Características de las Descargas de Sistemas Unitarios (DSUs) en la ciudad de Murcia

Juan T. García[a], Pablo Espín-Leal[a], Antonio Vigueras-Rodríguez[a], Luis G. Castillo[a], José M. Carrillo[a], Pedro D. Martínez Solano[b] y Simón Nevado Santos[b]

a Grupo Hidr@m, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Cartagena, Paso Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena, España; juan.gbermejo@upct.es; pablo_fm7@hotmail.com; avigueras.rodriguez@upct.es; luis.castillo@upct.es; jose.carrillo@upct.es.
b Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia S.A., Plaza Circular 9, Murcia, España; pdmartinez@emuasa.es; snevado@emuasa.es.

Línea temática M | Tema monográfico.

RESUMEN

Los vertidos que se producen en los sistemas de saneamiento en tiempo de lluvia tienen un importante impacto sobre el medio receptor. Hoy en día, es necesario un mejor conocimiento de estos vertidos con el objetivo de implementar medidas para reducir dichas emisiones. En este trabajo se ha monitorizado y modelado el comportamiento durante episodios de lluvia de dos cuencas de la ciudad de Murcia mediante la medición en continuo de la precipitación, la turbidez y el caudal circulante por el sistema. En base a los datos obtenidos de 21 lluvias, se han definido las variables características de cada evento y se ha procedido al estudio de las relaciones entre dichos parámetros con el objetivo de desarrollar un modelo estadístico que permita la construcción de polutogramas. Los resultados obtenidos proporcionan una herramienta para mejorar el conocimiento de la contaminación transportada por las redes unitarias en tiempo de lluvia.
Palabras clave | Descarga de Sistemas Unitarios (DSUs); redes de saneamiento; índices de predicción de contaminación; polutogramas.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de saneamiento y drenaje urbano han sufrido una gran evolución a lo largo de la historia junto a los continuos retos que el desarrollo y expansión de las urbes han supuesto para la sociedad (la necesidad de mejorar las condiciones higiénicas, el incremento de la disponibilidad de los recursos hídricos, la garantía de protección del medio ambiente, etc.).

La intensificación de las demandas hídricas y el refuerzo de la protección de la calidad de los sistemas acuáticos han motivado el rechazo de prácticas que con anterioridad eran permitidas, de modo que se ha tomado conciencia en todo el mundo de las cargas contaminantes movilizadas en los sistemas de saneamiento en tiempo de lluvia y las notables presiones que estos flujos generan sobre los medios receptores (Suarez y Cagiao, 2005).

Los depósitos de sólidos y sustancias a lo largo de las cuencas urbanas durante periodos secos pueden conllevar importantes problemas medioambientales. Durante los episodios lluviosos, el lavado de las superficies y de las propias redes de drenaje supone un incremento de la carga contaminante en el agua residual, por lo que los vertidos de estas aguas de lavado que se producen mediante las conocidas como Descargas de Sistemas Unitarios (DSUs) pueden provocar el transporte de importantes volúmenes de contaminación a las masas receptoras.

Estos problemas están recogidos en la legislación vigente. El artículo 259 del Real Decreto 1290/2012 de 7 de septiembre, que modifica el anterior Reglamento del Dominio Público Hidráulico, especifica lo siguiente: *"Con el fin de reducir convenientemente la contaminación generada en episodios de lluvia, los titulares de vertidos de aguas residuales urbanas tendrán la obligación de poner en servicio las obras e instalaciones que permitan retener y evacuar adecuadamente hacia la*

estación depuradora de aguas residuales urbanas las primeras aguas de escorrentía de la red de saneamiento con elevadas concentraciones de contaminantes producidas en dichos episodios".

Dentro de este contexto, conocer el comportamiento de la red en cuanto a la movilización de contaminación que se produce en esta es un aspecto fundamental. El control basado únicamente en el análisis de muestras puntuales ha demostrado ser técnica y económicamente inviable cuando se requiere un estudio de la red extenso tanto en espacio como en tiempo. Es por ello que resulta imprescindible recurrir a herramientas que permitan determinar indirectamente la calidad del agua de manera continua y en tiempo real.

