

Estimación mediante SWMM 5.0 del transporte de sedimentos depositados durante tiempo seco en conductos de alcantarillado unitario

Raquel Irene Seco¹, Manuel Gómez Valentín²

¹Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. irene.seco@estudiant.upc.edu

²Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. Grupo de Investigación FLUMEN. manuel.gomez@upc.edu

1 Introducción

1.1 El problema de la contaminación

En los últimos años, la creciente preocupación por los vertidos desde sistemas unitarios de alcantarillado a medios naturales receptores, y el establecimiento de estrictas normas ambientales en el ámbito europeo, ha impulsado el interés por optimizar la gestión de los sistemas de drenaje, de modo de reducir los problemas de contaminación y el impacto ecológico que producen sus vertidos.

Si a esto sumamos el hecho de que, durante la estación seca, muchos de los ríos de la región Mediterránea presentan un caudal circulante escaso, la capacidad de dilución del medio receptor es reducida, acentuándose los problemas de contaminación de los cauces, que a menudo implican el no cumplimiento de las normativas de calidad de las aguas.

El alcantarillado unitario está diseñado para transportar grandes caudales durante los períodos de lluvia, pero esto promueve consecuentemente la sedimentación de partículas cuando el caudal del sistema no tiene suficiente energía para mantener en movimiento el sedimento. Como resultado se produce una acumulación progresiva de partículas en el interior de los conductos durante el tiempo seco. A su vez, los sólidos acumulados en el sistema de alcantarillado unitario, constituyen uno de los problemas más importantes en términos de reducción de la capacidad de drenaje y tienen un efecto importante en la resistencia hidráulica. Como consecuencia de esto, la acumulación progresiva de sedimentos permite la activación anticipada de los vertederos del sistema.

Altos niveles de partículas sólidas y otros contaminantes asociados a éstas se observan en los caudales vertidos desde sistemas unitarios al medio fluvial receptor durante el período inicial de una tormenta. Las investigaciones en este campo sugieren que la principal fuente de sólidos está vinculada al proceso de erosión y re-suspensión de los sedimentos depositados en los conductos del sistema durante el periodo seco antecedente al evento de precipitación (Tait, Chebbo, Skipworth, Mathieu Ahyerre, & Saul, 2003). Por su parte, los sólidos contenidos en los caudales vertidos desde sistemas unitarios están constituidos por una gran cantidad de material orgánico con niveles importantes de DBO₅ (Arthur, Ashley, Tait, & Nalluri, 1999), contribuyendo en forma significativa al fenómeno de contaminación por primer lavado (Gromaire, Garnaud, Saad, & Chebbo, 2001) , (M Ahyerre, Chebbo, & Saad, 2001), (Ashley, B. Crabtree, Fraser, & Hvitved-Jacobsen, 2003).

1.2 Particularidades del transporte de sólidos en conductos de alcantarillado unitario

En los estudios de movimiento de partículas individuales desarrollados para cauces, se asume que las partículas tienen una forma, tamaño y densidad uniforme, y que no tienen propiedades cohesivas. No obstante, los sólidos de alcantarillado depositados en el interior de las conducciones durante el tiempo seco, exhiben generalmente cohesión debido a la naturaleza orgánica de sus partículas, y a la presencia de limos y grasas. Las fuerzas electroquímicas que actúan entre las partículas generando la cohesión pueden exceder las fuerzas hidrodinámicas o de inercia, lo que genera un efecto muy marcado sobre la condición de inicio del movimiento. La tensión crítica de corte se incrementa en varios órdenes de magnitud y cuando se supera, ocurre un colapso repentino de la estructura del depósito (Delleur, 2001)

Sin embargo, si bien la cohesión altera el inicio del movimiento del estrato depositado en el colector, la influencia de la cohesión en la forma en la cual el sedimento se mueve en el flujo de agua puede no ser tan significativa, de acuerdo a resultados experimentales llevados a cabo con sedimento cohesivo sintético realizados por Butler (Butler, May, & Ackers, 2003). Una vez perturbada la estructura cohesiva del depósito, las partículas son re suspendidas y transportadas por el flujo de agua en un modo similar a los sedimentos no cohesivos.

Los procesos que intervienen en el transporte de sedimentos ante la acción del agua en movimiento dentro de un sistema de alcantarillado unitario, dependen tanto de las propiedades del sedimento en sí como de las condiciones presentes en el flujo de agua, y ambas se manifiestan con una variabilidad importante.

La geometría típica de los conductos de alcantarillado, las condiciones de no homogeneidad y propiedad cohesiva, antes mencionada, de los sedimentos transportados por las aguas de los sistemas unitarios, y las reacciones químicas y biológicas que se producen entre ellos, complica en gran medida el desarrollo de modelos para el transporte de partículas en sistemas de drenaje urbano.

Por otra parte, las ecuaciones clásicas del transporte de sedimentos desarrolladas para ríos, actualmente aplicadas por algunos modelos comerciales de simulación, pueden no ser adecuadas para conducciones de alcantarillado de acuerdo a los resultados de estudios realizados en el área. (Ashley et al. 2003a). La evidente complejidad del problema requiere mayores esfuerzos de investigación para el diseño de metodologías que sean aplicables al problema real para el diseño y gestión de sistemas de alcantarillado unitario.

