

Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos.

Eduardo García Haba⁽¹⁾, Sara Perales Momparler⁽²⁾, Ignacio Andrés-Doménech⁽¹⁾

⁽¹⁾Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA). Área de Hidráulica e Hidrología. Universitat Politècnica de València. Cno. de Vera s/n 46022 Valencia.

⁽²⁾PMEnginyeria. Avda. Aragón, 18 - 1º - 1ª 46021 Valencia.

igando@hma.upv.es

1 Introducción

Las condiciones pluviométricas mediterráneas se caracterizan por grandes descargas de precipitación en pequeños intervalos de tiempo. Este tipo de sucesos se concentran generalmente en otoño, época en la que se registran elevados picos de intensidad de lluvia, propios de lluvias torrenciales. La magnitud de este fenómeno, unido a la progresiva impermeabilización del suelo y a las obsoletas infraestructuras de drenaje en zonas urbanas consolidadas, son responsables de generar una serie de efectos negativos desde el punto de vista hidrológico, hidráulico y medioambiental sobre el propio sistema de drenaje urbano y los medios receptores finales. Este último aspecto cobra en las últimas décadas mucha importancia, cuando se ha sido conscientes de que las escorrentías urbanas, lejos de ser “aguas limpias” acarrean importantes cargas contaminantes cuya descarga debe ser, cuanto menos, limitada al medio receptor. Además, los nuevos marcos legislativos que emanan de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE, exigen que así sea tenido en cuenta en el proceso de diseño de las infraestructuras de drenaje urbano. Con el objetivo de mitigar estos efectos negativos, los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), también conocidos como BMP o LID, representan una alternativa interesante y de uso cada vez más extendido, ya que permiten controlar tanto la cantidad como la calidad de la escorrentía generada, a la vez que lo combinan con una adecuada integración paisajística.

Los pavimentos permeables se engloban dentro de las técnicas de drenaje urbano sostenible cuyo objetivo principal es el fomento de la retención y la infiltración de las escorrentías en el origen del sistema. Por ello, y siguiendo las clasificaciones habituales, pueden ser catalogados como técnicas estructurales en origen. Las primeras aplicaciones de este tipo de soluciones para el drenaje urbano se remontan a la década de 1970 (Rodríguez, 2008). Este artículo se centra en el estudio de los pavimentos porosos o técnica de drenaje urbano sostenible, para el control de escorrentías generadas por eventos de lluvia de carácter mediterráneo. A partir del estudio concreto de un caso implantado en el municipio de Benaguacil (Valencia), se generalizan los resultados para obtener el rendimiento de la infraestructura en función de los parámetros básicos de diseño. El análisis se lleva a cabo a partir de la simulación continua de la serie histórica de precipitaciones con el programa SWMM. A partir de los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios definidos se obtienen ábacos de sencilla interpretación para cada uno de los índices de eficiencia definidos que permiten en última instancia decidir los parámetros óptimos de diseño.

2 Pavimentos permeables

2.1 Tipologías de pavimento permeable

El principio general de los pavimentos permeables es el de recoger y pretratar la escorrentía, y, si las características de calidad de éstas y el terreno lo permiten, infiltrarla a las capas inferiores del suelo (Scholza and Grabowiecki, 2007). En comparación con el enfoque tradicional, los sistemas basados en la retención y la infiltración se van imponiendo desde los puntos de vista de la sostenibilidad e incluso del coste económico de las actuaciones. En ese sentido, los pavimentos permeables muestran varios beneficios potenciales como la reducción de escorrentía y la reducción de la carga contaminante asociada a ésta. Así, los pavimentos permeables no sólo son una técnica para el control de la cantidad de escorrentía sino que se revelan eficaces para el control de la calidad en superficies como calzadas o aparcamientos donde la producción de aguas contaminadas puede ser frecuente. Contaminantes como los hidrocarburos o los metales pesados son habituales en las superficies

mencionadas anteriormente y pueden afectar gravemente a los medios receptores finales si no se biodegradan suficientemente o se retienen en el proceso de filtración (Brattebo and Booth, 2003).

Son muchas las clasificaciones que pueden hallarse en la literatura respecto de los pavimentos permeables. En la literatura anglosajona se habla de “*pervious pavements*” en general (Woods-Ballard et al., 2007) y se distinguen los dos tipos principales siguientes:

- a) Pavimentos porosos: son aquellos que filtran el agua a través de la totalidad de su superficie, como es el caso, por ejemplo, de superficies de grava, hormigón poroso o asfalto poroso.
- b) Pavimentos permeables (propriadamente dichos): están formados por materiales altamente impermeables como por ejemplo, adoquines, colocados de modo que existan huecos o juntas entre cada elemento. El agua percola de este modo por dichas discontinuidades hacia las capas inferiores del pavimento.

Por otra parte, esta clasificación atendiendo a la superficie propiadamente dicha debe cruzarse con otro criterio importante en el diseño de la infraestructura como es el destino final de las aguas filtradas (Rodríguez, 2008). Woods-Ballard *et al.* (2007) proponen la siguiente clasificación en los tres tipos siguientes:

- a) Infiltración completa al terreno subyacente. Cuando la capacidad de infiltración del terreno es lo suficientemente grande, se puede diseñar el pavimento permeable para que el agua infiltre en su totalidad hacia el mismo.
- b) Infiltración al terreno subyacente combinada con drenaje longitudinal. Cuando la capacidad de infiltración del terreno es escasa o limitada, se completa la infraestructura con drenes longitudinales en las capas inferiores que evacúan el exceso hacia la red convencional (Figura 1).