Existen numerosos estudios que ponen de manifiesto el potencial del empleo de medidas en continuo de turbidez para monitorizar la evolución de las concentraciones de ciertos indicadores de contaminación del agua (como los sólidos en suspensión o la demanda química de oxigeno) por medio de funciones de correlación directas (Anta et al., 2009; Hannouche et al., 2011; Del Río, 2011; Métadier y Bertrand-Krajewski, 2012; Bersinger et al., 2013).

Junto a la instrumentación de captación de datos, el estudio estadístico de las relaciones entre la concentración de contaminación en el agua residual y la escorrentía constituyen un marco de referencia para investigar los impactos asociados a las DSUs. Siguiendo esta línea, varias investigaciones (Gupta y Saul, 1996; LeBoutillier et al., 2000; Gromaire et al., 2001; Del Río, 2011) han realizado un análisis de la regresión estadística entre parámetros relacionados con los sólidos en suspensión y las variables hidrológicas e hidráulicas de los eventos lluviosos. En la Tabla 1 se muestran los resultados de dichos trabajos.

Tabla 1 | Variables y parámetros ajustados relacionados con la carga de Sólidos en Suspensión (SS).

Variables y parámetros ajustados			Gupta y Saul (1996)	LeBoutillier et al. (2000)	Gromaire et al. (2001)	Del Río (2011)
Variables	Hidrológicas	I_{MAX} (mm/h)	X	X	X	
		D_{LLUVIA} (h)	X	X		X
		TSP (días)	X	X	X	
		P_{TOTAL} (mm)		X	X	X
		I_{MAX5} (mm/h)		X		
		Tc (h)				X
		A (ha)				X
	Hidráulicas	Q_{MAX} (m^3/s)	X			X
		Q_{MED} (m^3/s)				X
		Q_{MAXTS} (m^3/s)				X
		TPH (h)				X
Parámetros ajustados		SST_{TOTAL} (kg)		X		
		SST_{PL} (kg)	X		X	
		$CMAX_{SS}$ (mg/L)				X
		$CMOV_{SS}$ (kg/ha)				X

Notas: I_{MAX} = intensidad de precipitación máxima; D_{LLUVIA} = duración de la lluvia; TSP = periodo seco precedente; P_{TOTAL} = precipitación total; I_{MAX5} = intensidad de precipitación cincominutal máxima; Tc = tiempo de concentración de la cuenca; A = área de la cuenca; Q_{MAX} = caudal máximo del evento; Q_{MED} = caudal medio del evento; Q_{MAXTS} = caudal máximo tiempo seco; TPH = tiempo al pico del hidrograma; SST_{TOTAL} = sólidos en suspensión acumulados por evento; SST_{PL} = carga contaminante total en primer lavado; $CMAX_{SS}$ = concentración máxima de sólidos en suspensión; $CMOV_{SS}$ = carga movilizada de sólidos en suspensión.

El estudio de estas relaciones estadísticas permite establecer herramientas de predicción de las características de movilización de contaminación para una tormenta dada tomando como base variables con cierta capacidad de pronóstico como pueden ser las características de la lluvia o la respuesta hidráulica del sistema de saneamiento.

El objetivo principal de este trabajo es continuar con el ajuste del modelo estadístico presentado en la investigación de García et al. (2017), cuya finalidad principal es predecir la concentración máxima de turbidez ($CMAX_{tb}$), el tiempo al pico del polutograma (TPP), y el tiempo de descenso del polutograma (TDP) para un evento lluvioso. Dicho modelo estadístico toma como base el análisis de los datos de las precipitaciones ocurridas entre junio de 2014 y febrero de 2017 en dos cuencas urbanas de la ciudad de Murcia. Para este análisis se han empleado datos en tiempo real de turbidez junto con simulaciones del

comportamiento de la red mediante un modelo matemático correctamente calibrado bajo el software SWMM (Storm Water Management Model).

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción de las cuencas de estudio

El conjunto de datos empleados en este trabajo han sido recogidos en dos puntos de la red de saneamiento de Murcia. Esta ciudad presenta una población equivalente de 525027 y está situada en el valle de confluencia de los ríos Segura y Guadalentín (Figura 1). Estos dos cauces tienen sus márgenes a cotas más elevadas que gran parte de las zonas colindantes, lo que unido a las bajas pendientes, hace necesaria la existencia de numerosas estaciones de bombeo de agua residual.