1.3 Elección de SWMM 5.0 para el desarrollo de la metodología

El programa EPA SWMM 5.0 (Storm Water Management Model), es un modelo dinámico de simulación hidrológica que permite analizar el comportamiento hidrodinámico en términos de cantidad de escorrentía como en calidad, principalmente para áreas urbanas (Rossman, 2009). Desarrollado por la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos, es de dominio público y código abierto.

SWMM 5.0 permite predecir la evolución de los parámetros de calidad durante un evento de tormenta. El modelo de cálculo de sólidos erosionados y transportados de SWMM 5.0 (modelo de calidad), permite actualmente la predicción de la carga sólida que sólo considera la acumulación y lavado de sedimentos depositados en las superficies de las cuencas de aporte (Gironás, Roesner, & Davis, 2009) (Rossman, 2009), sin contemplar la influencia de la sedimentación de partículas dentro de las conducciones.

En este contexto, este trabajo aborda el desarrollo de una metodología que permita determinar, en una primera aproximación, la valoración de la carga sólida y su evolución en el tiempo durante un evento de tormenta, asociada a los materiales previamente depositados en la red de alcantarillado durante el periodo seco, que pueda ser aplicada mediante las herramientas de las que ya dispone el software de dominio público SWMM 5.0.

Se presentan en este comunicado los resultados de un procedimiento de cálculo sobre el que se continúa trabajando de modo tal que permita, a futuro, contemplar las particularidades de los sólidos de alcantarillado unitario tales como la cohesividad entre partículas. Es por ello que, como se verá más adelante, se introducen algunas simplificaciones para la implementación y verificación inicial de la metodología.

Consideramos que la introducción en SWMM 5.0 de esta metodología en la simulación de la carga sólida supone una mejora en la capacidad de trabajo actual de este software, permitiendo contemplar el proceso de erosión y re-suspensión de sólidos preexistentes en el interior de sistemas unitarios, que hasta ahora no es considerada.

Los resultados obtenidos hasta el momento confirman el ajuste de la predicción en la evolución de la carga sólida total, y la aplicabilidad general de la metodología a redes de alcantarillado unitaria.

La aplicación de éste u otros modelos predictivos de la erosión de sólidos dentro de las conducciones permite obtener, entre otros, información para un primer análisis de la distribución temporal y espacial de las emisiones de la contaminación, herramienta esencial como apoyo a la toma de decisiones para mejorar el control de la contaminación intermitente por vertidos desde sistemas unitarios. Además proporciona información de los patrones de carga que llegan a una planta depuradora o a un depósito de retención al inicio de un evento de tormenta, permitiendo introducir una planificación más racional de los recursos.

2 Objetivo

El trabajo que se presenta en esta comunicación tiene por objetivo desarrollar una metodología para valorar la carga sólida transportada desde el interior del conducto durante un evento de lluvia, partiendo del conocimiento de la cantidad de sedimento depositado durante el periodo seco antecedente, y aprovechando las herramientas de cálculo incluidas originalmente en SWMM 5.0.

3 Metodología propuesta

3.1 Acumulación de sedimentos durante tiempo seco

La valoración de la carga sólida vertida desde sistemas unitarios al medio receptor está asociada en forma directa a los depósitos sólidos en el interior de las conducciones durante el tiempo seco en el que sólo circulan caudales residuales. La evaluación cuantitativa y análisis de la solución a los problemas de contaminación por vertidos involucra, entre los aspectos a considerar, la determinación del volumen de sólidos efectivamente depositado y distribuido en el sistema bajo condiciones de escurrimiento durante el tiempo si precipitación.

Resulta entonces necesario, previo al análisis del arrastre del material durante eventos de lluvia, definir patrones de sedimentación para determinar las zonas del sistema con más tendencia a depositar, dado que la acumulación de sólidos no se manifiesta de manera uniforme en todos los tramos de un sistema de alcantarillado. Luego de ese análisis debemos cuantificar el volumen de sedimento que queda retenido durante el tiempo seco antecedente al evento de tormenta en análisis.

El análisis de tendencias de sedimentación y la determinación del volumen del estrato de sólidos acumulado se llevó a cabo mediante la aplicación del método predictivo desarrollado por William Pisano (William C Pisano, Aronson, C. S. Queiroz, Blanc, & O' Shaughnessy, 1979), (William C Pisano, C. Queiroz, Aronson, Blanc, & O' Shaughnessy, 1981) para la U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Si bien para la implementación de este trabajo se realizó la estimación de la sedimentación dentro de conductos utilizando esta metodología, se pueden utilizar mediciones de campo en caso de contar con éstas.

Para simplificar esa estimación, consideramos en este trabajo que durante el tiempo transcurrido desde el inicio de la formación del depósito de fondo hasta su arrastre total, no se producen cambios físicos ni químicos en el material depositado.