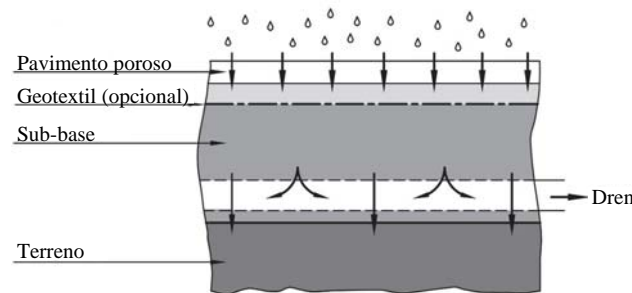


Figura 1 Sección tipo de un pavimento poroso combinado (adaptado de Woods-Ballard et al., 2007).

- c) Terreno subyacente impermeable o impermeabilizado mediante geomembranas. Dado que la capacidad de infiltración al terreno es nula, el sistema debe contar necesariamente con drenes longitudinales en las capas inferiores que evacúan el agua almacenada hacia la red convencional. Esta alternativa se utiliza cuando la permeabilidad del subsuelo es muy baja (por ejemplo, en terrenos arcillosos), cuando se quiere aprovechar el agua filtrada (en este caso la salida es hacia la red de aprovechamiento), cuando el terreno subyacente es especialmente sensible, incluso a las aguas filtradas, o cuando el nivel freático no se encuentra al menos a más de un metro de profundidad de la superficie del pavimento.

Pese a las ventajas ya mencionadas, existen también inconvenientes en los pavimentos permeables que no conviene perder de vista. Éstos vienen fundamentalmente del riesgo de colmatación y degradación de la infraestructura si no se toman las medidas de precaución necesarias. Así, los pavimentos permeables no deben usarse (o debe hacerse tomando las medidas preventivas previas necesarias) si se prevén cargas sólidas importantes en la escorrentía generada, pues la colmatación del pavimento se producirá rápidamente. Además, el crecimiento indeseado de malas hierbas entre los intersticios de los pavimentos permeables puede reducir notablemente su rendimiento. Por otra parte, se debe ser muy consciente de la calidad del agua que se está infiltrando al terreno, si es el caso, y de la vulnerabilidad de éste a recibirlas.

Como se describe más adelante en detalle (apartado 3.2), el caso de estudio cuyos resultados se analizan en el artículo corresponde a un pavimento poroso (cuya capa de rodadura está ejecutada con hormigón poroso) con infiltración limitada al terreno subyacente y por tanto, combinada con drenaje longitudinal hacia la red convencional.

2.2 Criterios de diseño

El diseño del pavimento permeable combina necesariamente tanto aspectos hidrológicos e hidráulicos como estructurales. Así, el pavimento debe ser capaz de gestionar cierto volumen de agua (que vendrá dado por los criterios de diseño del mismo) y evacuarlo de modo controlado al terreno subyacente, combinándolo o no con el drenaje adicional si fuese necesario. Por otra parte, el pavimento debe proporcionar la resistencia estructural necesaria adecuada al tipo de tráfico que deba soportar.

2.2.1 Hidrológicos e hidráulicos

El diseño hidrológico e hidráulico del pavimento poroso debe tener en cuenta cuatro aspectos esenciales (Woods-Ballard *et al.*, 2007): (1) estimar las características de percolación de la capa de pavimento, (2) determinar el volumen de almacenamiento (proporcionado por los poros de la sub-base) para alcanzar tasas de rendimiento adecuadas, (3) estimar la necesidad, y en su caso cuantificar, la capacidad del drenaje longitudinal adicional y (4) analizar la respuesta del pavimento ante eventos extremos de precipitación.

La capacidad de percolación de la propia capa de pavimento no suele ser un factor limitante en el diseño de éstos, pues suele ser al menos un orden de magnitud superior a las máximas intensidades de lluvia esperables. Por ejemplo, una tasa de percolación habitual a través de un pavimento de adoquines prefabricados de hormigón puede ser del orden de 4000 mm/h. Esta tasa se reduciría y estabilizaría con el tiempo debido a la colmatación, por lo que se suele recomendar en el diseño adoptar en este valor un factor de seguridad de 10.

La capacidad de almacenamiento en el propio pavimento (y que le confiere por tanto la capacidad de laminación) depende directamente de las características del régimen de precipitación, de la capacidad de infiltración al terreno subyacente, de la capacidad del drenaje complementario y del área drenada al propio pavimento y está directamente relacionada con el espesor de cada una de las capas del pavimento y sus respectivos índices de huecos. El objetivo principal del artículo reside en el análisis de todos los factores mencionados anteriormente en el rendimiento final de la infraestructura.

No existen directrices estandarizadas en cuanto a la capacidad con que deben diseñarse los drenes de salida. En cualquier caso, su tratamiento no es muy distinto de la propia capacidad del terreno subyacente, puesto que no hacen sino suplementarla. Los drenes que vehiculan la salida del agua desde el pavimento permeable al punto de vertido suelen diseñarse para caudales no superiores a 5 l/s/ha.

Por último, aunque la concepción del pavimento poroso se realiza para que no se produzcan encharcamientos superficiales sobre el mismo, debe comprobarse para qué eventos extremos comenzaría pese a todo la escorrentía superficial. A modo de ejemplo, el *Portland Stormwater Management Manual* (City of Portland, 2008) establece como criterio de extremos que el pavimento esté correctamente diseñado para almacenar (sin formación de escorrentía superficial) el volumen de la tormenta de 10 años de periodo de retorno y duración 24 horas, y que se infiltre (o se evacue si la infraestructura cuenta con drenes) en menos de 30 horas.

