

Influencia del régimen pluviométrico en el lavado inicial de pavimentos permeables

Carmen Hernández-Crespo^{a1}, Miguel Martín Monerris^{a2}, Valerio C. Andrés-Valeri^b, Ignacio Andrés-Doménech^{a3}

^a Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València (Camino de Vera s/n, 46022, Valencia,

^{a1} carhercr@upv.es; ^{a2} mmartin@hma.upv.es; ^{a3} igando@hma.upv.es)

^b Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción, Universidad de Cantabria (Av. de los Castros 44, 39005 Santander, valerio.andres@unican.es).

Línea temática M | Tema monográfico.

RESUMEN

La implantación de superficies permeables está creciendo cada vez más como medida de gestión de las aguas pluviales. Sin embargo, todavía existen ciertas reservas a su total establecimiento, asociadas principalmente a la incertidumbre existente en cuanto a su colmatación o la calidad del agua filtrada. Esta comunicación pretende contribuir a mejorar el conocimiento sobre estos aspectos. Para ello, se han construido cuatro infiltrómetros en los que se está ensayando la influencia del régimen pluviométrico (atlántico y mediterráneo), de la configuración del paquete de firme y del grado ensuciamiento. Los resultados de los primeros seis meses indican una influencia significativa del régimen pluviométrico sobre el volumen drenado por los distintos paquetes de firme ensayados, siendo menor el volumen drenado en clima mediterráneo, así como sobre la calidad del agua filtrada por el sistema, más concentrada en el clima mediterráneo. El grado de ensuciamiento alcanzado hasta el momento (800 g/m² acumulados en seis meses), ha provocado una moderada reducción de la velocidad de infiltración (25-50%).

Palabras clave | pavimento permeable; calidad del agua; capacidad hidráulica; grado de ensuciamiento; régimen pluviométrico.

INTRODUCCIÓN

El drenaje urbano sostenible representa una solución basada en la naturaleza que concilia la gestión del agua con su ciclo natural, restituyendo procesos naturales como la infiltración y la evapotranspiración. Tras varias décadas demostrando su eficacia, actualmente los sistemas de drenaje sostenible (SuDS) se consideran infraestructuras urbanas inteligentes y resilientes, que ofrecen protección frente a las inundaciones y la contaminación difusa, y confieren estética y biodiversidad a las ciudades (Jose et al., 2015). En los países mediterráneos ya se están superando las reticencias a su implantación inicialmente existentes y cada vez son más grandes y decididos los pasos que se dan en esta dirección (Castro-Fresno et al., 2013).

Una de las principales reticencias que presentan las superficies urbanas permeables es la incertidumbre asociada a la colmatación de las mismas por la deposición continua de contaminantes. Por ello, su correcto mantenimiento es un aspecto fundamental para garantizar su sostenibilidad a largo plazo (Sañudo-Fontaneda et al., 2014). En este sentido, la combinación de sistemas de aspiración y lavado a presión con agua se ha mostrado efectiva, mientras que el empleo de barredoras mecánicas no resulta eficiente en la recuperación de la capacidad de infiltración de las superficies permeables (Sañudo-Fontaneda et al., 2014). Otro aspecto que genera reticencia recae sobre la calidad del agua que es filtrada e infiltrada, debido en parte a que es una de las cuestiones de las que menor información se dispone. Los trabajos presentados en esta comunicación persiguen avanzar sobre esta importante cuestión, así como evaluar la influencia de la acumulación de contaminantes y la progresiva colmatación de las superficies permeables sobre la capacidad hidráulica de las mismas y sobre la calidad del agua filtrada e infiltrada.

MATERIAL Y MÉTODOS

El montaje experimental planteado en el presente estudio está ubicado en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universitat Politècnica de València (UPV). Consta de una batería de cuatro infiltrómetros diseñados para evaluar la capacidad hidráulica de una superficie permeable y de la calidad del agua infiltrada, bajo diferentes condiciones climáticas y de configuración del paquete de firme (véase Figura 1). Las condiciones climáticas ensayadas corresponden a dos de los regímenes pluviométricos de España, el atlántico y el mediterráneo. Las lluvias simuladas reproducen el régimen promedio pluviométrico de Valencia y Santander: eventos con un volumen de 16 mm y 30 minutos de duración, con una frecuencia semanal para el clima atlántico y quincenal en el clima mediterráneo (Andrés-Doménech et al. 2010). Para simular la lluvia se ha empleado agua desionizada (Conductividad Eléctrica: 21 $\mu\text{S}/\text{cm}$; pH: 6.9), dosificada a través de un simulador de lluvia compuesto de un depósito de almacenamiento de agua, una bomba de impulsión (Multi-1300 SICCE) y una malla de tuberías de riego por goteo constituida por 7 filas con 13 goteros/fila distribuidos uniformemente. El simulador de lluvia se encuentra colocado a una altura de 50 cm sobre la superficie del paquete de firme. Asimismo, se han ensayado dos configuraciones del paquete de firme: configuración C1 (formada, de abajo hacia arriba, por 1 lámina de geotextil + 25 cm de zahorra drenante caliza + 1 lámina de geotextil + 5 cm de gravilla fina lavada caliza + adoquín prefabricado de hormigón poroso) y configuración C2 (formada por 1 lámina geotextil + 5 cm de gravilla fina lavada caliza + adoquín prefabricado de hormigón poroso), con el fin de analizar la influencia de la capa inferior de zahorra. En las configuraciones tipo 1 se ha colocado una sonda de humedad (TBSMP02 - Interfaz SDI12, TEKBOX) en la capa de gravilla con el objetivo de evaluar la influencia del régimen pluviométrico sobre la humedad del firme y de ésta sobre la capacidad de retención de agua y de infiltración. La posible influencia de las condiciones ambientales se tiene en cuenta mediante la medición de la temperatura y humedad relativa del aire con los equipos (OTT TRH).