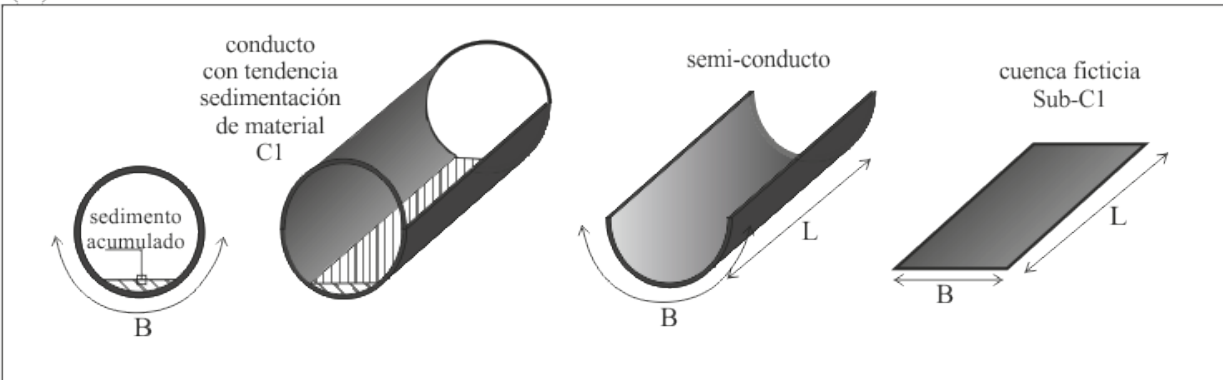
3.2 Analogía conducto real - cuenca ficticia

A efectos de evaluar el transporte de sedimentos dentro del alcantarillado con la premisa de utilizar las herramientas que ya dispone SWMM 5.0, se plantea contemplar los procesos de erosión en el conducto, asimilándolos con un elemento subcuenca (*subcatchment*), que se pueda considerar hidráulicamente equivalente al conducto real, y que denominaremos en adelante como "cuenca ficticia".

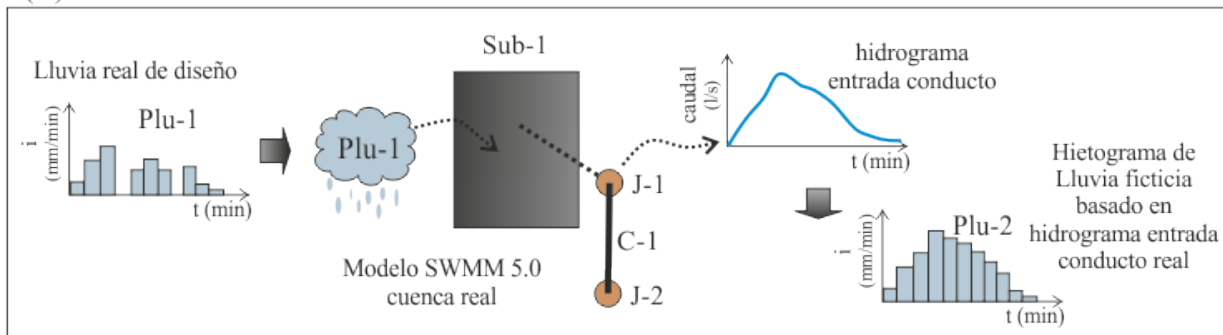
Teniendo en cuenta las consideraciones que a continuación se detallan, podemos fijar los parámetros básicos de la cuenca ficticia para definir el elemento correspondiente en SWMM 5.0. (véase *Figura 1. (A) Definición cuenca ficticia*). El área, ancho y longitud de la cuenca ficticia la obtenemos como el desarrollo del semi-cilindro correspondiente a la mitad inferior del conducto, asumiendo la hipótesis simplificativa de que para caudales medios transportados, el calado no supera el radio del conducto. La pendiente y rugosidad mantienen los valores originales del conducto de análisis. Y consideramos finalmente que el material del conducto es totalmente impermeable, y que debido a las condiciones de su superficie interna, no se produce encharcamiento en el mismo.

Por otra parte, la información de la lluvia a utilizar para la obtención del sedimentograma de salida en la cuenca ficticia debe ser diferente al evento de precipitación real que se produce y efectivamente escurre sobre la cuenca piloto de estudio. Esta afirmación se basa en el hecho de que el hidrograma de escurrimiento en la cuenca ficticia debe ser el mismo que se originaría en el conducto real debido al evento de precipitación real, que es el que originará la erosión de los sólidos depositados y su transporte. Si tomáramos el mismo evento de precipitación en ambas cuencas, real y ficticia, el hidrograma obtenido en la ficticia sería muy diferente en volumen al que circulará por el conducto, aunque conserve la forma.

