

Transporte de sedimentos cohesivos en conducciones de saneamiento unitario

Regueiro-Picallo, M.^{a1}, Anta, J.^{a2}, Suárez, J.^{a3}, Puertas, J.^{a4}, Naves, J.^{a5} y Jácome, A.^{a6}

^aGrupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, Campus de Elviña s/n. E-mail: ^{a1}manuel.regueiro1@udc.es, ^{a2}jose.anta@udc.es, ^{a3}jsuarez@udc.es, ^{a4}jeronimo.puertas@udc.es, ^{a5}juan.naves@udc.es, ^{a6}ajacome@udc.es.

Línea temática C | Agua y ciudad

RESUMEN

En este trabajo se ha llevado a cabo una campaña experimental en una instalación para el ensayo de conducciones alimentada por agua residual urbana con el objetivo de estudiar el fenómeno de transporte de sedimentos en tuberías de saneamiento. Para ello, se ha estudiado el volumen de sedimentos acumulado en conducciones circulares de PVC convencionales utilizando técnicas fotogramétricas para distintas condiciones de sedimentación y erosión. Además, se han analizado las propiedades físico-químicas de los sólidos depositados en el fondo y en las paredes de las tuberías tomando muestras puntuales. A partir de los resultados de los ensayos de erosión con diferentes tiempos de acumulación se ha obtenido una relación entre las propiedades de los sedimentos y su capacidad de arrastre y cohesión.

Palabras clave | canal experimental; sedimentos cohesivos; sistema de saneamiento unitario; transporte de sedimentos; tuberías saneamiento.

INTRODUCCIÓN

La acumulación de sólidos en sistemas de saneamiento se ha convertido en una de las principales fuentes de contaminación en áreas urbanas de todo el mundo (Ashley et al., 2004). En sistemas de saneamiento unitarios, la red secundaria de tuberías, compuesta por diámetros menores a 400 mm, contribuye de forma significativa a la producción de esta sedimentación de partículas debido a velocidades insuficientes durante períodos de tiempo seco (Rammal et al., 2017). La erosión y resuspensión de estos sólidos durante los episodios de lluvia es uno de los mayores focos de contaminación, provocando descargas de sistemas unitarios (DSUs) y sobrecargas en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) (Suárez y Puertas, 2005). Para poder prevenir estos problemas es necesario una gran inversión en el mantenimiento y limpieza de los puntos de la red con acumulación de sedimentos (Lange y Wichern, 2013). El objetivo de este trabajo es estudiar los procesos de transporte de sólidos cohesivos y la evolución de las características de los sedimentos depositados en tuberías con geometrías diferentes. Para ello, se ha diseñado una campaña de ensayos en una instalación experimental situada en la EDAR de A Coruña financiada por el proyecto estatal “SEDUNIT - Análisis de los procesos de acumulación, erosión y transporte de sedimentos cohesivos en sistemas de saneamiento unitario”. Estos ensayos continúan los trabajos desarrollados por Regueiro-Picallo et al. (2017) en los que se puso en marcha la instalación y se comparó la acumulación de sedimentos en una tubería circular de PVC frente a una ovoide con diámetro equivalente en condiciones de tiempo seco (grados de llenado pequeños).

MATERIAL Y MÉTODOS

Plataforma experimental

La plataforma de ensayos está situada en la planta de pretratamiento de la EDAR de Bens, en A Coruña (600,000 habitantes equivalentes). Esta instalación presenta un canal de 10 m de longitud y 0.8 m de ancho y una pendiente regulable entre el 0% y el 2%. El objetivo de esta instalación es ensayar con agua residual urbana diferentes secciones, principalmente tuberías de saneamiento y canales abiertos, bajo condiciones controladas de laboratorio. En particular, para este trabajo se han ensayado dos conducciones circulares de PVC de 7.5m de longitud con diámetros exteriores de 315 y 400 mm respectivamente.

Una bomba sumergible (ABS JS44 con diámetro de salida de 55x40 mm) situada después de las primeras rejillas de tamicos (apertura de 3 mm) introduce el agua residual al depósito de cabecera de la instalación. Este depósito está conectado con ambas tuberías a través de vertederos triangulares de 90° para repartir el caudal de forma homogénea. Aguas abajo del canal se sitúa una compuerta para fijar las condiciones de contorno de cada ensayo. Además, la plataforma está equipada con diferentes sensores y dispositivos de registro para monitorizar tanto los parámetros hidráulicos y las cargas contaminantes del agua residual como las características de los sedimentos (Figura 1). En Suárez et al. (2015) se describe con mayor detalle cada una de las partes y el funcionamiento de la instalación.

