de superficie para un pavimento sin mantenimiento es menor, ya que debe contar con una mayor seguridad en su diseño debido a la pérdida de sus propiedades de descarga.

A continuación se mencionarán las adaptaciones particulares propuestas y puestas en marcha para cada método de diseño estudiado en el capítulo 3 y los resultados obtenidos.

5.1 Adaptaciones de método de la curva envolvente

Inicialmente para la aplicación de esta metodología fue necesario adaptar los coeficientes de una IdF tipo Montana a una tipo Talbot, ya que las ecuaciones de esta metodología son contempladas a partir de curvas IdF tipo Talbot, y la información hidrológica disponible para la zona de estudio estaba descrita en ecuaciones IdF tipo Montana, la metodología utilizada para realizar esta conversión se explico detalladamente en el capítulo 3.

En esta metodología se utilizó la capacidad de absorción por unidad de superficie afectada por los factores de seguridad mencionados en el párrafo 4, al inicio de este capítulo, y que

fueron calculados mediante los resultados obtenidos de la simulación, esto se realizó con el fin de brindar una mayor seguridad en el diseño, ya que este método no contempla el uso de factores de seguridad.

Una vez realizados estos cambios se obtuvieron los siguientes resultados, dependiendo del periodo de retorno y la frecuencia de mantenimiento:

Tabla 29. Resultados de la adaptación del método de la curva envolvente

T= 2 años		
	V_{alm} (mm)	e (m)
Sin mantenimiento	94.41	0.52
Con mantenimiento	87.85	0.49
T= 3 años		
	V_{alm} (mm)	e (m)
Sin mantenimiento	105.31	0.59
Con mantenimiento	98.17	0.55
T= 4 años		
	V_{alm} (mm)	e (m)
Sin mantenimiento	116.62	0.65
Con mantenimiento	108.91	0.61

En la tabla anterior se evidencia que al tener en cuenta un mantenimiento en la estructura de pavimento, los espesores de diseño serán menores que al diseñar una que no cuente con esto. Así mismo, y como se ha venido mencionando, a mayor periodo de retorno es necesario un mayor espesor del pavimento. Los cálculos detallados de esta metodología se encuentran en el Anexo 4.

5.2 Adaptación de metodología Chile

Con este método se encuentra el espesor de la subbase de un pavimento. Para la aplicación de esta metodología en Bogotá se proponen las siguientes adaptaciones: (i) Al igual que en el capítulo 3, la capacidad de infiltración del suelo fue reemplazada por la capacidad de absorción por unidad de superficie del pavimento rígido poroso que se utilizó en la zona de estudio; (ii) para el cálculo de la tasa de infiltración, se reemplazó el factor de seguridad

propuesto por la metodología original, por aquellos mostrados en el capítulo 5 (párrafo 4), los cuales contemplan el mantenimiento esperado de la estructura.

Los resultados al aplicar las modificaciones mencionadas anteriormente, se obtuvieron a través de la secuencia presentada en el capítulo 3, numeral 3.2. A continuación se presentan los resultados obtenidos para las dos posibles condiciones en las que se encontraría el pavimento en la zona de estudio.

Tabla 30. Resultados de la adaptación del método de Chile

T= 2 años								
Mantenimiento	(1) d (min)	(2) I (mm/h)	(3) V_{afl} (m³)	(4) V_{inf} (m³)	(5) V_{alm} (m³)	(7) V_{pav} (m³)	(8) e (m)	(9) t_m (h)
Sin mantenimiento	62.00	30.90	28.27	6.30	21.98	122.08	0.71	91.00
Con mantenimiento	55.00	33.85	27.48	6.78	20.70	114.99	0.67	12.99
T= 3 años								
Sin mantenimiento	67.00	31.60	31.25	6.81	24.44	135.78	0.79	101.22
Con mantenimiento	60.00	34.39	30.46	7.40	23.06	128.11	0.74	14.47
T= 4 años								
Sin mantenimiento	72.00	32.27	34.29	7.31	26.97	149.86	0.87	111.71
Con mantenimiento	65.00	34.92	33.50	8.02	25.49	141.60	0.82	16.00

En la Tabla 30 se muestran los valores máximos obtenidos para el volumen de pavimento V_{pav} calculado como el cociente entre el volumen máximo de precipitación a ser almacenado y la porosidad del pavimento. En cuanto al espesor del pavimento, este se obtuvo como el cociente entre el volumen V_{pav} y el área del pavimento A_{pav} . Cabe resaltar que en la Tabla 30 se muestran únicamente los valores obtenidos para la duración en la cual se obtuvo el máximo espesor de pavimento para diferentes condiciones de mantenimiento. Los cálculos en detalle se encuentran en el Anexo 5.

A continuación se presentan las gráficas obtenidas al calcular el volumen almacenado en un pavimento con mantenimiento (rehabilitado) y sin mantenimiento (colmatado) para diferentes duraciones.

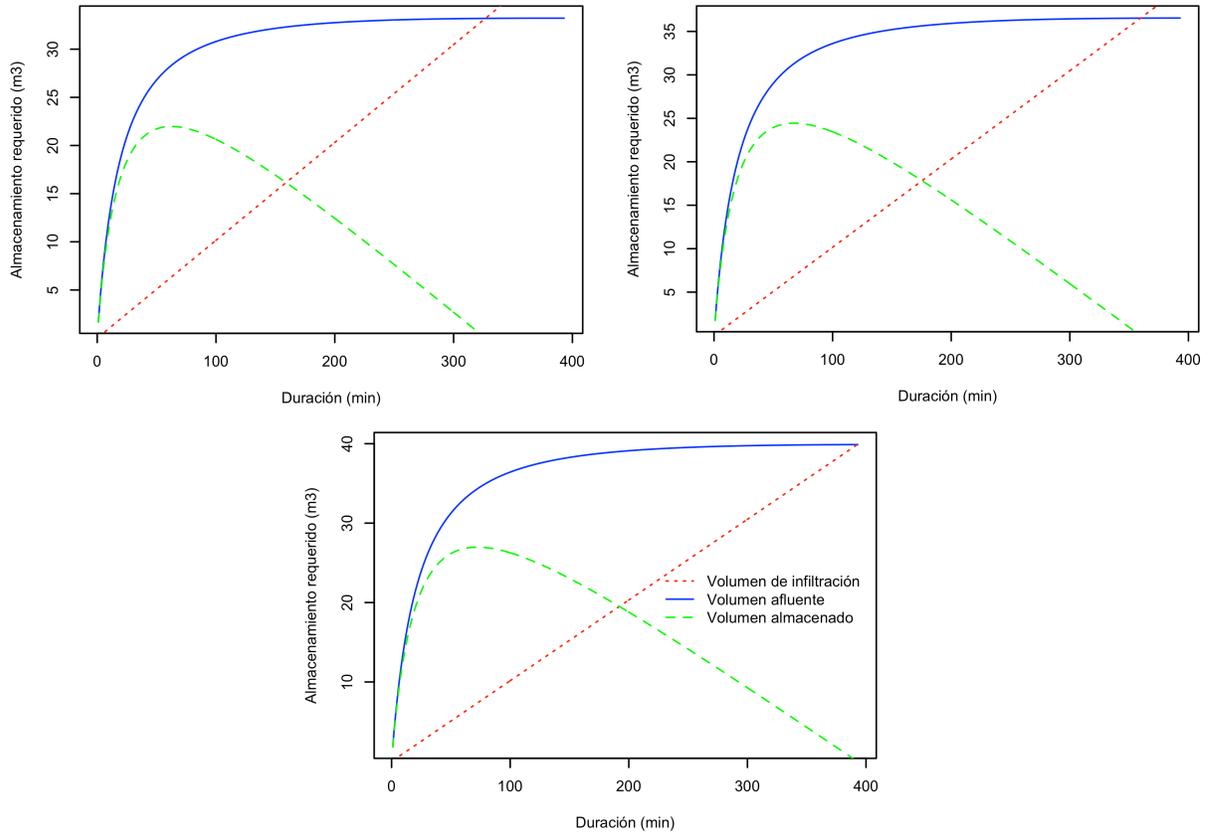


Figura 42. Cálculo del volumen de almacenamiento para un pavimento sin mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología Chile: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior)

En la figura anterior se observa que el volumen de agua almacenado requerido aumenta para periodos de retorno mayores. Estos valores fueron de 21.98 m^3 , 24.44 m^3 y 26.97 m^3 para 2, 3 y 4 años.

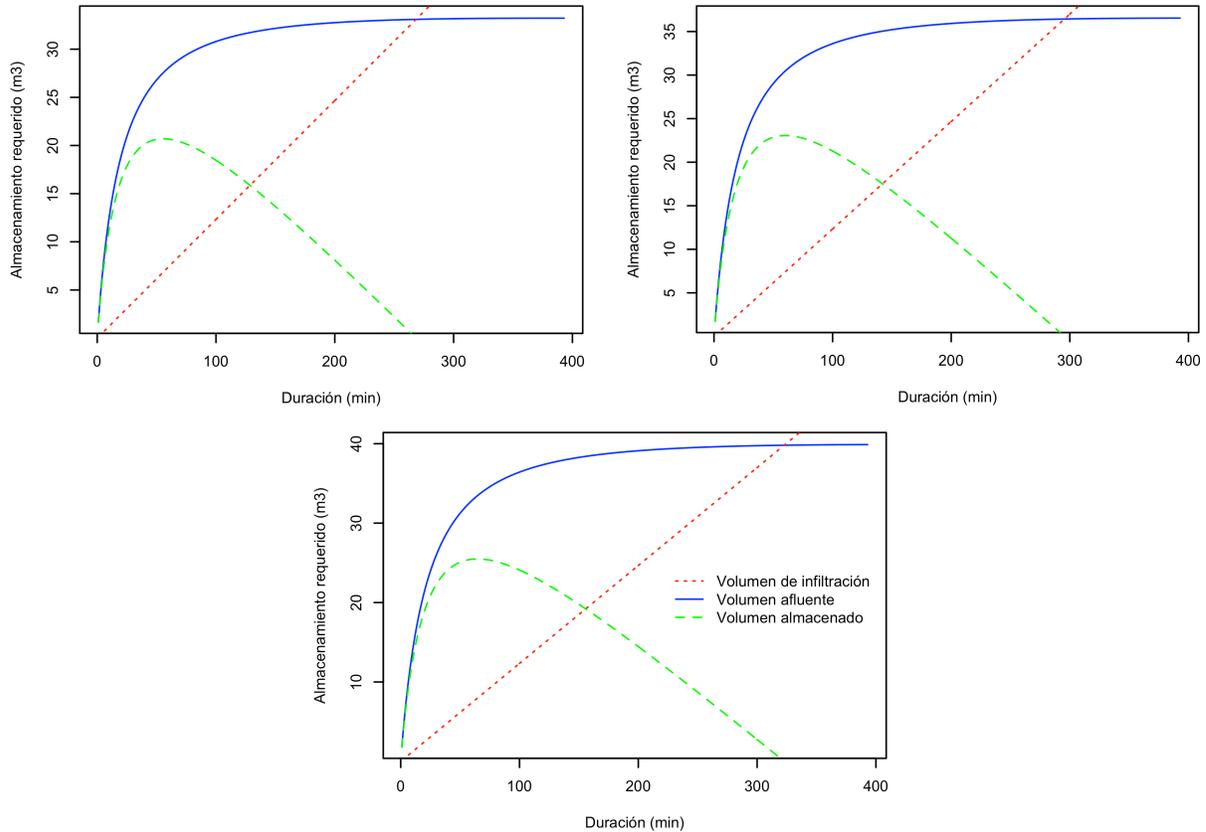


Figura 43. Cálculo del volumen de almacenamiento para un pavimento con mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología Chile: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior)

En la figura anterior se observa que el volumen de agua almacenado requerido aumenta para periodos de retorno mayores. Estos valores fueron de 20.7 m^3 , 23.06 m^3 y 25.49 m^3 para 2, 3 y 4 años.

De la Figura 42 y Figura 43 se concluye que al garantizar un mantenimiento de la estructura, se obtiene un mejor desempeño del mismo. Por otro lado se observa que los tiempos de vaciado son mayores para un pavimento rígido poroso sin mantenimiento que para uno con mantenimiento, este valor se observa cuando la curva del volumen afluente corta con la curva del volumen de infiltración, estos valores se muestran en la Tabla 30, columna 9.

5.3 Adaptación The SUDS manual, CiriaC697

En este método la capa de almacenamiento es considerada de un material diferente al pavimento poroso rígido, es decir el pavimento sólo permite la infiltración y el almacenamiento se tendría en una capa inferior. En este trabajo se asumirá que el pavimento poroso, además de permitir la infiltración, tendrá capacidad de almacenamiento, por lo tanto la porosidad utilizada se relaciona con las propiedades hidráulicas explicadas en el numeral 2.2.

