

Caso de estudio: Propuesta con materiales sustentables para el control del escurrimiento pluvial en áreas urbanas

Malena Monetti

CINTEMAC. UTN Facultad Regional Córdoba. Argentina
malenammonetti@gmail.com

Dayana Rautenberg

CINTEMAC. UTN Facultad Regional Córdoba. Argentina
carlosbaronetto@gmail.com

Carlos Baronetto

CINTEMAC. UTN Facultad Regional Córdoba. Argentina
carlosbaronetto@gmail.com

María Positieri

CINTEMAC. UTN Facultad Regional Córdoba. Argentina
mpositieri@gmail.com

ABSTRACT

Sustainable development and its application in construction are fundamental today in our society. The permeable pavements are a subset widely studied in the Urban Systems of Sustainable Drainage (SUDS) or BMPs (Best Management Practices or Good Environmental Practices). They are sections composed of several layers of materials that allow the passage of water, from the surface to the support base. They can be considered as a complete sustainable drainage chain because they provide infiltration, uptake, transport and storage, by allowing surface runoff to be controlled at source. This work presents the case study of a porous concrete pavement to be used in one of the parking lots of the Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC) with the aim of contributing to the control of urban runoff through the design and processing of porous concrete with materials locals evaluating their infiltration capacity as part of a permeable pavement. They were modeled with the SWMM 5.1 program of EPA, two types of pavements, one of pervious pavement with porous concrete developed and another of rigid concrete pavement. From the analysis of the hydraulic performance performed on the permeable pavement it is concluded that this type of structures provide favorable results for the management of runoff at the origin of the system. Even in unfavorable situations, for example the existence of practically impermeable land such as the type of soil in the study area, it is technically feasible and simple to obtain control of the runoff volumes generated.

Keywords: permeable pavements; porous concrete; management of runoff.

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo presenta la propuesta de aplicación de pavimento permeable en un estacionamiento con el objetivo de controlar el escurrimiento de aguas de lluvia. Se presenta la dosificación y propiedades del hormigón poroso desarrollado en laboratorio. El comportamiento y respuesta hidráulica de este pavimento de hormigón poroso para el clima local es analizado con el modelo de simulación matemática público SWMM 5.1 de la EPA de los Estados Unidos. Este modelo, además de contemplar la escorrentía urbana y los procesos de flujo, integra un módulo de cálculo específico para SUDS denominado LID (Low Impact Development). La versatilidad de este modelo de simulación, y su condición de libre distribución y código abierto, le ha permitido convertirse en uno de los más empleados en muchos países, como Estados Unidos, Canadá, Australia y en Europa, con el fin de

abordar numerosos estudios centrados en el análisis de la problemática de la cantidad y la calidad de agua (HUBER and DICKINSON, 1999). En este caso se realizó de acuerdo a criterios estructurales y no hidráulicos ya que no existen limitaciones en cuanto a caudales de vertidos de agua pluvial al sistema de drenaje urbano de la ciudad de Córdoba, Argentina, para este tipo de proyecto.

2. CARACTERÍSTICAS DEL ESTACIONAMIENTO Y DEL ÁREA EN ESTUDIO

El estacionamiento se encuentra ubicado en el predio de la UTN-FRC de la ciudad de Córdoba, **Figura 1**. El estacionamiento se emplaza dentro de un área de 4074 m², donde 381 m² pertenecen a edificios, 694 m² a espacios verdes y 2998 m² al estacionamiento propiamente dicho.

Figura 1. Ubicación del estacionamiento dentro de la Universidad



Fuente: Monetti, M. 2018

En la **Figura 2** se presenta la planta del estacionamiento a diseñar. Esta zona no recibe aportes de aguas pluviales de sectores aledaños. Los desagües pluviales de este sector serán evacuados al drenaje urbano de la calle Maestro López.

