

Análisis integral del lavado y arrastre de sólidos en suspensión en cuencas urbanas utilizando un simulador de lluvia a escala real

Comprehensive analysis of sediment wash-off and suspended solids transport in urban catchments using a full-scale rainfall simulator

Juan Naves^{ORCID iD a1*}, Jerónimo Puertas^{ORCID iD a2}, Joaquín Suárez^{ORCID iD a3} y Jose Anta^{ORCID iD a4}

^aGrupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñaría Civil - CITEEC, Universidade da Coruña, Campus de Elviña s/n. España.

E-mail: ^{a1}juan.naves@udc.es, ^{a2}jeronimo.puertas@udc.es, ^{a3}joaquin.suarez@udc.es, ^{a4}jose.anta@udc.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 06/07/2022

Aceptado: 05/09/2022

Publicado: 31/10/2022

Citar como: Naves, J., Puertas, J., Suárez, J., Anta, J. 2022. Comprehensive analysis of sediment wash-off and suspended solids transport in urban catchments using a full-scale rainfall simulator. *Ingeniería del agua*, 26(4), 231-243. <https://doi.org/10.4995/la.2022.18023>

RESUMEN

Ante la falta de datos experimentales precisos para el desarrollo y validación de modelos de lavado y transporte de sedimentos en la superficie de cuencas urbanas, en este estudio se presenta una serie de ensayos en los que los procesos involucrados son medidos con detalle en un modelo físico de drenaje urbano dual de 36 m² a escala real. Durante los experimentos, se han analizado tres intensidades de lluvia y cinco clases de sedimento y se han medido calados y velocidades en superficie mediante técnicas de visualización; calados en colectores; caudales, concentraciones de SST y distribuciones de tamaños de partícula en el flujo de entrada a las arquetas y en el punto de vertido de la red de colectores; y se han realizado balances de masas a partir del sedimento que queda depositado en las distintas partes del modelo. Todos los datos brutos y procesados obtenidos se encuentran disponibles en el repositorio de acceso abierto Zenodo (<https://zenodo.org/communities/washtreet>).

Palabras claves: Lavado y transporte de sedimentos, drenaje urbano, modelo físico, técnicas de visualización.

ABSTRACT

Due to the lack of accurate experimental data to develop and validate surface urban wash-off and sediment transport models, this study presents an extensive experimental campaign in which the variables involved in wash-off and sediment transport processes are precisely measured in a 1:1 scale urban drainage physical model of 36 m². In these experiments, different sediment granulometries and rain intensities were tested measuring surface and in-pipe water depths; surface velocities using imaging techniques; flow discharges, total suspended solids concentrations and particle size distributions at the entrance of the gully pots and at the pipe system outlet; and performing mass balances collecting the sediment that remains deposited at the end of the experiments in the different parts of the model. Raw and processed data obtained is openly available in Zenodo repository (<https://zenodo.org/communities/washtreet>).

Keys word: Wash-off and sediment transport, urban drainage, physical model, visualization techniques.

INTRODUCCIÓN

El incremento de la impermeabilización de las ciudades modifica la hidrología natural de las cuencas, produciendo un aumento de caudales y volúmenes de escorrentía, así como de la carga contaminante que se acumula en las superficies durante los episodios de tiempo seco (Anta *et al.*, 2006; Zafra *et al.*, 2017). La contaminación, que se origina principalmente por causa del tráfico rodado, es lavada y transportada durante los episodios de lluvia hacia las redes de saneamiento y drenaje, y en último término hacia las masas acuáticas. Se ha demostrado que estos contaminantes, tales como hidrocarburos, metales pesados, microplásticos o materia orgánica, están asociados a las fracciones más finas de las partículas en suspensión (Akan y Houghtalen, 2003; Hengren *et al.* 2005; Dris *et al.* 2015), y por lo tanto el estudio y la comprensión del transporte en suspensión de esta fracción de sedimentos es clave para el diseño y la gestión de medidas que minimicen su impacto en el medio ambiente (Rossi *et al.*, 2009; Sikorska *et al.*, 2015).

Para este fin, los modelos de drenaje urbano incluyen ecuaciones empíricas como la desarrollada por Sartor y Boyd (1972), que está implementada en el *StormWater Management Model* (SWMM) de la US-EPA (Rossman, 2005). Sin embargo, estas ecuaciones son muy aproximadas en comparación con la complejidad del proceso estudiado, y los resultados obtenidos tienen asociadas unas incertidumbres elevadas (Schellart *et al.*, 2010). Esto es debido principalmente a que utilizan como variables clave la masa inicial disponible para ser lavada y la intensidad de lluvia, por lo que no se tienen en cuenta las heterogeneidades en las características del sedimento ni las variaciones espaciales propias de cuencas urbanas. Algunos autores han realizado modificaciones a estas ecuaciones incorporando parámetros que tienen en cuenta variables como la energía de la lluvia o la pendiente de la cuenca (Egodawatta *et al.*, 2007; Muthusamy *et al.*, 2018), pero sin conseguir avances significativos en la precisión de los resultados.

Durante los últimos años, se han planteado aproximaciones que tienen en cuenta la heterogeneidad de las cuencas urbanas considerando los distintos procesos físicos involucrados al modelizar la puesta en suspensión de las partículas acumuladas en la superficie por los impactos de gotas de lluvia o por la escorrentía generada, su transporte en suspensión y su posible deposición (Deletic *et al.*, 1997; Shaw *et al.*, 2006; Hong *et al.*, 2016; Naves *et al.*, 2020a). Aunque su aplicabilidad se reduce actualmente a cuencas pequeñas debido a su alto coste computacional, los prometedores resultados en la modelización del lavado de sólidos (SST) obtenidos en Hong *et al.* (2019) y en Naves *et al.* (2020a) al acoplar este tipo de formulaciones a modelos 2D de aguas someras, presentan a estos modelos de lavado basados en procesos físicos como una alternativa real a las ecuaciones empíricas utilizadas hasta ahora. Sin embargo, la variabilidad del proceso de acumulación de sedimentos en entornos urbanos (Wijesiri *et al.*, 2015; Sandoval *et al.*, 2018) dificulta la medida en campo de las variables de entrada asociadas de forma precisa y sin afectar a las condiciones iniciales. Esta incertidumbre en la definición de variables importantes como las características del sedimento o su distribución espacial, junto con el incremento del número de parámetros, dificulta la calibración y validación de este tipo de modelos y reduce su aplicabilidad práctica.