Así mismo, en el presente método se recomienda el uso de factores de seguridad específicos dependiendo de los posibles daños que se podrían causar al tener la falla de la estructura. Lo anterior se explicó detalladamente en el numeral 2.1.3. Sin embargo, con el fin de brindar una mayor seguridad y una mejor adaptación a las condiciones de la zona de estudio, al igual que en las otras metodologías, se propone que la capacidad de absorción por unidad de superficie sea afectada por los factores de seguridad calculados mediante los resultados obtenidos del método de validación.

Adicionalmente, de acuerdo a esta metodología, para un pavimento de infiltración, la relación entre el área drenada y el área de infiltración es igual a 1 ($R=1$), es decir se considera que el área que aporta es igual al área del pavimento poroso rígido en planta. En el presente trabajo, se propone el cálculo de esta relación con el propósito que sea adaptada a la zona de estudio, considerando el área drenada calculada no solamente como el área del pavimento sino también teniendo en cuenta todas las áreas aportantes al pavimento y adicionalmente afectado por el coeficiente C de escorrentía, es decir el área activa de escurrimiento. Con lo anterior se tiene en cuenta la verdadera área que se encontrará aportando al pavimento. Adicionalmente el área de infiltración corresponde al área de la cara superior del pavimento poroso, con lo cual se buscó realizar una relación más realista entre el área de aporte y el área de infiltración.

Una vez realizadas estas adaptaciones, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales están en función del periodo de retorno y la frecuencia de mantenimiento:

Tabla 31. Resultados de la adaptación del método The SUDS Manual

T= 2 años	d (min)	R.P (mm)	f (mm)	P-f (mm)	e (m)
Sin mantenimiento	56	127.80	32.93	94.87	0.53
Con mantenimiento	49	123.41	34.96	88.45	0.49
T= 3 años					
Sin mantenimiento	60	141.01	35.28	105.73	0.59
Con mantenimiento	53	136.58	37.82	98.76	0.55
T= 4 años					
Sin mantenimiento	64	154.54	37.63	116.91	0.65
Con mantenimiento	57	150.08	40.67	109.40	0.61

En la tabla anterior se muestran únicamente los valores obtenidos para la duración en la cual se obtuvo el máximo espesor de pavimento para diferentes condiciones del mismo. Los cálculos en detalle se encuentran en el Anexo 6.

En la tabla anterior se evidencia que el máximo espesor corresponde a 0.65 m, para un periodo de retorno de 4 años y un pavimento sin mantenimiento. Para este mismo periodo de retorno y para un pavimento con mantenimiento se encontró un espesor de 0.61 m.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para diferentes duraciones, mediante las gráficas de las alturas de lluvia y la capacidad de absorción por unidad de superficie para diferentes periodos de retorno y frecuencia de mantenimiento:

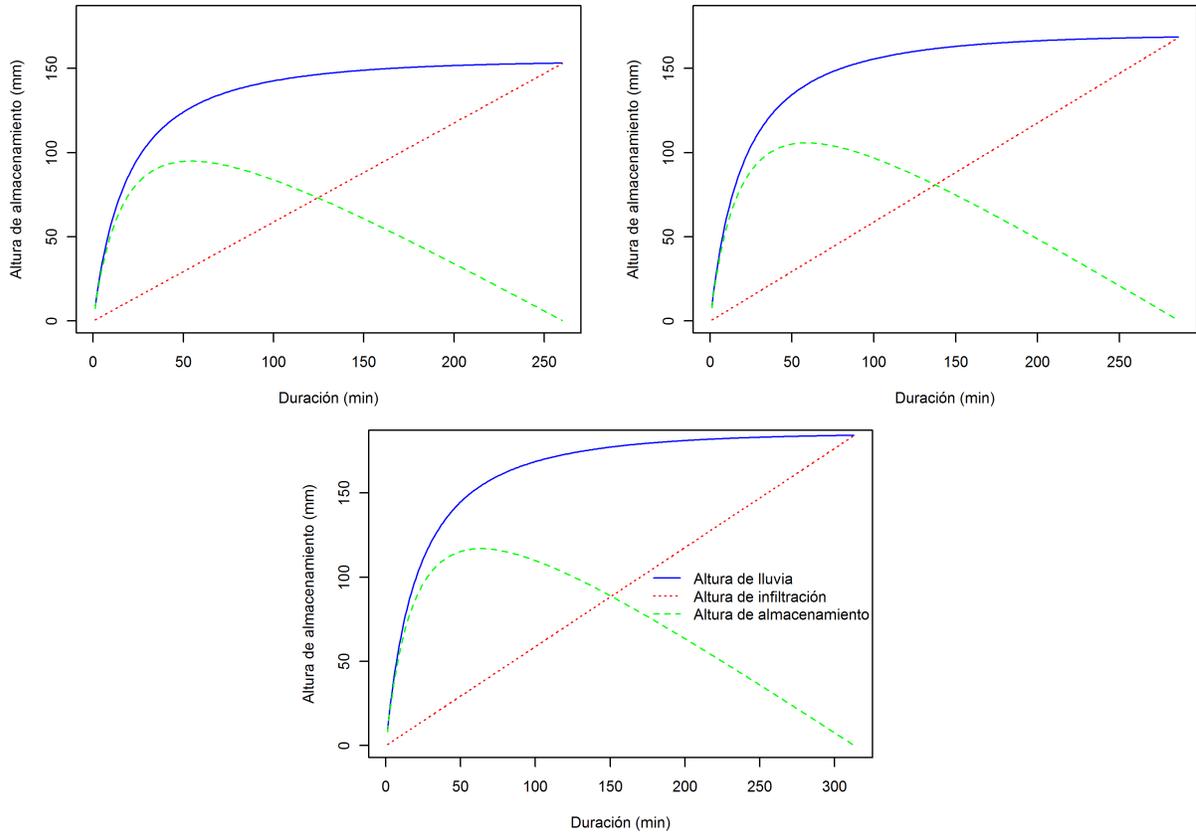


Figura 44. Cálculo altura de almacenamiento para un pavimento sin mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología The SUDS manual: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior)

En las gráficas anteriores, se observa que para un periodo de retorno de 2, 3 y 4 años, las máximas alturas de almacenamiento se presentan en una duración de 56, 60 y 64 minutos respectivamente. A partir de las máximas alturas se calculó el espesor de pavimento necesario en caso de no existir un mantenimiento a la estructura.

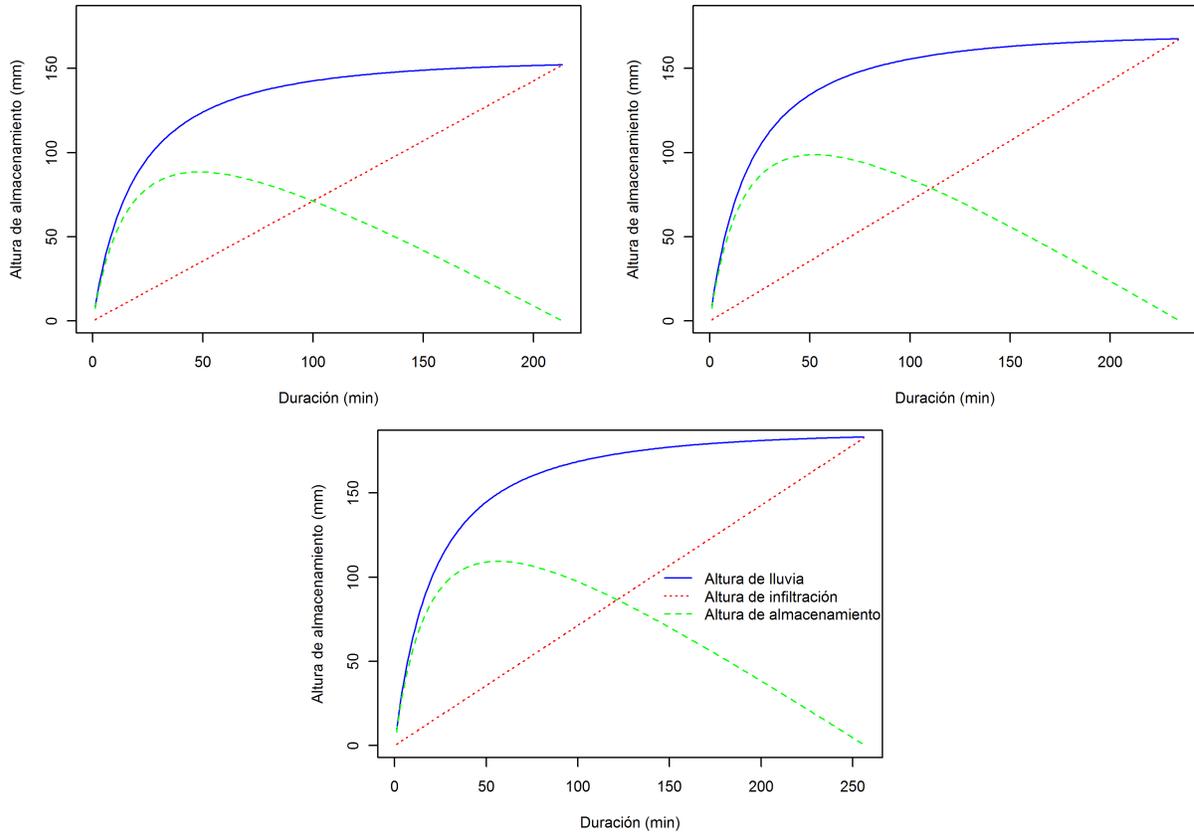


Figura 45. Cálculo altura de almacenamiento para un pavimento con mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología The SUDS manual: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior)

En las gráficas anteriores, se observa que para un periodo de retorno de 2, 3 y 4 años, las máximas alturas de almacenamiento se presentan en una duración de 49, 53 y 57 minutos respectivamente. Se evidencia que al existir un mantenimiento a la estructura de pavimento, el espesor disminuye, por lo tanto la escogencia correcta del factor de seguridad influye directamente en el diseño del pavimento.

5.4 Adaptación del Método Digest 365

Este método fue diseñado para el dimensionamiento de trincheras de infiltración, pero fue considerado en el presente trabajo debido a que los pavimentos porosos, al igual que las trincheras de infiltración son complementos del sistema de drenaje urbano que operan mediante mecanismos de infiltración similares y por lo tanto cumplen con la misma función. Para aplicar esta metodología en pavimentos porosos se realizaron las siguientes adaptaciones: (i) El área impermeable drenada se calculó como el producto entre el

coeficiente de escurrimiento y el área de drenaje explicado en el numeral 1.2.4; (ii) Para el cálculo del volumen de salida V_{inf} , α_{50} se definió como la capa inferior del pavimento; (iii) En el cálculo de infiltración se reemplazó el factor de seguridad propuesto por la metodología, por los presentados en el capítulo 5 (párrafo 4) los cuales tienen en cuenta la posible colmatación de la estructura. Estos factores de seguridad dependen de la condición final esperada del pavimento; (iv) Para el caso de un pavimento poroso el volumen efectivo de almacenamiento se calculó mediante la ecuación siguiente:

$$V_{efectivo} = A \cdot \eta \cdot e \quad \text{Ecuación 64}$$

Donde:

A : Área del pavimento poroso

η : Porosidad del pavimento

e : Espesor requerido del pavimento poroso

Los resultados al aplicar las modificaciones mencionadas anteriormente, se obtuvieron a través de la misma secuencia empleada en el numeral 3.4. A continuación se presentan los resultados obtenidos para las dos posibles condiciones en las que se encontraría el pavimento en la zona de estudio.

Tabla 32. Resultados de la adaptación del método Digest 365

T= 2 años	d (min)	P (mm)	V_{afn} (m³)	V_{inf} (m³)	V_{alm} (m³)	e (m)
Sin mantenimiento	55	31.032	21.985	5.588	16.397	0.522
Con mantenimiento	48	29.930	21.204	5.919	15.284	0.485
T= 3 años						
Sin mantenimiento	59	34.252	24.266	5.994	18.272	0.587
Con mantenimiento	51	32.962	23.352	6.289	17.062	0.540
T= 4 años						
Sin mantenimiento	64	37.694	26.705	6.502	20.203	0.642
Con mantenimiento	56	36.432	25.811	6.906	18.905	0.599

En la tabla anterior se mostraron los valores máximos obtenidos para el volumen requerido

V_{alm} , y el espesor máximo para el pavimento rígido poroso, calculado al despejar e de la Ecuación 64. Los cálculos en detalle se encuentran en el Anexo 7.

A continuación se presentan las gráficas obtenidas al calcular el volumen almacenado en un pavimento con mantenimiento (rehabilitado) y sin mantenimiento (colmatado) para diferentes duraciones.