Figura 2. Planta general del área de estacionamiento a diseñar



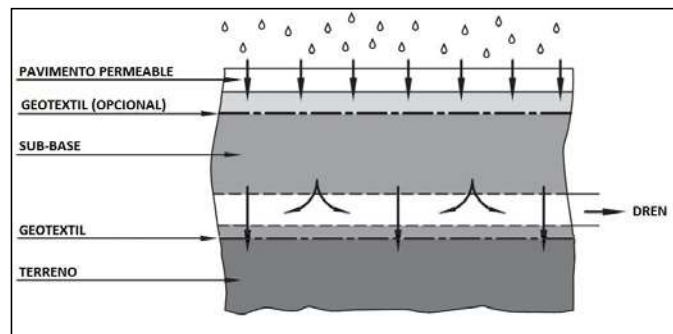
Fuente: Monetti, M. 2018

3. DISEÑO DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO

Los pavimentos permeables se encuentran dentro de las técnicas de drenaje urbano sustentable, cuyo objetivo principal es el fomento de la retención y la infiltración de las escorrentías en el origen del sistema. Se utiliza pavimento permeable para el estacionamiento como alternativa al pavimento impermeable convencional, con la finalidad de reducir el volumen y la velocidad de la escorrentía. Existen diferentes clasificaciones para los pavimento permeables, ya sea según la tipología

del pavimento o el destino de las aguas filtradas. En este caso según la tipología del pavimento utilizaremos pavimento permeable de hormigón poroso, de acuerdo a la clasificación realizada por FERGUSON (2005) en Estados Unidos. En cuanto al destino de las aguas filtradas, se adoptó un pavimento permeable con infiltración parcial al terreno subyacente (**Figura 3**). Esta elección surgió de la escasa o limitada capacidad de infiltración del terreno, debiendo completarse la infraestructura con drenes longitudinales en las capas inferiores que evacuan el exceso hacia la red convencional.

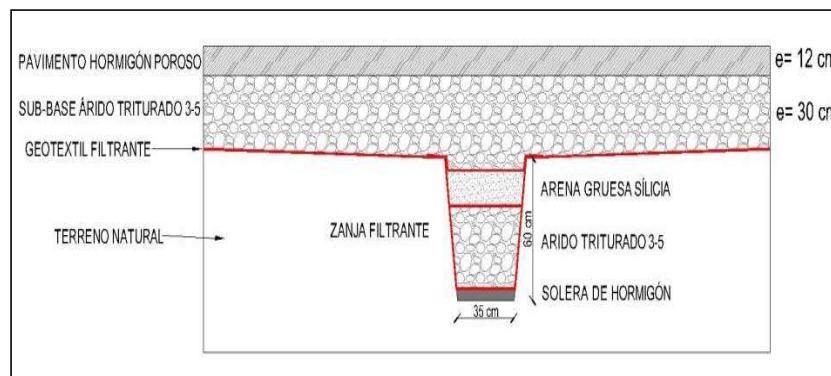
Figura 3. Infiltración parcial al terreno subyacente



Fuente: García Haba. 2011

El diseño del pavimento de hormigón poroso se realizó atendiendo criterios estructurales, debido a la falta de limitación de caudales de vertido al sistema de drenaje urbano por parte del municipio de la ciudad para este tipo de proyecto. De acuerdo a las recomendaciones bibliográficas se diseñó el pavimento permeable de hormigón poroso para el estacionamiento en estudio, **Figura 4**.

Figura 4. Sección pavimento permeable de hormigón poroso para estacionamiento



Fuente: Monetti, M. 2018

La disposición de las capas y espesor del hormigón poroso fueron tomados de las recomendaciones de empresas dedicadas a la provisión de este material en otros países y que usan en las mezclas el mismo aditivo utilizado en esta investigación. La empresa Concretos Especiales S.R.L en Chile, comercializa el aditivo Smart Crete y ejecuta obras con hormigón poroso. Por otro lado la empresa Construcciones Sustentables S.A, comercializa el Ecocreto, el cual es una marca registrada en México y EE.UU. El espesor de la sub-base se diseñó en función de las recomendaciones