Ante esta problemática, algunos autores han demostrado la utilidad de realizar estudios experimentales de transporte de sedimentos y con condiciones iniciales determinadas de forma precisa en laboratorio (Shaw *et al.*, 2006; Muthusamy *et al.*, 2018) para desarrollar y evaluar nuevas formulaciones de lavado en cuencas urbanas. Sin embargo, las superficies consideradas en estos estudios son del orden de 1 m² y no se consideran flujos en cuneta o interacciones con imbornales, por lo que su aplicación se limita a primeras aproximaciones en cuencas urbanas simples. En este artículo se presentan los resultados de una serie de experimentos de lavado de sedimentos realizados en un modelo físico de drenaje urbano a escala 1:1, de 36 m² de superficie y con un simulador de lluvia realista desarrollado especialmente para este estudio. En estos ensayos, el proceso de lavado y transporte de sedimentos producido por la lluvia y la escorrentía generada es medido con precisión en condiciones controladas de laboratorio. Esto, sumado a la definición precisa de las condiciones iniciales de los ensayos y a una detallada caracterización hidráulica, hacen que los resultados experimentales presentados en este artículo sean adecuados para el análisis, desarrollo y validación de modelos numéricos de lavado de sedimentos en cuencas urbanas, sin que sea necesario considerar las incertidumbres presentes en cuencas reales. Además, se ha considerado también el transporte de sedimentos a través de dos imbornales y de una red de colectores que drenan la escorrentía superficial generada hacia un punto final de vertido, permitiendo realizar un análisis integral del lavado de sedimentos que se acumulan en superficies urbanas.

En las siguientes secciones se describe con detalle el modelo físico, el simulador de lluvia desarrollado, la metodología usada en los ensayos de lavado y transporte de sedimentos, así como en ensayos previos de caracterización hidráulica, y los principales resultados y conclusiones obtenidos. Los datos generados en estos ensayos se encuentran disponibles en el repositorio de acceso abierto Zenodo (<https://zenodo.org/communities/washtreet>) y se describen en detalle en Naves *et al.* (2020c).

MATERIAL Y MÉTODOS

Modelo físico

El modelo físico empleado tiene una extensión aproximada de 36 m² y está ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) de la Universidade da Coruña. La superficie del modelo consiste en un tramo de calle con pavimento impermeable de hormigón a escala 1:1 con pendiente transversal y longitudinal a la cuneta del 2% y del 0.5%, que se conecta a una red de colectores a través de dos sumideros situados a lo largo de la cuneta y de una canaleta de recogida de agua colocada en la sección aguas abajo de la calle. Un total de 5 colectores, con diámetros comprendidos entre 85 mm y 190 mm, drenan la escorrentía superficial generada por la lluvia hacia un punto de vertido común. En la Figura 1 se incluye una imagen del modelo y del sistema de generación de lluvia que se describirá en el siguiente apartado. Una descripción más detallada de la instalación puede consultarse en Naves *et al.* (2017, 2020c). Las elevaciones del modelo, determinantes para la modelización de la escorrentía superficial debido a los bajos calados que se desarrollan, se han obtenido a partir de la medida manual de la distancia de varios puntos de la superficie a un plano horizontal láser de referencia y, con mayor precisión, mediante la técnica fotogramétrica *Structure from Motion* (SfM), que ya ha sido aplicada anteriormente en el ámbito del drenaje urbano (Regueiro *et al.*, 2018). A partir de la técnica SfM ha sido posible disponer de una topografía con una resolución de 5 mm, frente a los 500 mm de la topografía tradicional realizada, que permite modelizar con mayor precisión el flujo superficial. Los mapas de elevaciones resultantes se pueden consultar en Naves *et al.* (2019a), donde se analiza también el funcionamiento del modelo Iber (Bladé *et al.*, 2014) para modelizar la escorrentía empleando cada una de las topografías.

Simulador de lluvia

El simulador de lluvia empleado consiste en dos redes de conducciones de riego que tienen insertados un total de 2500 goteros autocompensantes en presión que permiten generar lluvias de 30, 50 y 80 mm/h de intensidad (Figura 1). Bajo los goteros, y a una distancia de 60 cm, se instaló una malla metálica de 3 mm de paso con el objetivo de romper las gotas de lluvia y mejorar tanto la uniformidad espacial de la intensidad de lluvia, como la distribución de tamaños de gota. Esta elección se realizó tras una calibración en la que se analizó la uniformidad de la lluvia y la distribución de tamaños y velocidades de gotas mediante un disdrómetro Parsivel 2 (OTT, Kempten, Alemania), para distintas mallas y posiciones de las mismas. De esta manera, se pueden conseguir precipitaciones muy uniformes ($C_u=87, 94$ y 97%) y con tamaños de gota muy similares a los de las lluvias reales. Los detalles respecto al desarrollo y la calibración del simulador de lluvia se pueden consultar en Naves *et al.* (2020b). La distribución de intensidades de lluvia se midió para cada precipitación a partir del volumen recogido por una serie de recipientes dispuestos en la superficie de la calle en una malla de 0.5 m × 0.5 m.



Figura 1 | Foto general de la instalación (izquierda) y detalle del sistema de generación de lluvia (derecha).

Caracterización hidráulica

La precisa caracterización del flujo superficial y en tuberías es esencial para la obtención de resultados adecuados a la hora de modelizar el transporte de sólidos por la escorrentía. Para ello, se han medido calados, caudales y velocidades en puntos significativos del modelo físico. En primer lugar, se han determinado los calados en 6 puntos de la superficie y 6 puntos de la red de colectores empleando sensores de ultrasonidos (Pepperl+Fuchs, Mannheim, Alemania) con una frecuencia de adquisición de 5 Hz. Las señales brutas son filtradas y suavizadas mediante un filtro de mediana de ancho 5 s y una mediana móvil de 20 s respectivamente. A continuación, la señal se transforma a distancia a partir de una calibración lineal previa de cada sensor, consistente en la medida de 5 distancias conocidas a un plano de referencia y en la que se han obtenido R^2 por encima de 0.99. Por último, el calado es obtenido teniendo en cuenta la distancia a la que se encuentra la superficie, la cual es medida durante 60 s antes de cada ensayo para evitar errores derivados de pequeñas variaciones de la posición de la sonda.

Tres de estos sensores de nivel también se instalaron en depósitos provistos de vertederos triangulares que se encuentran situados bajo los dos imbornales y en el punto de vertido de la red de colectores. El caudal es registrado de esta manera a partir del nivel medido en el depósito durante los ensayos. Previamente, para poder convertir el nivel de la señal en caudal, se ha obtenido para cada depósito una regresión polinómica de segundo orden (R^2 por encima de 0.99) utilizando los registros de las sondas al medir diferentes caudales constantes conocidos en los depósitos. Adicionalmente, para obtener el caudal en el punto de medida a la entrada de los depósitos y no en la salida del vertedero, se realizó una compensación del volumen que es retenido en el depósito debido a la laminación que éste produce. Durante los ensayos se midieron los caudales y calados generados por una precipitación constante de 5 minutos de duración utilizando las tres intensidades de lluvia que permite generar el simulador. Para la medida de caudales en los imbornales es necesario derivar el flujo de agua entrante en los imbornales hacia los depósitos, por lo que cada precipitación fue repetida sin derivar el agua para obtener el caudal tanto en los imbornales como en el punto de vertido de la red de colectores. En la Figura 2 se incluyen imágenes de los sensores de ultrasonidos colocados en la superficie de la calle y en la red de colectores para la medida de calados.