La influencia de la progresiva colmatación se está estudiando mediante espolvoreo en seco de sedimentos sobre la superficie del adoquín. El material aplicado ha sido recogido en diferentes infraestructuras viales urbanas, en seco mediante barredora mecánica, y facilitada por los servicios de limpieza de la UPV. La dosis aplicada (5 $\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$) ha sido seleccionada de acuerdo con la información proporcionada por los servicios de limpieza (masa recogida, superficie barrida y frecuencia de limpieza) y contrastada con referencias científicas (Vaze and Chiew, 2002), y ha sido la misma en los cuatro paquetes de firme ensayados. El material empleado se caracteriza por una humedad del 2%, un contenido de materia volátil del 8.2% en peso seco y una composición granulométrica con alta proporción de arenas (gravas: 13.2%; arenas: 85.0%; limos y arcillas: 1.8% en peso seco).

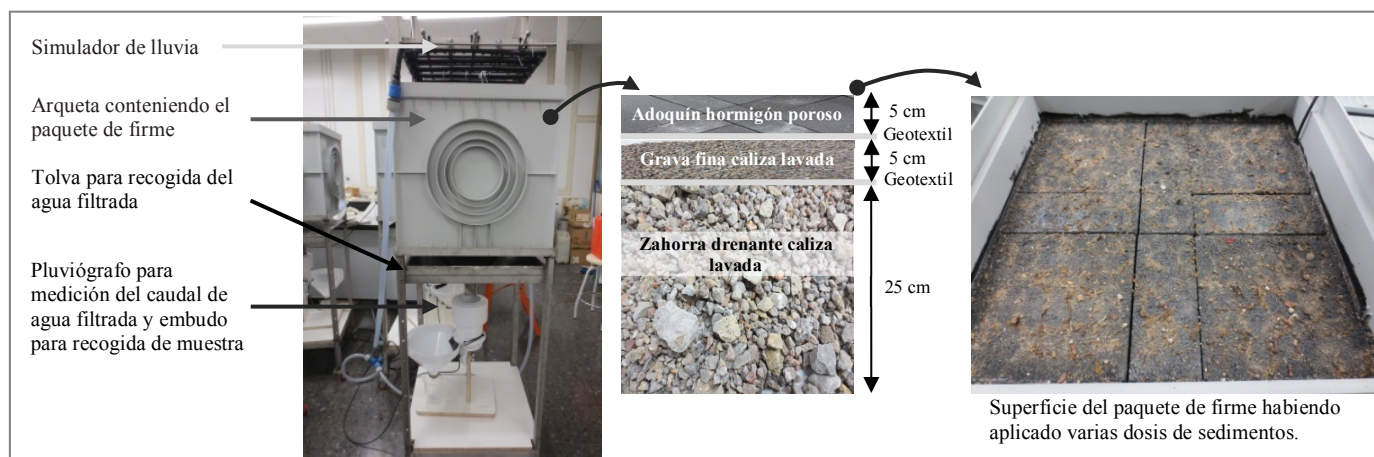


Figura 1 | Imágenes del montaje experimental.

El caudal de agua infiltrada, una vez aforado por los pluviógrafos, se recoge en unos recipientes y se conserva en frigorífico hasta su posterior análisis. Las variables analizadas son las siguientes: DBO_5 (Respirometría mediante sistema de control OxiTop[®]), DQO (test Spectroquant[®]: ISO 15705), Sólidos Suspendidos Totales y Volátiles (UNE-EN 872 y UNE 77034 V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

respectivamente), turbidez (turbidímetro TN100 Eutech), Nitrógeno Total (test Spectroquant®: ISO 11905-1 + Fotometría), Amonio (test Spectroquant®: ISO 7150/1), Nitritos (test Spectroquant®: EPA354.1), Nitratos (test Spectroquant®), Fósforo Total (test Spectroquant®: disgregación + ISO 6878/1), ortofosfatos (test Spectroquant®: ISO 6878/1).