La zona de estudio incluye dos cuencas urbanas denominadas San Félix y S1. Ambas son mayormente residenciales y realizan el drenaje mediante sistemas de alcantarillado unitario, presentado un porcentaje de impermeabilidad del 47% y 21% respectivamente. Las principales características de las cuencas de estudio se presentan en la Tabla 2.

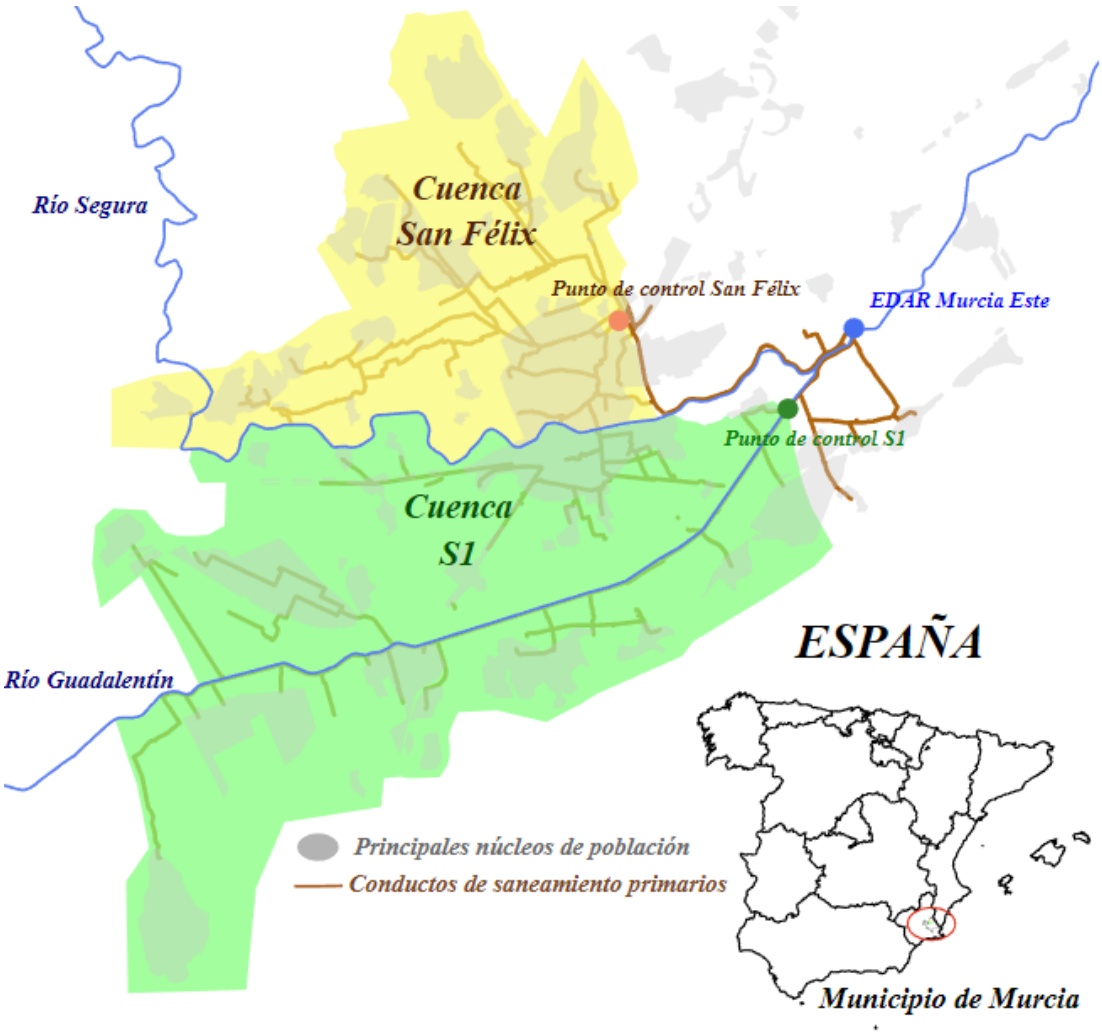

Figura 1 | Localización de las cuencas de estudio.

Tabla 2 | Características de las cuencas de estudio.