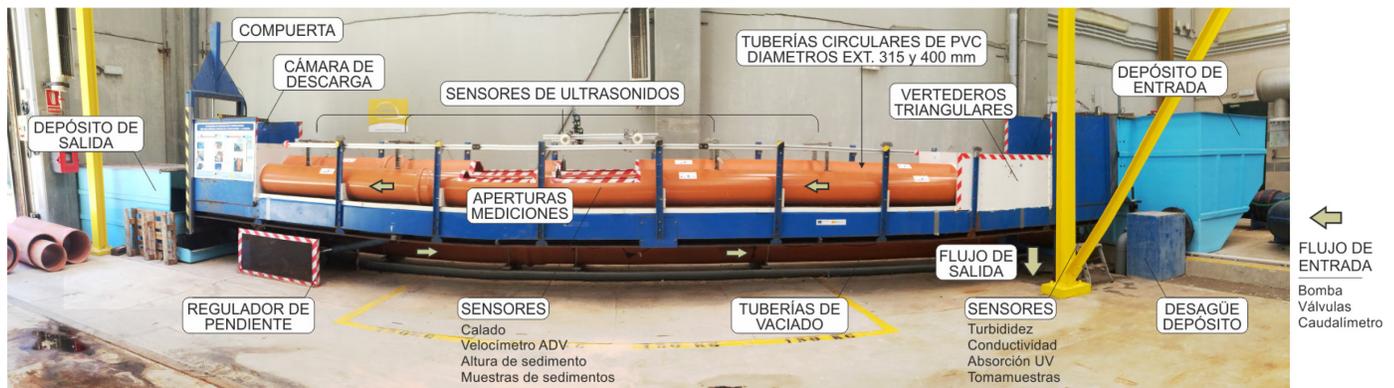


Figura 1 | Plataforma de ensayos situada en la EDAR de Bens (A Coruña).

Plan de ensayos

Para estudiar los procesos de acumulación y arrastre de sedimentos se ha diseñado una campaña experimental dividida en ensayos de sedimentación de partículas sólidas en el contorno de las tuberías bajo unas condiciones hidráulicas constantes y otros de erosión de los sedimentos al incrementar el flujo en las tuberías. En primer lugar, se ha llevado a cabo un ensayo de larga acumulación en el cual se ha registrado la evolución de la masa depositada y de las características de los sedimentos durante 20 días. Para ello, se fijaron unas condiciones hidráulicas constantes de caudal $Q = 4.1$ L/s, pendiente $S = 0.1\%$ y unas condiciones de contorno aguas abajo de $h = 85$ mm, resultando un grado de llenado de 22.5% y 28.4% para las tuberías de 315 y 400 mm respectivamente. Durante esta fase de acumulación se han monitorizado los caudales de entrada y los calados en varios puntos a lo largo de las tuberías a través de pequeñas ventanas. También se han registrado con sondas situadas en el depósito de cabecera los parámetros de conductividad, turbidez (SOLITAX sc) y materia orgánica (UVAS plus sc) del agua residual (Hach-Lange, Berlín, Alemania). Además, de forma puntual, se han registrado la acumulación de sedimentos en las tuberías a partir de técnicas fotogramétricas, los perfiles y campos de velocidades con un velocímetro ADV Nortek Vectrino© (Rud, Noruega) y se han tomado muestras manuales de los sólidos acumulados en la sección central de las tuberías.

El estudio del arrastre de sólidos se ha realizado a partir de tres ensayos de erosión después de un período de 3, 7 y 20 días de consolidación del sedimento en ambas tuberías. Este procedimiento es similar al planteado en los trabajos de Tait et al.

(2003) y Seco et al. (2014) en los que se midió la resistencia del sedimento con un erodímetro después de diferentes tiempos de consolidación. El primer ensayo de erosión se llevó a cabo después de los 20 días del ensayo de larga acumulación. Dos experimentos se realizaron a mayores tratando de reproducir las mismas condiciones de altura de sedimento inicial, para lo cual se fijaron menores velocidades del agua residual durante la fase de acumulación. El tiempo de cada ensayo fue de 30 minutos (similar a Rushford et al., 2003), durante el cual se elevó el caudal en cada tubería. Durante estos ensayos se registró la variación de las cargas contaminantes con sondas calibradas a partir de muestras puntuales tomadas aguas arriba y aguas abajo de las tuberías y, además, se midió el perfil de velocidades en la sección central de cada tubería. Además, antes y después de empezar cada ensayo se registraron los volúmenes de sedimentos y se tomaron muestras manuales.

Determinación de sedimentos acumulados

Para poder registrar el volumen de sedimentos y tomar las muestras manuales de sedimentos se han abierto dos aperturas de 700 mm en la parte central de cada una de las tuberías. La acumulación de sedimentos y la toma de las muestras de sedimentos se ha realizado después de detener el flujo y se vaciar ambas tuberías de manera cuidadosa utilizando la compuerta automática. Los sólidos de fondo se registraron siempre en la misma apertura para poder comparar su evolución.