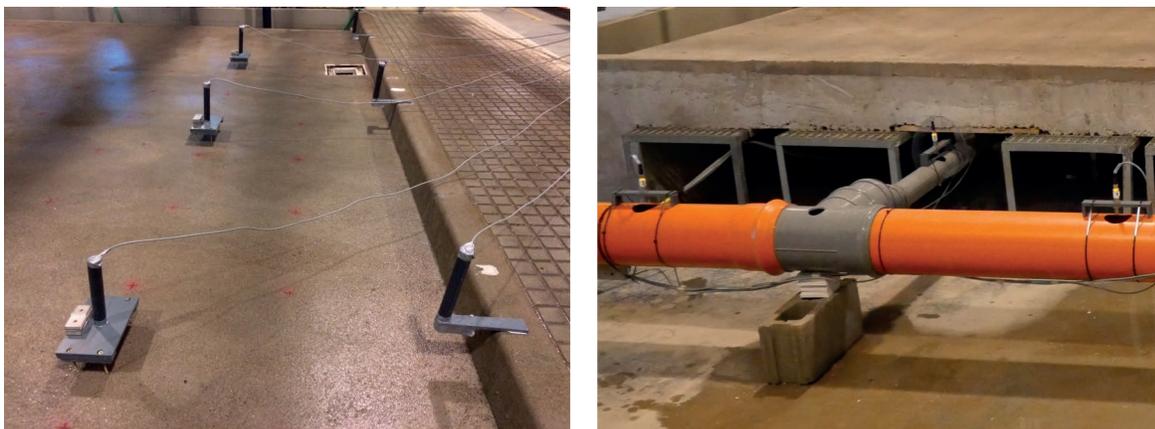


Figura 2 | Sondas de ultrasonidos instaladas y protegidas de la lluvia para la medida de calados en superficie (izquierda) y en la red de colectores (derecha).

Debido a los bajos calados desarrollados en superficie, del orden de pocos milímetros, se ha empleado una técnica de visualización *Large Scale Particle Image Velocimetry* (LSPIV) para la determinación de las velocidades superficiales en el modelo. Uno de los aspectos clave de este procedimiento ha sido el empleo de partículas fluorescentes de bajo coste e iluminación UV, que han permitido registrar el movimiento de las partículas sin la interferencia de las gotas de lluvia. En la Figura 3 se incluye un esquema de la posición de las cámaras de video y linternas UV para la grabación de las partículas fluorescentes transportadas por la escorrentía generada, y un ejemplo de las imágenes utilizadas para el análisis LSPIV. En Naves *et al.* (2021) se incluyen más detalles de la metodología desarrollada para la medida de la distribución de velocidades superficiales, consistente en una transformación de la imagen para rectificar el ángulo y la óptica de las cámaras, un pretratamiento de las imágenes obtenidas para optimizar el análisis

LSPIV y un filtrado de los resultados de velocidades eliminando valores erróneos. En los tres ensayos realizados se han medido las velocidades superficiales en régimen estacionario para cada una de las intensidades de lluvia estudiadas (30, 50 y 80 mm/h).

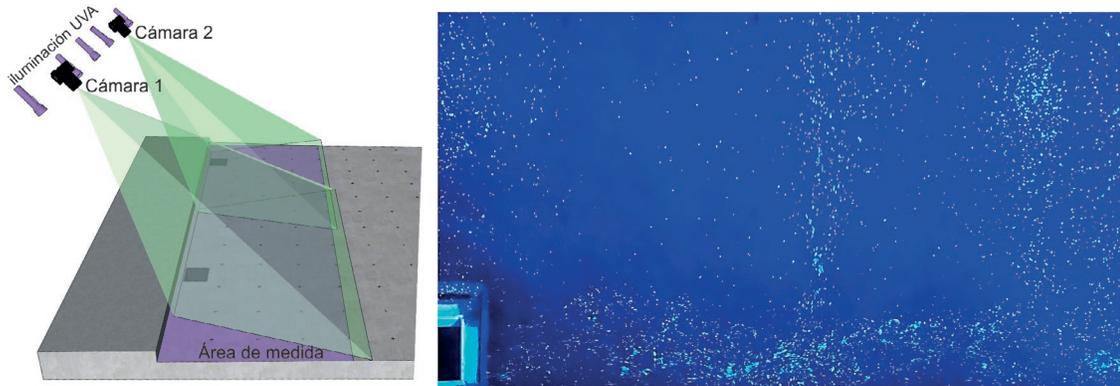


Figura 3 | Montaje experimental para la aplicación de la técnica LSPIV para la medida de velocidades superficiales utilizando partículas fluorescentes como trazador (izquierda), y detalle de una imagen tomada por la cámara 2 utilizada en el análisis donde se aprecian las partículas fluorescentes (derecha).

Ensayos de lavado y transporte de sedimentos

Una vez que el comportamiento hidráulico de los ensayos ha sido medido con precisión para las tres intensidades de lluvia consideradas, los ensayos se centran en analizar el lavado y transporte de sedimentos a partir de una carga inicial, una distribución espacial sobre la superficie y unas propiedades del sedimento conocidas. Para ello se ha tamizado un mismo material que se ha recogido de un vial real, cuyas características se pueden consultar en Naves *et al.* (2020a), para obtener cuatro clases de sedimentos (D1-D4) con una granulometría muy uniforme y D_{50} comprendidos entre 30 y 275 μm . Las diferentes clases de sedimento definidas permiten analizar la influencia del tamaño del sedimento en el proceso sin introducir incertidumbres debido a heterogeneidades en el sedimento distribuido inicialmente. Además, estas cuatro clases de sedimento han sido combinadas para obtener una última granulometría continua (D5) similar a la que puede darse en cuencas urbanas reales. Esto permite obtener resultados útiles para el análisis de aproximaciones multiclasa en modelos de lavado para considerar las distintas fracciones de sedimentos. En la Tabla 1 se incluyen las características de cada una de las clases de sedimentos empleadas, que se han medido utilizando un *coulter láser* (Beckam-Coulter LS I3 320). Además, en esta tabla se incluye la densidad, la porosidad y el contenido en materia orgánica de cada una de las clases de sedimento consideradas.

Tabla 1 | Características de las clases de sedimento utilizados en los experimentos de lavado y transporte.