Cuenca	San Félix	S1
Área de la Cuenca (km^2), *A*	14.89	47.53
Densidad de población (hab/km^2)	14250	2685
Ratio de impermeabilidad (m^2/m^2)	0.47	0.21
Pendiente media (m/m), *S*	0.0043	0.0013
Longitud del cauce principal (km), *L*	10.75	17.00
Longitud de la red de saneamiento (km)	513.15	616.84
Tiempo de concentración (min), *Tc*	87.14	193.75

Monitorización de la calidad del agua

En cuanto a la pluviometría, la ciudad de Murcia está equipada con 39 pluviómetros de balancín repartidos a lo largo de toda la superficie del municipio. Su rango de medida se encuentra entre los 0 y los 7 mm/min con una precisión de 0.2 mm. La información de lluvia es registrada y enviada a través del sistema SCADA.

Los equipos de monitorización del agua residual se encuentran instalados en los puntos de salida de las cuencas de estudio, en el entorno de dos importantes puntos de vertido tal como se puede observar en la Figura 1. En las estaciones de control se realiza el registro del nivel en el colector mediante un sensor ultrasónico Endress+Hauser FMR50. Junto con la determinación del calado, se efectúa la toma de agua residual hasta un tanque de sedimentación de 20 litros a través de una tubería de succión de 25 mm de diámetro gracias a una bomba peristáltica de 1 L/s de caudal medio. Con el objetivo de proteger el equipo de medida, en la toma de agua residual se encuentra instalada una pantalla de acero inoxidable. En la Figura 2 se puede observar la configuración de dichos puntos de control.

Los sensores de turbidez, conductividad y temperatura se encuentran alojados en el interior del tanque de sedimentación y registran las medidas de estos parámetros con un intervalo de 20 segundos. La turbidez se obtiene por medio de un medidor nefelométrico infrarrojo Endress+Hauser CUS 42 con una longitud de onda de 880 nm, de acuerdo con el estándar NF EN 27027.

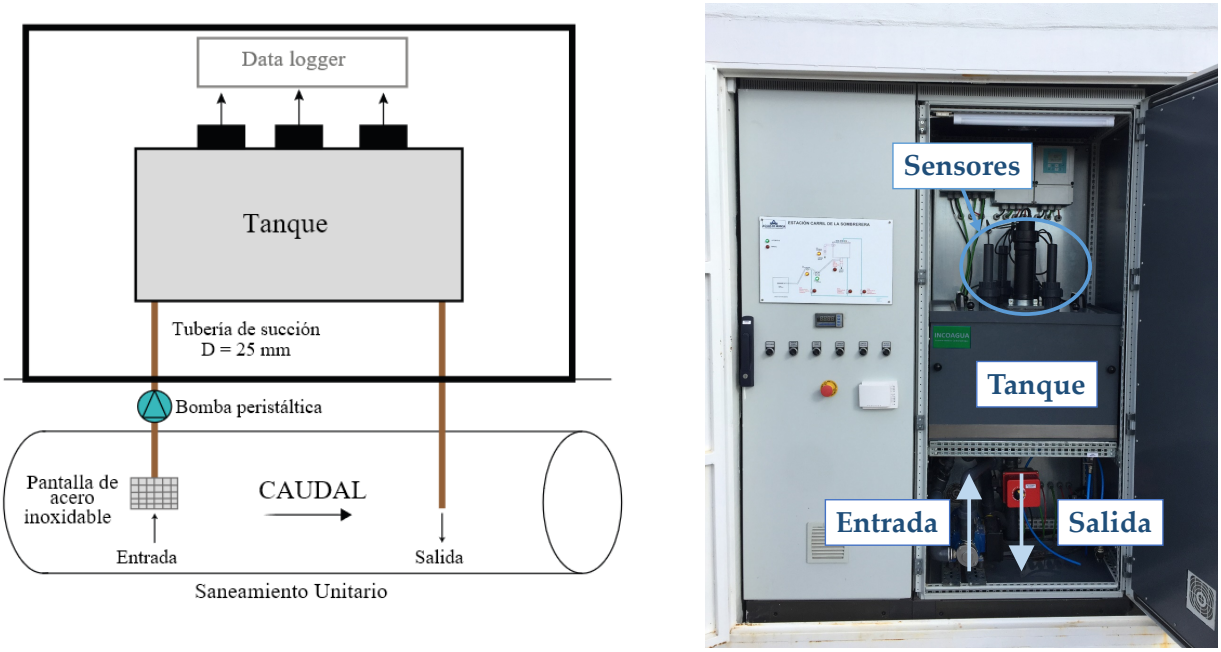

Figura 2 | Esquema de las estaciones de control.