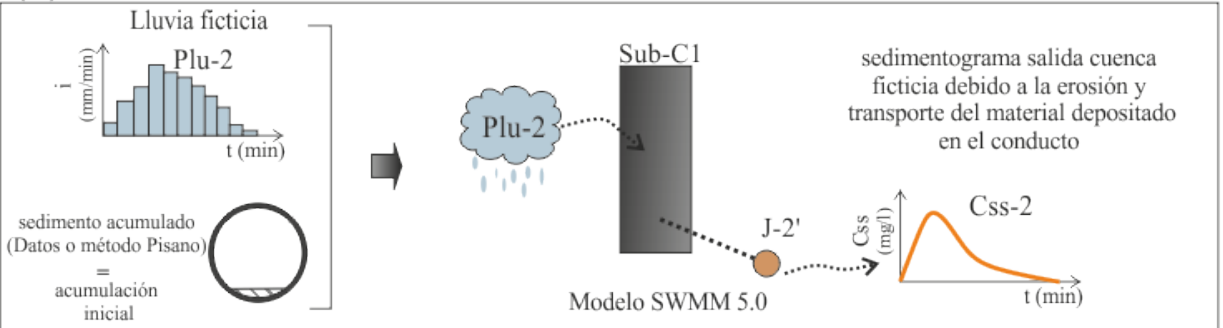
(A) Definición cuenca ficticia



(B) Determinación lluvia ficticia



(C) Simulación cuenca ficticia en SWMM 5.0



(D) Determinación sedimentograma final

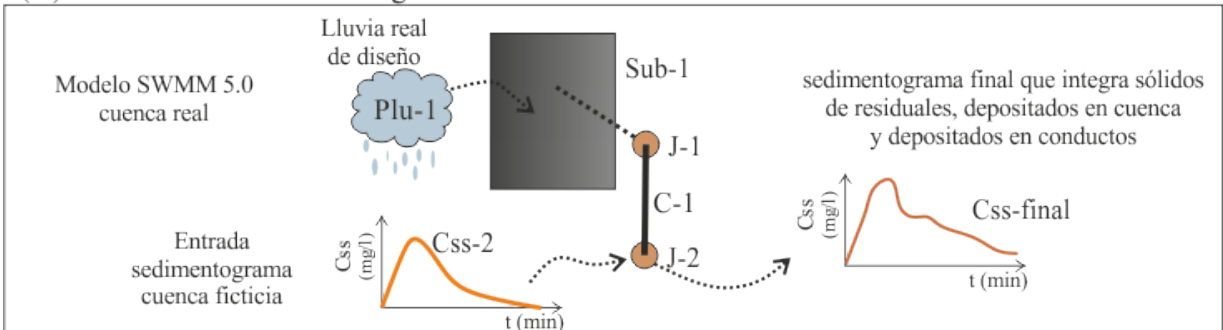


Figura 1. Diagrama esquemático de la metodología planteada para la obtención de la carga contaminante que considere el aporte superficial y el del interior de los conductos

La primera etapa de simulación en SWMM 5.0 contempla por ello la construcción y calibración de un modelo hidrológico e hidráulico detallado de la zona en estudio, del cual se obtienen los hidrogramas de entrada a los conductos del sistema en los que se prevea sedimentación durante el tiempo seco. Se esquematiza este procedimiento en la *Figura 1. (B) Determinación lluvia ficticia*.

Teniendo en cuenta que para cuencas regulares en forma y área pequeña el hidrograma de escurrimiento presenta el mismo aspecto que el hietograma de precipitación, definimos un evento de lluvia equivalente o ficticio basado en la forma del hidrograma obtenido en la entrada del conducto real. La intensidad de la precipitación ficticia en cada intervalo se determina como la relación del caudal real en el conducto con el área de la cuenca ficticia. Siguiendo este procedimiento, hemos verificado que la respuesta en caudal de la cuenca ficticia ante el evento ficticio es equivalente a la respuesta en caudal del conducto real dentro del sistema ante el evento de precipitación real, con errores en volumen menores al 1%, que son perfectamente asumibles (*Figura 2*).

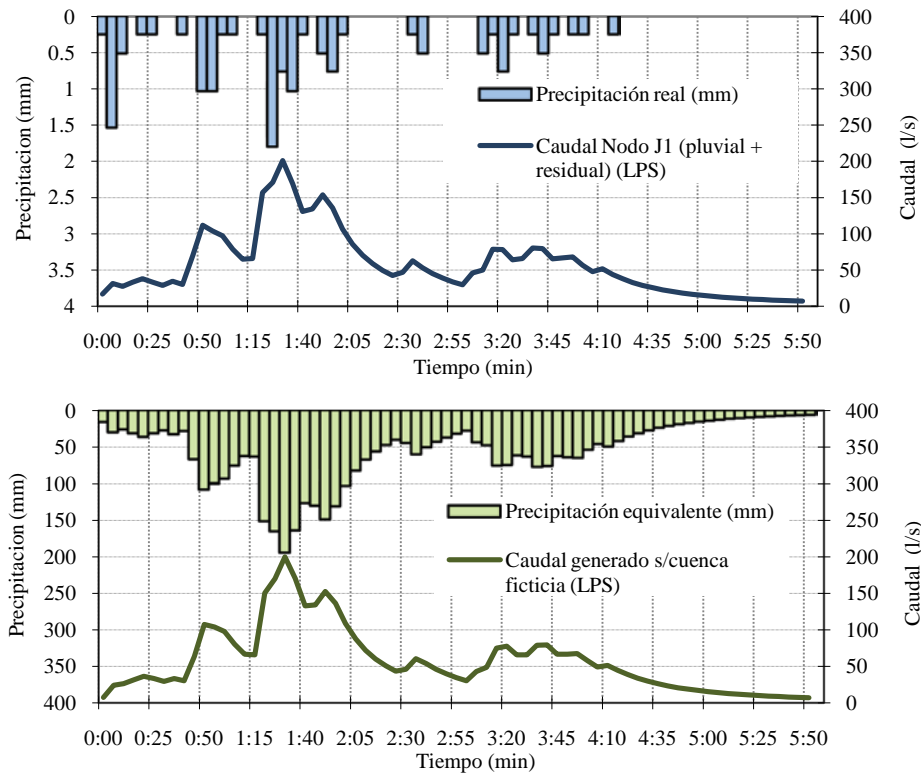


Figura 2. Hidrograma de escurrimiento en cuenca real originado por el evento de precipitación real del 08/05/2010, e Hidrograma de escurrimiento en cuenca ficticia asociado al evento ficticio de precipitación.