2.2.2 Estructurales

Los criterios estructurales de diseño deben ser aquellos que proporcionen la capacidad portante adecuada a la categoría de tráfico que deba soportar el pavimento, sin que éste sufra deformaciones importantes. Dado que la mayoría de normas y recomendaciones de diseño de secciones de firme están referidas a materiales convencionales, deberán ser los propios fabricantes de la estructura porosa los que establezcan los requerimientos estructurales necesarios. En cualquier caso, las directrices generales de diseño pasan por las siguientes etapas: (1) establecer la categoría de tráfico, (2) si fuese necesario, mejorar la capacidad portante de la explanada, normalmente compactando (aunque esto iría en detrimento de la capacidad de infiltración del terreno, por lo que es recomendable que primero se vierta una fina capa de grava y se compacte sobre ella), (3) seleccionar el tipo de sub-base y su espesor y (4) seleccionar el tipo y espesor del pavimento permeable.

Woods-Ballard *et al.* (2007) establecen, en función de la categoría de tráfico y de las características de la explanada, espesores de la sub-base entre 200 y 450 mm. Por su parte, el *Portland Stormwater Management Manual* (City of Portland, 2008) recomienda, para zonas de aparcamiento, compactar la explanada, una sub-base de árido limpio de diámetro 20-50 mm, de espesor mínimo 15 cm y si la capa de rodadura es de hormigón poroso, que ésta tenga un espesor mínimo de 100 mm. Entre la explanada y la sub-base, debe colocarse un geotextil. Por último, el manual *Low Impact Development Manual for Southern California* (The Low Impact Development Center Inc., 2010) cataloga los pavimentos porosos con hormigón poroso como apropiados para aparcamientos, senderos, aceras, zonas de juego, plazas, campos deportivos y similar, incluso para carreteras de baja intensidad de tráfico (IMD < 25000 vehículos/día). Si se fomenta la infiltración al subsuelo, la explanada

debe compactarse lo mínimo posible como lo permitan los requerimientos estructurales. Sobre ella, la capa de árido limpio que constituye la sub-base puede sin embargo compactarse ligeramente. El espesor que se adopta para la sub-base distribuye la carga de tráfico, compensando así la falta de compactación de la explanada (Ferguson, 2005). Así, se adaptarán para ésta espesores mínimos de 150 mm y máximos de 300 mm. La capa de rodadura de hormigón poroso será de al menos 100 mm. En el apartado 3.2 se especifican los criterios adoptados para la infraestructura objeto del caso de estudio desarrollado en el artículo.

3 Caso de estudio

A partir de un caso concreto de pavimento poroso ejecutado en Benaguasil (Valencia), se pretende analizar la respuesta hidráulica del mismo a largo plazo, evaluando su rendimiento en cuanto a la cantidad porcentual de escorrentía filtrada respecto de la producida en la cuenca y también respecto del porcentaje de eventos completamente gestionados por el pavimento respecto del promedio anual de tormentas. Estos indicadores de eficiencia se definen detalladamente en el apartado 4.1. Para ello, se realiza la simulación continua de la infraestructura con una serie de precipitación relativamente larga (apartado 4.1), convenientemente tratada para efectuar las simulaciones. En el apartado 4.2 se describe la infraestructura objeto del análisis y en el 4.3 se detalla la conceptualización del mismo en SWMM para proceder a la simulación. Finalmente, se definen los escenarios simulados en los que, tomando siempre como referencia los parámetros de la infraestructura construida, se analiza cómo variaciones en los mismos modifican la respuesta hidráulica, y por tanto el rendimiento final.

3.1 Análisis y caracterización del escenario pluviométrico

El dimensionamiento de infraestructuras como los pavimentos permeables debe tener como punto de partida la caracterización del régimen pluviométrico de la zona de aplicación de los mismos. Habitualmente, los métodos hidrológicos de diseño adoptan criterios de extremos vinculados a períodos de retorno para la definición de los parámetros de diseño (caudales de pico de avenida fundamentalmente). Esta idea redundante en el concepto de tormenta de diseño asociada a una determinada frecuencia de excedencia. La obtención de estos criterios para la evaluación del funcionamiento, en este caso, de un pavimento permeable, no puede basarse en el mismo procedimiento, puesto que en este caso, todo el rango de lluvias es importante. Por otra parte, así como en los enfoques de diseño tradicionales la variable clave es la intensidad máxima, entran en juego ahora otras, igualmente decisivas como el volumen y duración de evento y el tiempo de separación entre episodios de lluvia (tiempo seco). Es por lo tanto necesario abordar una caracterización completa del proceso temporal de precipitación, con el objetivo de caracterizar los eventos de precipitación estadísticamente independientes que constituyen el input de la simulación matemática que se aborda posteriormente.

Los datos analizados para la aplicación práctica desarrollada han sido facilitados por el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ). El SAIH constituye una red de recogida de datos de precipitación y de control de los caudales circulantes (niveles en embalses, cauces y canales, posiciones de compuertas,...) que cubre el territorio adscrito a la CHJ. Los datos caracterizados corresponden a los de la estación pluviométrica que el SAIH tiene en Villamarchante. Benaguasil y Villamarchante son dos poblaciones vecinas ubicadas en una margen y otra del río Turia y que apenas distan 4 km por lo que se adoptan como representativos para el caso desarrollado los datos de Villamarchante. La aplicación del desarrollo teórico se lleva a cabo con la serie 1990-2009, cuya discretización temporal original es cinco-minutal.