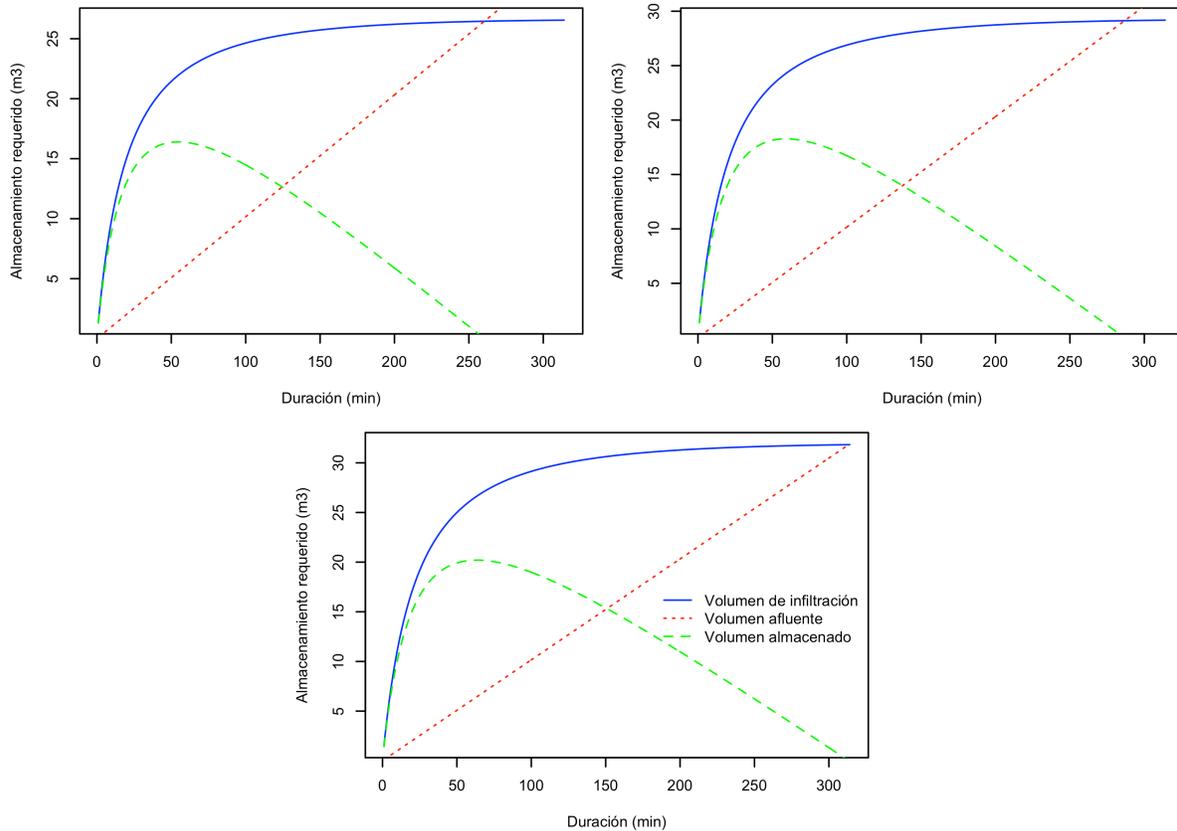


Figura 46. Cálculo del volumen de almacenamiento para un pavimento sin mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología Digest 365: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior)

En la figura anterior se observa que el volumen de agua almacenado requerido aumenta para periodos de retorno mayores. Estos valores fueron de 16.397 m^3 , 18.272 m^3 y 20.203 m^3 para 2, 3 y 4 años.

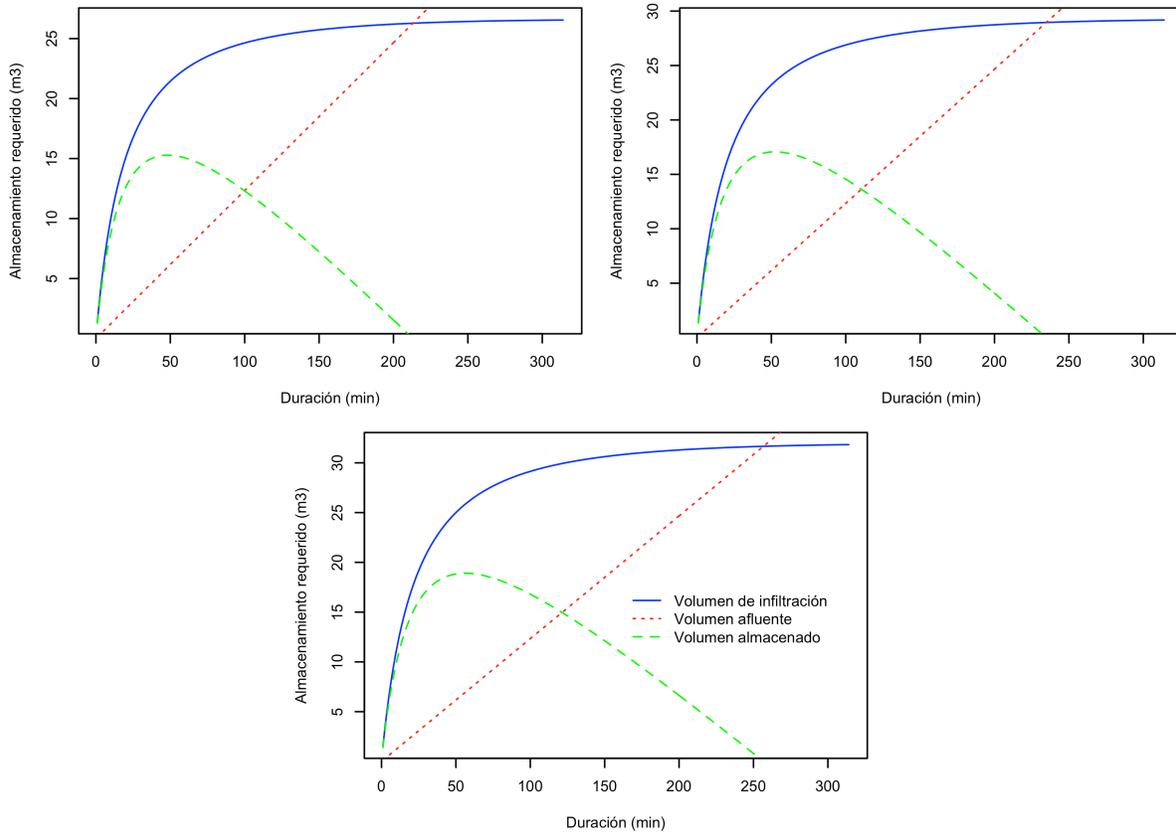


Figura 47. Cálculo del volumen de almacenamiento para un pavimento con mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología Digest 365: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior)

En la figura anterior se observa que el volumen de agua almacenado requerido aumenta para periodos de retorno mayores. Estos valores fueron de 15.284 m^3 , 17.072 m^3 y 18.905 m^3 para 2, 3 y 4 años.

De la Figura 46 y Figura 47, se concluye que al garantizar un mantenimiento de la estructura, se obtiene un mejor desempeño del mismo. Por otro lado se observa que los tiempos de vaciado son mayores para un pavimento rígido poroso sin mantenimiento que para uno con mantenimiento, este valor se observa cuando la curva del volumen afluente corta con la curva del volumen de infiltración.

5.5 Adaptación de los métodos franceses

Al igual que en las metodologías descritas anteriormente, en los métodos simplificados se usaron los factores de seguridad calculados de acuerdo a los resultados de alturas obtenidas mediante el método de validación.

A diferencia de las metodologías anteriores, el factor de seguridad no afecta únicamente la capacidad de absorción por unidad de superficie: éste afecta el caudal de salida (Q_s) y por lo tanto el caudal específico (q_s). Teniendo en cuenta lo anterior, los caudales específicos mencionados en el numeral 3.5 fueron afectados por los factores de seguridad de la capítulo 5 (párrafo 4). Los resultados obtenidos para un pavimento con mantenimiento y sin mantenimiento son 250.66 mm/d y 206.50 mm/d, a partir de estos valores se evidencia que el caudal específico para un pavimento rehabilitado es mayor, ya que este cuenta con mayores propiedades filtrantes, debido a su mantenimiento.

La anterior modificación se propone con el fin de adaptar el factor de seguridad a condiciones reales de la zona de estudio seleccionada, con el objetivo de obtener espesores más apropiados a las condiciones de mantenimiento.

Una vez realizada esta adaptación, se aplicó el método de las lluvias y de los volúmenes y se obtuvieron los siguientes resultados, dependiendo del periodo de retorno y la frecuencia de mantenimiento.

5.5.1 Método de las lluvias

Con los caudales específicos descritos anteriormente se realizó el cálculo del espesor máximo del pavimento poroso rígido de forma similar a lo que se hizo para la aplicación de la metodología en el numeral 3.5.1. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 33. Resultados de la adaptación del método de las lluvias

T= 2 años	d (min)	P (mm)	q_s (mm)	P- q_s (mm)	V_{alm} (m³)	e (m)
Sin mantenimiento	55	31.03	7.89	23.14	16.40	0.53
Con mantenimiento	48	29.93	8.35	21.58	15.29	0.49
T= 3 años						
Sin mantenimiento	59	34.25	8.46	25.79	18.27	0.59
Con mantenimiento	53	33.31	9.22	24.09	17.07	0.55
T= 4 años						
Sin mantenimiento	64	37.69	9.18	28.52	20.20	0.65
Con mantenimiento	56	36.43	9.75	26.69	18.91	0.61

En la tabla anterior se muestran únicamente los valores obtenidos para la duración en la cual se obtuvo el máximo espesor de pavimento para diferentes condiciones del mismo. Los cálculos en detalle se encuentran en el Anexo 8.

En esta tabla se evidencia que el máximo espesor corresponde a 0.65 m, para un periodo de retorno de 4 años y un pavimento sin mantenimiento, para este mismo periodo de retorno y para un pavimento con mantenimiento se encontró un espesor de 0.61 m.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para diferentes duraciones, mediante las gráficas de las alturas de lluvia y caudal específico para diferentes periodos de retorno y frecuencia de mantenimiento:

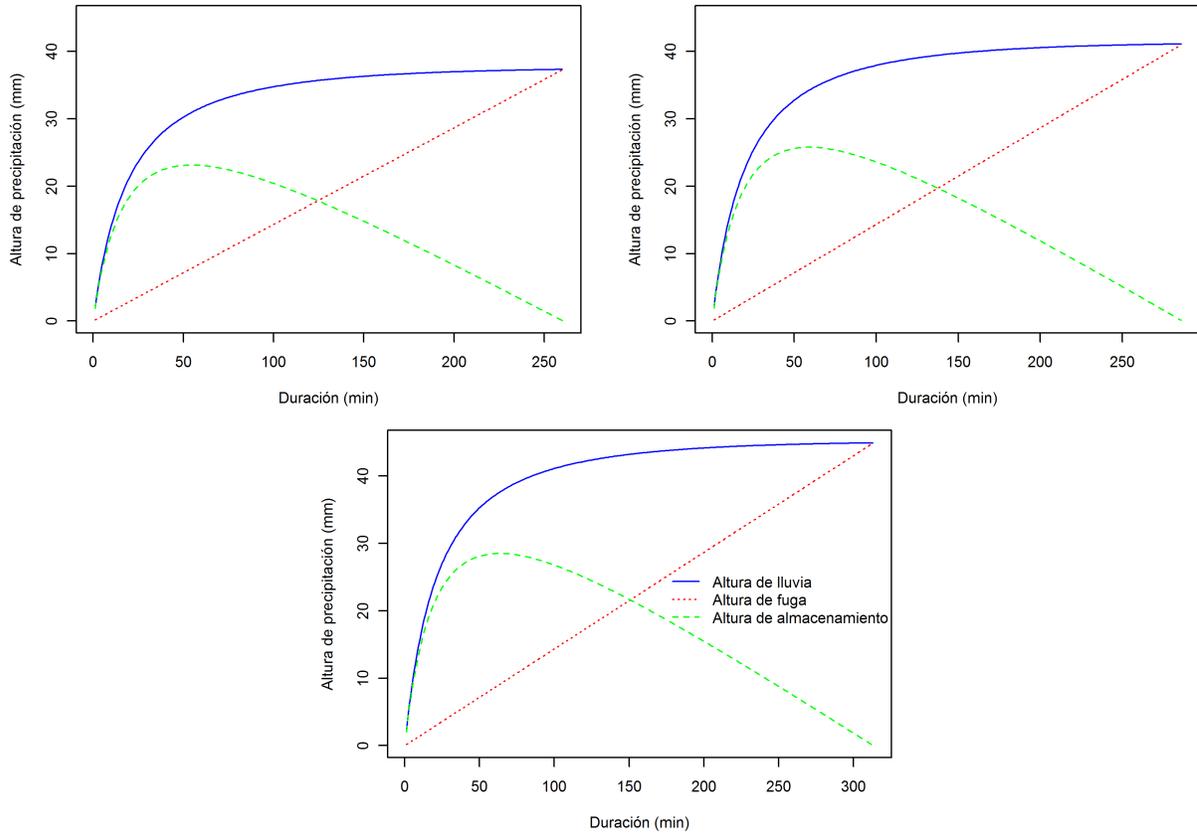


Figura 48. Cálculo de la altura de almacenamiento para un pavimento sin mantenimiento y diferentes periodos de retorno para el método de las lluvias: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior)

En las gráficas anteriores, se observa que para un periodo de retorno de 2, 3 y 4 años, las máximas alturas de almacenamiento se presentan en una duración de 55, 59 y 64 minutos respectivamente, a partir de las máximas alturas se calculó el volumen máximo de almacenamiento y el espesor de pavimento necesario en caso de no existir un mantenimiento a la estructura.