De la aplicación del método de Pisano o bien a partir de campañas de medición en los conductos de estudio, hemos previamente obtenido el espesor correspondiente al depósito de sólidos. Este espesor de sedimento acumulado durante el tiempo seco se introduce en SWMM 5.0 como un parámetro de acumulación inicial dentro de las propiedades de la cuenca ficticia (*Initial Buildup*), en unidades de masa distribuida por superficie.

Mediante un proceso de calibración se adecúan los valores de los parámetros de las funciones de acumulación (*build up*) y lavado (*wash off*) con el objetivo de ajustar el sedimentograma de salida del modelo de cuenca ficticia, al sedimentograma que denominamos real, tal como se muestra en la *Figura 3* para eventos de precipitación que se toman como ejemplo. Debido a no contar con medidas reales de la evolución de los sólidos a la salida del conducto real, el sedimentograma que denominamos real y que permite la calibración del modelo de sólidos, se obtuvo previamente mediante la aplicación de la aproximación empírica de van Rijn para arrastre de fondo (Van Rijn, 1984) (Van Rijn, 1993).

Para la aplicación de la formulación de van Rijn de transporte de sedimentos de fondo es necesario definir previamente parámetros característicos de los sólidos del alcantarillado. Debido a no contar hasta la finalización de este trabajo con datos locales de caracterización de sedimentos, se adoptaron parámetros de densidad de partículas uniforme de 2520 kg/m³ (R. W. Crabtree, Ashley, & Gent, 1995) y tamaños de partícula $d_{50}=0.75\text{mm}$.

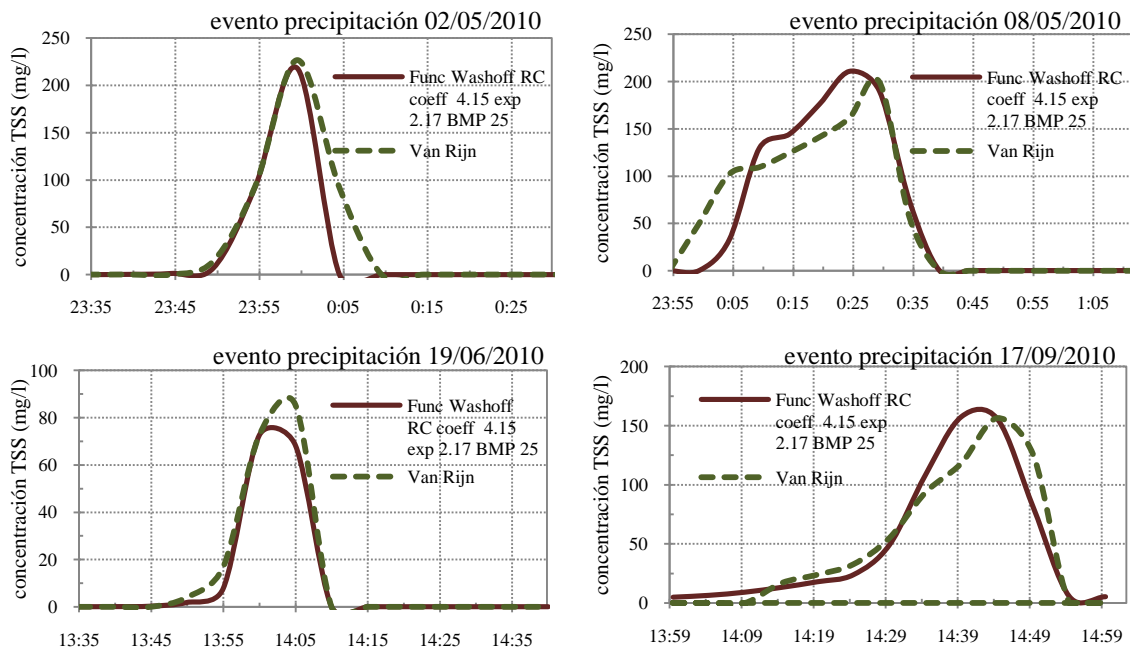


Figura 3. Polutogramas de sólidos según aproximación de van Rijn y resultados obtenidos con metodología de cuenca ficticia en SWMM, e Hidrogramas de escurrimiento que los generan.

Efectuando la simulación en SWMM 5.0 de estos modelos de cuenca ficticia (Figura 1. (C) Simulación cuenca ficticia en SWMM 5.0), partiendo de la acumulación inicial durante el tiempo seco antecedente al evento de precipitación real y aplicando el correspondiente hietograma de lluvia ficticia, obtenemos la evolución en el tiempo de la carga sólida por efecto del lavado o erosión dentro de los conductos de análisis.

3.3 Sedimentograma final

Finalmente, introducimos el sedimentograma correspondiente a la evolución del proceso de erosión de sólidos en la cuenca ficticia determinado en el paso (C) de la Figura 1, como una entrada directa (*Inflow*), en términos de masa por unidad de tiempo, en el nodo de salida del conducto real. (Figura 1 (D) Determinación sedimentograma final).

Como resultado de una nueva simulación del modelo real, se obtiene un sedimentograma de salida que integra las dos fuentes de material sólido. Es decir que con esta modificación introducida en el modelo inicial, se obtiene como resultado la evolución de la carga total de sólidos que buscamos, que contempla tanto el proceso de lavado en la superficie de la cuenca como el producido dentro del conducto con tendencia a sedimentar en tiempo seco.