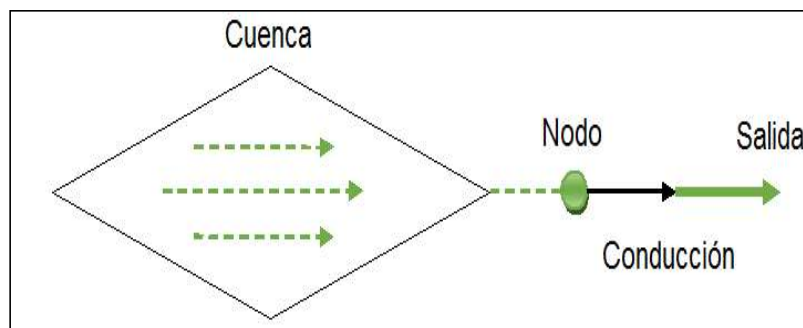
bibliográficas pertinentes proponiendo un espesor de 30 cm. Este espesor verifica el espesor mínimo para pavimento permeable indicado por U.S. EPA (1980) de acuerdo a la categoría de tráfico e índice de CBR. El espesor adoptado es el recomendado para tráfico medio e índice de CBR entre 6 y 9. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la sección adoptada para el pavimento de hormigón poroso del estacionamiento corresponde a un pavimento de hormigón poroso de 12 cm de espesor a realizarse con el hormigón dosificado en esta investigación, con la serie K; la sub-base es de árido triturado tamaño 30-50 mm de 30 cm de espesor con geotextil de filtro y separación, MacTex de Maccaferri.

Se completó el diseño de la sección del pavimento permeable con un dren inferior para permitir evacuar el agua no infiltrada en el terreno natural, hacia el sistema de drenaje pluvial urbano. El dren propuesto, es un dren tipo francés, formado por una solera de hormigón, grava tamaño 30-50 mm y arena gruesa como filtro.

4. MODELO SWMM 5.1

El estacionamiento se ha conceptualizado en SWMM mediante una cuenca, 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 la **Figura 5** se representa esquemáticamente la conceptualización de la zona de estudio en SWMM.

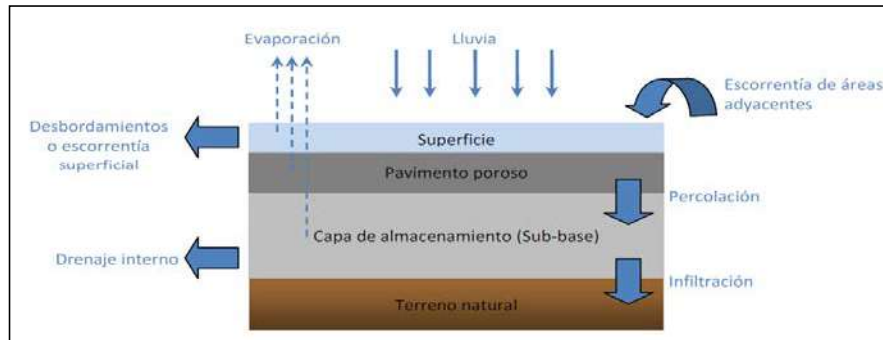
Figura 5. Conceptualización de la zona de estudio en SWMM



Fuente: Rautenberg, D. 2017

En este caso, la técnica empleada corresponde a un pavimento poroso, representado como una sucesión vertical de capas 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 6** se representan esquemáticamente los procesos y las líneas de flujo características en un pavimento poroso.

Figura 6. Esquema conceptual de flujos en un pavimento poroso



Fuente: Monetti, M. 2018

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 7**. 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 supera la intensidad de precipitación, 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 por 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 terreno natural, de modo que si el caudal de entrada es igual o inferior a la tasa de infiltración hacia el terreno natural, se dirige a la Unidad de Almacenamiento 2 (el suelo natural). Si el caudal de entrada al Divisor 2 excede la tasa de infiltración hacia el terreno natural, se dirigirá hacia el sistema de drenaje, y de éste a la salida del sistema.