El análisis estadístico de los resultados se ha realizado empleando el software SPSS 16.0. La influencia del régimen pluviométrico y de la configuración del firme se ha evaluado comparando los resultados obtenidos mediante ANOVA de un factor, si las variables presentan una distribución normal, o mediante el test U de Mann-Whitney si no son normales. Como significancia estadística se tomó para el error de tipo I una probabilidad del 5% o menor ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proyecto se encuentra en fase inicial puesto que la batería de ensayos descrita se pretende mantener durante al menos un año. Los resultados de los primeros meses de ensayos (enero-junio 2017) apuntan una influencia evidente del régimen pluviométrico sobre la humedad de los distintos paquetes de firme, el volumen drenado por éstos y sobre el lavado del material que configura el firme.

La humedad del paquete de firme se muestra en la Figura 2. Se puede observar que ambos paquetes de firme parten de contenidos de humedad del 15%, que corresponde al volumen de agua que ocupa el volumen de los poros. Como cabe esperar, la tendencia general en ambos paquetes de firme es hacia un aumento de la humedad conforme avanzan los experimentos. También se observa que durante las primeras semanas no existe una diferencia importante en los contenidos de humedad entre ambos. A partir de mediados de abril es cuando empiezan a diferenciarse siendo, después de cinco meses desde el inicio, un 33% mayor en el paquete de firme sometido a clima atlántico que en mediterráneo.

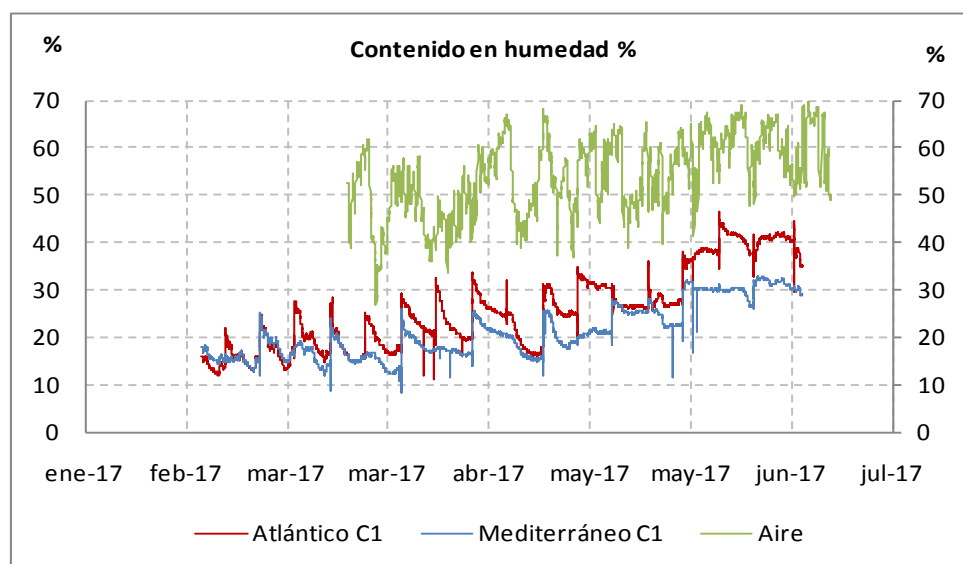


Figura 2 | Evolución del contenido en humedad en los infiltrómetros Atlántico y Mediterráneo desde el inicio de los ensayos hasta la actualidad. C1: configuración 1 del paquete de firme; C2: Configuración 2 del paquete de firme. La serie de datos "Aire" indica la humedad relativa de la atmósfera del laboratorio (eje secundario).

En cuanto al volumen drenado final por los diferentes paquetes de firme, se puede observar que es significativamente superior en el régimen pluviométrico atlántico ($p < 0.05$), lo cual parece razonable debido a su mayor humedad y frecuencia de lluvia (Figura 3). En término medio el volumen drenado es del 70% del volumen de lluvia aplicado (16 l/m^2) en las condiciones atlánticas y del 54% en las condiciones mediterráneas. Con la información que se dispone hasta el momento, la configuración del firme no afecta de manera significativa al volumen drenado ($p > 0.05$), siendo la media muy similar en los paquetes de firme C1 y C2 sometidos a clima atlántico y difiriendo ligeramente entre sí los paquetes de firme C1 y C2 sometidos a clima mediterráneo. En este último caso, el volumen drenado es menor en la configuración tipo C1, la que tiene una capa de 25 cm de

grava, que confiere al sistema una mayor capacidad de retención de agua. Respecto a la influencia de la configuración, cabe mencionar que el drenaje del agua se produce de manera libre, es decir, el agua infiltrada no se ve frenada por una capa de suelo que, estando saturada o no, laminaría sin duda la velocidad de evacuación. En una instalación real, este efecto de disminución de la velocidad de infiltración por parte del suelo seguramente sí que haría más evidente el beneficio que supondría el almacenamiento disponible en esta capa adicional de material drenante.