El volumen de sedimentos acumulados se registró a partir de la técnica fotogramétrica “Structure From Motion” (SFM). Esta técnica no intrusiva permite obtener una reconstrucción en 3D del contorno de cada tubería a partir de series de imágenes tomadas alrededor de la apertura con una cámara fotográfica convencional (Figura 2). Para ello, la composición de las imágenes se ha realizado con el software VisualSFM, desarrollado por Wu et al. (2011) y Wu (2013), y la malla de la superficie de sedimentos se ha generado con el software MeshLab, ambos con licencia de uso libre. La principal ventaja de esta metodología es la facilidad para medir tanto perfiles trasversales como longitudinales del lecho con una resolución espacial de 0.1 mm. Para registrar el volumen de sedimentos acumulado es necesario calcular la diferencia entre la malla de alturas de los sedimentos y la geometría teórica de cada tubería. Para obtener mayor precisión en la identificación de puntos es necesario una buena superposición de las imágenes y un cierto contraste dentro del espacio fotografiado. Además, se necesitan al menos cuatro puntos con coordenadas conocidas para escalar y referenciar el modelo 3D. En esta campaña de ensayos se han utilizado entre 6 y 9 puntos, resultando un error medio cuadrático (RMS, siglas en inglés) del modelo menor a 2.5 mm (0.4% de la apertura). Esta metodología de medición a partir de imágenes basada en la técnica SFM es similar a la utilizada por Detert et al. (2016) para la orto-rectificación y composición de fotografías del cauce de un río.

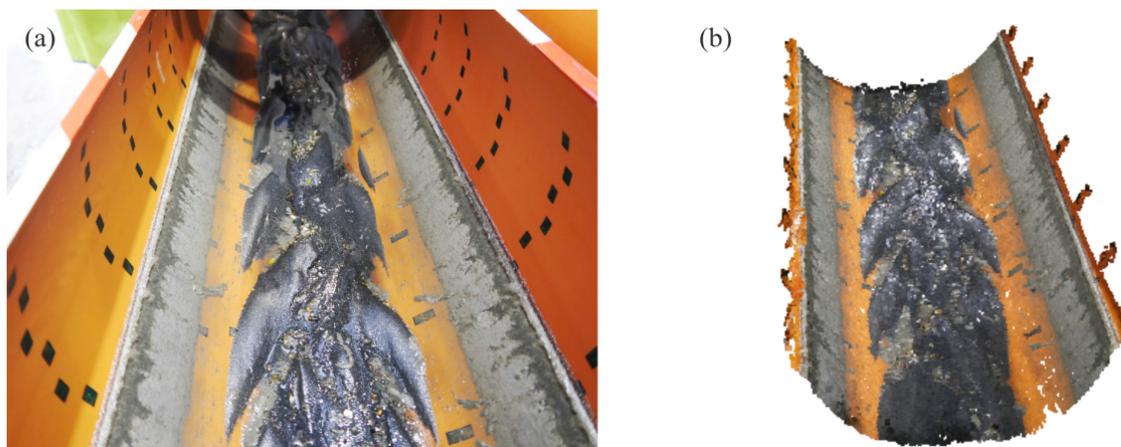


Figura 2 | Imagen del sedimento acumulado (a) y del modelo reconstruido (b) del contorno de la tubería con diámetro exterior de 315 mm.

Muestras de sedimentos

Las características de los sedimentos se registraron a través de muestras manuales durante el ensayo de larga acumulación y antes y después de cada uno de los ensayos de erosión. Para cada una de las muestras se estudiaron los parámetros físico-químicos siguiendo estándares internacionales (Tabla 1). En cuanto a los parámetros químicos, se han seleccionado la demanda química de oxígeno (DQO) y el ratio de oxígeno consumido (OUR, siglas en inglés: *Oxygen Uptake Ratio*). La DQO muestra un valor absoluto de la contaminación de la muestras mientras que el OUR es un indicador dinámico de la actividad biológica del sedimento muestreado.

Tabla 1 | Métodos utilizados para analizar los parámetros físico-químicos en las muestras de sedimentos.

Parámetro Físico	Método de analítica	Parámetro Químico	Método de analítica
Sólidos (ST, SV, w)*	2540 G, APHA (1998)	DQO	5220 D, APHA (1998)
Densidad	2710 F, APHA (1998)	OUR**	5210 D, APHA (1998)
Granulometría	ISO 13320:2009 e ISO 2591-1:1988		

* ST: sólidos totales; SV: sólidos volátiles; w: grado de humedad.

** Obtenido a partir del análisis de la DBO.

El análisis de la DQO del sedimento se ha realizado a partir de tres métodos de preparación de muestras propuestos por McGregor et al. (1993). Estas técnicas consisten en batir, agitar y mezclar la muestra de sedimentos añadiendo agua destilada a diferentes revoluciones (Tabla 2). Una vez agitada la muestra diluida, se centrifuga a 2000g durante 30 minutos para separar las fases sólido-líquido (similar a la norma de lixiviación de residuos granulares y lodos UNE-EN 12457-2:2002). Finalmente, el análisis de la DQO se realiza a partir del sobrenadante siguiendo el estándar APHA (1998) (Tabla 1).