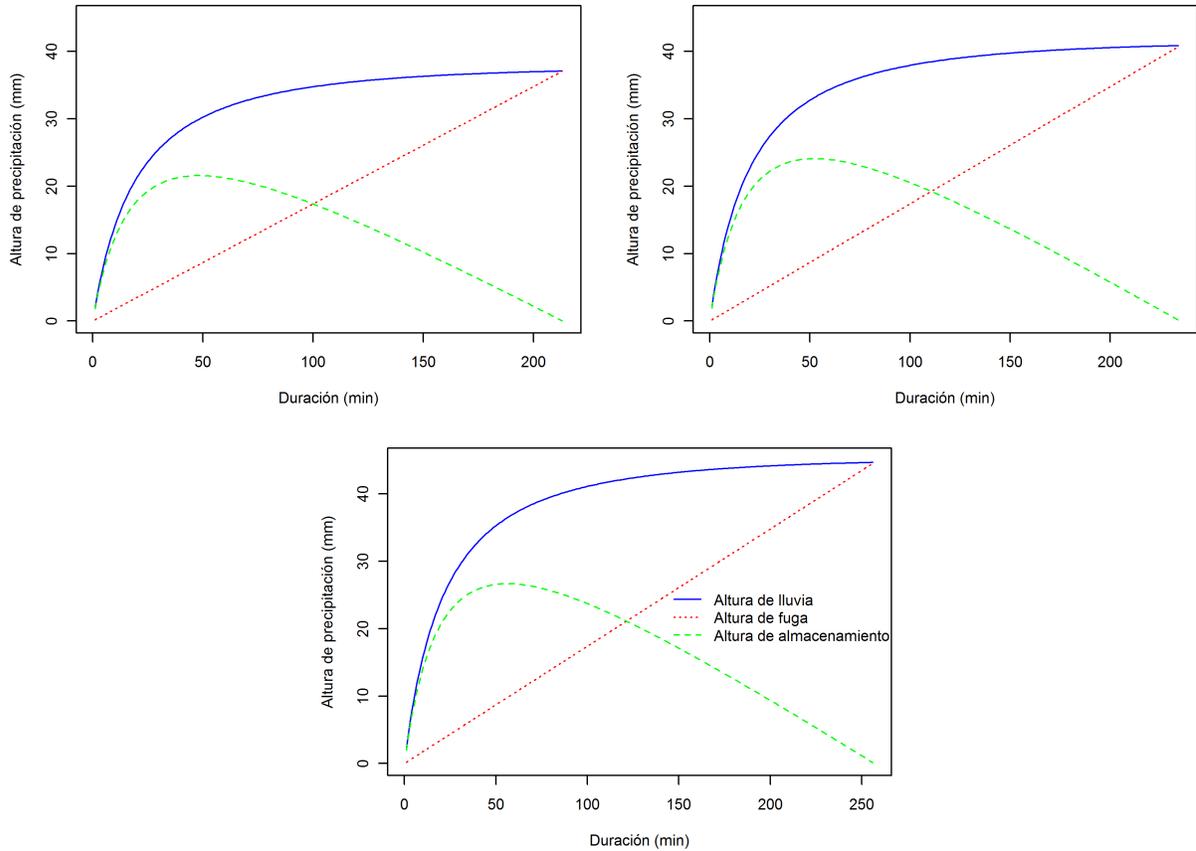


Figura 49. Cálculo de la altura de almacenamiento para un pavimento con mantenimiento y diferentes periodos de retorno para el método de las lluvias: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior)

En las gráficas anteriores, se observa que para un periodo de retorno de 2, 3 y 4 años, las máximas alturas de almacenamiento se presentan en una duración de 48, 53 y 56 minutos respectivamente. Se evidencia que al existir un mantenimiento a la estructura de pavimento, el espesor disminuye, por lo tanto la escogencia correcta del factor de seguridad influye directamente en el diseño del pavimento.

5.5.2 Método de los volúmenes

Una de las adaptaciones realizadas para este método es considerar el caudal específico variable en el tiempo debido a las variaciones hidrológicas. La metodología para encontrar la curva de alturas específicas variables es la siguiente: (i) se calcula la capacidad de absorción f del pavimento por unidad de superficie como el cociente entre el caudal de salida y la altura de precipitación por el área del modelo físico de Gómez *et al*, 2010 para un pavimento colmatado y nuevo; (ii) se calcula el caudal de salida Q_s como el producto de la capacidad de absorción f y el área del pavimento poroso rígido A_{pav} ; (iii) se calcula el caudal específico q_s variable para colmatado y nuevo como el producto del cociente entre el caudal de salida y la superficie activa S_a y el vector de precipitaciones diarias de la zona de estudio, obteniendo la curva de volúmenes específicos acumuladas para un pavimento colmatado y nuevo; (iv) se calculan los volúmenes específicos correspondientes a un pavimento con mantenimiento y sin mantenimiento como el producto de la curva para un pavimento nuevo por los factores de seguridad mencionados en el capítulo 5 (párrafo 4). A continuación se presentan las curvas obtenidas de volúmenes específicos.

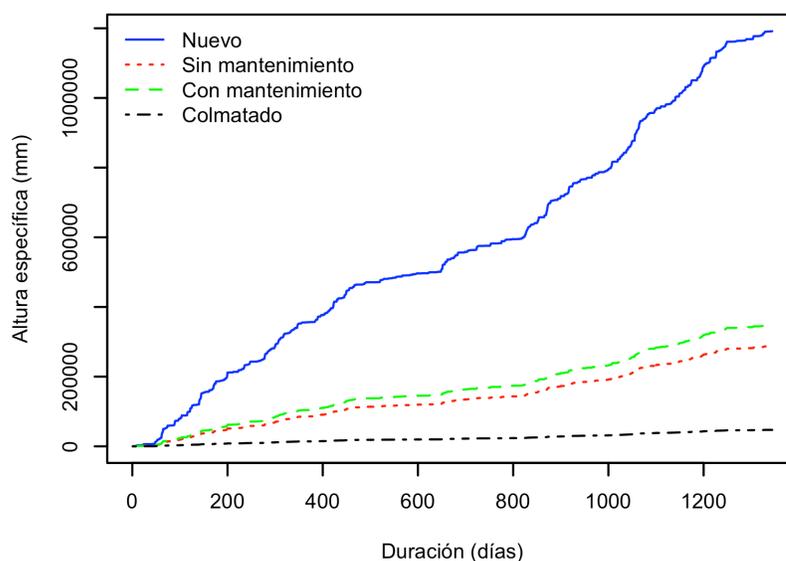


Figura 50. Curvas de alturas específicas para la adaptación del método de los volúmenes a la zona de estudio

Una vez graficado el caudal específico variable (ver Figura 50) se realiza una subdivisión con el fin de calcular para cada año i , para cada evento de lluvia j y para cada volumen específico q_s variable, la altura $DH_{ij}(q_s)$ correspondiente a la diferencia entre la curva de alturas acumuladas (ver Anexo 2) y la de evacuación $q_s.d$. Se determinan los valores máximos anuales y se realiza la clasificación frecuencial de dichos valores.

En la Figura 51, Figura 52, Figura 53 y Figura 54 se presentan los valores anuales de altura para un pavimento colmatado, sin mantenimiento y con mantenimiento.

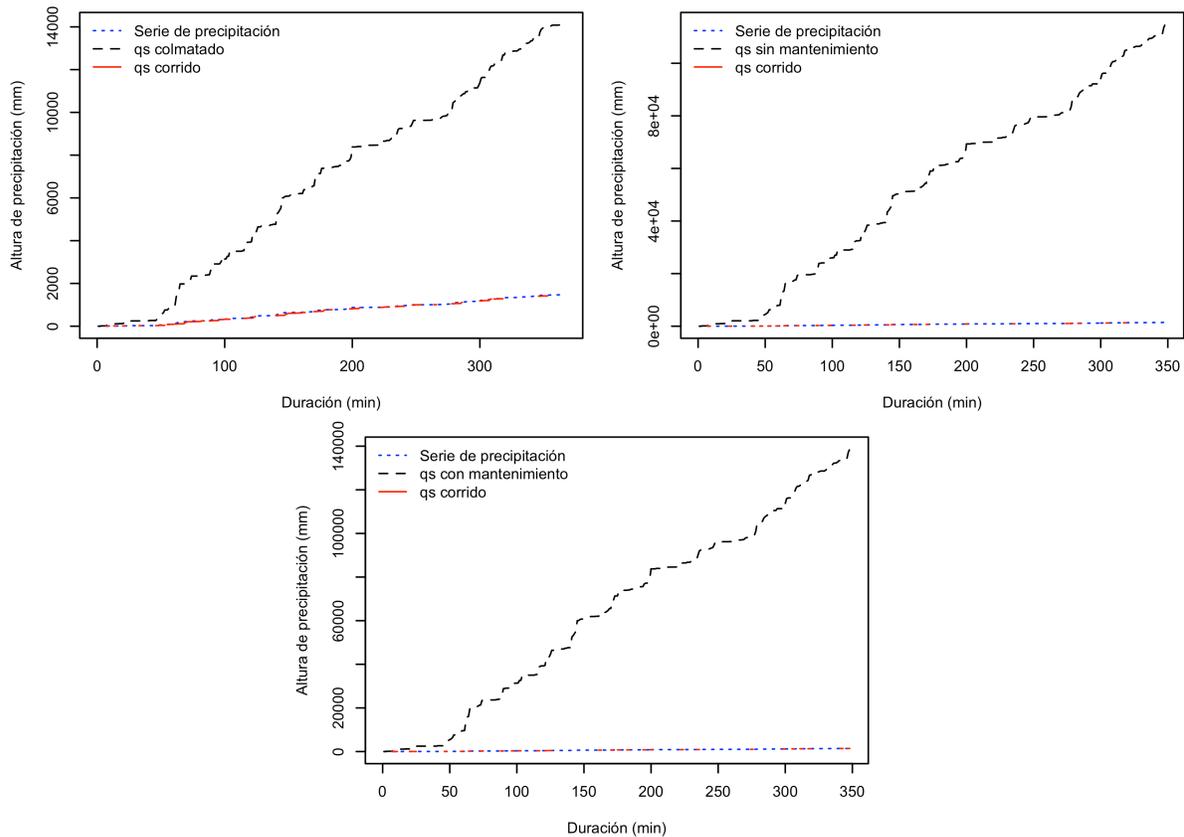


Figura 51. Altura máxima para el año 2008 y diferentes condiciones del pavimento para la adaptación del método de los volúmenes : colmatado (izquierda superior), sin mantenimiento (derecha superior) y con mantenimiento (izquierda inferior)

En la Figura 51 se muestran alturas acumuladas para el año 2008 para las condiciones del pavimento mencionadas anteriormente y para cada evento lluvioso para el cual debió calcularse la máxima altura corriendo el caudal específico variable (q_s corrido). Para colmatado la mayor altura de agua se evidencia en una duración de 147 días, para un

pavimento con mantenimiento en 90 días y finalmente para un pavimento sin mantenimiento en 142 días.