3.4 Consideración de polutogramas para otros contaminantes asociados

La presencia de materia orgánica, medida a través del parámetro DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno), el contenido de Nitrógeno total, de NH_4 (amonio) etc., afectan la calidad de las aguas receptoras, siendo una situación relevante en el estudio aplicado del impacto ante vertidos.

La estimación de la carga contaminante por materia orgánica y nitrógeno asociada a los sólidos de residuales depositados durante el tiempo seco, puede ser de complicada estimación si tenemos en cuenta las reacciones químicas y biológicas que se producen entre ellos durante el tiempo que estén depositados en los conductos, previo a su lavado por efecto del caudal de tormenta. No consideramos por ello, su presencia en el modelo de calidad planteado exclusivamente para sólidos mediante la metodología de la cuenca ficticia.

Sin embargo, del mismo modo que ya lo permite considerar SWMM 5.0, es posible conocer también la evolución en el tiempo a la salida de la cuenca de otros contaminantes asociados a los sólidos, considerando que se trata de una fracción de éstos, aceptando para ello la hipótesis de que los procesos de acumulación y de lavado

de contaminantes tales como DBO₅ y NH₄ siguen la misma ley que para los sólidos, y que la relación entre ellos se mantiene constante.

4 Aplicación del modelo. Resultados y Análisis

Para la verificación de la metodología propuesta se tomó como zona de estudio una cuenca piloto ubicada en la zona urbana de la localidad de Granollers, en la comunidad autónoma de Cataluña, España, tomándose para la calibración del modelo hidrológico e hidrodinámico los datos de precipitaciones y caudales de escurrimiento medidos durante la campaña de muestreo realizada desde el mes de mayo de 2010.

Previo a la aplicación de la metodología, se analizó el sistema de alcantarillado a fin de determinar los tramos de conducciones con tendencia a sedimentar según las condiciones de pendiente, diámetro y densidad poblacional del área de aporte. Luego, mediante la aplicación del método predictivo de Pisano, se determinó el volumen de sólidos acumulados en esos conductos para un período antecedente de días secos previos al evento de precipitación de 20 días.

Analizando el conducto de salida de la cuenca piloto de estudio, y de la aplicación de diferentes eventos de precipitación sobre la cuenca ficticia para ese conducto, se obtuvieron los sedimentogramas que se muestran como ejemplos en las gráficas de la *Figura 3* antes presentada. Podemos observar comparativamente para distintos eventos de lluvia analizados, la evolución en el tiempo de la carga de sólidos a la salida de la cuenca ficticia, que representa el proceso de erosión, re-suspensión y transporte dentro del conducto, y esa misma evolución determinada mediante el procedimiento empírico de van Rijn que tomamos de referencia. Notaremos que los valores del polutograma de sólidos de van Rijn son aproximados a los obtenidos mediante la metodología propuesta de cuenca ficticia, si bien se evidencia una diferencia en la masa total erosionada, y una tendencia inicial de erosión más abrupta en el instante inicial del proceso erosivo. A pesar de estas observaciones, si comparamos el valor de la máxima concentración de sólidos de salida obtenida con ambos procedimientos (*Tabla 1*), veremos que la diferencia es menor a un 10%, por lo que la podemos considerar admisible. Igualmente analizando la masa total de sólidos erosionada, si bien el ajuste es menos eficaz, podemos considerarlo suficiente.

Tabla 1. Comparación de la concentración máxima y masa total de sólidos obtenida de la aplicación de la metodología de cuenca ficticia y el procedimiento de van Rijn

Evento de precipitación	<i>Máxima concentración TSSc (mg/l)</i>			
	02/05/2010	08/05/2010	19/06/2010	17/09/2010
procedimiento van Rijn	226.72	199.59	85.47	156.44
cuenca ficticia	211.76	210.79	72.52	157.60
diferencia	6.60%	5.61%	15.15%	0.74%
	<i>Masa total de sólidos (kg)</i>			
procedimiento van Rijn	9.257	8.204	10.830	9.397
cuenca ficticia	10.571	8.810	8.713	9.643
diferencia	14.19%	7.38%	19.54%	2.62%

Tal lo indicado en la esquematización de la metodología, el sedimentograma final se obtiene a partir de una tercera simulación en SWMM 5.0, previa incorporación de los sedimentogramas obtenidos para las cuencas ficticias como entradas al sistema en los puntos de salida de cada conducto de análisis. Este sedimentograma integra las fuentes de sólidos provenientes de la escorrentía superficial, los propios de las aguas residuales, y los lavados desde el interior de los conductos.

En la *Figura 4* se muestran los resultados obtenidos para el evento de lluvia del día 17/09/2010 que se toma de ejemplo. Es importante notar que el efecto del lavado en el interior del conducto no se obtiene con el modelado normal de la cuenca en SWMM 5.0 (sedimentograma SWMM normal) tal como puede evidenciarse en la gráfica, y que su influencia puede ser relevante en la calidad del agua al inicio de la tormenta.