La cuestión fundamental antes de abordar la simulación matemática con la citada serie de lluvia es la separación de la serie continua de registros pluviométricos en eventos de precipitación estadísticamente independientes con objeto de referir los resultados posteriores, entre otros, a frecuencias de evento. El aislamiento de un evento de precipitación precisa del establecimiento de criterios para definir cuándo comienza y acaba la tormenta en cuestión. Si dos pulsos de lluvia están separados por un lapso de tiempo relativamente corto, lo más probable es que pertenezcan al mismo evento. No obstante, si ese espacio temporal es largo, la tendencia es que éstos pertenezcan a episodios diferentes. La cuestión se centra por tanto en establecer cuál es esa separación mínima entre pulsos de lluvia que separa dos episodios diferentes de precipitación. No existe una metodología universal para la identificación de dicha separación mínima (en adelante separación crítica), y por tanto de los eventos de precipitación. Hasta la fecha, las investigaciones de Restrepo-Posada y Eagleson (1982) siguen marcando las directrices generales a seguir al respecto. La manera de abordar el problema consiste en asumir los eventos de precipitación como realizaciones estadísticamente independientes, de modo que la separación crítica será aquella que dé lugar a que la serie de separaciones entre eventos se rija mediante un proceso de Poisson, esto es, esté

distribuida exponencialmente. Bonta y Rao (1988) corroboran esta teoría profundizando en algunos aspectos adicionales, entre los cuales la necesidad de contar con una serie de al menos 10 años para que los resultados obtenidos sean estadísticamente significativos. Andrés-Doménech *et al.* (2010), aplican la metodología en varias localizaciones españolas, añadiendo otros criterios de identificación basados en el análisis de bondad de los ajustes exponenciales obtenidos mediante los criterios de Kolmogorov-Smirnov, Nash-Sutcliffe y la evolución del momento de primer orden con la separación crítica. En la citada referencia el lector puede encontrar el detalle de la metodología.

La aplicación del procedimiento a la serie 1990-2009 de Villamarchante demuestra una separación crítica de evento de 26 horas, esto es, dos pulsos de lluvia que disten en el tiempo más de este valor pertenecen automáticamente a eventos de precipitación diferentes. Con este criterio, resultan en la serie un total de 752 eventos independientes. Muchos de ellos corresponden a eventos de escasísima notoriedad, próximos por una parte a la propia sensibilidad del pluviómetro y por otra, por debajo de un umbral de escorrentía práctico a la hora de generar escorrentía. Por ello, se han eliminado de la serie todos aquellos eventos con un volumen bruto de lluvia inferior a 1 mm. De este modo, la serie se reduce a un total de 548 eventos, esto es, un promedio de $N_E=27.4$ eventos/año. La serie de episodios así generada constituye el input meteorológico de la simulación matemática posterior.

3.2 Descripción de la infraestructura

El pavimento poroso objeto de análisis constituye el aparcamiento para vehículos de la nueva piscina cubierta municipal de Benaguasil, Valencia (Figura 2). Su superficie total es de 825 m².

El dimensionamiento del pavimento permeable tuvo como punto de partida la siguiente sección de firme convencional adoptada en el proyecto de urbanización. La sección propuesta contemplaba 20 cm de base de zahorra artificial compactada al 100% del Próctor Modificado sobre la que se vertía una capa de hormigón HF-4.0 de 20 cm de espesor, con mallazo #15x15 cm Ø 8mm.

Para el aparcamiento objeto de estudio, dado que el hormigón poroso se va a ejecutar con un ligante comercial (*Ecocreto*), se siguieron las especificaciones sugeridas por el distribuidor del mismo, que posteriormente se someten al análisis presentado en el artículo. El detalle de la sección propuesta es el siguiente:

- a) Sub-base de árido limpio, tamaño 25-50 mm y espesor 250 mm.
- b) Hormigón poroso con árido 6-12 mm y aditivo tipo *Ecocreto*, con espesor 120 mm.



Figura 2 (a) Infraestructura en construcción: sub-base de gravas, dren y geotextil. (b) Infraestructura terminada.

El distribuidor del producto comercial indica que no es necesaria una capa de filtro entre la sub-base y el hormigón poroso. Por otra parte, de los ensayos de percolación en este tipo de capa de rodadura y teniendo en cuenta el factor de seguridad $FS=10$ antes mencionado, resulta una capacidad de percolación de 4320 mm/h, es decir, permeable a todos los efectos. Cabe destacar igualmente que ésta es la estructura de firme que *Ecocreto* especifica para tráfico intenso, siendo la equivalente a un pavimento de 20 cm de hormigón convencional. La inmediata inferior sería para tráfico medio, de 8 cm de espesor, equivalente a un pavimento convencional de 15 cm.

El terreno natural está formado por una capa muy impermeable cerca de la superficie (margas conocidas localmente como *tap*), cuya permeabilidad de cálculo estimada mediante ensayos convencionales resulta de $2.64 \cdot 10^{-4}$ cm/s. Por ello, la evacuación final del agua se propone a través de un dren inferior, que es lo primero que se construye, que desagua al colector de pluviales de la urbanización de la nueva piscina cubierta. Tras el

dren, en este caso se vierte una fina capa de gravas sobre el terreno natural previo a la compactación del fondo de caja, y a continuación se extiende el geotextil y sobre éste se coloca la capa de árido limpio que conforma la sub-base.

Como ya se ha comentado previamente, el diseño del pavimento se realiza en base a criterios estructurales, y no hidráulicos, ya que no existe una restricción en cuanto a los caudales de vertido a la red ni al cauce cercano. En cualquier caso, se comprueba que cumple el criterio de volumen de calidad (CEDEX, 2008). Lo que se plantea por tanto a continuación es, con este diseño, analizar cuál es el rendimiento hidráulico de la infraestructura de cara al control de las escorrentías que en ella se producen, y cómo varía esta eficiencia en función de los parámetros de diseño y de los parámetros de cuenca.