Tabla 2 | Metodologías para la preparación de muestras para el análisis de la DQO en sedimentos siguiendo los trabajos de McGregor et al. (1993).

Método	Equipo	Código DQO	Dilución	Tiempo de agitación	Revoluciones
Batido	Batidora	DQO tipo I	1/3 durante batido y luego enrasar hasta 1/10	5 minutos	> 5,000 rpm
Agitación	Agitador magnético	DQO tipo II	1/10	2 horas	900 rpm
Mezcla	Agitador mecánico	DQO tipo III	1/10	2 horas	55 rpm

Para la medida del OUR se han utilizado equipos de respirometría Oxytop® (Weiheim, Alemania). Los valores de OUR se obtienen a partir de la pendiente de la curva de consumo de oxígeno después de 48 horas (Sadaka et al., 2006). Este parámetro está relacionado con la resistencia a la erosión del lecho de sedimentos, como se muestra en los estudios de Vollertsen y Hvitved-Jacobsen (2000) y Seco (2014). El objetivo en este estudio es estudiar la relación que guardan los parámetros químicos del sedimento con su cohesión y resistencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tipos de sedimentos acumulados

A pesar de que se establecieron unas condiciones hidráulicas constantes para el ensayo, se han identificado patrones diarios de las cargas contaminantes en el agua residual introducidas por el funcionamiento de la propia EDAR (Regueiro-Picallo et al., 2017). Para registrar estas variaciones, se monitorizó el agua residual en el depósito de cabecera con sondas calibradas a

través de un tomamuestras automático (muestras cada 6 horas), resultando una concentración de sólidos en suspensión totales (SST) de 224 ± 65 mg/L y de DQO de 414 ± 80 mgO₂/L. Este flujo de entrada de sólidos junto a las velocidades insuficientes en ambas tuberías provocaron la sedimentación de partículas en el fondo.

Dos tipos de sedimentos se identificaron en los contornos de ambas tuberías durante los ensayos. Por un lado, se registró la acumulación de un lecho granular y cohesivo en el fondo y, por otro lado, se observó la formación de biopelículas pegadas a las paredes de la tubería (Figura 3a); sedimentos Tipo A/C y Tipo D siguiendo la clasificación propuesta por Crabtree (1989). En la Figura 3b se muestran las diferencias entre las curvas granulométricas medias de cada uno de los tipos de sedimento frente a la granulometría de los sólidos a la entrada de las tuberías. El tamaño medio de partícula a la entrada (800 μ m) es mayor con respecto a los sedimentos acumulados debido a que estos sólidos están compuestos por partículas menos densas que las depositadas en el fondo (136 ± 11 μ m) y en las paredes (40 ± 2 μ m).

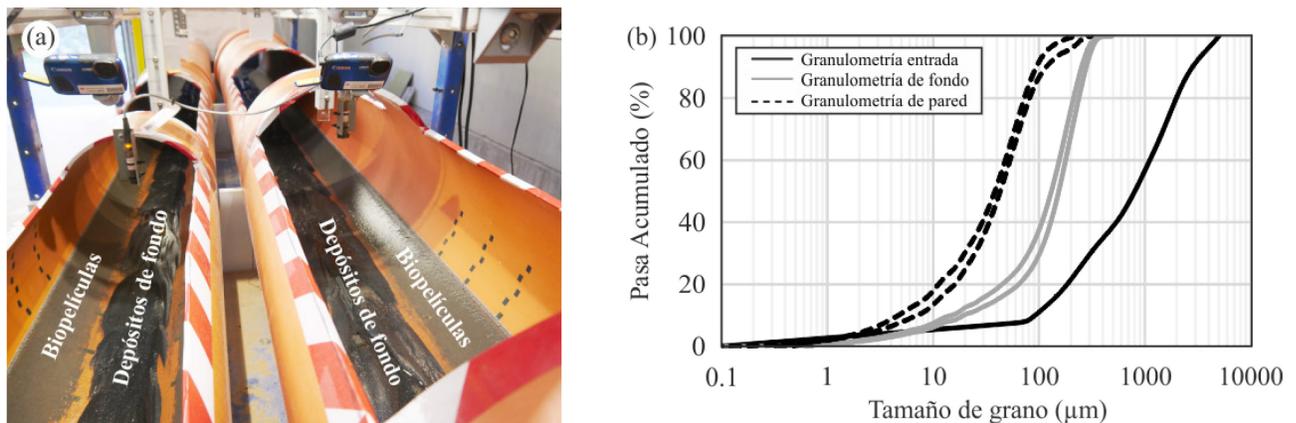


Figura 3 | Acumulación de dos tipos de sedimentos en los contornos de las tuberías (a) y representación de las distribuciones de los tamaños de grano de los sólidos que entran a las tuberías junto a las distribuciones mínima y máxima de los sedimentos de fondo y biopelículas (b).