Clase de sedimento	D_{50} (μm)	D_{16} (μm)	D_{84} (μm)	Densidad (kg/m^3)	Porosidad	Materia orgánica (%)
D1	30.1	11.4	54.6	2540	0.035	7.7
D2	68.1	46.3	91.8	2579	0.015	4.1
D3	143.9	105.8	186.8	2558	0.010	3.3
D4	273.8	204.7	351.8	2551	0.006	2.3
D5	165.3	48.1	291.6	2557	0.019	4.9

El sedimento es dispuesto al inicio de cada uno de los ensayos sobre la superficie de la calle con una carga de 20 g por metro de cuneta y siguiendo una distribución espacial escalonada concentrando el mayor porcentaje de sólidos cerca de la cuneta del modelo como sucede en cuencas reales (Sartor y Boyd, 1972). Para la carga de sedimentos se consideraron las conclusiones obtenidas en Naves *et al.* (2017), encontrándose el valor dentro del rango de cargas reportadas en la literatura (Morgan *et al.*, 2017; Zafra *et al.*, 2008). Una descripción en detalle de la distribución de sedimentos se puede encontrar en Naves *et al.* (2020a).

A continuación, se simula de forma constante una de las tres posibles lluvias durante 5 minutos y se toman muestras manuales en la entrada de los imbornales y en el punto de vertido en la red de colectores. Para facilitar la toma de muestras en los imbornales se han retirado las rejjas y se ha instalado un canal perimetral interior que concentra el agua entrante en un punto común de muestreo. Esto no afecta significativamente al comportamiento hidráulico ya que en este caso de lluvias cortas, no torrenciales y cuenca pequeña los imbornales con o sin reja representarían una condición de contorno libre en donde no se esperan calados sobre los mismos. En la Figura 4 se incluyen imágenes de los puntos en los que se toman las muestras. Parte de estas muestras son filtradas para obtener concentraciones de sólidos en suspensión totales (SST) siguiendo el método descrito en APHA (1995) y medir así la movilización de sedimentos en el modelo. En el punto de vertido de la red de colectores se ha medido además la turbidez mediante una sonda Solitax (Hach, Loveland, USA) que, mediante una regresión lineal con respecto a las muestras de SST, nos permite obtener el polutograma a la salida de la red en continuo de la misma forma que en Naves *et al.* (2017). El promedio de los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos individualmente para cada uno de los ensayos realizados fue de 0.94. Debido a la reducida cantidad de muestra, las determinaciones granulométricas tomadas a la entrada de las arquetas y en el punto de vertido se analizan con un *coulter láser* (Beckam-Coulter LS I3 320) para determinar la distribución de tamaños de partícula (DTP) del sedimento que va siendo lavado de la superficie y transportado por la red de colectores. Este análisis es especialmente interesante con la granulometría continua (D5) para conocer variaciones temporales de las fracciones de sedimento que se lavan durante los ensayos.



Figura 4 | Toma de muestras de manera manual en la entrada de las arquetas (izquierda) y en el punto de vertido de la red de colectores (derecha) durante los experimentos de lavado y transporte de sedimentos.

La carga inicial de sedimento no es lavada por completo por la lluvia durante los ensayos. Por lo tanto, una vez terminado el ensayo, se recogen y se miden las masas de sedimento que han quedado depositadas en las distintas partes del modelo. Para ello, se recupera mediante una aspiradora industrial el sedimento que queda depositado en la superficie y en el interior de las arquetas. A continuación, se limpia mediante agua a presión el sedimento depositado en las tuberías y se recoge en el punto de vertido mediante un tamiz de 10 μm . Esto permite plantear, junto a la masa total lavada por el punto de vertido de la red, un balance de masas que sirva como indicador de la correcta ejecución de cada ensayo, pudiéndose detectar errores groseros en la distribución del sedimento, en la toma y análisis de muestras de SST o en la recolección de sedimento depositado al final de los ensayos. La metodología empleada para realizar este balance de masas está descrita en los ensayos preliminares incluidos en Naves *et al.* (2017) y en Naves *et al.* (2020c). Las muestras recogidas también se analizan con el *coulter láser* con el objetivo de saber qué tamaños de partículas quedan depositados en cada uno de los componentes del modelo físico. A modo de resumen, la Figura 5 muestra los diferentes puntos de medida y las variables estudiadas tanto para los ensayos de caracterización hidráulica como para los ensayos de lavado y transporte de sedimentos.

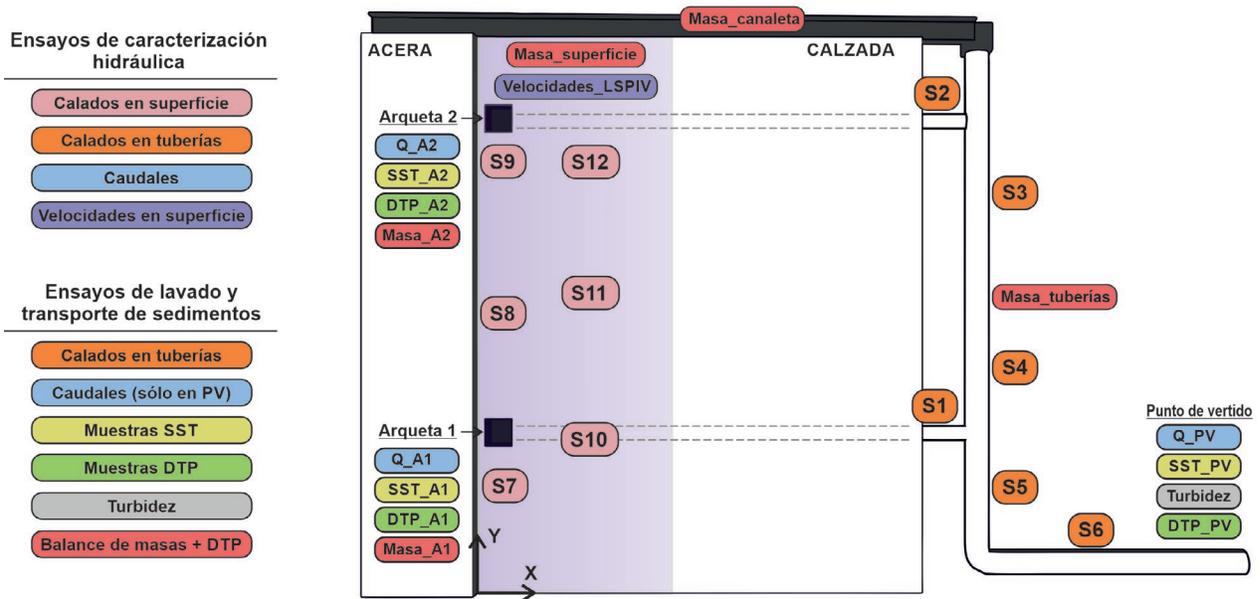


Figura 5 | Variables y puntos de medida considerados para la realización de los ensayos de caracterización hidráulica y los ensayos de lavado y transporte de sedimentos.

Los 23 ensayos realizados (Tabla 2) combinan las tres intensidades de lluvia con las cinco clases de sedimento. Durante la realización de los ensayos, la disminución del volumen de flujo debido a la toma de muestras de 200 mL a la entrada de las arquetas puede afectar a los resultados obtenidos en el punto de vertido de la red de colectores, principalmente en los primeros momentos de los ensayos cuando el caudal es muy reducido. Por ello, como se recoge en la Tabla 2, se han realizado ensayos adicionales con las mismas condiciones en los que únicamente se toman muestras en el punto de vertido, permitiendo medir sin perturbaciones el transporte de sedimentos también en este punto. En los ensayos en los que se utilizan las clases de sedimento de mayor tamaño y las intensidades de lluvia más bajas las concentraciones de SST medidas en el punto de vertido son despreciables, por lo que estos casos se realizaron únicamente una vez tomando muestras en ambos puntos de medida.