3.3 Simulación matemática

Para analizar la respuesta hidráulica del sistema, se ha creado un modelo matemático de simulación. Para ello se ha empleado el modelo de dominio público SWMM 5.0 de la EPA de los Estados Unidos (Rossman, 2004), que además de contemplar la escorrentía urbana y los procesos de flujo, integra un módulo de cálculo específico para SUDS. Por otra parte y en paralelo, se han contrastado los resultados con otro software comercial, WinDes (MicroDrainage), obteniendo resultados satisfactorios.

El *Stormwater Management Model* (SWMM) es un modelo dinámico de simulación del drenaje urbano. Una de las características más relevantes de SWMM para el estudio que se aborda, es que ofrece la posibilidad de controlar la cantidad y calidad de las escorrentías urbanas, cumpliendo el objetivo más importante de los SUDS. Para ello cuenta con un módulo de cálculo específico LID (acrónimo de *Low Impact Development*, otra de las acepciones de los SUDS), cuyo principio de funcionamiento se basa en capturar y/o retener la escorrentía mediante diferentes técnicas de SUDS (como zonas de bio-retención, zanjas de infiltración, pavimentos porosos, cunetas vegetadas y depósitos) para su posterior salida del sistema.

3.3.1 Conceptualización del sistema

La zona de estudio se ha conceptualizado en SWMM mediante una cuenca (en este caso el aparcamiento), que solamente recoge las aguas de lluvia caídas en la misma, puesto que carece de cuencas adyacentes que supongan aportes externos. La escorrentía generada se inyecta en un nodo ficticio, circula por una conducción y sale finalmente del sistema para conectarse a la red de drenaje municipal. En este caso, la técnica empleada corresponde a un pavimento poroso, representado como una sucesión de capas verticales con unas determinadas propiedades. Durante la simulación, SWMM realiza un balance sobre cada capa, permitiendo conocer el movimiento del agua y su almacenamiento entre éstas. En la Figura 3 se representan esquemáticamente los procesos y las líneas de flujo características en un pavimento poroso.

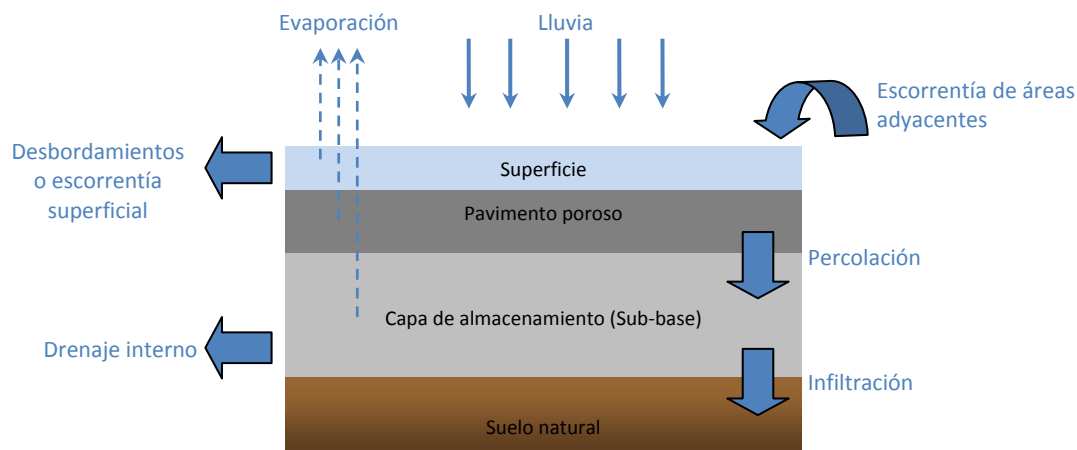


Figura 3 Esquema conceptual de flujos en un pavimento poroso.

El esquema de funcionamiento de un pavimento poroso en SWMM puede representarse mediante dos nudos divisores y dos unidades de almacenamiento, como se muestra en la Figura 4. La lluvia que cae sobre el pavimento poroso se moviliza en primer lugar hacia el Divisor 1, donde la intensidad de precipitación se

compara con la tasa de percolación del pavimento poroso. Si la tasa de percolación del pavimento poroso es excedida, la lluvia filtrada por el pavimento poroso es dirigida a la Unidad de Almacenamiento 1, que tiene una superficie igual al área del pavimento poroso y una profundidad igual a la profundidad del almacenamiento (sub-base), afectada de la porosidad. Una vez agotada la capacidad de almacenamiento de la Unidad 1, el exceso de flujo se dirige al Divisor 2. El caudal de entrada al Divisor 2 se compara con la conductividad hidráulica saturada del suelo natural, de modo que si el caudal de entrada es igual o inferior a la tasa de infiltración hacia el suelo natural, se dirige a la Unidad de Almacenamiento 2 (el suelo). Si el caudal de entrada al Divisor 2 excede la tasa de infiltración hacia el suelo natural, se dirigirá hacia el sistema de drenaje, y de éste a la salida del sistema.

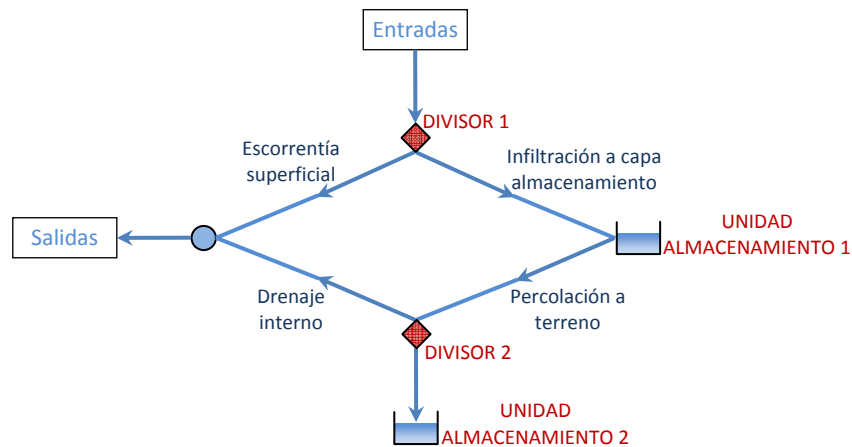


Figura 4 Conceptualización de un pavimento poroso en SWMM.