Figura 7. Conceptualización de un pavimento poroso en SWMM



Fuente: Monetti, M. 2018

Hay que destacar la importancia de la escorrentía superficial, la percolación e infiltración y el drenaje interno, sin olvidar también el importante papel que juega el transporte hidráulico en el sistema. Es por lo tanto necesario conocer la formulación en la que SWMM se basa para modelar estos procesos, y así entender mejor tanto el funcionamiento como los resultados de un pavimento poroso tras la simulación.

5. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DE APORTE

Los parámetros de cuenca permiten definir las propiedades tanto geométricas como hidrológicas e hidráulicas de la propia cuenca de drenaje. El estacionamiento propiamente dicho corresponde a una cuenca de 2998 m² de superficie y una pendiente media del 0,4%.

La cuenca en estudio se considera totalmente permeable, puesto que coincide exactamente con el estacionamiento vehicular ejecutado con hormigón poroso, cuyo coeficiente de rugosidad de Manning es 0,017 según bibliografía. Se ha considerado que no se produce almacenamiento en depresión dada la condición de total permeabilidad de la superficie de la cuenca. El modelo de infiltración usado para la modelación de la percolación es el de Horton debido a que es el que mejor se ajusta acorde a los datos iniciales recogidos.

El pavimento de hormigón poroso tiene un espesor de 120 mm, una pendiente media de 0,4%, una tasa de infiltración máxima de 4608 mm/h obtenida del ensayo de percolación en laboratorio afectada de un coeficiente de seguridad de 10. El coeficiente de seguridad se adoptó teniendo en cuenta las recomendaciones de RODRIGUEZ HERNANDEZ (2008) considerando escorrentía de mala calidad y sin mantenimiento del pavimento. Además, el pavimento de hormigón tiene una relación de vacíos de 0,21 y un factor de colmatación nulo, una constante de decaimiento de 2 l/s y un tiempo de secado de 8 días (fijados según las recomendaciones de ROSSMAN, 2004).

En relación a las propiedades de la sub-base se tiene un espesor de 300 mm, una porosidad del 40%, una relación de vacíos de 0,67. El terreno natural tiene una conductividad hidráulica de 1 mm/h y un factor de colmatación nulo.

La Dirección de Planeamiento Físico de la Universidad brindó información sobre el tipo de suelo de la zona de emplazamiento del estacionamiento, a partir del perfil de suelo obtenido para estudios de fundación. En función de dicho estudio, se observó que hasta los dos metros de profundidad se tiene un suelo del tipo Limo Arcilloso (CL-ML) con un nivel de saturación de 39,5%. Conociendo el tipo de suelo, se obtuvo del libro Hidrología Aplicada (CHOW, et al., 1994) el parámetro de infiltración a través del Método de Green-Amp, resultando para un suelo Arcilloso-Limoso una permeabilidad saturada de 1 mm/h. Por su parte, el drenaje interno, es del tipo descarga por orificio con un valor de n de 0,5 y un caudal máximo de 1,8 mm/h. Por lo tanto se obtiene el coeficiente de descarga a partir de la Ecuación (1) que es la que emplea el programa SWMM para estimar el caudal de drenaje por unidad de área del pavimento permeable.

$$Q = C \cdot (h - H_d)^n \quad (1)$$

Donde: C = Coeficiente de descarga en mm/h; h = altura de agua almacenada en mm; H_d = altura del desagüe en mm; $n = 0,5$. Por lo tanto se obtiene un coeficiente de descarga C de 0,104 mm/h.

6. CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO PERMEABLE

Siendo la finalidad principal contribuir al control de la escorrentía superficial mediante el uso de pavimentos de hormigón poroso, es que se expresan a continuación la dosificación y propiedades obtenidas en la etapa experimental para el hormigón poroso con materiales locales. La dosificación adoptada surge del análisis de resultados de la etapa experimental, tomándose como adecuada la dosificación de la serie K. En la **Tabla 1** se muestra la dosificación para la serie K y en la **Tabla 2** las

relaciones utilizadas para la dosificación. Las características del hormigón en estado endurecido de la serie K se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 1. Dosificación de materiales en kg. para un m³ de hormigón poroso

ID serie	Agua	Cemento	Ceniza volante	A. Grueso	A. Fino	Aditivo
K	125	350	50	1175	279	10