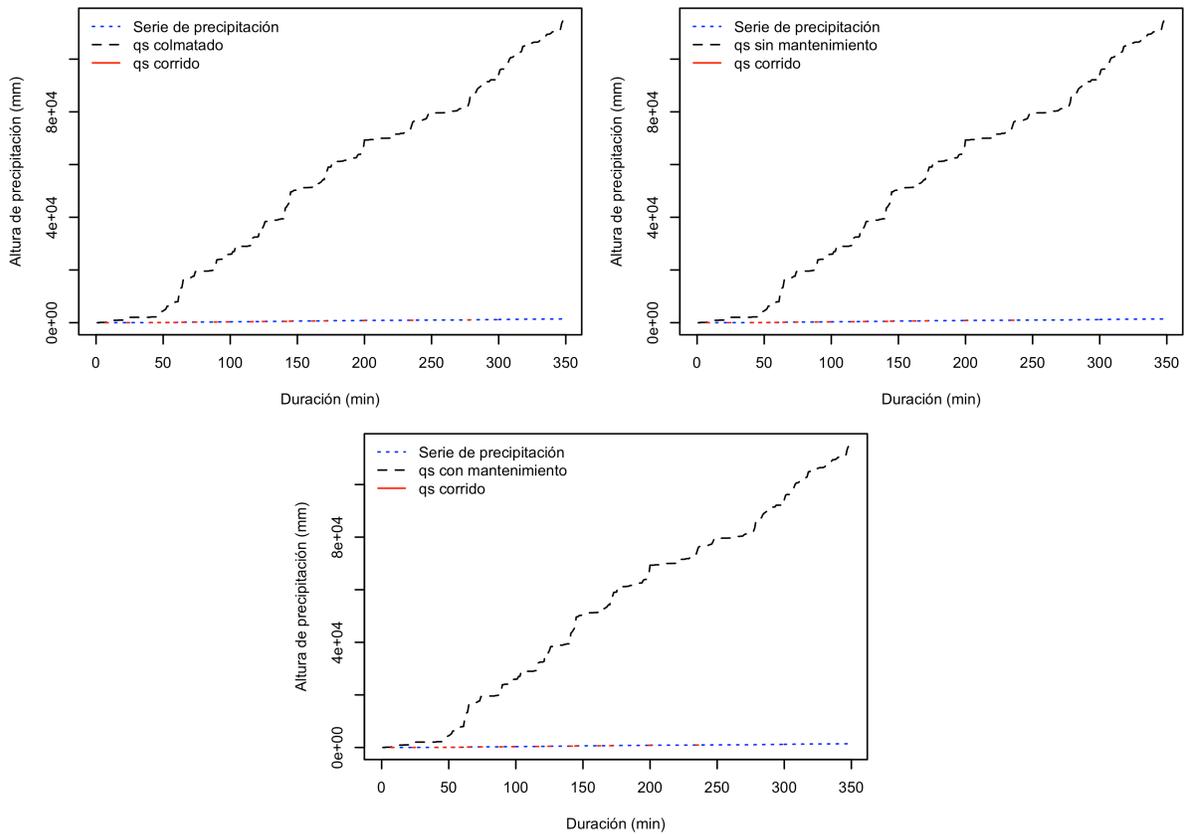


Figura 52. Altura máxima para el año 2009 y diferentes condiciones del pavimento para la adaptación del método de los volúmenes : colmatado (izquierda superior), sin mantenimiento (derecha superior) y con mantenimiento (izquierda inferior)

En la Figura 52 se muestran alturas acumuladas para el año 2009 para las condiciones del pavimento mencionadas anteriormente y para cada evento lluvioso para el cual debió calcularse la máxima altura corriendo el caudal específico variable (q_s corrido). Para colmatado la mayor altura de agua se evidencia en una duración de 297 días, para un pavimento con mantenimiento en 288 días y finalmente para un pavimento sin mantenimiento en 287 días.

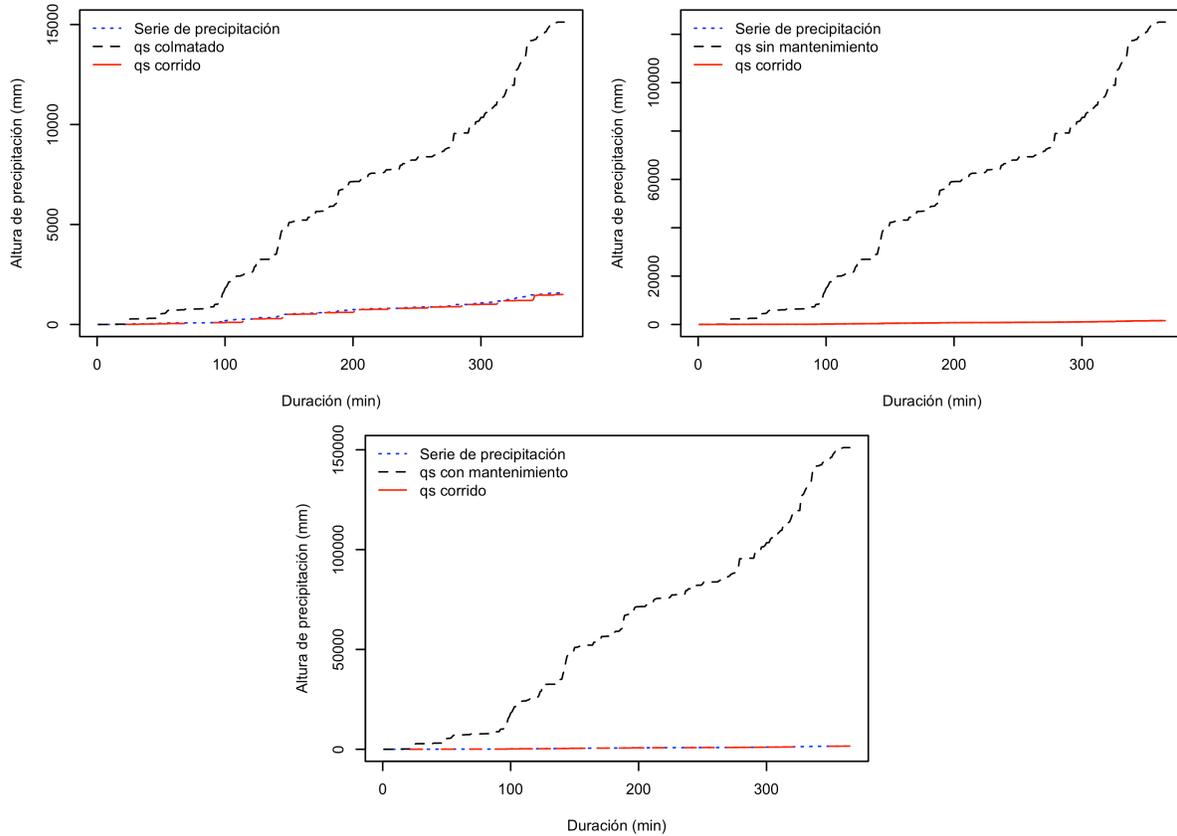


Figura 53. Altura máxima para el año 2010 y diferentes condiciones del pavimento para la adaptación del método de los volúmenes : colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)

En la Figura 53 se muestran alturas acumuladas para el año 2010 para las condiciones del pavimento mencionadas anteriormente y para cada evento lluvioso para el cual debió calcularse la máxima altura corriendo el caudal específico variable (q_s corrido). Para colmatado la mayor altura de agua se evidencia en una duración de 340 días, para un pavimento con mantenimiento en 145 días y finalmente para un pavimento sin mantenimiento en 148 días.

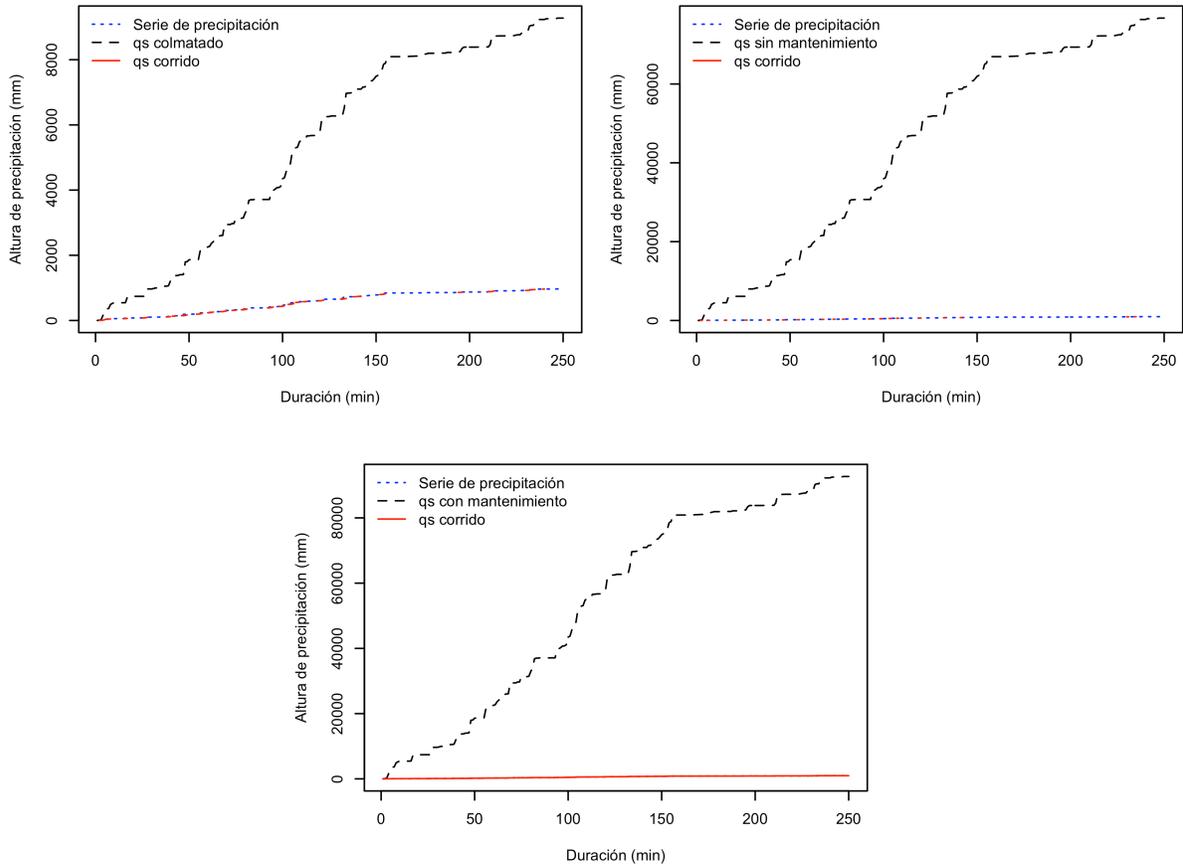


Figura 54. Altura máxima para el año 2011 y diferentes condiciones del pavimento para la adaptación del método de los volúmenes : colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior) y rehabilitado (izquierda inferior)

En la Figura 54 se muestran alturas acumuladas para el año 2011 para las condiciones del pavimento mencionadas anteriormente y para cada evento lluvioso para el cual debió calcularse la máxima altura corriendo el caudal específico variable (q_s corrido). Para colmatado la mayor altura de agua se evidencia en una duración de 133 días, para un pavimento con mantenimiento en 120 días y finalmente para un pavimento sin mantenimiento en 133 días

Las alturas máximas que se encontraron al realizar los cálculos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 34. Alturas acumuladas máximas obtenidas para cada año y condición del pavimento mediante la adaptación del método de los volúmenes

Años	H_{max} colmatado (mm)	H_{max} con mantenimiento (mm)	H_{max} sin mantenimiento(mm)
2008	122.02	50.20	57.80
2009	121.78	76.11	77.36
2010	278.96	147.60	154.40
2011	63.82	41.60	46.50

Al igual que en la aplicación de la metodología se deben calcular curvas HdF con los valores de la Tabla 34; en este caso se utilizó la metodología descrita en el numeral 1.2.3. Se utilizaron 22 y 4 como valores de P y N , respectivamente, donde P es el promedio del número de eventos para cada año i y condición del pavimento y N el número de años para los cuales se contaba con series continuas de lluvia. A continuación se muestran los resultados obtenidos después de aplicar dicha metodología.

Tabla 35. Resultados de análisis de frecuencias mediante la adaptación del método de los volúmenes

r	H_{max} colmatado (mm)	H_{max} con mantenimiento (mm)	H_{max} sin mantenimiento (mm)	F	T
1	278.96	147.60	154.40	0.03	6.0
2	122.02	73.61	75.26	0.08	2.40
3	121.78	50.20	57.80	0.12	1.50
4	63.82	41.60	46.50	0.17	1.0

En la tabla anterior se observa que para las alturas más importantes, el periodo de retorno es mayor debido que presentan la menor frecuencia. A continuación se muestra la gráfica que relaciona el caudal específico, las alturas máximas de agua acumulada y el periodo de retorno.

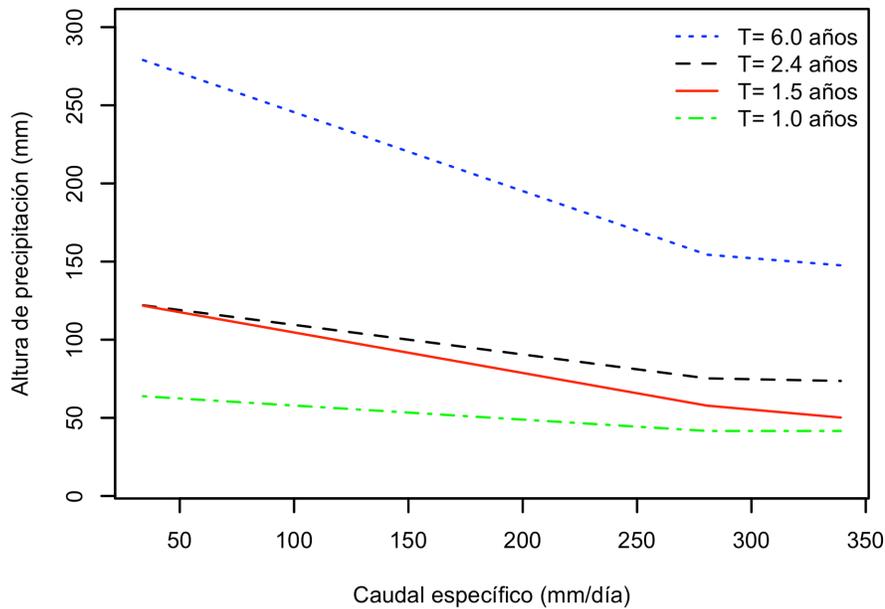


Figura 55. Curvas del análisis frecuencial obtenidas para la adaptación del método de los volúmenes para la determinación de la altura específica

Después de encontrar la curva de altura específica, se calcula, mediante la Ecuación 53, el volumen de agua que debe ser almacenado por la estructura, en este caso la capa de pavimento poroso rígido. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada periodo de retorno y condición del pavimento.