A continuación se sintetizan los procesos y ecuaciones que SWMM utiliza para modelar la escorrentía superficial, los procesos de percolación e infiltración, el drenaje interno y el transporte hidráulico (Rossman, 2004). La escorrentía superficial en SWMM se modela mediante un embalse no lineal, donde la ecuación de pérdidas para el tránsito superficial es la de Manning. SWMM ofrece la modelación de la infiltración mediante los modelos de Horton, Green-Ampt y el método del número de curva del SCS. Cuando el proceso ocurre a través de la capa porosa del pavimento, se habla de percolación, aunque evidentemente, están gobernados por las mismas ecuaciones. El transporte de agua por el interior de los conductos es gobernado por las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento para el flujo transitorio en lámina libre, es decir, las ecuaciones de Saint Venant. Por último, el drenaje interno del pavimento se modela mediante una ecuación de descarga del tipo $q=C(h-H_d)^n$, donde q es el caudal de salida (mm/h), h es la altura de agua en la capa de almacenamiento (mm), y H_d es la altura del propio dren.

3.3.2 Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo provienen de la propia definición de la solución presentada en el apartado 3.2, y en el caso de los parámetros de percolación e infiltración, de los ensayos realizados tanto al propio pavimento poroso como al terreno natural subyacente.

En cuanto a los parámetros de la cuenca (en el caso estudiado, el propio aparcamiento), el área es de 825 m² y se ha adoptado un coeficiente de rugosidad de Manning para el hormigón poroso de 0.017. Por otra parte, el modelo de infiltración usado para la modelación de la percolación es el de Horton, con una tasa de infiltración (con FS=10) de 4320 mm/h, una constante de decaimiento de 2 l/s y un tiempo de secado de 8 días.

En cuanto a los parámetros del propio pavimento permeable (módulo LID), los esenciales son los siguientes: espesor de hormigón poroso de 120 mm, índice de huecos 0.21, espesor de la sub-base de 250 mm, índice de huecos 0.67 y conductividad hidráulica del terreno $2,64 \times 10^{-4}$ cm/s. La capacidad hidráulica del dren inferior se limita a 5 l/s.

Además de estos parámetros, cabe destacar que el proceso de colmatación no se ha modelado como tal, sino que se ha tenido en cuenta introduciendo en la tasa de percolación del pavimento poroso un factor de seguridad FS=10. Además, se ha obviado el efecto de la evaporación puesto que con la definición independiente de eventos, cabe esperar que el efecto de ésta sea despreciable.

3.3.3 Escenarios simulados

Tomando como referencia la infraestructura descrita anteriormente, se detallan a continuación los tres escenarios simulados, en función de parámetros de diseño del pavimento poroso (caudal de drenaje interno y espesor de la capa de almacenamiento), y de parámetros de cuenca (cantidad de superficie drenante).

Escenario 1. Se pretende observar la influencia de la naturaleza del terreno natural y del caudal de drenaje interno sobre el funcionamiento de la infraestructura. Para ello, se ha considerado un caudal de drenaje variable y el siguiente rango de permeabilidades características de diferentes terrenos: arena limosa (caso de estudio, $k=2,64 \times 10^{-4}$ cm/s), limos arenosos ($k=10^{-5}$ cm/s), limos ($k=10^{-6}$ cm/s), arcillas limosas ($k=10^{-7}$ cm/s) y arcillas impermeables ($k=0$ cm/s). El espesor de la capa de almacenamiento se mantiene fijo (250 mm) y el área de la cuenca drenante coincide con la del propio aparcamiento.

Escenario 2. Se pretende estudiar la influencia que tiene el espesor de la capa de almacenamiento (sub-base) y del caudal de drenaje interno sobre el funcionamiento de la infraestructura. Para ello, se ha considerado el siguiente rango de espesores: 150 mm; 200 mm; 250 mm; 300 mm; 350 mm. Además, el caudal de drenaje se considera variable, el terreno natural se asume totalmente impermeable ($k=0$ cm/s) y el área de la cuenca drenante coincide con el propio aparcamiento.

Escenario 3. Se adoptan los parámetros originales del caso de estudio ($k=2,64 \times 10^{-4}$ cm/s; $e=250$ mm; $q=5$ l/s/ha), salvo que en este caso, la superficie que drena hacia el pavimento poroso se ve incrementada en N veces la superficie original del aparcamiento. Con esto se pretende observar la influencia que tendrá el aumento de la superficie drenante en la respuesta del pavimento poroso, caso de que éste tuviera aportes externos.

4 Resultados

4.1 Índices de eficiencia

El rendimiento del funcionamiento del pavimento permeable para cada uno de los escenarios planteados y con el régimen pluviométrico adoptado se evalúa a partir de dos índices de eficiencia. El índice de eficiencia eventual ρ_e evalúa la frecuencia con la que no se produce escorrentía superficial sobre el pavimento poroso, esto es, la infraestructura es capaz de gestionar completamente la lluvia caída. Por su parte, el índice de eficiencia volumétrica ρ_v establece el ratio de escorrentía gestionada por el pavimento respecto de la correspondiente a la lluvia caída. Siendo N_e el número de eventos que generan escorrentía superficial de los N eventos simulados en la serie, P_i el volumen de lluvia precipitado en el evento i y E_i la correspondiente escorrentía superficial producida sobre el pavimento poroso, los índices ρ_e y ρ_v se definen como:

$$\rho_E = 1 - \frac{N_E}{N} \quad \rho_V = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{\sum_{i=1}^N P_i}$$

4.2 Influencia de los parámetros de diseño

Las figuras 5 y 6 sintetizan los resultados obtenidos para las eficiencias eventual y volumétrica en los escenarios 1 y 2, esto es, variando dos de los parámetros de diseño que más condicionan la respuesta de la infraestructura: la capacidad de infiltración del suelo subyacente y el espesor de la sub-base de gravas.