En la variación temporal del volumen drenado final (Figura 3, derecha) desde el inicio de los ensayos hasta la actualidad, por el momento, no se observa una tendencia clara de disminución o aumento, por lo que el grado de ensuciamiento alcanzado hasta el momento (800 g/m^2 acumulados en 6 meses) no ha provocado todavía una disminución de la capacidad volumétrica del sistema, para las condiciones de lluvia ensayadas, es decir, no se observa una pérdida de capacidad de almacenamiento por ocupación de huecos por parte de los sedimentos adicionados. Otro aspecto diferente es la capacidad de infiltración de los paquetes de firme, en este caso sí que se observa una infiltración ligeramente más lenta conforme aumenta el grado de ensuciamiento (Figura 4), en ambos climas.

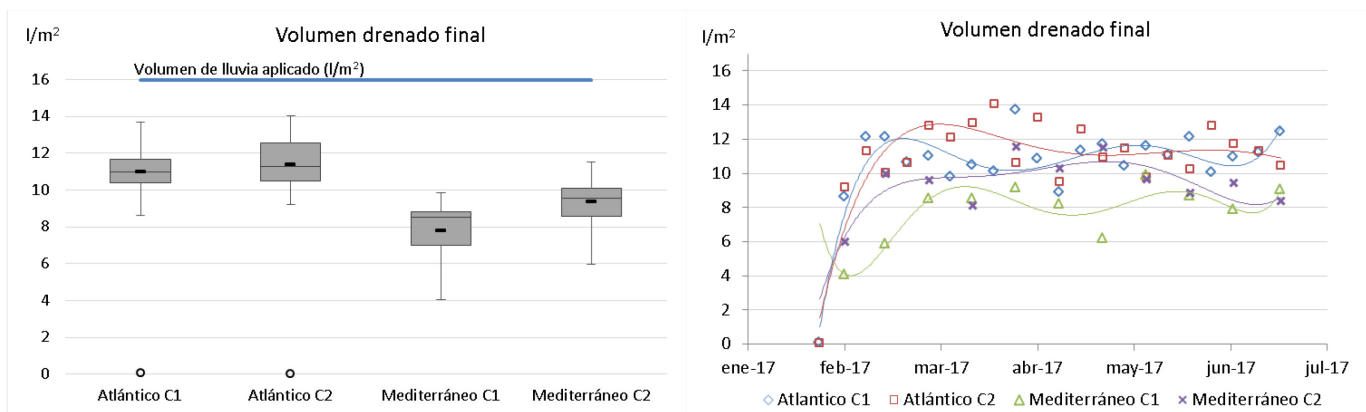


Figura 3 | Diagramas de caja y bigotes (izquierda) y evolución del volumen drenado final desde el inicio de los ensayos hasta la actualidad (derecha). C1: configuración 1 del paquete de firme; C2: Configuración 2 del paquete de firme.

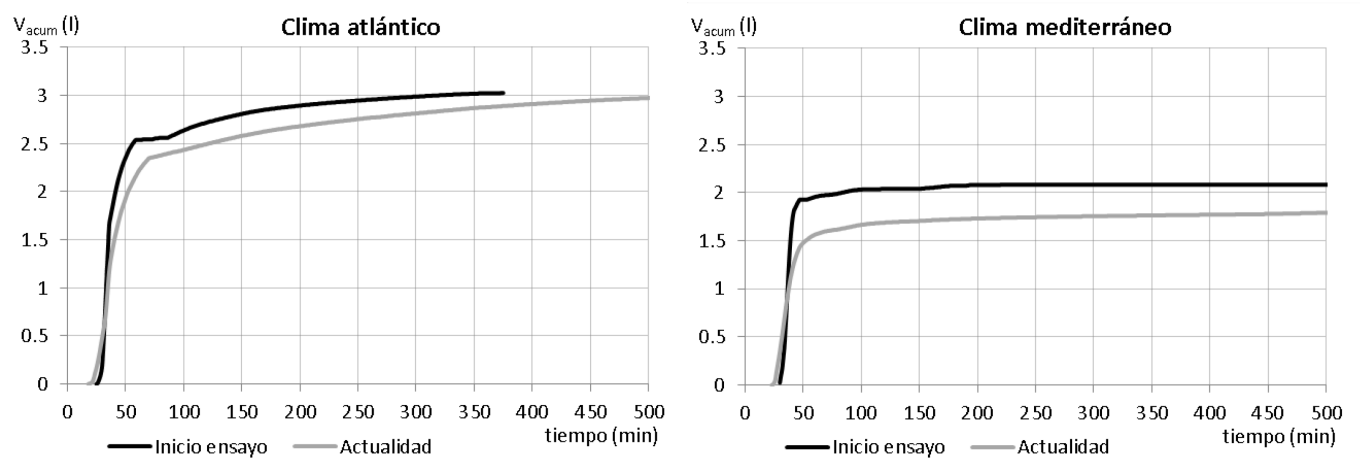


Figura 4 | Volumen acumulado en los primeros 500 minutos tras dos simulaciones de lluvia realizadas al inicio de los ensayos (línea negra) y en la actualidad (línea gris), en clima atlántico (izquierda) y mediterráneo (derecha), para la configuración 1 del paquete de firme.

