

# Evaluación a largo plazo de pavimentos permeables en condiciones reales: rendimiento hidráulico y retención de contaminantes.

Calzadilla-Cabrera, D. <sup>a1</sup>, García-Haba, E. <sup>a2</sup>, Hernández-Crespo, C. <sup>a3</sup> Martín Moneris, M. <sup>a4</sup> y Andrés-Doménech, I. <sup>a5</sup>

<sup>a</sup> Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València (UPV), Camino de Vera SN, 46022 Valencia, E-mail: <sup>a1</sup>dcalcab@posgrado.upv.es, <sup>a2</sup>edgarha@iiama.upv.es, <sup>a3</sup>carhercr@upvnet.upv.es, <sup>a4</sup>mmartin@hma.upv.es, <sup>a5</sup>sigando@hma.upv.es

Línea temática | C. Agua y ciudad.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el desarrollo urbano ha generado una serie de impactos negativos sobre el ciclo hidrológico natural, como el aumento del caudal de escorrentía, la disminución de la infiltración y la degradación de la calidad del agua. En este contexto, las soluciones basadas en la naturaleza se han consolidado como estrategias eficaces para mitigar estos efectos, al integrar infraestructuras sostenibles que imitan los procesos hidrológicos naturales (Perales-Momparler et al., 2017). En este marco, los pavimentos permeables se han consolidado como una de las estrategias más prometedoras para integrar la gestión del agua en el entorno construido. Estos sistemas permiten gestionar la escorrentía urbana de forma más sostenible al favorecer la infiltración del agua de lluvia, reducir los picos de caudal y mejorar la calidad del agua antes de su retorno al medio natural (Hernández-Crespo et al., 2019). Además de su función hidráulica, los pavimentos permeables contribuyen a la recarga de acuíferos, permiten la reutilización del agua captada en climas cálidos cuando se combinan con reservorios subterráneos, y aportan beneficios ambientales añadidos como la mitigación del efecto isla de calor urbana o la mejora de la seguridad vial. Sin embargo, su implementación no está exenta de desafíos técnicos y funcionales que limitan su rendimiento y durabilidad a largo plazo.

Uno de los principales retos asociados al funcionamiento de los pavimentos permeables es la pérdida progresiva de su capacidad de infiltración debido al colmatado de sus poros, causado por la acumulación de sedimentos y materia orgánica en la superficie o en las capas intermedias (García-Haba et al., 2023). Este fenómeno reduce de forma significativa la eficacia hidráulica del sistema e incrementa el riesgo de escorrentía superficial. El grado y la velocidad del colmatado están influenciados por diversos factores, como las características del evento de lluvia, el tipo de suelo del entorno, la calidad del aire, la temperatura ambiente, la superficie de drenaje contributiva y las condiciones de tráfico (Brown et al., 2015). Para mantener el buen funcionamiento de estos sistemas, se han desarrollado diferentes técnicas de mantenimiento, que incluyen desde la limpieza con barrido mecánico y aspirado hasta el uso de agua a alta presión combinada con succión simultánea. En este sentido, varios estudios coinciden en que la mayor parte del colmatado se concentra en los primeros centímetros de la superficie, lo que permite que una limpieza adecuada pueda recuperar parcialmente su capacidad de infiltración (Razzaghmanesh et al., 2018). Desde un punto de vista constructivo, una menor tortuosidad y una distribución uniforme de los poros en el hormigón poroso se asocian a una mayor resistencia a la colmatación.

Además del mantenimiento, el envejecimiento natural de los pavimentos permeables representa un factor crítico que puede condicionar su viabilidad a largo plazo. La exposición prolongada a condiciones ambientales variables y al tránsito vehicular puede degradar tanto su resistencia mecánica como su capacidad de infiltración. Algunos estudios han observado una disminución significativa de las tasas de infiltración tras los dos primeros años de funcionamiento, lo que indica la necesidad de evaluar el comportamiento de estos sistemas en escenarios reales de uso prolongado (Razzaghmanesh et al., 2018; Brown et al., 2015). En este contexto, resulta fundamental comprender cómo evolucionan sus prestaciones hidráulicas y de calidad de agua con el tiempo, así como identificar los factores que influyen en su deterioro. Esta información es esencial para optimizar el diseño, el mantenimiento y la gestión de estas infraestructuras dentro de estrategias urbanas sostenibles.