Tabla 2. Relaciones de la dosificación serie K

ID serie	Pasta/Agregado P/A	Agua/Cemento A/C	A. Grueso/Cemento AG/C	A. Fino/A. Grueso AG/AF
K	0,49	0,31	2,94	0,24

Tabla 3. Propiedades en estado endurecido serie K

Propiedad	Valor
Resistencia a compresión 28 días [MPa]	32,3
Porosidad [%]	20
Permeabilidad [cm/seg]	1,28
Relación de vacíos (relación de vacíos = porosidad/(1-porosidad))	0,25

7. RESPUESTA DE UN PAVIMENTO PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO Y UNO DE HORMIGÓN CONVENCIONAL

De los resultados obtenidos de la modelación de la misma cuenca urbana, ante un mismo evento de lluvia de periodo de retorno de 5 años y duración de 5 minutos el comportamiento hidrológico, y con ello la consecuencia ambiental en ambos pavimentos es muy diferente, diferencia que se produce justamente por las características propias de cada sistema de drenaje urbano. Mientras el pavimento de hormigón convencional constituye un sistema impermeable de evacuación de aguas, el sistema urbano de drenaje sostenible mediante pavimento permeable disminuye la escorrentía superficial al aumentar la evacuación de aguas mediante infiltración. En la **Figura 8** se observan los resultados del balance de aguas en la cuenca del estacionamiento cuando el mismo es de pavimento permeable de hormigón poroso y en la **Figura 9** cuando es de hormigón convencional.

Figura 8. Resultados del balance de agua en un pavimento permeable

Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 ⁶ ltr	Peak Runoff LPS	Runoff Coeff
Cuenca	20.10	0.00	0.00	0.19	20.04	0.06	146.74	0.997

Fuente: Monetti, M. 2018

Figura 9. Resultados del balance de agua en un pavimento de hormigón convencional

Subcatchment Runoff Summary								
Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 ⁶ ltr	Peak Runoff LPS	Runoff Coeff
Cuenca	20.10	0.00	0.00	13.70	6.40	0.02	0.61	0.319

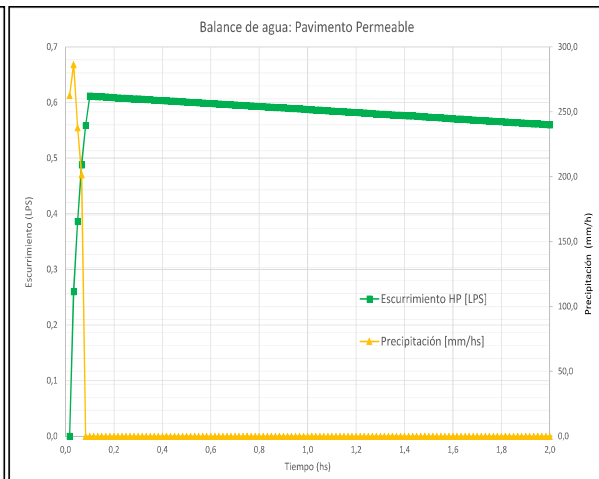
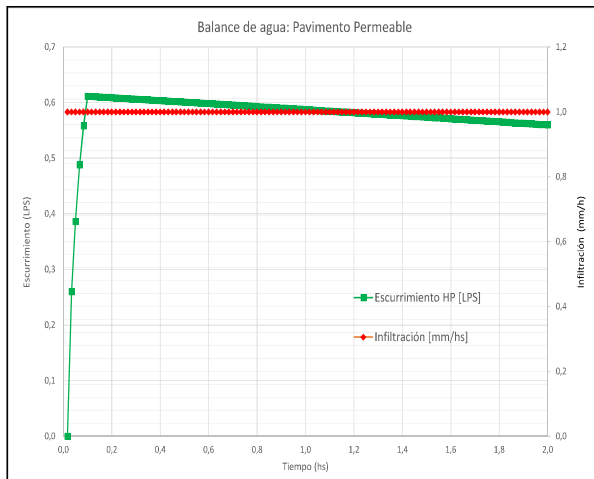
LID Performance Summary								
Subcatchment	LID Control	Total Inflow mm	Evap Loss mm	Infil Loss mm	Surface Outflow mm	Drain Outflow mm	Initial Storage mm	Final Storage mm
Cuenca	Pavimento Permeable	20.10	0.00	13.70	0.00	6.40	0.00	0.00

Fuente: Monetti, M. 2018

En la **Figura 10** y **Figura 11** se presenta el balance de agua en términos del escurrimiento y la infiltración, y el escurrimiento y la precipitación para el pavimento permeable respectivamente.