En el caso de la influencia de la permeabilidad (Figura 5), puede apreciarse cómo en cuanto el terreno subyacente está en el dominio de las arenas ($k > 10^{-4}$ cm/s), las eficiencias obtenidas son completas, independientemente de la capacidad del dren inferior que será, por tanto, innecesario. Complementariamente, conforme el terreno pierde capacidad de infiltración, hasta el caso completamente impermeable, con capacidades del dren superiores a 0.1 l/s/ha se consiguen eficiencias altas, superiores al 70%.

Por otra parte, la influencia del espesor de la capa de gravas se revela menos decisiva en los valores finales de eficiencia, como puede observarse en la Figura 6. Las máximas diferencias de eficiencia entre los extremos de la horquilla considerada se obtienen en el entorno de una capacidad del dren de 0.1 l/s/ha, y son, como mucho, del orden de $\pm 25\%$.

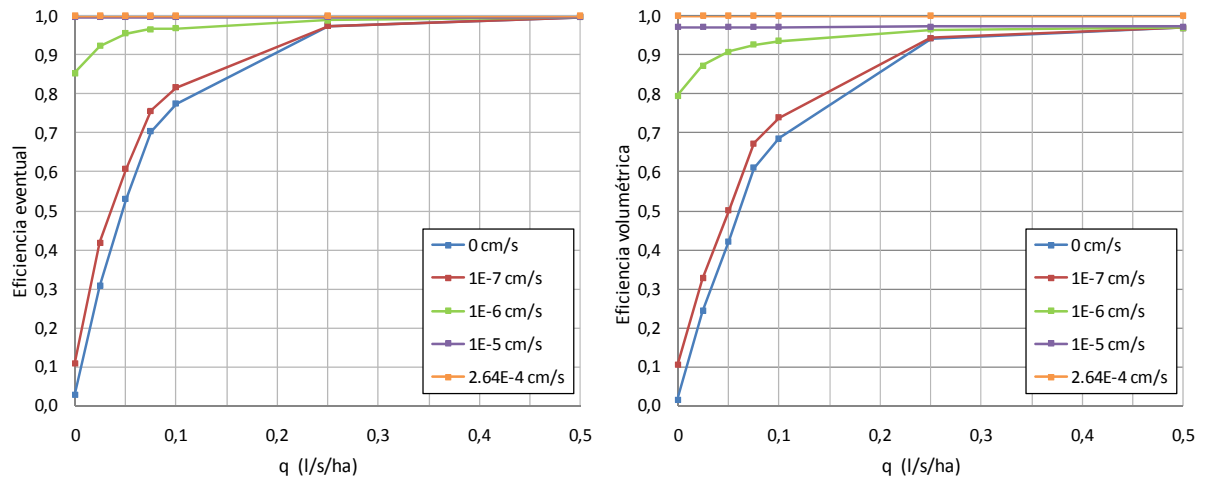


Figura 5 Índices de eficiencia en función de la capacidad de infiltración del terreno, con espesor de la sub-base de gravas fijo, 250 mm (escenario 1).

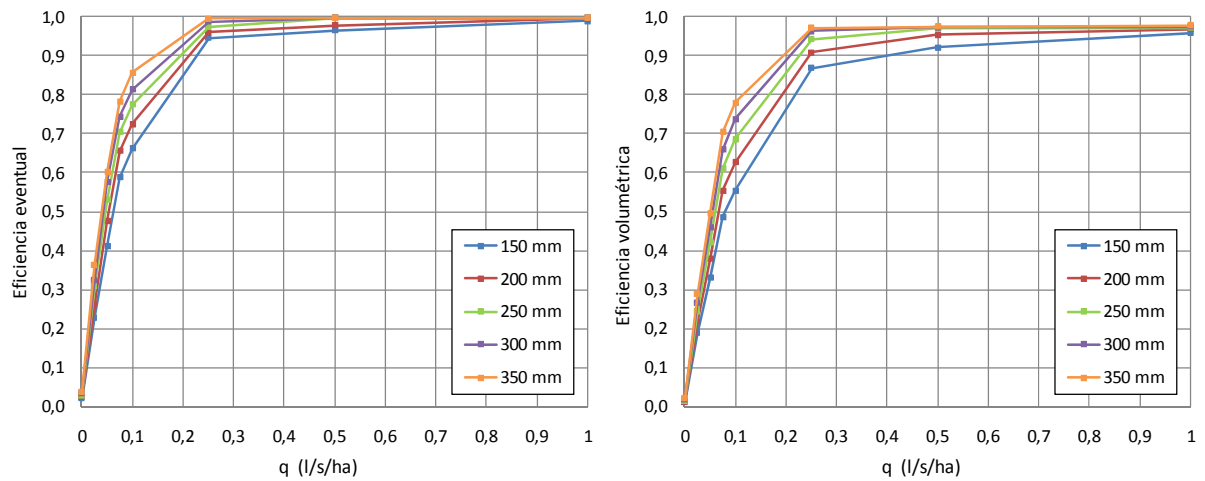


Figura 6 Índices de eficiencia en función del espesor de la sub-base de gravas, con terreno impermeable (escenario 2).