Tabla 36. Volumen de agua acumulada para diferentes periodos de retorno y condiciones del pavimento mediante la adaptación del método de los volúmenes

T (años)	V_{alm} (m ³) colmatado	V_{alm} (m ³) sin mantenimiento	V_{alm} (m ³) con mantenimiento
6.0	197.63	109.38	104.57
2.4	86.44	53.32	52.15
1.5	86.27	40.95	35.56
1.0	45.21	29.47	29.47

En la tabla anterior se observa que el volumen de agua que debe ser almacenado es mucho mayor cuando el pavimento se encuentra colmatado, debido a que éste ha perdido sus propiedades filtrantes, causando que la evacuación de las demandas de agua sea más lenta, y provocando la acumulación de ésta en la estructura de pavimento poroso rígido.

Puesto que para el objetivo de este trabajo de grado es primordial el cálculo del espesor del pavimento, se calculó como el cociente entre los volúmenes de agua almacenada y el área efectiva del pavimento requerido en la zona de estudio.

Tabla 37. Espesor del pavimento para diferentes periodos de retorno calculado a partir del análisis frecuencial mediante la adaptación del método de los volúmenes

T (años)	e (m) colmatado	e (m) sin mantenimiento	e (m) con mantenimiento
6.0	6.35	3.36	3.52
2.4	2.78	1.68	1.71
1.5	2.77	1.14	1.32
1.0	1.45	0.95	0.95

En la Tabla 37, se demuestra que para periodos de retorno más altos es necesario un dimensionamiento mayor de la estructura. Por otro lado se observa que es necesario garantizar el buen mantenimiento de las estructuras ya que un pavimento sin mantenimiento requiere mayor espesor que una estructura con un mantenimiento regular.

Debido a que los periodos de retorno de diseño necesarios para poder realizar la comparación con el método de validación son 2, 3 y 4 años se realizó una interpolación lineal de los datos obtenidos en la Tabla 37, con el fin de obtener los resultados que se presentan a continuación.

Tabla 38. Espesores de pavimento obtenidos a partir de la interpolación de los periodos de retorno obtenidos mediante la adaptación del método de los volúmenes

T (años)	e (m) colmatado	e (m) sin mantenimiento	e (m) con mantenimiento
6.0	6.35	3.52	3.36
4.0	4.37	2.52	2.43
3.0	3.37	2.01	1.96
2.4	2.78	1.71	1.68
2.0	2.78	1.54	1.44
1.5	2.77	1.32	1.14
1.0	1.45	0.95	0.95

En la tabla anterior, es evidente que los espesores requeridos para un pavimento colmatado son demasiado altos, haciéndolos poco viables tanto económica como urbanísticamente. Sin

embargo, cabe resaltar que en este tipo de inversiones se hace necesario contemplar la limpieza permanente de los mismos con el fin de evitar la colmatación de las estructuras.

Los cálculos detallados de esta metodología se encuentran en el Anexo 9.

Una vez aplicados todas las adaptaciones de métodos de diseño existentes, se realizó una tabla resumen que se muestra a continuación, la cual facilita la comparación de los resultados obtenidos para el espesor de pavimento:

Tabla 39. Resultados de espesores de pavimento poroso rígido al realizar las adaptaciones de las metodologías de diseño

Metodología	T (años)	e (m) sin mantenimiento	e (m) Con mantenimiento
Curva envolvente	2	0.53	0.49
	3	0.59	0.54
	4	0.64	0.60
Chile	2	0.71	0.67
	3	0.79	0.74
	4	0.87	0.82
The SUDS manual	2	0.52	0.49
	3	0.59	0.54
	4	0.64	0.60
Digest 365	2	0.52	0.49
	3	0.59	0.54
	4	0.64	0.60
Lluvias	2	0.52	0.49
	3	0.59	0.54
	4	0.64	0.60
Volúmenes	2	1.54	1.44
	3	2.01	1.96
	4	2.52	2.43

En la tabla anterior se evidencia una similitud en los resultados obtenidos mediante todas las metodologías, a excepción del método de Chile, el cual asume un factor de seguridad adicional de 1.25 correspondiente a la porción de lluvia que cae antes y después de la porción más intensa de la tormenta, no incluida en las curvas IdF y que afecta al volumen afluente y el método de los volúmenes el cual utiliza serie prolongadas de precipitación como parámetro de entrada.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede evidenciar que la diferencia de las metodologías radica en el factor de seguridad, el cual afecta la capacidad de absorción del pavimento poroso rígido y que fue unificado para la zona de estudio en este capítulo a partir de los resultados obtenidos para los espesores de pavimento por medio del método de validación, descrito en el capítulo 4.

6. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez aplicadas las metodologías existentes, desarrollado un método de validación y una adaptación de las metodologías de diseño a las características de la zona de estudio basada en los resultados obtenidos mediante la validación, se hace necesario comparar los espesores encontrados con el fin de establecer las ventajas de las adaptaciones propuestas y validar los resultados obtenidos a partir del método de validación.

A continuación se van a realizar tres comparaciones: (i) resultados obtenidos al aplicar las metodologías de diseño originales Vs. resultados obtenidos mediante las metodologías de diseño adaptadas a la zona de estudio; (ii) resultados obtenidos por medio del método de validación Vs. resultados obtenidos mediante las metodologías de diseño originales; (iii) resultados obtenidos por medio del método de validación Vs. los resultados obtenidos mediante las metodologías de diseño adaptadas a la zona de estudio. En la Tabla 40 se presenta un resumen de los espesores obtenidos mediante los procedimientos mencionados anteriormente.

Con el fin de asegurar un avance en los resultados obtenidos al realizar las adaptaciones a los métodos de diseño originales a la zona de estudio, es necesario comparar los espesores obtenidos mediante los dos escenarios (metodologías originales y metodologías adaptadas). A continuación se compararán los resultados para cada metodología: (i) Para el método de la curva envolvente, conociendo que su adaptación consistió en contemplar un factor de seguridad de acuerdo al mantenimiento de la estructura, se evidenció un aumento en los espesores, ya que este método originalmente no contempla ningún factor de seguridad; (ii) Para el método de Chile, se obtuvieron espesores mayores al aplicar la adaptación propuesta, sin embargo cabe resaltar que la metodología original arroja espesores similares a los obtenidos para un pavimento rígido poroso con mantenimiento ya que utiliza un factor de seguridad similar al obtenido para esta condición mediante el método de validación; (iii) para *The SUDS manual* en la adaptación de la metodología los espesores obtenidos son mayores ya que el factor de seguridad considerado es menor que el propuesto por la original, adicionalmente en la adaptación fue considerada la escorrentía proveniente de toda la cuenca, no solo la precipitación efectiva sobre el pavimento poroso rígido como lo

propone este método; (iv) Para el método Digest 365, los espesores obtenidos en la adaptación de la metodología son mayores ya que se afectó el volumen de salida V_{inf} mediante el uso de los factores de seguridad obtenidos por el método de validación, adicionalmente el volumen afluente V_{afl} es afectado por el coeficiente de esorrentía C el cual era omitido por la metodología original; (v) Para el método de las lluvias, el caudal específico q_s para un pavimento poroso rígido con mantenimiento y sin mantenimiento es mayor al caudal específico utilizado en la metodología original, el cual fue afectado por el coeficiente de seguridad propuesto por Azzout *et al.*(1994), por lo tanto los espesores obtenidos en la adaptación son menores; (vi) Para el método de los volúmenes se logró obtener magnitudes de espesores al aplicar la adaptación propuesta, ya que, a diferencia del método original, al considerar el caudal específico variable se tiene en cuenta el comportamiento real de la lluvia, relacionado al caudal específico. De acuerdo a lo anterior se evidenció que en las adaptaciones realizadas a las metodologías se obtuvieron espesores mayores con respecto a las metodologías originales, a excepción del método de las lluvias, puesto que, como se mencionó, para este último se utilizaron factores de seguridad menores, obtenidos como resultado de la simulación.

Tabla 40. Espesores obtenidos mediante las metodologías originales, sus adaptaciones y el método propuesto de validación

Metodología	T(años)	Métodos originales	Métodos adaptados	
		Nuevo	Sin mantenimiento	Con mantenimiento
Método de la curva envolvente	2	0.21	0.53	0.49
	3	0.25	0.59	0.54
	4	0.28	0.64	0.60
Chile	2	0.64	0.71	0.67
	3	0.71	0.79	0.74
	4	0.79	0.87	0.82
The SUDS manual	2	0.01	0.52	0.49
	3	0.02	0.59	0.54
	4	0.02	0.64	0.60
Digest 365	2	0.28	0.52	0.49
	3	0.32	0.59	0.54
	4	0.36	0.64	0.60
Lluvias	2	0.66	0.52	0.49
	3	0.73	0.59	0.54
	4	0.80	0.64	0.60
Volúmenes	2	-	1.54	1.44
	3	-	2.01	1.96
	4	-	2.52	2.43
Método de validación	2	0.14	0.58	0.47
	3	0.42	1.73	1.42
	4	1.11	4.61	3.80

Al comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación de los métodos de diseño originales y el método de validación propuesto, se observa que para los espesores obtenidos por el método de validación para un periodo de retorno de 2 años y un mantenimiento esperado nulo (colmatado), la metodología más adaptada es la de Chile, ya que ésta tiene en cuenta un factor de seguridad que depende del mantenimiento y que en este trabajo fue asumido sin mantenimiento (ver Figura 3). Adicionalmente, se observa que el método de las lluvias, a pesar de contar con un único coeficiente de seguridad, garantiza el diseño para ambas condiciones (sin mantenimiento y con mantenimiento) ya que los resultados de ésta se encuentran por encima de los obtenidos por el método de validación para un periodo de

retorno de 2 años. Por otro lado, se evidencia que para periodos de retorno de 3 y 4 años ninguna de las metodologías existentes se ajusta a los resultados obtenidos por el método de validación.

Teniendo en cuenta que una de las debilidades presentadas en los métodos de diseño existentes es la unificación de un factor de seguridad a la zona de estudio y a parámetros que tengan una relación directa con el posible comportamiento hidráulico de la estructura, se utilizaron los espesores obtenidos para condiciones de pavimento colmatado, rehabilitado y nuevo mediante el método propuesto de validación con el fin de proponer factores de seguridad que dependieran del mantenimiento de la estructura y que hubieran sido calculados a partir de información hidrológica de la zona de estudio. Con estos factores de seguridad y junto con otras modificaciones que fueron explicadas detalladamente en el capítulo 5, fueron obtenidos valores de espesor de pavimento adaptados a la zona de estudio donde se evidenció que para un periodo de retorno de 2 años las metodologías que utilizaban el mismo concepto hidrológico con respecto a los volúmenes o alturas de entrada y volúmenes o alturas de salida como lo son el método de la curva envolvente, Chile, Digest 365 y *the SUDS manual*, los cuales se basan en el método de las lluvias propuesto por Azzout *et al.* (1994) son los más concordantes con los resultados obtenidos mediante el método de validación. Por otro lado, para un periodo de retorno de 3 años el método que otorga resultados más realistas es el método de los volúmenes, el cual arroja espesores mayores acercándose a los obtenidos mediante el método de validación.

De las comparaciones realizadas en este capítulo se evidenció que las metodologías adaptadas se comportan de manera más realista y acordes a los resultados simulados mediante el método de validación para periodos de retorno de 2 y 3 años. Sin embargo se observó que ninguna de las metodologías arroja resultados que representen de una manera adecuada los obtenidos mediante el método de validación para un periodo de retorno de 4 años.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se propuso, tras una revisión de los métodos de diseño existentes, la utilización de un método de diseño de pavimento poroso rígido adaptado a la carga hidrológica característica de una zona específica de Bogotá (Avenida 68 con calle 80) y teniendo en cuenta propiedades hidráulicas y de envejecimiento de una mezcla de pavimento probada en condiciones de laboratorio Gómez *et al.* (2010), con el fin de controlar las posibles inundaciones que se ocasionen en la zona.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante este trabajo de grado, se propone utilizar el método de la curva envolvente como metodología de diseño en la zona de estudio para un periodo de retorno de 2 años, ya que es el más avanzado puesto que arroja de manera inmediata el máximo almacenamiento requerido sin necesidad de realizar cálculos para diferentes duraciones, y adicionalmente se cuenta con la información hidrológica requerida para la aplicación del mismo. Cabe resaltar que esto implica contar con una herramienta que relacione los coeficientes de una ecuación tipo Montana (como la utilizada por la EAAB) con una Talbot (ecuación utilizada por el método original) para la representación mediante ecuaciones funcionales de curvas de Intensidad-duración-Frecuencia. Adicionalmente se propone utilizar el método de los volúmenes para un periodo de retorno de 3 años como metodología de diseño, utilizando los factores de seguridad propuestos para la zona de estudio en este trabajo de grado.