Tabla 2 | Ensayos de lavado y transporte de sedimentos realizados. Para cada combinación de clase de sedimento e intensidad de lluvia se especifica los puntos de medida utilizados en los ensayos: tomando muestras tanto en arquetas como en el punto de vertido (A/PV) y/o sólo en el punto de vertido (PV).

Clase de sedimento	Intensidad de lluvia		
	30 mm/h	50 mm/h	80 mm/h
D1	A/PV; PV	A/PV; PV	A/PV; PV
D2	A/PV	A/PV	A/PV; PV
D3	A/PV	A/PV	A/PV; PV
D4	A/PV	A/PV	A/PV
D5	A/PV; PV	A/PV; PV	A/PV; PV

RESULTADOS

A modo de ejemplo, los calados y caudales obtenidos en los ensayos de caracterización hidráulica realizados para la intensidad de lluvia de 50 mm/h se muestran en la Figura 6. En las series temporales representadas se puede ver los bajos calados desarrollados en la superficie del modelo y las oscilaciones en las medidas de calados en superficie que producen los impactos de las gotas de lluvia en comparación con los registros de calados en los colectores. Se incluyen también los caudales obtenidos en la entrada de ambas arquetas y en el punto de vertido de la red de colectores.

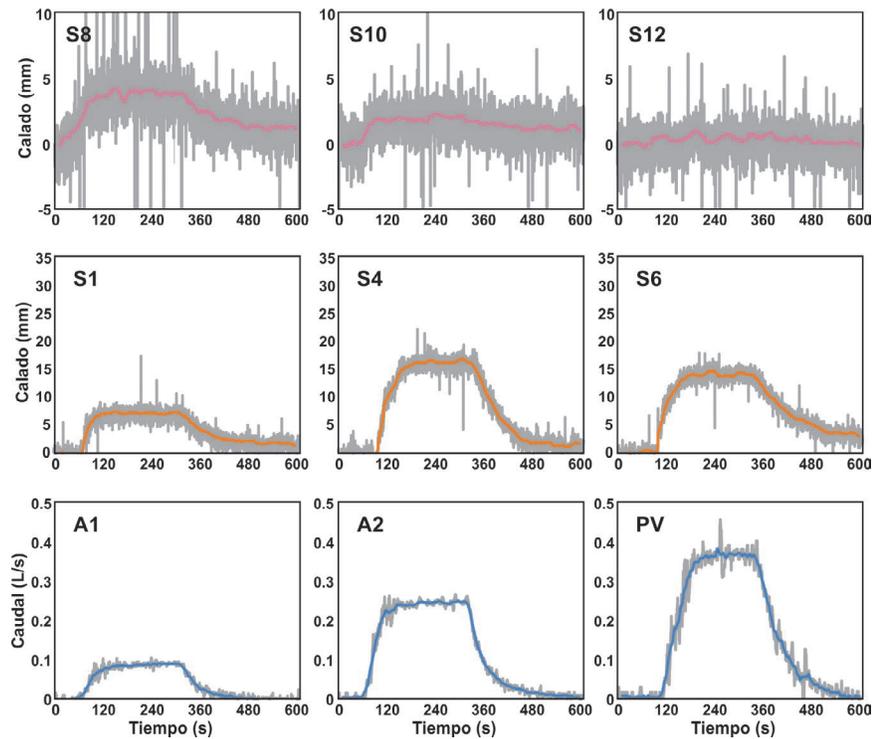


Figura 6 | Calados superficiales (fila 1), calados en tuberías (fila 2) y caudales (fila 3) obtenidos para la intensidad de lluvia de 50 mm/h.

Dada su importancia en el lavado y transporte de sedimentos y su necesidad a la hora de calibrar con precisión modelos de drenaje, la caracterización hidráulica se completa con la medida de la distribución de velocidades en la superficie del modelo. En la Figura 7 se presenta en detalle las velocidades en las inmediaciones del imbornal 2 obtenidas mediante la técnica LSPIV para la lluvia de 50 mm/h, en donde se pueden observar los canales preferenciales de drenaje en dirección perpendicular a la cuneta detectados en Naves *et al.* (2019a) para todas las intensidades de lluvia. Estos canales tienen un ancho de unos 25 cm y se sitúan en las posiciones $y=2.5$, $y=3.25$, $y=4.25$, $y=4.9$ e $y=5.75$ m. En Naves *et al.* (2021) se presentan de forma detallada los resultados comparando las velocidades obtenidas usando diferentes técnicas de procesamiento de las imágenes y usando dos trazadores diferentes: partículas fluorescentes añadidas a la escorrentía y burbujas naturalmente presentes en el agua generadas por el impacto de las gotas de lluvia en la superficie del modelo. Ante las irregularidades del terreno que se han intuido a partir de estos resultados, se ha empleado la técnica fotogramétrica SfM para la determinación de forma precisa de las elevaciones de la superficie, que se hace imprescindible para modelizar adecuadamente la escorrentía generada (Naves *et al.* 2019a, 2020a).

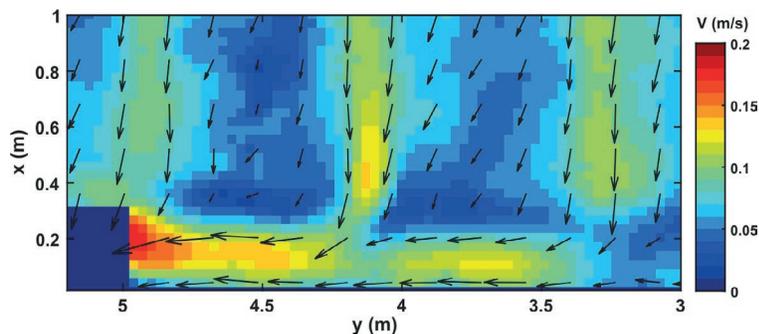


Figura 7 | Ejemplo de distribución de velocidades superficiales en las inmediaciones del imbornal 2 para la lluvia de intensidad 50 mm/h.