Ensayo de larga acumulación

Al estudiar la evolución del lecho de sedimentos en las tuberías para las condiciones fijadas se ha registrado a partir de la técnica SFM un crecimiento inicial casi-lineal de la masa acumulada después de los seis primeros días (Figura 4). Como resultado se han obtenido ratios de acumulación de 3.10 y 3.16 mm/día para las tuberías de 315 y 400 mm respectivamente. Estos valores son similares a los obtenidos por Lange y Wichern (2013) de 2.85 mm/día y Regueiro-Picallo et al. (2017) de [1.4-3.8] mm/día para una tubería de 300 mm de diámetro interior.

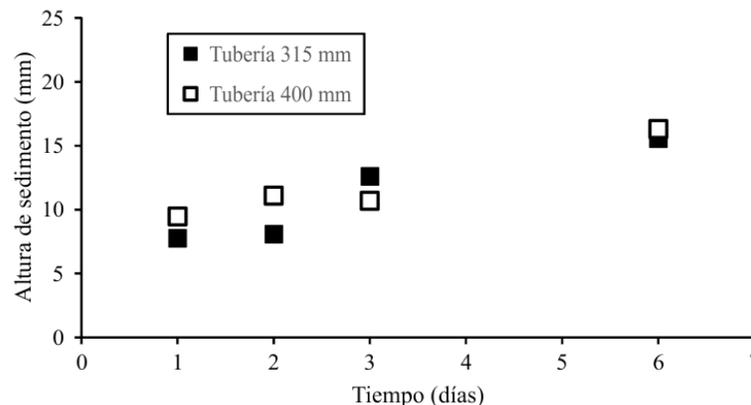


Figura 4 | Altura de sedimento depositado durante los seis primeros días en el ensayo de larga acumulación en las tuberías de 315 y 400 mm.

Durante el ensayo se han tomado tres muestras de sedimentos a los 3, 6 y 20 días del inicio de la acumulación. Para que los resultados fuesen representativos se ha muestreado en la misma abertura de cada tubería pero en diferentes secciones, con el objetivo de mantener las propiedades del sedimento inalteradas.

En la Tabla 3 se muestran los parámetros físico-químicos promediados para las tuberías de 315 y 400 mm. En general no se ha apreciado una tendencia temporal clara, únicamente los valores de materia orgánica (SV) y OUR muestran un descenso con el paso del tiempo indicando una pérdida de la actividad biológica del sedimento. En comparación con los datos de caracterización de sedimentos en estudios anteriores se han obtenido valores similares, exceptuando los valores de volátiles en los sedimentos Tipo D debido a pequeñas partículas inorgánicas atrapadas en la biopelícula próximas a la lámina de agua. Además se han registrado grandes diferencias con respecto a los valores de DQO tanto en los sedimentos Tipo A/C y Tipo D.

En función de la metodología de preparación de muestras escogida se han obtenido diferentes resultados de DQO del sedimento. El método de preparación DQO tipo I presenta mayores valores que los métodos tipo II y III en todas las muestras de sedimento Tipo A/C (Tabla 3). Este resultado se ajusta a los estudios de McGregor et al. (1993) y Ashley et al. (2004), lo cuales señalan una fracción contaminante de DQO diferente en función del método de preparación seleccionado. A partir del método de batido (DQO tipo I) se obtiene la DQO total contaminante del sedimento, mientras que con los métodos de agitación magnética y mecánica (DQO tipo II y III respectivamente) se consigue la DQO de la fracción fácilmente erosionable del sedimento. De las muestras tomadas en el ensayo de acumulación resulta un porcentaje del 42% de la fracción erosionable frente a la carga total contaminante de los sedimentos Tipo A/C, mientras como referencia se tiene valores del 25% y 57% para los sedimentos Tipo A y Tipo C respectivamente (Ashley et al., 2004).

Tabla 3 | Evolución de las propiedades físico-químicas de los sedimentos Tipo A/C y Tipo D durante el ensayo de larga acumulación (3días-Promedio-20días) comparados con valores promediados de estudios anteriores.