Este grado de ensuciamiento representa un valor próximo al que provoca colmatación evidente y pérdida de capacidad de infiltración según los ensayos realizados por Andrés-Valeri et al. (2016), en los que se obtuvieron reducciones de la capacidad de infiltración de entre 63% y 79% para un grado de ensuciamiento de 500 g/m^2 . En el presente estudio la disminución mostrada en la Figura 4 todavía no es tan alta, pudiendo cifrarse en 25-50%, aunque sí que se aprecian de forma cualitativa zonas del pavimento que comienzan a producir cierto encharcamiento. En este sentido, entre las pruebas a realizar en

las próximas fases del proyecto se encuentran seguir aumentando el grado de ensuciamiento y “apelmazar” el material para simular el efecto de compactación que ejerce el tráfico rodado.

El agua filtrada se caracteriza por presentar una conductividad eléctrica y un pH elevados (Figura 5). El fuerte incremento del pH que tiene lugar, de 6.9 del agua de lluvia a valores superiores a 10 del agua infiltrada, está relacionado con el lavado del material del adoquín permeable. La composición de éste tiene una alta proporción de cemento, que le confiere una alta basicidad. Los paquetes sometidos al clima atlántico, al tener un régimen pluviométrico más frecuente presentan valores significativamente menores para ambas variables fisico-químicas ($p < 0.05$), así mismo, en ambos regímenes se puede observar una disminución a lo largo del tiempo transcurrido desde el inicio de los ensayos (enero 2017). Al final del periodo analizado parece alcanzarse un tramo asintótico para ambas variables, estabilizándose en valores en torno a 500 y 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para clima atlántico y mediterráneo respectivamente y de pH en torno a 10 para ambos climas. Será interesante evaluar el comportamiento a largo plazo y comprobar si la calidad del agua filtrada sigue mejorando, prestando especial interés al pH, que todavía se encuentra en niveles muy altos para ser introducido en el medio natural. La variable de estudio que no está ejerciendo una influencia significativa sobre la calidad del agua filtrada es la configuración del paquete de firme ($p > 0.05$), encontrándose los valores muy próximos entre sí.