Figura 10. Esgurrimiento e infiltración

Figura 11. Esgurrimiento y precipitación



Fuente: Monetti, M. 2018

En las **Figuras 12** y **13** se presentan balances para el pavimento de hormigón convencional. Finalmente en la **Figura 14** se presenta el escurrimiento de agua en el pavimento permeable y en el pavimento de hormigón convencional ante el mismo evento de precipitación.

Figura 12. Esgurrimiento e infiltración

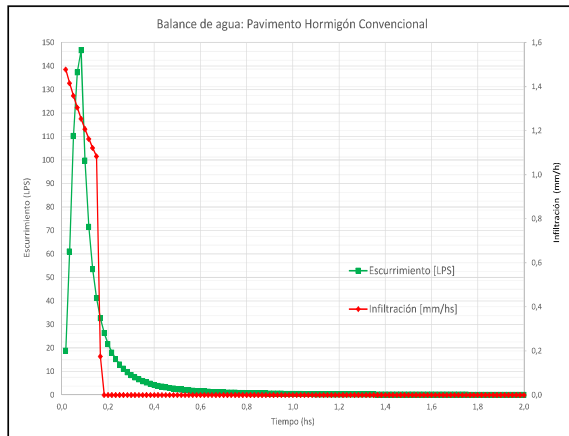
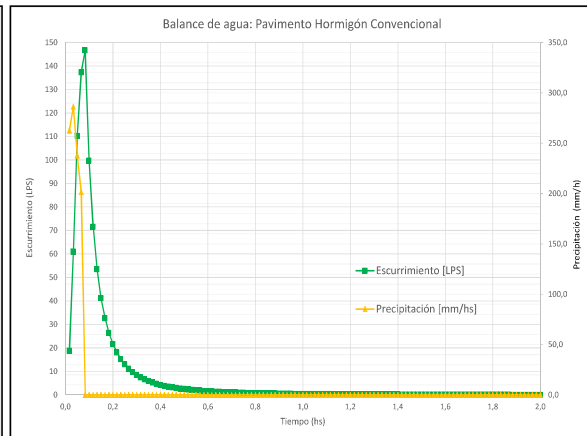
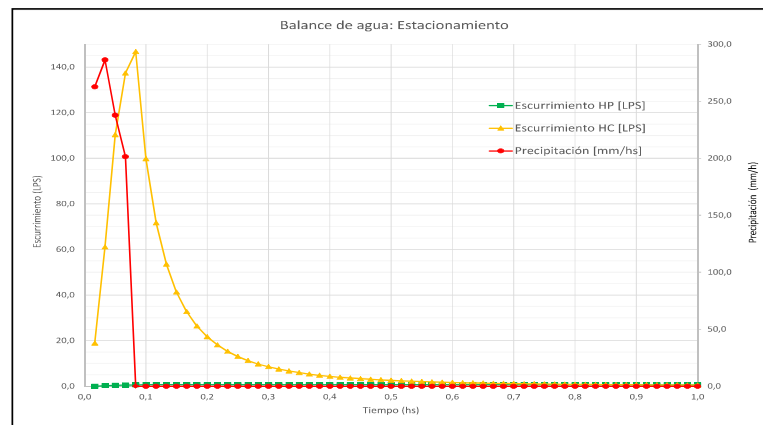