En la Figura 8 se presentan los polutogramas de SST de las muestras tomadas en las dos arquetas y en el punto de vertido de la red de colectores para la intensidad de lluvia de 50 mm/h y las diferentes clases de sedimentos. Se puede observar cómo las muestras tomadas son capaces de registrar de forma adecuada los polutogramas que se dan tanto en la entrada a las arquetas como en el punto final de vertido. El tamaño del sedimento se presenta en estos resultados como una variable clave en el proceso estudiado, siendo el sedimento más fino (D1), con diámetro medio aproximado de 30 μm , el único que produce concentraciones significativas de SST en el punto de vertido para esta intensidad de lluvia. Las concentraciones obtenidas con el sedimento con granulometría continua D5 ($d_{50}=165 \mu\text{m}$) se sitúan, tanto en los imbornales como en el punto de vertido, entre las obtenidas con los sedimentos D2 ($d_{50}=68 \mu\text{m}$) y D3 ($d_{50}=144 \mu\text{m}$). Por lo tanto, considerar el tamaño medio de partícula como representativo a la hora de modelizar el lavado de sedimentos puede resultar en estimaciones totalmente erróneas.

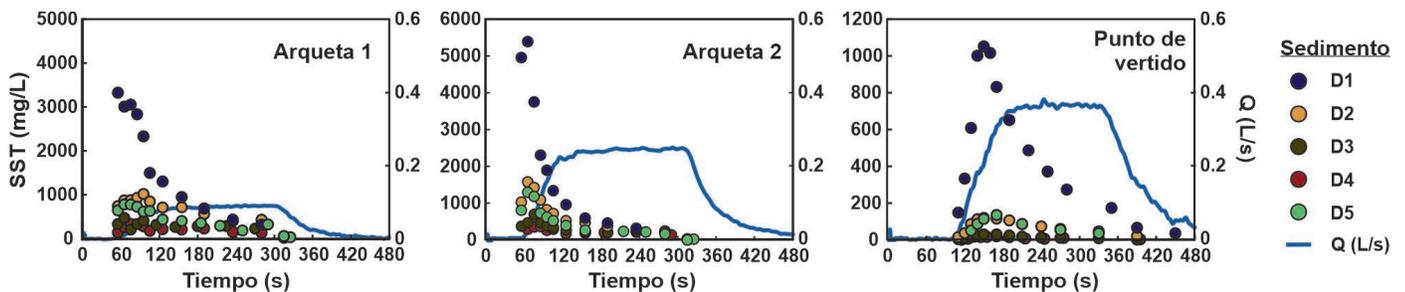


Figura 8 | Sólidos en suspensión totales medidos en la entrada a las arquetas y en el punto de vertido para una lluvia de 50 mm/h y las diferentes clases de sedimentos.

En la Figura 9 se presentan las masas obtenidas y los errores en los balances de masas realizados para las diferentes clases de sedimentos en los ensayos con intensidad de lluvia de 50 mm/h. Los cierres de estos balances entre la masa inicial distribuida sobre la superficie de la calle y la masa recogida al final de los ensayos de las distintas partes del modelo físico, junto a la masa lavada en el punto de vertido durante el ensayo, muestran errores menores al 5%. Este resultado es realmente satisfactorio considerando la complejidad del fenómeno estudiado y confirma la correcta ejecución de los ensayos. Este error máximo también se mantiene para los cierres de balances de masas para las intensidades de lluvia de 30 y 80 mm/h, que pueden consultarse en los datos publicados en el repositorio Zenodo (Naves *et al.*, 2019b).

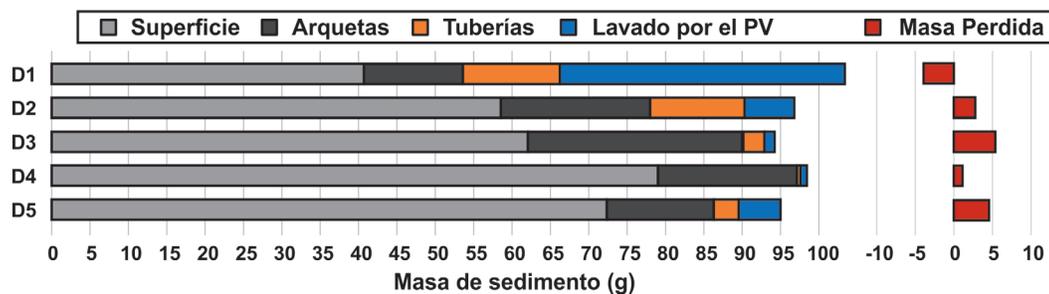


Figura 9 | Masas de sedimento obtenidas al final de los ensayos al realizar el balance de masas para la lluvia de 50 mm/h y las diferentes clases de sedimento.

Por último, se ha analizado la distribución de tamaños de partículas para el sedimento recogido al realizar el balance de masas y para las muestras tomadas durante el ensayo a la entrada de las arquetas y en el punto final de vertido. Este análisis es especialmente interesante en los ensayos en los que se utiliza una clase de sedimento con granulometría continua y realista (D5) ya que se pueden determinar las fracciones lavadas y depositadas en cada uno de los elementos del modelo. En la Figura 10 se presentan los resultados de distribuciones de tamaños de partículas obtenidos mediante el *coulter* láser (Beckam-Coulter LS I3 320) para el sedimento D5 y la intensidad de lluvia de 50 mm/h. En primer lugar, se muestran las granulometrías de las masas depositadas y recogidas de la superficie, las arquetas y los colectores, junto a la distribución media en las muestras tomadas a la entrada de ambas arquetas y en el punto de

vertido al finalizar el ensayo. Se puede observar que las granulometrías son más finas a medida que el sedimento es transportado a través de las distintas partes del modelo. Tomando como referencia el tamaño medio del sedimento D5 ($d_{50}=165 \mu\text{m}$), se puede observar que la fracción lavada a través de las arquetas presenta un d_{50} promedio igual a $80 \mu\text{m}$, quedando depositadas en superficie las partículas más gruesas ($d_{50}=213 \mu\text{m}$). De esta masa lavada, las partículas más grandes tienen una mayor probabilidad de depositarse en las arquetas, de las que se recoge un sedimento de tamaño medio $176 \mu\text{m}$. Una vez atravesadas las arquetas, el sedimento es movilizado por los colectores hasta el punto de vertido. En este proceso, parte del mismo es depositado ($d_{50}=72 \mu\text{m}$) llegando al punto de vertido una masa con predominancia de las partículas más finas ($d_{50}=39 \mu\text{m}$). Se incluyen adicionalmente las distribuciones de tamaños de las muestras tomadas en la entrada a la arqueta 2, en donde se puede observar que las partículas más finas se lavan en primer lugar y, a medida que pasa el tiempo, el diámetro medio de la masa lavada va incrementándose.