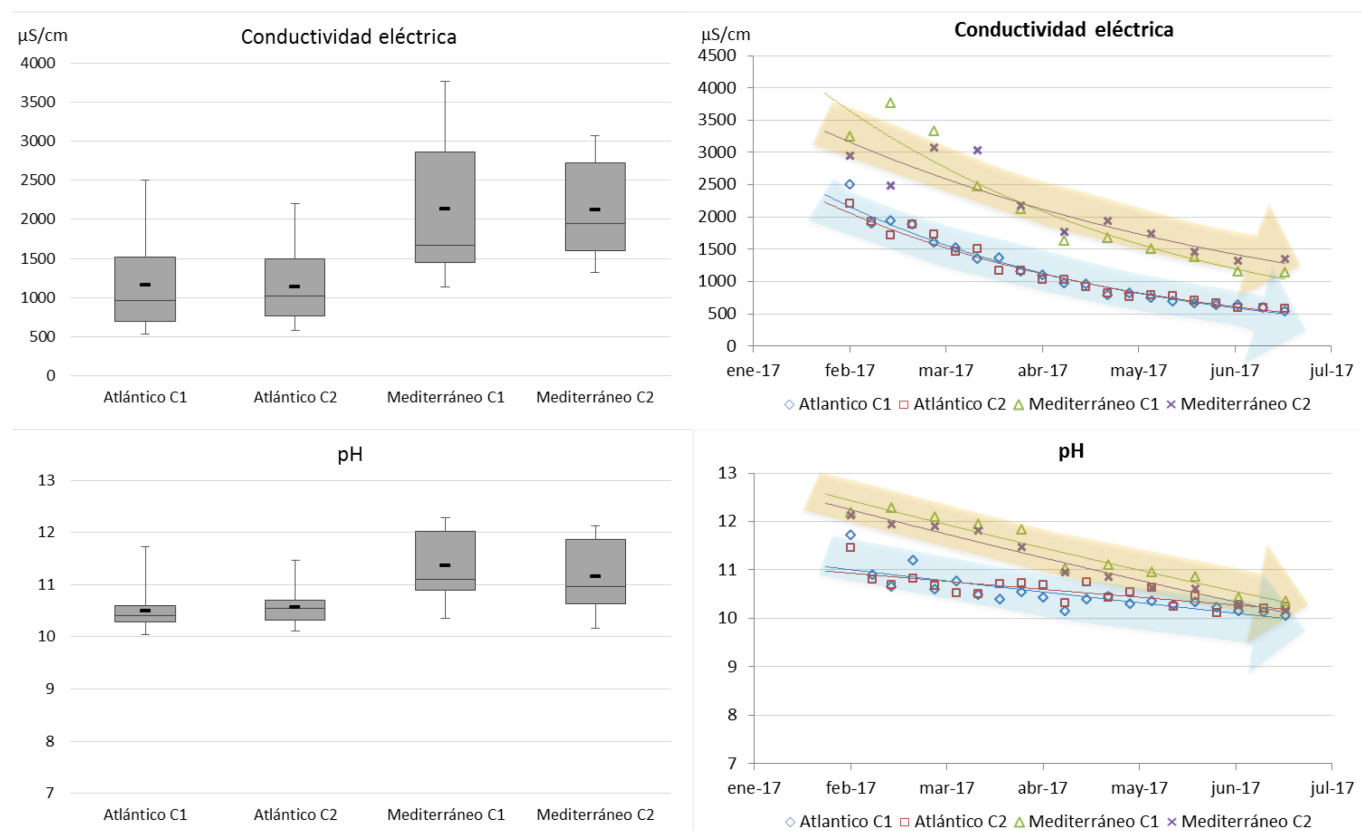


Figura 5 | Diagramas de caja y bigotes y evolución de la conductividad eléctrica (arriba) y del pH (abajo) en el agua infiltrada desde el inicio de los ensayos hasta la actualidad. Las flechas indican la tendencia temporal observada (en azul para clima atlántico y naranja para clima mediterráneo). C1: configuración 1 del paquete de firme; C2: Configuración 2 del paquete de firme.

En lo que respecta al efecto de la carga contaminante, teniendo en cuenta que la dosis aplicada ha sido la misma en ambos regímenes pluviométricos, también se observan claras diferencias en la calidad del agua filtrada dependiendo del clima simulado. Cabe mencionar que estas diferencias se hacen patentes a partir del tercer mes del estudio, momento a partir del cual el agua filtrada por los paquetes sometidos a clima mediterráneo comienza a presentar concentraciones significativamente superiores a las del clima atlántico, presentando además una coloración parduzca más intensa. A modo de ejemplo, se presentan en la Figura 6 los diagramas de caja y bigotes y la evolución temporal de dos de las variables estudiadas en los ensayos (DQO y

NT).