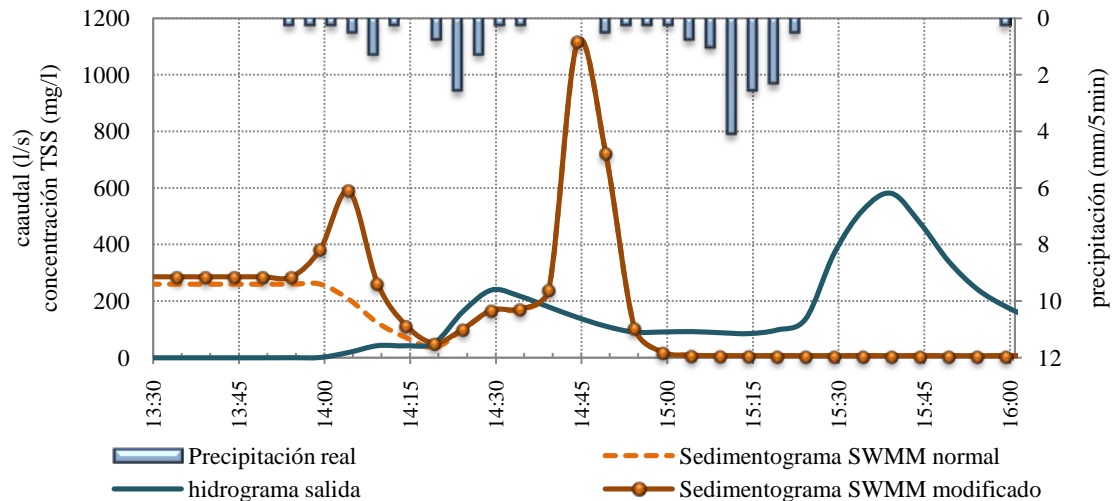


Figura 4. Hidrograma de escurrimiento para evento de lluvia del 17/09/2010, y sedimentograma de salida de la cuenca piloto evaluados mediante modelo en SWMM original y nueva metodología.

Para el mismo evento puede observarse también a través de una curva de doble masa acumulada como la de la Figura 5, que habiendo transcurrido aproximadamente 1hs desde el inicio de la precipitación en la cuenca de estudio, ante el escurrimiento del 25% del caudal total asociado al evento, se registra el aporte de alrededor del 93% de la carga sólida total. Este tipo de respuesta, donde comparativamente altas concentraciones de sedimentos se observan dentro del flujo de alcantarillado al inicio de una tormenta se conoce como fenómeno de primer lavado, o por su nombre en inglés: first flush. En los casos que estudiamos y de la aplicación de la metodología propuesta, se observa que la ocurrencia de este fenómeno está influenciada tanto por el lavado de las superficies impermeables de la cuenca como el que ocurre en el interior de los conductos.

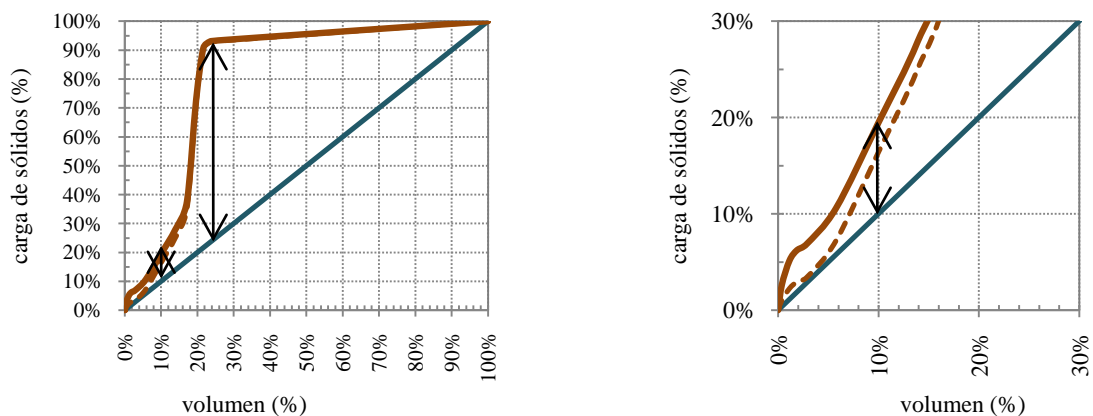


Figura 5. Curva de doble masa acumulada. Carga sólida (procedimiento SWMM original y modificado) frente a volumen de escurrimiento.

Finalmente se muestra en las gráficas de la Figura 6 los sedimentogramas en el punto de salida de la cuenca estudiada para el evento de precipitación del 17/09/2010 para el cual se cuenta además con muestras puntuales recogidas en este punto y para las cuales se determinaron los valores de Materia en Suspensión (MES) en laboratorio.

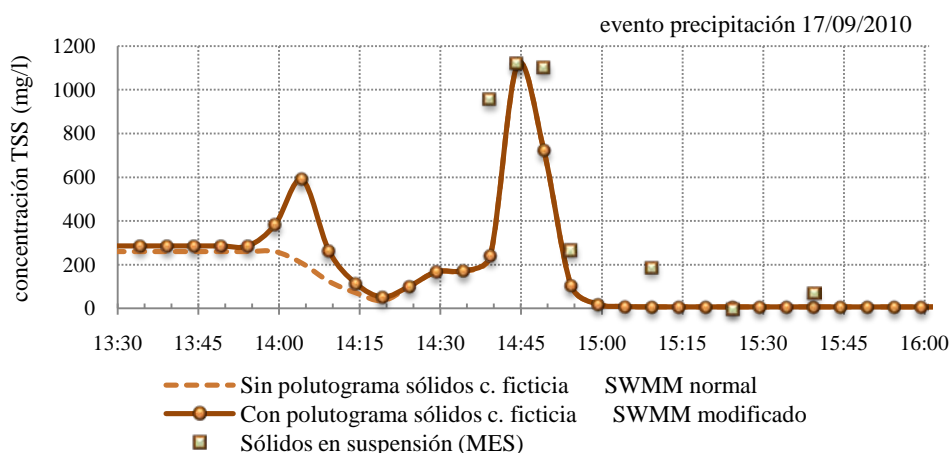


Figura 6. Comparación de sedimentogramas. Aplicación directa del módulo de calidad de SWMM 5.0, aplicación de la metodología propuesta y resultados MES en muestras puntuales.