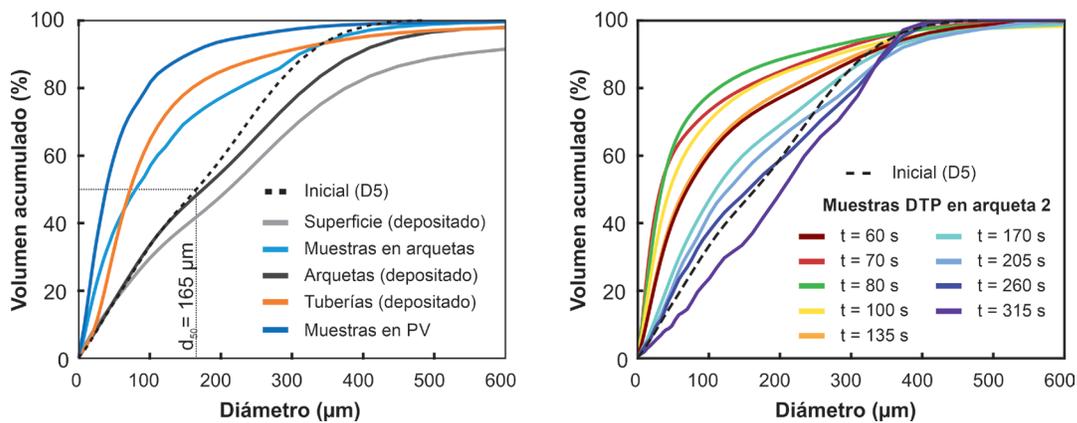


Figura 10 | Distribución de tamaños de partículas medios en los diferentes puntos de medida y en las masas recogidas para realizar el balance de masas (izquierda), y variación temporal de los tamaños de partículas presentes en el flujo de entrada a la arqueta 2 (derecha). Se muestran los resultados obtenidos en el ensayo con la clase de sedimento D5 y la intensidad de lluvia de 50 mm/h .

Aplicabilidad y disponibilidad de los datos

Los resultados experimentales presentados en este trabajo son una aportación destacada en el estudio de la movilización de sedimentos en entornos urbanos porque se han obtenido en un modelo físico de drenaje urbano a escala 1:1, utilizando un simulador de lluvia realista que es capaz de generar tres intensidades de lluvia diferentes, y midiendo de forma precisa las condiciones iniciales y las variables que intervienen en el proceso de lavado y transporte de sedimentos en cuencas urbanas. La caracterización hidráulica realizada permite disponer de una descripción detallada del flujo superficial y en tuberías para la calibración de modelos de drenaje. Estos datos, en particular las distribuciones de velocidades superficiales, no suelen estar disponibles en estudios en campo y son fundamentales para que las posibles incertidumbres no se propaguen a la modelización del lavado y transporte de sedimentos. Otra ventaja de los ensayos presentados es que los polutogramas y los caudales han sido obtenidos tanto en la entrada de los imbornales como en el punto de vertido de la red de drenaje, lo que permite separar el transporte de sedimentos en superficie y en la red de colectores. Los resultados son por lo tanto adecuados no sólo para calibrar, validar o desarrollar módulos de transporte de sedimentos en modelos duales de drenaje urbano, sino que también en modelos en los que se tenga en cuenta únicamente la superficie o la red de colectores.

La utilización de diferentes intensidades de lluvia y granulometrías uniformes (D1-D4) permite determinar la influencia de la lluvia y de las características del sedimento en el lavado de sedimentos. Además, los resultados obtenidos con la granulometría continua son muy útiles para probar diferentes aproximaciones multiclase y determinar cómo modelizar adecuadamente la heterogeneidad de tamaños en el transporte de sedimentos en cuencas urbanas reales. Por último, además de ser un buen indicador de la fiabilidad de los ensayos, los balances de masas aportan información interesante sobre el proceso de lavado y transporte de sedimento, pudiéndose analizar la eficiencia de las arquetas en función del caudal y el tamaño de sedimento o los tamaños máximos de sedimentos que son movilizadas para cada intensidad de lluvia.

Debido a la utilidad de los datos obtenidos para futuras investigaciones, todos los resultados brutos y procesados que se han presentado en este artículo han sido publicados en el repositorio abierto Zenodo dentro del ámbito del proyecto WASHTREET ('Wash-off and sediment transport experiments in a full scale urban drainage physical model'). De esta manera es posible replicar los resultados derivados que se han presentado hasta ahora (Naves *et al.*, 2019a; 2020a, 2020b, 2021) y se permite a otros autores disponer libremente de los datos para probar sus propias hipótesis, desarrollar nuevas formulaciones o calibrar y validar sus propios modelos. La base de datos se organiza en 3 paquetes correspondientes a los ensayos hidráulicos y de lavado y transporte de sedimentos (Naves *et al.* 2019b), el análisis PIV (Naves *et al.*, 2019c) y a la técnica fotogramétrica SfM (Naves *et al.*, 2019d), y pueden ser consultados en Naves *et al.* (2020c) y en la página del proyecto <https://zenodo.org/communities/washtreet>.

CONCLUSIONES

Ante la falta de datos lo suficientemente precisos para el desarrollo de formulaciones de lavado y transporte de sedimentos en cuencas urbanas y la dificultad en trabajos de campo para medir con precisión variables importantes como las características del sedimento, su distribución espacial o su carga inicial sin afectar a las condiciones iniciales del evento, en este trabajo presentamos una serie de experimentos en los que los procesos involucrados son medidos con precisión en un modelo físico de drenaje urbano a escala real. Las principales conclusiones del estudio son:

- a. La metodología desarrollada ha permitido obtener resultados precisos y de alta resolución de la movilización de sólidos en suspensión a través de un modelo físico de drenaje urbano de 36 m² considerando flujos en superficie y a través de un sistema de drenaje compuesto por dos arquetas y una red de tuberías. Además, la fiabilidad de los resultados ha sido comprobada a partir de la realización de balances de masas entre la masa inicial distribuida, la masa total lavada a través del punto de vertido y la masa que queda depositada en las distintas partes del modelo físico, obteniendo errores menores al 5%.
- b. A partir de los resultados obtenidos para cada una de las 5 clases de sedimento utilizadas se ha comprobado la importante influencia que tiene la intensidad de lluvia y, sobre todo, la granulometría de los sólidos en su movilización. Por lo tanto, considerar el tamaño medio de partícula como representativo a la hora de modelizar el lavado y transporte de sedimentos en cuencas urbanas puede resultar en estimaciones totalmente erróneas. Además, la consideración de la granulometría en estudios de monitorización de redes de drenaje podría explicar diferencias observadas entre distintas cuencas urbanas.
- c. Se ha evaluado positivamente la utilización de técnicas de visualización LSPIV y SfM en modelización hidráulica de modelos físicos. Estas técnicas han sido empleadas respectivamente para la obtención de velocidades superficiales y para la determinación precisa de las elevaciones de la superficie con el objetivo de obtener una representación ajustada de la hidráulica de los ensayos, que es clave en el proceso de puesta en suspensión de las partículas y su posterior transporte.
- d. La definición precisa de las condiciones iniciales, la ajustada representación de las variables hidráulicas y la precisa medición de la movilización de SST durante los ensayos, hacen que los datos obtenidos sean óptimos para el análisis y desarrollo de formulaciones de lavado y transporte de sedimentos en modelos de drenaje urbano sin considerar las incertidumbres propias de cuencas reales.