El presente estudio se centra en la evaluación del comportamiento a largo plazo de una instalación real de pavimentos permeables, en contraste con los numerosos estudios previos realizados a escala de laboratorio. La instalación analizada fue construida en 2020, lo que permite contar con cinco años de funcionamiento, un periodo adecuado para evaluar su rendimiento en condiciones reales de uso. Se estudiará la evolución de la permeabilidad del pavimento, la acumulación de contaminantes en su estructura y su capacidad para mejorar la calidad del agua, incluyendo la retención de microplásticos (MPs). A partir de estos resultados, se desarrollarán herramientas para evaluar el impacto de los pavimentos permeables en la resiliencia urbana y su contribución a la sostenibilidad.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en una parcela peatonal próxima a la playa en Valencia (España), destinada a actividad comercial de fin de semana conocida como “el rastro”, que atrae una gran afluencia de personas. Para facilitar las tareas logísticas y de mantenimiento, cuenta con accesos para el tráfico rodado. La proximidad a vías urbanas y a la costa favorece también la deposición de partículas transportadas por el viento. Tras cada jornada comercial, se realiza un barrido mecánico de la superficie, según informan las autoridades municipales.

La parcela ocupa unos 10.000 m<sup>2</sup>, de los cuales 3.000 m<sup>2</sup> están pavimentados con baldosas de hormigón poroso dispuestas en mosaico (Figura 1). El resto del pavimento es de hormigón impermeable. La sección tipo del pavimento permeable responde a un diseño habitual (Woods-Ballard et al., 2015), salvo en el perímetro, donde adopta una configuración de zanja de infiltración.



**Figura 1** | Zona de estudio. Superior: Localización y distribución de la zona de estudio. Inferior: Detalle encuentro hormigón poroso-alcorque, tubo drenaje del pavimento permeable y encuentro hormigón impermeable-drenaje perimetral. Fuente: Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la ciudad de València.

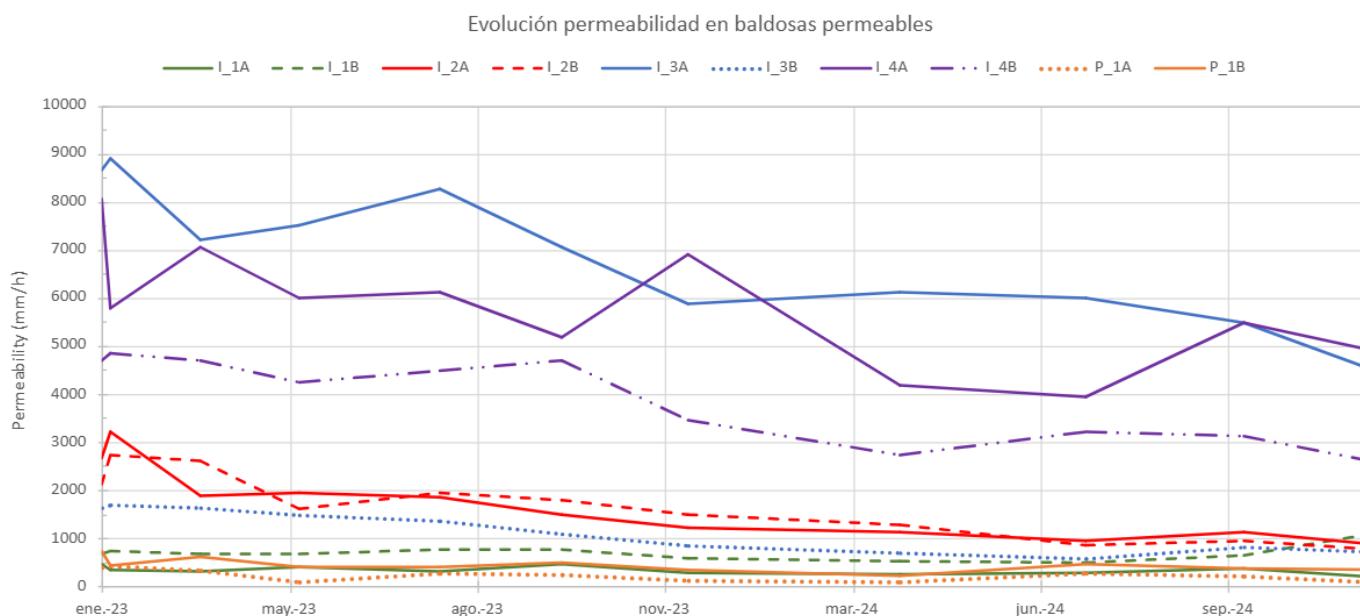
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología combinó ensayos de permeabilidad in situ y en laboratorio para evaluar el rendimiento de un pavimento permeable tras cinco años de uso. En campo, se realizaron mediciones periódicas entre enero de 2023 y diciembre de 2024 en cinco ubicaciones representativas, aplicando el método NLT-327/00. En laboratorio, se analizaron baldosas nuevas, proporcionadas por el fabricante, y usadas, que fueron retiradas del lugar de estudio tras cinco años de funcionamiento, mediante ensayos de permeabilidad antes y después de una limpieza a presión, recogiendo el agua empleada para estudiar la carga de contaminantes liberados. Se determinaron parámetros fisicoquímicos, contenido de sólidos y nutrientes, y se analizó la presencia