Parámetro	Sedimento Tipo A/C		Sedimento Tipo D	
	3 d-Promedio-20 d	Referencias ^{1),2),3)}	3 d-Promedio-20 d	Referencias ¹⁾
Densidad (kg/m ³)	1461- 1494 -1477	1544	1183- 1160 -1186	1210
Sólidos totales (%)	52.9- 56.3 -56.6	58.7	30.9- 27.9 -28.2	25.8
Sólidos volátiles (%)	12.1- 10.7 -11.3	14.4	19.1- 17.2 -14.7	61.0
d50 (µm)	125- 136 -138	63-2000	40- 40 -42	63-2000
DQO tipo I (g/kg)*	4.6- 4.0 -4.0	69.8	-	193
DQO tipo II (g/kg)*	1.5- 1.8 -2.7	-	17.9- 21.7 -14.8	-
DQO tipo III (g/kg)*	1.8- 1.6 -1.9	-	17.9- 19.7 -12.1	-
OUR (g/kg/día)*	13.3- 9.7 -5.9	6.5**	48.2- 34.6 -16.0	20.6**

Referencias: ¹⁾Crabtree (1989); ²⁾Ristenpart (1995); ³⁾Ashley et al. (2004).

*g/kg y g/kg/día respecto a valores de sedimento seco

**obtenidos a partir de los valores de DBO₅

Ensayos de erosión

Tres ensayos de erosión se han llevado a cabo bajo condiciones de entrada similares ($Q = 11.6 \pm 0.5$ L/s y SST = 323 ± 64 mg/L) en diferentes tiempos de acumulación de los sedimentos (3, 7 y 20 días). La masa erosionada de los sedimentos se ha calculado a partir de la diferencia entre el volumen de sólidos depositados antes y después del ensayo, utilizando la técnica SFM. La altura inicial de los sedimentos registrada fue de 7.3 ± 3.9 mm y 14.3 ± 2.0 mm en las tuberías de 315 y 400 mm respectivamente. A pesar de tener unas condiciones iniciales similares se ha registrado un descenso de la masa de sedimento erosionada a medida que el tiempo de acumulación en las tuberías crece (Figura 5a). Esta misma tendencia se observa al V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

estudiar las características físico-químicas del lecho de sedimento antes de cada ensayo (Figura 5b). La degradación y el descenso del contenido en materia orgánica en las muestras indican que existe una mayor cohesión del lecho. Estos resultados sugieren que la resistencia o la capacidad erosiva del sedimento está afectada por la actividad biológica del lecho, como también señalan los trabajos de Tait et al. (2003) y Seco et al. (2014). Por lo tanto, los sedimentos “frescos” depositados en las tuberías son más susceptibles a la erosión frente a un episodio de lluvia.

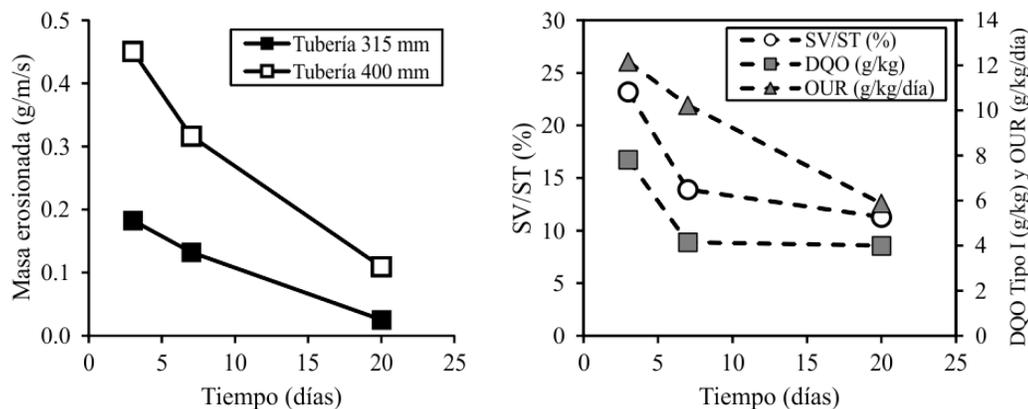


Figura 5 | Evolución de la tasa de erosión (a) y de las propiedades físico-químicas de las muestras de sedimento al inicio de cada ensayo (b) para distintos tiempos de acumulación en las tuberías.

Al estudiar la apariencia final del lecho de sedimentos en la tubería de 400 mm se ha observado la formación de pequeñas dunas o “ripples”, mientras que en la tubería de 315 mm se registra un lecho plano debido principalmente al menor ancho de la superficie final de sedimento (<100 mm) (Figura 6). Durante los ensayos de erosión se ha registrado un valor del número de Froude (F) de 0.51 y 0.44 en las tuberías de 315 y 400 mm respectivamente, donde $F=U/(gA/T)^{0.5}$, U es la velocidad media del flujo (m/s), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), A es el área (m^2) y T es el ancho de la lámina de agua (m). Además, para caracterizar a estas dunas se registró una altura de 2, 6 y 3 mm y una longitud de 56, 83 y 72 mm después de cada ensayo de erosión con tiempos de acumulación de 3, 7 y 20 días respectivamente. Las formaciones en el lecho son responsables de una fracción de la tensión de corte del lecho de sedimentos. La tensión de corte del lecho se divide en el esfuerzo cortante de las partículas y en la tensión debida a las formas de fondo (Banasiak y Tait, 2008), por lo que a partir de la metodología SFM se puede obtener una información más precisa de la tensión de corte en la superficie del lecho.