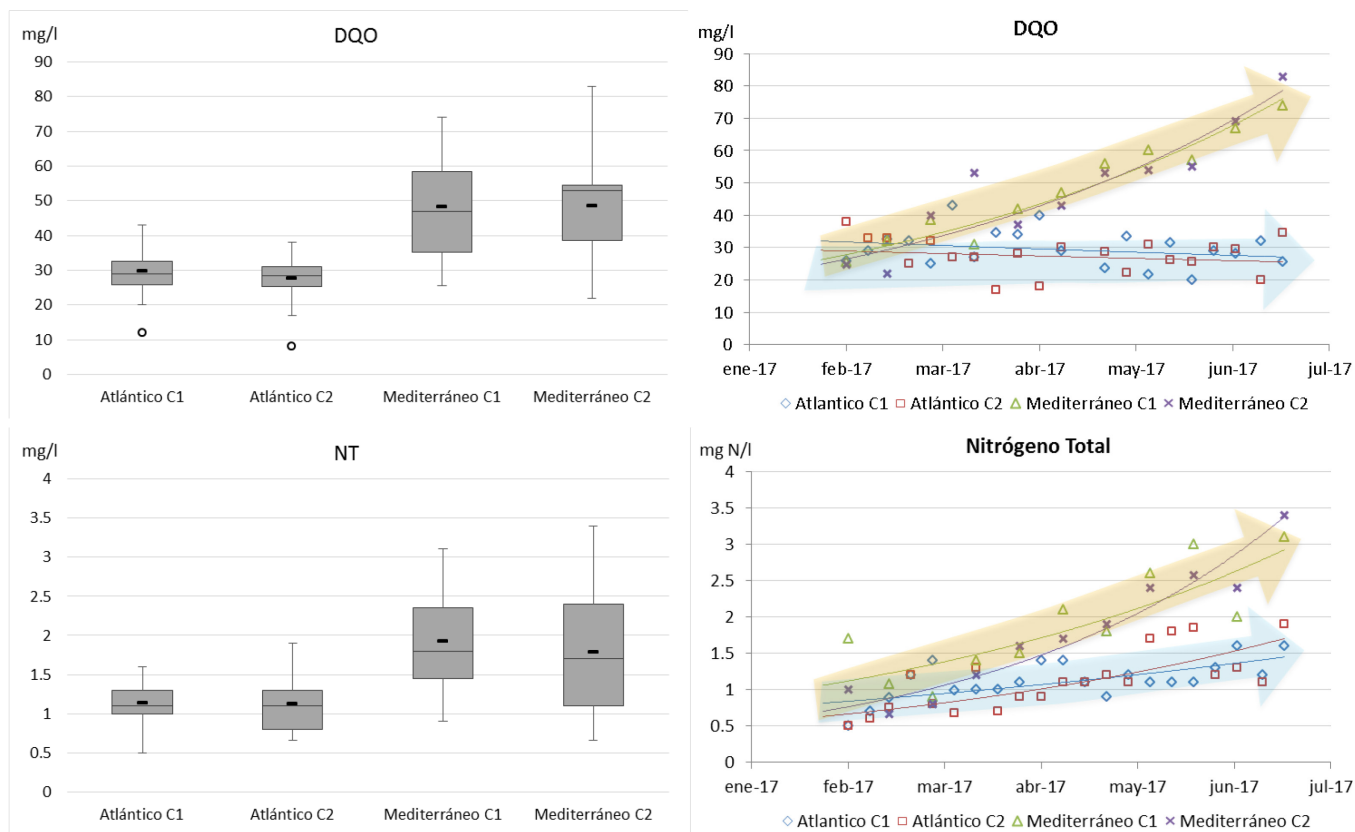


Figura 6 | Evolución de la DQO y el NT en el agua infiltrada desde el inicio de los ensayos hasta la actualidad. Las flechas indican la tendencia temporal observada (en azul para clima atlántico y naranja para clima mediterráneo). C1: configuración 1 del paquete de firme; C2: Configuración 2 del paquete de firme.

El mayor incremento de la concentración de contaminantes en el agua filtrada en los paquetes de firme de clima mediterráneo está posiblemente relacionado con la menor frecuencia de lluvia. Esto es, como el volumen mensual de lluvia aplicado en clima atlántico es el doble que en el mediterráneo, el volumen drenado también es mayor, concretamente un 30% mayor en término medio. Por tanto, dado que la carga contaminante aplicada es la misma para ambos climas, esto se traduce en que la carga contaminante se encuentre más concentrada en el clima mediterráneo.

Este comportamiento es más evidente en las variables solubles (p. ej. Nitratos), o con una componente soluble importante (DQO, NT). Sin embargo, en el caso de los sólidos en suspensión, como el paquete de firme actúa como material filtrante, no se percibe por el momento esta tendencia (Figura 7). No obstante, se considera interesante evaluar los cambios que se vayan produciendo a más largo plazo para extraer conclusiones más definitivas al respecto.

Otra cuestión interesante que se plantea en el presente proyecto es si los pavimentos permeables producen una mejora de la calidad del agua de la escorrentía urbana. Aunque ya existen estudios previos que demuestran esta mejora (Millán et al. 2013), el presente proyecto lo corrobora. Si se compara la calidad del agua filtrada con la que tendría una escorrentía procedente de un pavimento totalmente impermeable que lavase la carga contaminante acumulada en una semana (DQO: 188 mg/l; NT: 2.0 mg/l; SST: 152.5 mg/l), se puede decir que incluso después de un largo periodo sin mantenimiento (6 meses) y una acumulación de carga contaminante considerable (800 g/m² acumulados en 6 meses) el agua infiltrada sigue presentando una calidad notablemente mejor, con los siguientes rangos de valores dependiendo del clima y configuración: DQO: 25.6-83.0 mg/l; NT: 1.6-3.4 mg/l; SST: 3.0-23.1.