En la actualidad se está continuando esta línea de investigación empleando pavimentos permeables para poder analizar el rendimiento hidráulico y de eliminación de contaminación de esta tipología de técnica SUDS.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor ha sido financiado por la beca de doctorado FPU14/01778. Este trabajo ha sido financiado parcialmente a través de los proyectos RTI2018-094217-B-C33 (MINECO/FEDER-UE), UNLC15-DE-2862 (MINECO/FEDER-UE y ED431C 2018/56 (Xunta de Galicia). Además, los autores quieren agradecer a Montserrat Recarey, Manuel Regueiro y Esteban Sañudo su ayuda durante la realización de los ensayos.

REFERENCIAS

- Akan, A.O., Houghtalen, R.J. 2003. *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modeling*. John Wiley & Sons, USA.
- Anta, J., Peña, E., Suárez, J., Cagiao, J. 2006. A BMP selection process based on the granulometry of runoff solids in a separate urban catchment, *Water Sa*, 32(3), 419–428. <https://doi.org/10.4314/wsa.v32i3.5268>
- APHA. 1995 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington, DC, USA.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Deletic, A., Maksimovic, E., Ivetic, M. 1997. Modelling of storm wash-off of suspended solids from impervious surfaces, *Journal of Hydraulic Research*, 35(1), 99–118. <https://doi.org/10.1080/00221689709498646>
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., Tassin, B. 2015. Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry*, 12(5), 592–599. <https://doi.org/10.1071/EN14167>
- Egodawatta, P., Thomas, E., Goonetilleke, A. 2007 Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall. *Water Research*, 41(13), 3025–3031. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.037>
- Herngren, L. F. 2005 *Build-up and Wash-off Process Kinetics of PAHs and Heavy Metals on Paved Surfaces Using Simulated Rainfall*, Doctoral dissertation, Queensland University of Technology, Brisbane, Queensland, Australia, 2005.
- Hong, M., Bonhomme, C., Le, M.H., Chebbo, G. 2016. A new approach of monitoring and physically-based modelling to investigate urban wash-off process on a road catchment near Paris. *Water Research*, 102, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.027>
- Morgan, D., Johnston, P., Osei, K., Gill, L. 2017. “Sediment build-up on roads and footpaths of a residential area.” *Urban Water Journal*, 14(4), 378–385. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1148182>
- Muthusamy, M., Tait, S., Schellart, A., Beg, M.N.A., Carvalho, F.R., de Lima, J.L.M.P. 2018. Improving understanding of the underlying physical process of sediment wash-off from urban road surfaces. *Journal of Hydrology*, 557, 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.047>
- Naves, J., Jikia, Z., Anta, J., Puertas, J., Suárez, J., Regueiro-Picallo, M. 2017. Experimental study of pollutant washoff on a full-scale street section physical model. *Water Science and Technology*, 76(10), 2821–2829. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.345>
- Naves, J., Anta J., Puertas J., Regueiro-Picallo, M., Suárez, J. 2019a. Using a 2D shallow water model to assess Large-scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) and Structure from Motion (SfM) techniques in a street-scale urban drainage physical model. *Journal of Hydrology*, 575, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.003>
- Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Puertas, J. 2019b. [Dataset] WASHTREET Hydraulic, wash-off and sediment transport experimental data in an urban drainage physical model, *Zenodo* <http://doi.org/10.5281/zenodo.3233918>
- Naves, J., Puertas, J., Suárez, J., Anta, J. 2019c. [Dataset] WASHTREET Runoff velocity data using different Particle Image Velocimetry (PIV) techniques in a full scale urban drainage physical model, *Zenodo*, <http://doi.org/10.5281/zenodo.3239401>
- Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Puertas, J. 2019d. [Dataset] WASHTREET Application of Structure from Motion (SfM) photogrammetric technique to determine surface elevations in an urban drainage physical model, *Zenodo*, <http://doi.org/10.5281/zenodo.3241337>
- Naves, J., Rieckermann, J., Cea, L., Puertas, J., Anta, J. 2020a. Global and local sensitivity analysis to improve the understanding of physically-based urban wash-off models from high-resolution laboratory experiments *Science of the Total Environment*, 709, 136152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136152>

- Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Puertas, J. 2020b. Development and calibration of a new dripper-based rainfall simulator for large-scale sediment wash-off studies *Water*, 12(1), 152. <https://doi.org/10.3390/w12010152>
- Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Puertas, J. 2020c. Hydraulic, wash-off and sediment transport experiments in a full-scale urban drainage physical model. *Scientific Data*, 7, 44. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0384-z>
- Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Puertas, J. 2021. Assessing different imaging velocimetry techniques to measure shallow runoff velocities during rain events using an urban drainage physical model. *Hydrology and Earth System Science*. 25, 885–900. <https://doi.org/10.5194/hess-25-885-2021>
- Regueiro-Picallo, M., Anta, J., Suárez, J., Puertas, J., Jácome, A., Naves, J. 2018. Characterisation of sediments during transport of solids in circular sewer pipes. *Water Science and Technology*, 2017(1), 8–15. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.055>
- Rossi, L., Chèvre, N., Fankhauser, R., Krejci, V. 2009. Probabilistic environmental risk assessment of urban wet-weather discharges: an approach developed for Switzerland, *Urban Water Journal*, 6(5), 355–367. <https://doi.org/10.1080/15730620902934801>
- Rossman, L.A. 2015. *Storm Water Management Model, User's Manual, Version 5.1* No. EPA/600/R-05/040. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, USA.
- Sandoval, S., Vezzaro, L., Bertrand-Krajewski, J.L. 2018. Revisiting conceptual stormwater quality models by reconstructing virtual state variables, *Water Science and Technology*, 78(3), 655–663. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.337>
- Sartor, J.D., Boyd, G.B. 1972. *Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants*. EPA-R2-72-081. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- Schellart, A.N.A., Tait, S.J., Ashley, R.M. 2010. Towards quantification of uncertainty in predicting water quality failures in integrated catchment model studies, *Water Research*, 44(13), 3893–3904. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.05.001>
- Shaw, S. B., Walter, M.T., Steenhuis, T.S. 2006. A physical model of particulate wash-off from rough impervious surfaces. *Journal of Hydrology*, 327(3-4), 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.01.024>
- Sikorska, A.E., Del Giudice, D., Banasik, K., Rieckermann, J. 2015. The value of streamflow data in improving TSS predictions—Bayesian multi-objective calibration. *Journal of Hydrology*, 530, 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.051>
- Wijesiri, B., Egodawatta, P., McGree, J., Goonetilleke, A. 2017. Process variability of pollutant build-up on urban road surfaces, *Science of Total Environment*, 518, 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.014>, 2015
- Zafra, C.A., Temprano, J., Tejero, I. 2008. Particle size distribution of accumulated sediments on an urban road in rainy weather. *Environmental technology*, 29(5), 571–582. <https://doi.org/10.1080/09593330801983532>
- Zafra, C., Temprano, J., Suárez, J. 2017. A simplified method for determining potential heavy metal loads washed-off by stormwater runoff from road-deposited sediments, *Science of Total Environment*, 601, 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.178>