VIII Jornadas de Ingeniería del Agua. 22 y 23 de octubre de 2025. Zaragoza

de microplásticos mediante tamizado, digestión, separación por densidad y espectroscopía Raman, siguiendo la metodología descrita anteriormente por Calzadilla-Cabrera et al. (2023).

Las baldosas nuevas mostraron una permeabilidad media en laboratorio de 3558 mm/h, muy inferior a la reportada en otros estudios, posiblemente por su diseño y características de fabricación (Viana et al., 2023; Zhang et al., 2021). Tras un lavado a presión, esta aumentó un 32 %, indicando la presencia de finos residuales. En campo, tras cinco años de uso, la permeabilidad media durante los dos años de campañas de medición, se redujo un 48 %, alcanzando 1659,9 mm/h (Figura 2), con alta variabilidad entre puntos, especialmente en zonas con mayor tránsito o exposición a sedimentos. A pesar del descenso, la limpieza a presión en laboratorio permitió recuperar un 42,5 % de la permeabilidad en baldosas usadas, lo que sugiere que una combinación adecuada de mantenimiento mecánico e hidráulico puede restaurar parcialmente su capacidad drenante.



**Figura 2 |** Evolución temporal de la permeabilidad (mm/h) para cada una de las baldosas estudiadas. Cada línea representa una baldosa estudiada.

Los resultados evidencian una acumulación significativa de contaminantes en las baldosas tras cinco años de funcionamiento (Tabla 1), con valores elevados de DQO (+258 %), fósforo total (+123 %), nitrógeno total (+28 %) y sólidos en suspensión (+48 %), lo que indica una retención efectiva de materia orgánica y partículas en su estructura interna. La turbidez también fue alta, posiblemente influida por residuos del entorno o del propio material. En cambio, los niveles de nutrientes solubles y la conductividad se mantuvieron bajos y estables, lo que sugiere una acumulación selectiva centrada en la fracción particulada. Estos resultados respaldan el papel del pavimento poroso como sumidero de contaminantes, incluso sin capas filtrantes adicionales, aunque factores como el régimen climático mediterráneo o las lluvias intensas pueden limitar su capacidad de retención (Hernández-Crespo et al., 2019).

**Tabla 1** | Resumen de parámetros de calidad en las baldosas analizadas. U=usada; N=Nueva; G=Grande; P=Pequeña; C=Clara; O=Oscura.

	Conductividad	Turbidez	DQO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>total</sub>	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	P <sub>total</sub>	SST
Baldosa Id.	μS/cm	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
UGC	933	132.5	58	0.05	0.037	1	2.4	0.04	0.37	266
UGO	949	122.5	109	0.04	0.073	1	3.1	0.02	0.78	343.6
UPC	936	62.9	25.4	0.02	0.043	1.1	1.9	0.02	0.24	128.6
UPO	931	67.5	22.5	0.02	0.032	0.8	2	0.04	0.29	173
NGC	951	31.3	25.1	0.06	0.044	0.7	2.2	0.03	0.15	112.8
NGO	1010	136	21.5	0.04	0.029	1.1	2.1	0.03	0.36	299
NPC	940	47.4	10.6	0.02	0.035	1	1.7	0.03	0.16	120.4
NPO	941	21.25	9.5	0.01	0.038	1	1.4	0.03	0.08	60.4