Figura 13. Esgurrimiento y precipitación



Fuente: Monetti, M. 2018

Figura 14. Esgurrimiento para el pavimento permeable y de hormigón convencional



Fuente: Monetti, M. 2018

El pico de la lluvia se desfasa en 3,6 minutos aproximadamente del inicio de la lluvia y se convierte en escorrentía superficial en el pavimento de hormigón convencional; mientras que en el pavimento permeable el escurrimiento superficial es prácticamente nulo, hay una gran infiltración y una salida por dren luego de 6 minutos aproximadamente de iniciada la lluvia.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para el pavimento permeable, la precipitación caída se transforma en un 0,00% de escorrentía superficial, un 0,00% de pérdida por evaporación, 68,16% de pérdida por infiltración y 31,84% de salida por dren con un error en la modelación de 0,00% mientras que para el pavimento de hormigón convencional, la precipitación se transforma en 0,94% de infiltración y 99,06% de escurrimiento superficial con un error en la modelación de 0,66%. Se debe considerar que sólo en el análisis del parámetro escurrimiento superficial, se logra con el pavimento permeable eliminar casi completamente el escurrimiento superficial que se genera con un pavimento de hormigón convencional y con ello se logra una mejora en la gestión de lluvias en áreas urbanas. El diseño de un pavimento permeable debe apoyarse en estudios previos, como estudios hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos, que permitan definir correctamente las condiciones de contorno del problema al que se enfrenta el proyectista.

Además, el diseño debe buscar un equilibrio entre criterios de diseño y criterios económicos, de manera que se conforme finalmente la mejor solución técnicamente viable. El proceso de modelización implica adoptar una serie de parámetros y simplificar muchos aspectos de la realidad. Esta simplificación, implica que los parámetros adoptados no son totalmente representativos de los fenómenos concretos. Los parámetros de un modelo, en general se encuentran tabulados en manuales, por lo que, una manera confiable de verificar la exactitud de esos parámetros sería la calibración o la constatación de los resultados obtenidos tras la simulación con datos reales. Esto se consigue mediante la instrumentación adecuada que permita aforar aquellos parámetros influyentes en la respuesta de la infraestructura frente a una determinada solicitud.

Se concluye que mediante el sistema de pavimento permeable de hormigón poroso como sistema SUDS elegido para gestionar las aguas de lluvias se logra adelantarse a la aparición de los problemas de inundación y con ello a lo que esta implica. Estimar la posible reducción de escorrentía pluvial en un área urbana en función de la capacidad de infiltración del hormigón poroso y la incidencia de la infiltración de las aguas de lluvia en la gestión de las inundaciones urbanas. También se consigue controlar el volumen de escorrentía superficial en área urbana, mediante la infiltración controlada con el uso de hormigón poroso en función de la capacidad de infiltración de este obtenida en laboratorio y se logra captar y transportar el excedente de agua a través de dren hacia puntos de desagüe y descarga conocido. Por último, el sistema propuesto cumple con los criterios de diseño de este tipo de SUDS. El pavimento permeable es capaz de gestionar un determinado evento de precipitación, al mismo tiempo satisface la función estructural con la cual fue proyectado el pavimento para bajas cargas de tránsito.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad la beca de Maestría para docentes universitarios.

REFERENCIAS

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. & MAYS, L.W. (1994). Hidrología Aplicado. MC GRAW HILL. ISBN:958-600-171-17.

FERGUSON, B.K. (2005). Porous Pavements. Boca Raton: CRC PRESS. Taylor & Francis. Integrative Studies In Water Management And Land Development; 6. Series Editor Robert L. France. Isbn: 0-8493-2670-2.

HUBER, W., & DICKINSON, R. (1992). **Stormwater Management Model**, Version 4: User's Manual. EPA 600/3-88/001a. Athens, Georgia: Environmental Research Laboratory.

MONETTI, M. (2018). **Hormigón poroso con materiales locales, una contribución para la gestión de las aguas de lluvia**. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba

RAUTENBERG, D. (2017). **Estudio del hormigón permeable como material de construcción en obras viales**. Trabajo Final de Grado. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba

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 ligeros**. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.

ROSSMAN, L. (2004). **Stormwater Management Model User's Manual**. Version 5.0. Cincinnati, OH: USEPA.