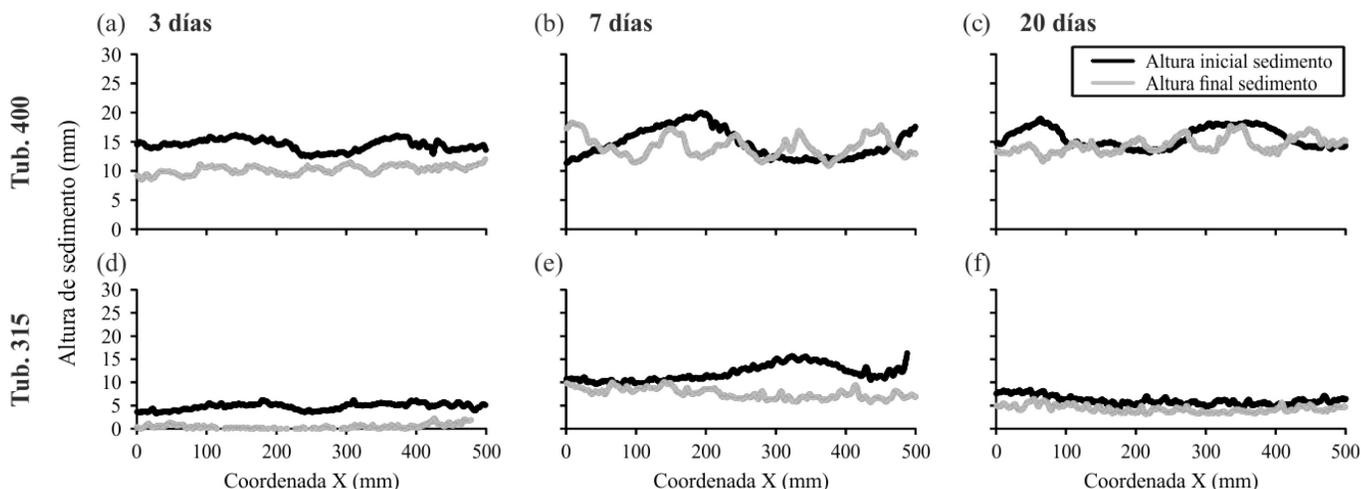


Figura 6 | Distribución inicial y final del lecho de sedimentos para diferentes tiempos de acumulación en las tuberías de 400 mm (a), (b), (c) y 315 mm (d), (e), (f).

CONCLUSIONES

Una serie de ensayos de acumulación y erosión se han llevado a cabo en dos conducciones circulares de PVC (diámetros exteriores de 315 y 400 mm) bajo diferentes condiciones hidráulicas de entrada en un canal de ensayos alimentado con agua residual urbana. Durante los ensayos se ha registrado la acumulación de sólidos y se han tomado muestras de sedimentos de los contornos de las tuberías, diferenciando entre sólidos granulares en el fondo y biopelículas en las paredes. Se ha utilizado la técnica fotogramétrica SFM para calcular el volumen de partículas sólidas acumuladas. Además, a partir de las muestras de sedimentos se han analizado sus propiedades físico-químicas.

A partir del estudio de larga acumulación se han analizado tres muestras de sedimentos tomadas después de 3, 6 y 20 días del inicio del ensayo. Los valores de sólidos volátiles y OUR mostraron una tendencia a decrecer a medida que aumenta el tiempo de acumulación de los sedimentos en el lecho de las tuberías. Este resultado indica que los sedimentos “frescos” tienen una mayor degradación y menor cohesión con respecto a las muestras tomadas después de varias semanas. Además, la mayoría de los parámetros físico-químicos presentan valores similares a los obtenidos en campañas experimentales durante décadas pasadas. A pesar de ello, se encontraron diferencias en los valores de DQO total de todas las muestras y en la fracción volátil de las biopelículas.

Los ensayos de erosión se realizaron bajo condiciones hidráulicas y de altura de sedimento inicial similares con el objetivo de estudiar la influencia del tiempo de acumulación en los procesos de erosión del lecho. Para ello, se ensayaron tres períodos de consolidación del sedimento en el fondo de las tuberías de 3, 7 y 20 días. Para cada uno de los ensayos se ha registrado el volumen de sólidos antes y después de cada ensayo, resultando una menor tasa de erosión a medida que el tiempo de consolidación aumenta. Este descenso de la masa erosionada coincide con valores más bajos de las propiedades químicas (DQO y OUR) y porcentaje de volátiles en las muestras de sedimento anteriores al ensayo. Por lo tanto, para un mayor tiempo de consolidación de los sedimentos en las tuberías se tiene una mayor resistencia y cohesión del lecho.