4.3 Influencia de los parámetros de cuenca

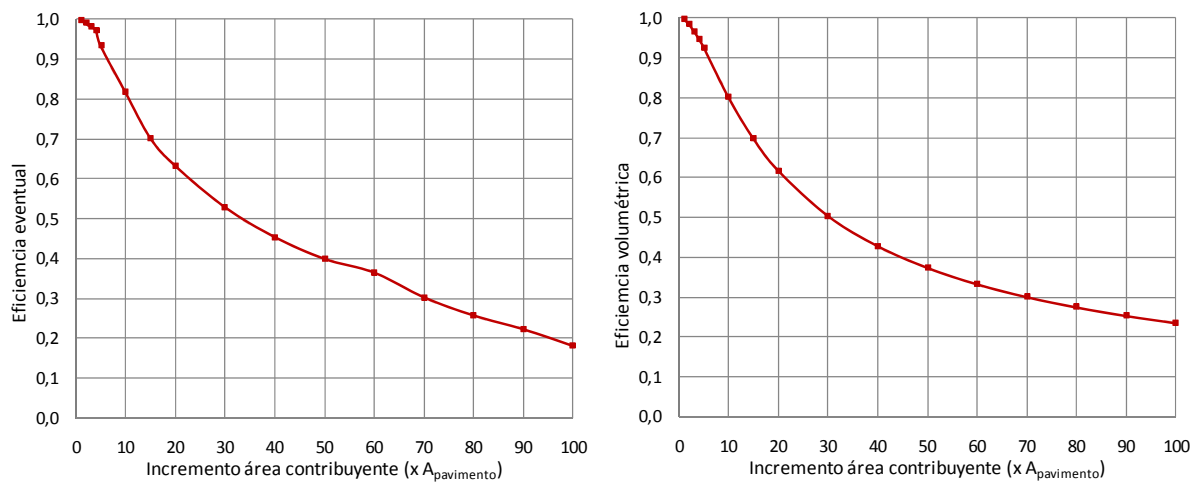


Figura 7 Índices de eficiencia para el caso de estudio en función del incremento del área contribuyente neta (escenario 3)

Por último, se adjuntan las eficiencias que ofrecería la infraestructura con sus parámetros originales de diseño (escenario 3), en función de un hipotético incremento de su área de aportación. Como puede apreciarse en la figura 7, el descenso de eficiencias es relativamente suave, lo cual demuestra que la infraestructura es muy elástica a recibir aportes adicionales a los generados en su propia área: las eficiencias se mantienen por encima del 60% con áreas de hasta 20 veces el área del pavimento.

5 Conclusiones

Los pavimentos permeables son una solución eficaz para el tratamiento en origen de las escorrentías, como lo vienen demostrando desde hace décadas sus múltiples aplicaciones en países anglosajones y del norte de Europa. Sin embargo en países de climas más secos, su uso es todavía hoy tímido, quizás por la falta de experiencia y las reticencias que de ésta se derivan en cuanto a su funcionamiento. No obstante, el análisis del funcionamiento hidráulico realizado en el pavimento poroso del aparcamiento de la nueva piscina cubierta de Benaguasil pone de manifiesto que, aún en climas mediterráneos, con características propias como la torrencialidad, este tipo de soluciones proporcionan resultados favorables para la gestión de la escorrentía en el origen del sistema, contribuyendo con ello, además, a los beneficios en cuanto a la mejora que se consigue en la calidad de las aguas filtradas a su través. Aún en terrenos prácticamente impermeables, es técnicamente viable y sencillo obtener el control de más del 90% de los eventos y de los volúmenes de escorrentía generados, como lo demuestran los resultados obtenidos.

Los datos relativos a la definición geométrico-hidráulica del aparcamiento de Benaguasil han sido proporcionados por el proyecto AQUAVAL (Programa Life+ de Política Medioambiental y Gobernanza 2008), financiado por la Unión Europea y la Diputación de Valencia.

6 Referencias

- Andrés-Doménech, I., Montanari, A., and Marco, J. B. 2010. *Stochastic rainfall analysis for storm tank performance evaluation*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 1221-1232, doi:10.5194/hess-14-1221-2010.
- Bonta J. V. and Rao R. 1988. *Factors affecting the identification of independent store events*. Journal of Hydrology, Elsevier, 98 (3-4), 275-293.
- Brattebo, B. and Booth, D. 2003. *Long-term storm water quantity and quality performance of permeable pavement systems*. Water Research. 37(26), 4369–76.
- CEDEX, 2008. *Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano*. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento. CEDEX, Centro de Estudios Hidrográficos. ISBN 978-84-7790-475-5.
- City of Portland. *Portland Stormwater Management Manual (SWMM)*. 2008. Development Services Center. Portland. USA. August 2008.
- Ferguson, B. K. (2005). *Porous Pavements*. Boca Raton, Fla. CRC Press.
- Restrepo-Posada P. J. and Eagleson P. S. 1982. *Identification of independent rainstorms*. Journal of Hydrology, Elsevier, 55 (1-4), 303-319.
- Rodríguez Hernández, J. 2008. *Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero*. Tesis Doctoral. Grupo GITECO. Universidad de Cantabria.
- Rossman, L.A. 2004. *Stormwater Management Model User's Manual*. Version 5.0. Cincinnati, OH: USEPA.
- Scholz, M. and Grabowiecki P. 2007. *Review of permeable pavements systems*. Building and Environment 42 (2007), 3830–3836.
- The Low Impact Development Center Inc. 2010. *Low Impact Development Manual for Southern California*. Southern California Stormwater Monitoring Coalition. USA. April 2010.
- Woods-Ballard B., Kellagher R., Martin P., Jefferies C., Bray R. and Shaffer P. 2007. *The SUDS Manual*. CIRIA C697, London.