A partir de este trabajo de grado se logró construir una herramienta que convierte los factores de una ecuación tipo Montana disponibles para Bogotá D.C. en factores utilizables en una ecuación tipo Talbot, lo cual permite simplificar el diseño de una estructura de pavimento poroso rígido aplicable a cualquier zona de Bogotá.

Adicionalmente se logró proponer un método para el cálculo del factor de seguridad en función del nivel de mantenimiento esperado, aspecto clave utilizado en el dimensionamiento hidráulico de pavimentos porosos rígidos adaptados a las condiciones hidrológicas del sitio de estudio y a las características de las mezclas de dichos pavimentos.

Con lo anterior se logra una mayor adaptabilidad de los métodos de diseño a las características de la zona de estudio, obteniendo diseños más racionales, lo cual conllevaría a la disminución en el costo del mismo. Por otro lado es posible obtener factores de seguridad para otras zonas de estudio, siempre y cuando se cuente con la información hidrológica suficiente, es decir series prolongadas de lluvia de resolución adecuada (más de 1 registro/hora), con el fin de garantizar la precisión del método de validación propuesto. Lo anterior se debe a que el factor de seguridad propuesto contempla la frecuencia de mantenimiento de la estructura: se evidenció que de esta frecuencia depende la eficacia en la evacuación de las demandas hidrológicas y por lo tanto el espesor de almacenamiento.

En este trabajo de grado se encontró, al aplicar las metodologías existentes, que el método de las lluvias (ver Azzout *et al.*, 1994) es el fundamento teórico de las otras metodologías (a excepción del método de los volúmenes), y por lo tanto los resultados arrojados por éstas son similares. De acuerdo a lo anterior, se puede afirmar que los únicos métodos de diseño de pavimentos porosos existentes en la literatura son los métodos franceses reportados por Azzout *et al.* (1994). Sin embargo, es importante resaltar que el método de la curva envolvente muestra un avance ya que simplifica los cálculos realizados al adaptar directamente el método de las lluvias a las condiciones hidrológicas de la zona y al arrojar el espesor máximo requerido aplicando un sólo procedimiento matemático.

Con el fin de tener un comportamiento real de un pavimento poroso rígido a partir de un método de validación, es necesario contar con series prolongadas de lluvia mayores a cuatro años, ya que se deben contemplar tanto periodos intensos de lluvia como periodos secos con el fin de considerar el almacenamiento y vaciado de la estructura con menor incertidumbre. Lo anterior se identificó al aplicar el método de validación donde se evidenció un periodo en el cual la estructura de pavimento estaba sometida a un periodo intenso de lluvia y como resultado el pavimento no logró su vaciado.

Para concluir, mediante este trabajo de grado se logró asociar espesores de pavimento poroso rígido a periodos de retorno mediante la metodología de validación propuesta. En efecto, dicha metodología permitió evaluar los resultados obtenidos al aplicar las metodologías de diseño existentes.

8. RECOMENDACIONES

Como resultado de este trabajo, se pudo concluir que ninguna de las metodologías originales ni adaptadas de diseño de pavimentos porosos arrojan resultados suficientemente representativos para periodos de retorno elevados (más de 4 años) ya que ninguno de las metodologías arroja valores que se acerquen a los resultados obtenidos mediante el método propuesto de validación, a diferencia de los resultados obtenidos para periodos de retorno de 2 y 3 años. Por lo tanto, se recomienda desarrollar métodos de diseño que arrojen resultados más acordes con las necesidades hidrológicas de la zona de estudio para periodos de retorno elevados. Sin embargo, cabe resaltar que, si se cuenta con información hidrológica suficiente (series de lluvias de varios años con resolución horaria o superior), como herramienta de dimensionamiento hidráulico se recomienda utilizar métodos de simulación como el empleado en este trabajo de grado para obtener diseños más adaptados a zonas específicas de estudio y diversos periodos de retorno.

En caso de obtener espesores de pavimento poroso rígido en los cuales sea poco viable su construcción ya que necesitan una gran capacidad de almacenamiento en su estructura debido a las solicitaciones hidrológicas de la zona, se recomienda combinar diferentes técnicas alternativas (trincheras de infiltración, pozos, humedales artificiales, estanques de almacenamiento, *etc.*), con el fin de que estas demandas sean mitigadas por diferentes estructuras y no únicamente por la estructura de pavimento o tener en cuenta el suelo que se encuentra debajo de la estructura, el cual en caso que sea granular aporta a la capacidad de almacenamiento de la estructura.

Se recomienda que las metodologías existentes utilicen factores de seguridad más adaptados y racionales, que dependan tanto de las características de la zona como de las propiedades del diseño de mezcla y contemplen el mantenimiento esperado del pavimento poroso rígido.

En caso que se utilice la metodología de la curva envolvente, debe garantizarse que el volumen de entrada menos el volumen de salida arroje un valor positivo, ya que de lo

contrario se obtienen resultados de espesor erróneos, considerando grandes alturas en momentos donde no se necesitan, lo anterior debido a la forma matemática de la expresión.

Durante este trabajo de grado se evidenció una ausencia de ejemplos en el desarrollo del método de los volúmenes, el cual da lugar a diferentes interpretaciones que podrían conducir a errores conceptuales en el diseño, por lo que se recomienda compartir experiencias acerca de la aplicación de este método a través de medios de fácil acceso al público. Lo anterior se propone teniendo en cuenta que dicho método tiene el potencial de representar de mejor manera la dinámica de las lluvias en zonas específicas de estudio.

Con respecto a las metodologías de diseño, se recomienda buscar nuevos enfoques para el diseño teniendo en cuenta series de lluvias, factores de seguridad más racionales que contemplen interacciones bioquímicas y no solo físicas o adaptar las herramientas existentes al sitio de estudio y al mismo tiempo indagar sobre posibles herramientas hidrológicas, hidráulicas, flujo en medios porosos y modelos de datos que den solución a las ecuaciones de Richard's como el modelo Hydrus 2D/3D desarrollado para flujos en medios parcialmente saturados. Adicionalmente, se recomienda para futuras investigaciones realizar ensayos a escala real, que permitan validar los principios de diseño y los resultados obtenidos en este trabajo de grado.

Con el fin de garantizar el acceso a la información hidrológica de la zona que se esté estudiando, se recomienda al Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana contar con convenios mas explícitos o flexibles que faciliten la obtención de información hidrológica de resolución adecuada o contar con ésta en el sistema de información universitaria. Así mismo se propone crear una base de datos única que recopile la información utilizada en diferentes investigaciones realizadas en la Universidad.

9. REFERENCIAS

- Aguado, A. y V. Albert (1994). *Hormigón Poroso*. Universidad de Chile y Centro Tecnológico del hormigón, Chile.
- Altarejos García L. (2007). *Aplicación de sistemas de drenaje urbano sostenible en el desarrollo urbanístico de Paterna, Valencia*. V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil: desarrollo y sostenibilidad en el marco de la ingeniería. Sevilla (España), 26 a 28 de noviembre de 2007. 20 p.
- Asserella, H. *et al.* (1996). *Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos*, Chile. pp 118-209
- Azzout J-R., Barraud S., Cres F., Alfakih E. (1994). *Techniques alternatives en assainissement pluvial*. Paris: Tec et Doc, 372 p.
- Bratieres, K. Fletcher T.D., Deletic A., Alcazar L., Le Coustumer S. and McCarthy D.T. (2008). Removal of nutrients, heavy metals and pathogens by stormwaterbiofilters. 11th International Conference on Urban Drainage (11 ICUD), Edinburgh, UK, 31 Aug.-5 Sept. 2008. 10 p.
- Broviak, Pam. (2005), Pervious pavement: naturally absorbent. En: Public Works 136. No. 1 34-6, 38-9.
- Brown, D. (1995). "Porous pavement". Pit & Quarry, vol. 87, no. 11.
- Carcedo, A. y Posse, A. (2006). *Manual de ingeniería de taludes*, Madrid, Instituto Geológico Minero de España.
- Chebbo, G. *et al.*(1999), "Público: Characterisation of urban runoff pollution in Paris", en *Water Science and Technology*, vol XXXIX, núm. 2, pp. 1-8.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R. y Mays, L.W. (2000), *Hidrología aplicada*, Bogotá, McGraw-Hill Interamericana.

- Colandini, V. (1997). Effets des structures-réservoirs à revêtement poreux sur les eaux pluviales: qualité des eaux et devenir des métaux lourds, PhD thesis, University of Pau, France, 171 p.
- Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICTUC), (1996), Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos. Guía de diseño, Santiago de Chile.
- Forest of Dean District Council. (2012), “Soakaway Design Digest 365” [en línea], disponible en: http://www.fdean.gov.uk/media/assets/planningBC/documents/approved%20documents/BRE_soakaway_Design_Guide.pdf, recuperado: 21 de abril de 2012.
- Gómez González G.A., Rodríguez Benavides A.F., Torres A. (2010). Durabilidad de las capacidades filtrantes de la capa de rodadura de un pavimento poroso rígido. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, 21-25 Nov. 2010. 11 p.
- Gómez, G.A., Rodríguez, A.F. y Torres, A. (2010, Noviembre), “Durabilidad de las capacidades filtrantes de la capa de rodadura de un pavimento poroso rígido” [conferencia], XXIV Congreso latinoamericano de hidráulica, Punta del Este, Uruguay.
- Jayasuriya, L.N.N. *et al.* (2007), “Público: Contributing to the sustainable use of stormwater: the role of pervious pavements”, en *Water Science and Technology*, vol LVI, núm. 12, pp. 69–75.
- Leiton Soubannier, J.S. (1985). *Riego y drenaje*, Costa Rica, EUNED.
- Lopes da Silveira, A.L. y Avruch Goldenfum, J. (2007, abril-junio), “Metodología Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte”, en *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol.12, núm. 2, pp. 157-170.

- Lozano Silva R.A., Niño Paredes J.E. (2003). Estudio Hidráulico de Calzadas con Estructura de Reservorio, Tesis (Ingeniero civil), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2003.
- Maryland Stormwater Design Manual (2000), *Environmental Site Design*, Maryland.
- Matthews R.R., Watt W.E., Marsalek J., Crowder A.A., Anderson B.C. (1997). Extending retention times in a stormwater pond with retrofitted baffles. *WaterQualityResearchJournal of Canada*, 32(1), 73-87.
- Montejo Fonseca, A. (2001), *Ingeniería de pavimentos para carreteras*, Bogotá, Universidad Católica de Colombia. Ediciones y Publicaciones.
- Mora, O., Alvarado, D. y Torres, A. (2011, 11-16 de septiembre), “Economic analysis of the application of porous pavements on Bogota roads” [conferencia], 12nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre Brazil.
- Mosalve Sáenz, G. (1995), *Hidrología en la ingeniería*, Bogotá, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Niño Rivera I., Villamil M. (2003). Pavimento poroso rígido para pavimentos drenantes. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2003. Tesis (Especialista en Ingeniería de Pavimentos) Universidad Católica de Colombia.
- Reyes, F. y Torres, A. (2002), “Público: Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes”, en *Ingeniería de Construcción*, vol. XVII, núm. 2, pp. 93-102.
- Reyes, F. y Torres, A. (2002), “Público: Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes”, en *Ingeniería de Construcción*, vol. XVII, núm. 2, pp. 93-102.
- Thévenot, D.R. (1992), *Pollution des eaux pluviales urbaines*, París, ENPC, 1992.
- Torres Abello, A. (2004), *Apuntes de clase sobre hidrología urbana*, Bogotá, Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

Torres, A. (2001 octubre-diciembre), "Público: Alternativas técnicas de drenaje", en *Acodal*, pp. 7-12.

Torres, A.; Ortega Suescún, D.H.M. y Herrera Daza, E. (2009), "Propiedades filtrantes de los pavimentos porosos rígidos" [Conferencia], Conferencia Internacional AGUA 2009, Instituto Cinara - Univalle, Cali, Colombia.

"Uso de Solver" [en línea], disponible en:

<http://www2.ubu.es/econapli/profesores/jfalegre/archivos/textos/uso%20de%20solver.pdf>, recuperado: 07 de mayo de 2012.