En la reconstrucción 3D de la tubería de 400 mm obtenida a partir de la técnica de SFM se ha podido distinguir formas de fondo al final de los ensayos de erosión. La principal ventaja de este método es la información completa de la superficie del lecho, permitiendo un cálculo más preciso del volumen de sólidos depositados y la posibilidad de estudiar la influencia de estas formaciones en la tensión de corte en la superficie del lecho.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el MINECO y el programa FEDER a través de los proyectos “SEDUNIT” (Ref. CGL2015-69094-R) y “OVALPIPE II” (Ref. RTC-2016-4987-5). El trabajo de investigación de Juan Naves está financiado por la beca FPU14/01778. Los autores también quieren agradecer a las empresas EDAR Bens SA y ABN Pipe Systems SLU y al trabajo de Montse Recarey por su colaboración durante la campaña experimental.

REFERENCIAS

- Ashley, R., Bertrand-Krajewski, J.-L., Hvitved-Jacobsen, T., Verbanck, M. 2004. *Solids in sewers*. Scientific & Technical Report No. 14. IWA Publishing, London, UK.
- APHA 2008. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 1998 20th edn*. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- Banasiak, R., Tait, S. 2008. The reliability of sediment transport predictions in sewers: influence of hydraulic and morphological uncertainties. *Water Science and Technology* 57(9), 1317-1327.
- Crabtree, R.W. 1989. Sediments in sewers. *Water and Environment Journal* 3(6), 569-578.

- Detert, M., Huber, F., Weitbrecht, V. 2016. Unmanned aerial vehicle-based surface PIV experiments at Surb Creek. *In River Flow 2016*, Julio 12-15, St. Louis, MO, USA, 563-568.
- ISO 13320:2009. *Particle size analysis. Laser diffraction methods*. International Organization for Standardization, Ginebra.
- ISO 2591-1:1988. *Test sieving. Part 1: Methods using test sieves of woven wire cloth and perforated metal plate*. International Organization for Standardization, Ginebra.
- Lange, R.L., Wichern, M. 2013. Sedimentation dynamics in combined sewer systems. *Water Science and Technology* 68(4), 756-762.
- McGregor, I., Ashley, R.M., Oduyemi, K.K. 1993. Pollutant release from sediments in sewer systems and their potential for release into receiving waters. *Water Science and Technology* 28(8/9), 161-169.
- Rammal, M., Chebbo, G., Vazquez, J., Joannis, C. 2017. Do storm events samples bias the comparison between sewers deposits contribution? *Water Science and Technology* 75(2), 271-280.
- Regueiro-Picallo M., Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Puertas, J. 2017. Monitoring accumulation sediment characteristics in full scale sewer physical model with urban wastewater. *Water Science and Technology* 76(1), 115-123.
- Ristenpart, E. 1995. Sediment properties and their changes in a sewer. *Water Science and Technology* 31(7), 77-83.
- Rushforth, P.J., Tait, S.J., Saul, A.J. 2003. Modeling the erosion of mixtures of organic and granular in-sewer sediments. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(4), 308-315.
- Sadaka, S.S., Richard, T.L., Loecke, T.D., Liebman, M. 2006. Determination of compost respiration rates using pressure sensors. *Compost Science & Utilization* 14(2), 124-131
- Seco, I. 2014. *In-sewer organic sediment transport. Study of the release of sediments during wet-weather from combined sewer systems in the Mediterranean region in Spain*. PhD Thesis, UPC, Barcelona, Spain.
- Seco, I., Valentín, M.G., Schellart, A., Tait, S. 2014. Erosion resistance and behaviour of highly organic in-sewer sediment. *Water Science and Technology* 69(3), 672-679.
- Suarez, J., Puertas, J. 2005. Determination of COD, BOD, and suspended solids loads during combined sewer overflow (CSO) events in some combined catchments in Spain. *Ecological Engineering* 24(3), 199-217.
- Suárez, J., Anta, J., Puertas, J., Naves, J., Regueiro-Picallo, M. 2015. Plataforma de ensayos para conducciones con agua residual urbana en la EDAR de A Coruña. *IV Jornadas de Ingeniería del Agua*, Octubre 21-22, Córdoba, España, 851-858.
- Tait, S.J., Marion, A., Camuffo, G. 2003. Effect of environmental conditions on the erosional resistance of cohesive sediment deposits in sewers. *Water Science and Technology* 47(4), 27-34.
- UNE-EN 12457-2:2002. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 2: Ensayo por lotes de una etapa para una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño). Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.
- Vollertsen, J., Hvitved-Jacobsen, T. 2000. Resuspension and oxygen uptake of sediments in combined sewers. *Urban Water* 2(1), 21-27.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., Seitz, S.M. 2011. Multicore bundle adjustment. *In Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 3057-3064.
- Wu, C. 2013. Towards Linear-time Incremental Structure From Motion. *In 2013 International Conference on 3D Vision-3DV 2013*, 127-134.