Las baldosas usadas acumularon una media de  $10.272 \pm 5829$  MPs/m<sup>2</sup> tras cinco años de uso, lo que confirma un efecto acumulativo en condiciones reales. La tasa de acumulación anual estimada fue de 2054 MPs/m<sup>2</sup>/año. Aunque las baldosas nuevas también presentaron MPs ( $1343 \pm 194$  MPs/m<sup>2</sup>), estos podrían deberse a residuos de fabricación o exposición temprana. El contexto urbano del estudio, una zona peatonal con alta actividad comercial, favorece la presencia de MPs, especialmente fibras sintéticas. La morfología predominante fueron fibras (70,3 % en baldosas usadas), seguidas de partículas y, en menor medida, films. La mayoría de los MPs retenidos eran de tamaño medio o grande ( $\geq 75$  μm), lo que concuerda con su mayor capacidad de quedar atrapados en la matriz porosa. En cuanto a la composición, se identificaron principalmente polietileno (PE), polipropileno (PP) y poliéster, plásticos comunes en residuos urbanos (Zhang et al., 2023). Estos resultados refuerzan la eficacia del pavimento poroso como sumidero de MPs a largo plazo, aunque también sugieren que podría convertirse en una fuente secundaria si no se gestiona adecuadamente.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman una pérdida progresiva de permeabilidad en las baldosas de hormigón poroso, con una reducción media del 48 % tras cinco años de servicio en un entorno urbano intensivo, lo que equivale a un descenso aproximado del 28 % anual. Esta disminución se atribuye a procesos de colmatación por acumulación de sedimentos y materia orgánica, especialmente en zonas con mayor exposición a escorrentía y tránsito peatonal. No obstante, la capacidad de recuperación de la permeabilidad mediante limpieza a presión alcanzó el 42,5 %, lo que demuestra el potencial para recuperar esa permeabilidad que permitiría prolongar su funcionalidad. Debe por tanto enfatizarse el mantenimiento de este tipo de estructuras.

En cuanto a la retención de contaminantes, se observó una acumulación significativa de sólidos en suspensión, materia orgánica y nutrientes en las baldosas usadas, lo que confirma su función como sumideros a largo plazo. Además, los resultados evidencian una notable acumulación de microplásticos, con una media de 10.272 MPs/m<sup>2</sup> y predominio de fibras de tamaño

medio y grande. Estos datos refuerzan el papel del pavimento poroso en la retención de MPs, incluso sin capas filtrantes adicionales, aunque también subrayan la importancia del contexto urbano y del mantenimiento para evitar que el sistema se convierta en una fuente secundaria de contaminación.

---

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se desarrolla en el marco del proyecto de I+D+i SUDSLong-VLC (PID2021-122946OB-C32), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE y de la ayuda PRE2022-102831, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+. Se agradece igualmente la colaboración del Ayuntamiento de Valencia y las empresas Bertolín y Fenollar en el desarrollo de este estudio.

---

## REFERENCIAS

- Brown, R. A., & Borst, M., 2015. Evaluation of surface and subsurface processes in permeable pavement infiltration trenches. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(2), 04014041.
- Calzadilla-Cabrera, D., Wang, Q., Martín, M., Rajadel, N.O., Rousseau, D.P., Hernández-Crespo, C., 2023. Microplastics occurrence and fate in full-scale treatment wetlands. *Water Research*, 240, 120106.
- García-Haba, E., Naves, J., Hernández-Crespo, C., Goya-Heredia, A., Suárez, J., Anta, J., & Andrés-Doménech, I., 2023. Influence of sediment characteristics on long-term hydrology and water quality behaviour during the clogging process of a permeable asphalt. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103658.
- García-Haba, E., Hernández-Crespo, C., Martín, M., & Andrés-Doménech, I., 2023. The role of different sustainable urban drainage systems in removing microplastics from urban runoff: A review. *Journal of Cleaner Production*, 411, 137197.
- Hernández-Crespo, C., Fernández-Gonzalvo, M., Martín, M., & Andrés-Doménech, I., 2019. Influence of rainfall intensity and pollution build-up levels on water quality and quantity response of permeable pavements. *Science of The Total Environment*, 684, 303-313.
- Perales-Momparler, S., Andrés-Doménech, I., Hernández-Crespo, C., Vallés-Morán, F., Martín, M., Escuder-Bueno, I., & Andreu, J., 2017. The role of monitoring sustainable drainage systems for promoting transition towards regenerative urban built environments: a case study in the Valencian region, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 163, S113-S124.
- Razzaghamanesh, M., & Beecham, S., 2018. A review of permeable pavement clogging investigations and recommended maintenance regimes. *Water*, 10(3), 337.
- Viana, E. A., Mota, L. J. A., Sandoval, G. F. B., & de Souza Risson, K. D. B., 2023. Desempeño mecánico e hidráulico de pavimentos permeables de concreto: evaluación experimental. *Ingeniería y Desarrollo*, 41(2), 137.
- Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A., Yang, J., & Wang, H., 2021. Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete. *Construction and Building Materials*, 266, 121074.
- Zhang, J., Ding, W., Zou, G., Wang, X., Zhao, M., Guo, S., & Chen, Y., 2023. Urban pipeline rainwater runoff is an important pathway for land-based microplastics transport to inland surface water: A case study in Beijing. *Science of The Total Environment*, 861, 160619.