Woods Ballard, *et al.* (2007), *The SUDS manual*, Londres, Ciria Classic house.

10. ANEXOS

A manera de anexos se presenta la memoria de cálculos de este trabajo de grado. A continuación se mencionarán los anexos:

- Anexo 1** Fotos pluviogramas e información horaria procesada
- Anexo 2** Datos diarios de precipitación
- Anexo 3** Interpolación curvas IdF
- Anexo 4** Cálculos método de la curva envolvente
- Anexo 5** Cálculos método Chile
- Anexo 6** Cálculos método The SUDS manual
- Anexo 7** Cálculos método Digest 365
- Anexo 8** Cálculos método de las lluvias
- Anexo 9** Cálculos método de los volúmenes
- Anexo 10** Resultados iteraciones parámetros C_t y C_p
- Anexo 11** Resultados del método de validación

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1. Formación de la precipitación en las nubes (Chow <i>et al.</i> , 2000)	7
Figura 2. Hidrograma Unitario Sintético de Snyder (a) Hidrograma Unitario Estándar ($t_p = 5.5t_r$). (b) Hidrograma Unitario requerido ($t_p \neq 5.5t_r$) (Chow <i>et al.</i> , 2000)	15
Figura 3. Metodología para el cálculo del Cs de acuerdo al mantenimiento y a la calidad del afluente (Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas [DICTUC], 1996)25	
Figura 4. Curvas de Intensidad-duración-Frecuencia.....	34
Figura 5. Curvas de Altura-duración-Frecuencia	35
Figura 6. Superposición de la curva Altura-duración para una frecuencia elegida y la curva de evacuación	36
Figura 7. Curva de alturas acumuladas en un año	37
Figura 8. Curvas para la determinación de la altura específica	38
Figura 9. Modelo físico de la capa de concreto rígido poroso y dispositivos de vertimiento y recolección (Gómez <i>et al.</i> , 2010).....	40
Figura 10. Localización Bogotá, Colombia, zona de estudio y estación pluviográfica (Google earth).....	41
Figura 11. Estructura de pavimento poroso (No se considera una capa de almacenamiento inferior o suelo granular	42
Figura 12. Formas de drenaje (Azzout <i>et al.</i> , 1994).....	43
Figura 13. Curvas IdF para la estación Salitre Casa de Bombas	45
Figura 14. Curvas HdF para la estación Salitre Casa de Bombas	46
Figura 15. Curvas IdF de la zona de estudio para diferentes periodos de retorno.....	50

Figura 16. Cálculo de la capacidad de absorción para cada condición de pavimento: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)	52
Figura 17. Almacenamiento requerido para T= 2 años y diferentes condiciones del pavimento para la metodología Chile: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	57
Figura 18. Almacenamiento requerido para T= 3 años y diferentes condiciones del pavimento para la metodología Chile: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	58
Figura 19. Almacenamiento requerido para T= 4 años y diferentes condiciones del pavimento para la metodología Chile: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	59
Figura 20. Almacenamiento requerido para T= 2 años y diferentes condiciones del pavimento para el método The SUDS manual: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)	62
Figura 21. Almacenamiento requerido para T= 3 años y diferentes condiciones del pavimento para el método The SUDS manual: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)	63
Figura 22. Almacenamiento requerido para T= 4 años y diferentes condiciones del pavimento para el método The SUDS manual: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior)	64
Figura 23. Almacenamiento requerido para T= 2 años y diferentes condiciones del pavimento para el método Digest 365: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	67
Figura 24. Almacenamiento requerido para T= 3 años y diferentes condiciones del pavimento para el método Digest 365: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	68

Figura 25. Almacenamiento requerido para T= 4 años y diferentes condiciones del pavimento para el método Digest 365: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	69
Figura 26. Cálculo del caudal específico para cada condición del pavimento: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	71
Figura 27. Almacenamiento requerido para T= 2 años y diferentes condiciones del pavimento para el método de las lluvias: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	73
Figura 28. Almacenamiento requerido para T= 3 años y diferentes condiciones del pavimento para el método de las lluvias: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	74
Figura 29. Almacenamiento requerido para T= 4 años y diferentes condiciones del pavimento para el método de las lluvias: colmatado (izquierda superior), rehabilitado (derecha superior) y nuevo (inferior).....	75
Figura 30. Altura máxima para el año 2008 y diferentes condiciones del pavimento para el método de los volúmenes: colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)	76
Figura 31. Altura máxima para el año 2009 y diferentes condiciones del pavimento para el método de los volúmenes: colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)	77
Figura 32. Altura máxima para el año 2010 y diferentes condiciones del pavimento para el método de los volúmenes: colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)	78
Figura 33. Altura máxima para el año 2011 y diferentes condiciones del pavimento para el método de los volúmenes: colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)	79

Figura 34. Curvas del análisis frecuencial obtenidas para el método de los volúmenes para la determinación de la altura específica.....	81
Figura 35. Curva de masas para la estación Salitre Casa de Bombas, del periodo comprendido entre los años 2008 y 2011	86
Figura 36. Hidrograma de entrada para la estación Salitre Casa de Bombas, del periodo comprendido entre los años 2008 y 2011	86
Figura 37. Calibración de los parámetros C_t y C_p del hidrograma sintético de Snyder a partir de las pruebas de laboratorio de Gómez <i>et al.</i> (2010): Prueba 1 (izquierda superior), Prueba 2 (derecha superior) y Prueba 3 (inferior)	90
Figura 38. Hidrogramas de salida utilizando el método de Snyder según mantenimiento para el método de validación: sin mantenimiento (izquierda superior), con mantenimiento (derecha superior) y nuevo (inferior).....	91
Figura 39. Hidrogramas de entrada y salida para la zona de estudio según mantenimiento para el método de validación: sin mantenimiento (izquierda superior), con mantenimiento (derecha superior) y nuevo (inferior).....	92
Figura 40. Espesor del pavimento según mantenimiento para el método de validación: sin mantenimiento (izquierda superior), con mantenimiento (derecha superior) y nuevo (inferior).....	94
Figura 41. Relación de frecuencias para el cálculo del periodo de retorno correspondiente a diferentes espesores encontrados mediante el método de validación.....	95
Figura 42. Cálculo del volumen de almacenamiento para un pavimento sin mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología Chile: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior)	101
Figura 43. Cálculo del volumen de almacenamiento para un pavimento con mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología Chile: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior).....	102

Figura 44. Cálculo altura de almacenamiento para un pavimento sin mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología The SUDS manual: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior).....	105
Figura 45. Cálculo altura de almacenamiento para un pavimento con mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología The SUDS manual: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior).....	106
Figura 46. Cálculo del volumen de almacenamiento para un pavimento sin mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología Digest 365: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior).....	108
Figura 47. Cálculo del volumen de almacenamiento para un pavimento con mantenimiento y diferentes periodos de retorno para metodología Digest 365: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior).....	109
Figura 48. Cálculo de la altura de almacenamiento para un pavimento sin mantenimiento y diferentes periodos de retorno para el método de las lluvias: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior).....	112
Figura 49. Cálculo de la altura de almacenamiento para un pavimento con mantenimiento y diferentes periodos de retorno para el método de las lluvias: T= 2 años (izquierda superior), T= 3 años (derecha superior), T= 4 años (inferior).....	113
Figura 50. Curvas de alturas específicas para la adaptación del método de los volúmenes a la zona de estudio	114
Figura 51. Altura máxima para el año 2008 y diferentes condiciones del pavimento para la adaptación del método de los volúmenes : colmatado (izquierda superior), sin mantenimiento (derecha superior) y con mantenimiento (izquierda inferior).....	115
Figura 52. Altura máxima para el año 2009 y diferentes condiciones del pavimento para la adaptación del método de los volúmenes : colmatado (izquierda superior), sin mantenimiento (derecha superior) y con mantenimiento (izquierda inferior).....	116

Figura 53. Altura máxima para el año 2010 y diferentes condiciones del pavimento para la adaptación del método de los volúmenes : colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior), rehabilitado (izquierda inferior) y nuevo (derecha inferior)	117
Figura 54. Altura máxima para el año 2011 y diferentes condiciones del pavimento para la adaptación del método de los volúmenes : colmatado (izquierda superior), arbitrario (derecha superior) y rehabilitado (izquierda inferior)	118
Figura 55. Curvas del análisis frecuencial obtenidas para la adaptación del método de los volúmenes para la determinación de la altura específica	120

INDÍCE DE TABLAS

Tabla 1. Cálculos para la construcción del hidrograma unitario sintético.....	17
Tabla 2. Ecuaciones de pre-dimensionamiento de pavimentos porosos rígidos (Lopes da Silveira y Avruch Goldenfum, 2007)	23
Tabla 3. Factores de seguridad sugeridos para el diseño de sistemas de infiltración.....	26
Tabla 4. Porosidad de materiales (Woods-Ballard <i>et al.</i> , 2007).....	28
Tabla 5. Coeficientes decimales de escorrentía de áreas homogéneas utilizados para calcular el coeficiente de aporte para zonas urbanas heterogéneas (Azzout <i>et al.</i> , 1994)	33
Tabla 6. Ecuaciones IdF de Montana para la zona de estudio, estación Salitre Casa de Bombas	44
Tabla 7. Ecuaciones HdF para la zona de estudio, estación Salitre Casa de Bombas	46
Tabla 8. Parámetros ecuación de Montana de la zona de estudio para interpolaciones de IdF para 2 y 4 años	51
Tabla 9. Parámetros de Talbot ajustados para las curvas IdF de la zona de estudio	53
Tabla 10. Cálculo del valor del coeficiente de escorrentía C y la relación R	53
Tabla 11. Resultados de volumen máximo de almacenamiento y espesor del pavimento para diferentes periodos de retorno y para cada condición del pavimento mediante el método de la curva envolvente	54
Tabla 12. Cálculo del valor del coeficiente de escorrentía C	55
Tabla 13. Resultados obtenidos para periodos de retorno de 2, 3 y 4 años	56
Tabla 14. Resultados de altura máxima de almacenamiento para diferentes periodos de retorno y para cada condición del pavimento mediante el método The SUDS manual61	

Tabla 15. Resultados de volumen de almacenamiento requerido para diferentes periodos de retorno y para cada condición del pavimento mediante el método Digest 365	66
Tabla 16. Cálculo de la superficie activa.....	70
Tabla 17. Resultados altura máxima de almacenamiento para diferentes periodos de retorno y para cada condición del pavimento mediante el método las lluvias.....	72
Tabla 18. Alturas acumuladas máximas obtenidas para cada año y condición del pavimento	80
Tabla 19. Resultados de análisis de frecuencias.....	80
Tabla 20. Volumen de agua acumulada para diferentes periodos de retorno y condiciones del pavimento para el método de los volúmenes.....	81
Tabla 21. Espesor del pavimento para diferentes periodos de retorno calculado a partir del análisis frecuencial del método de los volúmenes.....	82
Tabla 22. Espesores de pavimento obtenidos a partir de la interpolación de los periodos de retorno obtenidos mediante el método de los volúmenes.....	82
Tabla 23. Resultados de espesores de pavimento poroso rígido al aplicar las metodologías existentes	83
Tabla 24. Cálculo de las dimensiones utilizadas en el hidrograma de Snyder.....	87
Tabla 25. Cálculo de las dimensiones utilizadas para el cálculo de los parámetros C_t y C_p	88
Tabla 26. Cálculo de la precipitación equivalente para convertir el convertir el hidrograma de salida del modelo físico en un hidrograma unitario.....	89
Tabla 27. Valores C_t y C_p	90
Tabla 28. Espesor de pavimento poroso rígido en metros a partir del método de validación	96
Tabla 29. Resultados de la adaptación del método de la curva envolvente.....	99

Tabla 30. Resultados de la adaptación del método de Chile	100
Tabla 31. Resultados de la adaptación del método The SUDS Manual	104
Tabla 32. Resultados de la adaptación del método Digest 365	107
Tabla 33. Resultados de la adaptación del método de las lluvias.....	111
Tabla 34. Alturas acumuladas máximas obtenidas para cada año y condición del pavimento mediante la adaptación del método de los volúmenes.....	119
Tabla 35. Resultados de análisis de frecuencias mediante la adaptación del método de los volúmenes.....	119
Tabla 36. Volumen de agua acumulada para diferentes periodos de retorno y condiciones del pavimento mediante la adaptación del método de los volúmenes.....	120
Tabla 37. Espesor del pavimento para diferentes periodos de retorno calculado a partir del análisis frecuencial mediante la adaptación del método de los volúmenes.....	121
Tabla 38. Espesores de pavimento obtenidos a partir de la interpolación de los periodos de retorno obtenidos mediante la adaptación del método de los volúmenes.....	121
Tabla 39. Resultados de espesores de pavimento poroso rígido al realizar las adaptaciones de las metodologías de diseño	122
Tabla 40. Espesores obtenidos mediante las metodologías originales, sus adaptaciones y el método propuesto de validación.....	126