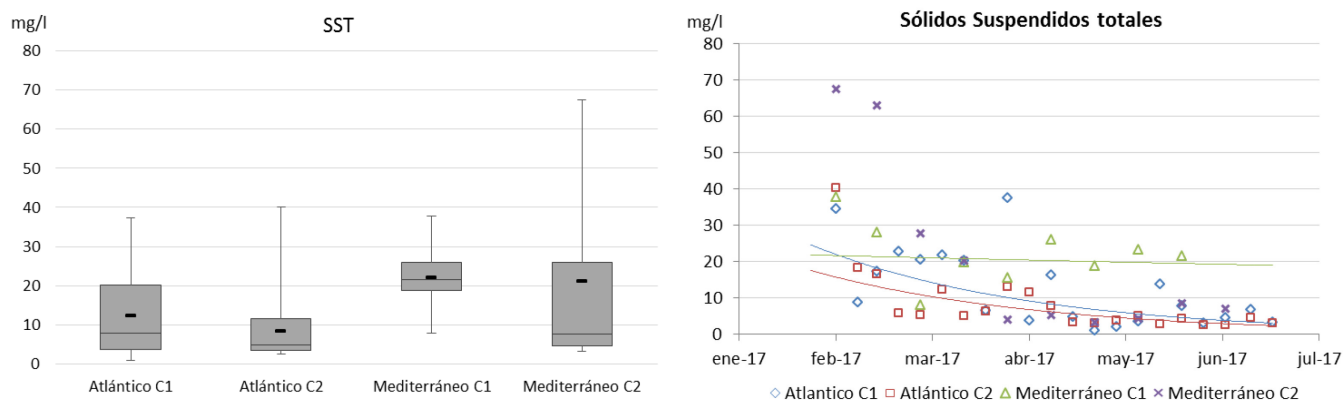


Figura 7 | Evolución de los SST en el agua infiltrada desde el inicio de los ensayos hasta la actualidad. Las flechas indican la tendencia temporal observada (en azul para clima atlántico y naranja para clima mediterráneo). C1: configuración 1 del paquete de firme; C2: Configuración 2 del paquete de firme.

CONCLUSIONES

Con respecto a la metodología experimental, se ha comprobado que los montajes permiten reproducir condiciones pluviométricas diferentes que se reflejan en diferentes contenidos de humedad en los pavimentos permeables.

La progresiva deposición de sedimentos ha provocado la obturación de algunas zonas del pavimento, lo cual queda reflejado en la mayor lentitud en filtrar el volumen de precipitación de un episodio.

Se ha observado que la composición química del adoquín permeable es crucial en la calidad del agua que filtra. En este caso, los valores de pH superiores a 10 pueden afectar a los procesos biogeoquímicos que se puedan producir en el propio pavimento permeable y que se puedan trasladar al suelo o a la red de saneamiento.

Aunque los resultados son todavía preliminares, se observa una diferencia significativa de la calidad del agua filtrada según se trate de clima atlántico o mediterráneo, principalmente en sustancias con altos componentes solubles (DQO, NT). En los próximos meses se observará la tendencia de esa diferencia.

El pavimento permeable, sin mantenimiento de limpieza, con 800 g/m² depositados en seis meses, emite menos del 23% de la carga de DQO que emitiría un pavimento convencional bajo las mismas condiciones de deposición y precipitación semanal.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se desarrolla en el marco de los proyectos SUPRIS-SURoS (Ref. BIA2015-65240-C2-1-R MINECO/FEDER, UE) y SUPRIS-SUPeI (Ref. BIA2015-65240-C2-2-R MINECO/FEDER, UE) financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los Presupuestos Generales del Estado y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Los autores agradecen igualmente a las empresas Quadro Prefabricados de Hormigón SL, TenCate Geosynthetics Iberia SL, Atlantis SUDS SL y SECOPSA el suministro de materiales para la realización de los ensayos.

REFERENCIAS

- Andrés-Doménech, I., Montanari, A., Marco, J.B. 2010. Stochastic rainfall analysis for storm tank performance evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 1221–1232.
- Andrés-Valeri, V.C., Marchioni, M., Sañudo-Fontaneda, L.A., Giustozzi, F., Becciu, G. 2016. Laboratory Assessment of the Infiltration Capacity Reduction in Clogged Porous Mixture Surfaces. *Sustainability*, 8, 1–11.
- Castro-Fresno, D., Andrés-Valeri, V. C., Sañudo-Fontaneda, L. A., Rodríguez-Hernandez, J. 2013. Sustainable Drainage Practices in Spain, Specially Focused on Pervious Pavements. *Water* 5, 67-93. <http://www.mdpi.com/2073-4441/5/1/67>.
- Jose, R.; Wade, R. and Jefferies, C. 2015. Smart SUDS: recognising the multiple-benefit potential of sustainable surface water management systems. *Water Science & Technology* 17, 245-251.
- Millán, P., Nacher-Rodríguez, B., Hernández, C., Martín, M., Vallés, F.J., Andrés-Doménech, I., Perales-Momparler, S., 2013. Análisis comparativo de las escorrentías producidas en un pavimento permeable y en una calzada convencional. En: Vallés-Morán, F.J., Andrés-Doménech, I., Escuder-Bueno, I., López-Jiménez, P.A., Marco, J.B. (Eds.), 2013, III Jornadas de Ingeniería del Agua, La protección contra los riesgos hídricos, vol. 2, ISBN 978-84-267-2071-9, pp. 131e138.
- Sañudo-Fontaneda, L.A., Rodríguez-Fernández, J., Calzada-Pérez, M.A., Castro-Fresno, D. 2014. Infiltration behaviour of polymer-modified porous concrete and porous asphalt surfaces used in SuDS techniques. *Clean-Soil, Air, Water* 42(2), 139-145.
- Vaze, J., Chiew, F.H.S. 2002. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface. *Urban Water* 4, 379-389.