5 Conclusiones

Consideramos que la relativa simplicidad de implementación de esta metodología, y la posibilidad de utilizar para el cálculo el software SWMM 5.0 de licencia libre, ampliamente empleado en hidrología urbana, muestra el aporte de este trabajo como una herramienta que permite considerar el lavado y transporte de carga sólida depositada en el interior de las conducciones. Entendemos que este procedimiento mejora los resultados que se obtienen actualmente con modelos hidrológicos convencionales tales como SWMM 5.0 en cuanto a evolución de la carga sólida, esencial para prever los efectos contaminantes asociados a su vertido a medios naturales receptores.

Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta en las condiciones explicadas en la presente comunicación, prueban el ajuste de la predicción. No obstante, no debemos perder de vista que los resultados no deben ser generalizados sin una verificación con datos reales. Es por ello que se continúa trabajando en la recolección de datos en una cuenca de estudio ubicada en el municipio de Granollers en la provincia de Barcelona, que serán utilizados en un futuro para la verificación de la efectividad real de este enfoque de modelado de sedimentos de alcantarillado.

Por su parte, el conocimiento de las características físicas, químicas, y propiedades de los sedimentos del alcantarillado, como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, es crucial para el desarrollo de modelos que permitan describir apropiadamente el movimiento de sólidos y predecir con una mejor estimación los cambios de concentración, en general significativos, que se producen en el escurrimiento de agua en el periodo inicial de un evento de precipitación.

6 Agradecimientos

Agradecemos al *Consorci per a la Defensa de la Conca del Besòs*, y a *Drenatges Urbans del Besòs* por facilitar el desarrollo de las tareas de medición y permitir que este trabajo se desarrolle en el marco de un proyecto de colaboración con el Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya.

7 Referencias Bibliográficas

- Ahyerre, M, Chebbo, G., & Saad, M. (2001). Nature and Dynamics of Water Sediment Interface in Combined Sewers. *Journal of Environmental Engineering*, 127(3), 233-239.
- Arthur, S., Ashley, R. M., Tait, S. J., & Nalluri, C. (1999). Sediment Transport in Sewers - a Step Towards the Design of Sewers To Control Sediment Problems. *Proceedings of the ICE - Water Maritime and Energy*, 136(1), 9-19. doi: 10.1680/iwtme.1999.31264.
- Ashley, R. M., Crabtree, B., Fraser, A., & Hvitved-Jacobsen, T. (2003). European Research into Sewer Sediments and Associated Pollutants and Processes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(4), 267. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:4(267).
- Butler, D., May, R., & Ackers, J. (2003). Self-Cleansing Sewer Design Based on Sediment Transport Principles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(4), 276. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:4(276).
- Crabtree, R. W., Ashley, R. M., & Gent, R. (1995). Mousetrap: Modelling of real sewer sediment characteristics and attached pollutants. *Water Science and Technology*, 31(7), 43-50.
- Delleur, J. W. (2001). Sediment Movement in Drainage Systems. In L. W. Mays (Ed.), *Stormwater Collection Systems Design Handbook* (pp. 14.1-14.25). McGraw-Hill.
- Gironás, J., Roesner, L. A., & Davis, J. (2009). *Storm Water Management Model. Applications Manual EPA/600/R-09/077*. *Journal of the American Water Resources Association* (Vol. 107, pp. 1-179). Cincinnati. doi: 10.1111/j.1752-1688.1990.tb01394.x.
- Gromaire, M. C., Garnaud, S., Saad, M., & Chebbo, G. (2001). Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water research*, 35(2), 521-33. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11229007>.
- Pisano, William C, Aronson, G. L., Queiroz, C. S., Blanc, F. C., & O' Shaughnessy, J. C. (1979). *EPA_600-2-79-133_Pisano_Dry-weather deposition and flushing for combined sewer overflow pollution control*. (R. Filed & R. P. Traver, Eds.) (p. 336). Cincinnati: U.S. EPA.
- Pisano, William C, Queiroz, C., Aronson, G. L., Blanc, F. C., & O' Shaughnessy, J. C. (1981). Procedures for Estimating Dry Weather Pollutant Deposition in Sewer Systems. *Journal Water Pollution Control Federation*, 53(11), 1627-1636.
- Rossman, L. A. (2009). *Storm Water Management Model. User's Manual. Version 5.0 EPA/600/R-05/040. Water Management* (pp. 1-266). Cincinnati.
- Tait, S. J., Chebbo, G., Skipworth, P. J., Ahyerre, Mathieu, & Saul, A. J. (2003). Modelling in-Sewer Deposit Erosion to Predict Sewer Flow Quality. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(4), 316-324. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:4(316).
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 81(10), 507. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431).
- Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Amsterdam: Aqua Publications.