Modelo hidráulico de la red

El Storm Water Management Model (SWMM) de la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (US-EPA) es un modelo numérico de simulación de precipitaciones que permite simular el comportamiento hidrológico-hidráulico de un sistema de saneamiento, tanto en términos de cantidad de agua como de calidad de la misma.

Para este estudio se ha empleado un modelo calibrado y simplificado de la red de saneamiento de Murcia bajo este software. En la Figura 3 y en la Tabla 3 se muestran una imagen de dicho modelo y sus principales características, respectivamente.

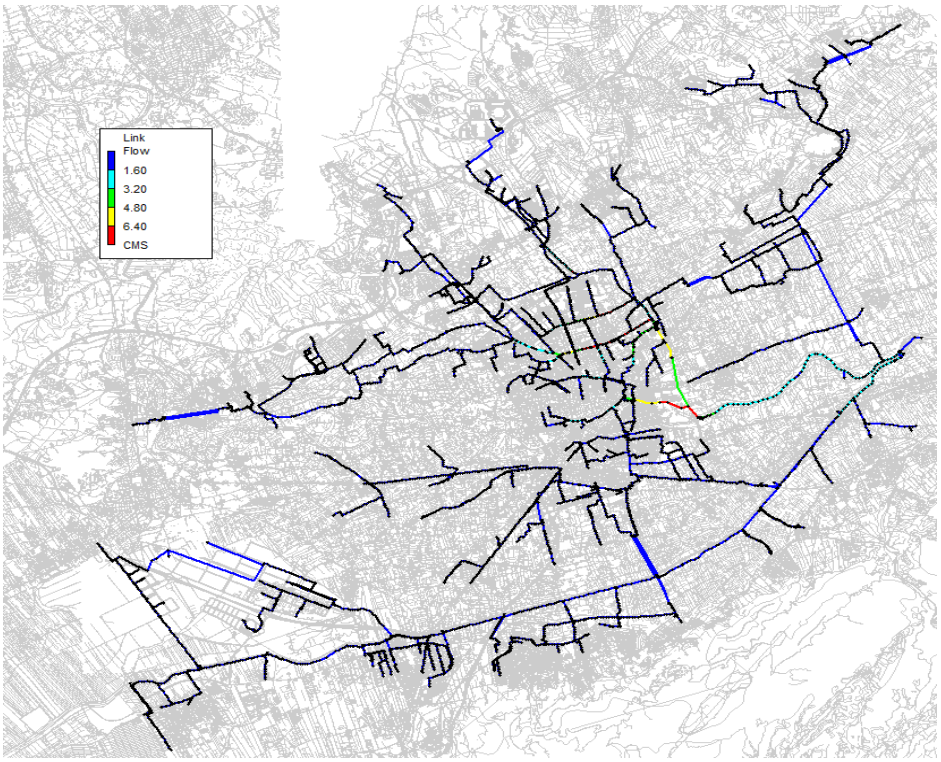

Figura 3 | Vista del modelo hidráulico empleado bajo el software SWMM.

Tabla 3 | Descripción del modelo hidráulico de la ciudad de Murcia.

Información	Elemento	Número
Hidrológica	Pluviómetros	39
	Cuencas	4553
Hidráulica	Nudos	6073
	Nudos de vertido	58
	Almacenamientos	70
	Conductos	6304
	Bombeos	100

En la Figura 4 se muestra la comparación entre el calado real medido en un evento de lluvia y el calado producto de la simulación de dicha lluvia en el modelo de la red. Como se puede observar, existen ligeras diferencias entre calados en el caso de la cuenca S1, mientras que la cuenca San Félix muestra un ajuste más ajustado a las mediciones. Las diferencias en el caso de la primera de las cuencas son inferiores al 10% y son causadas principalmente por la existencia de numerosos bombeos.

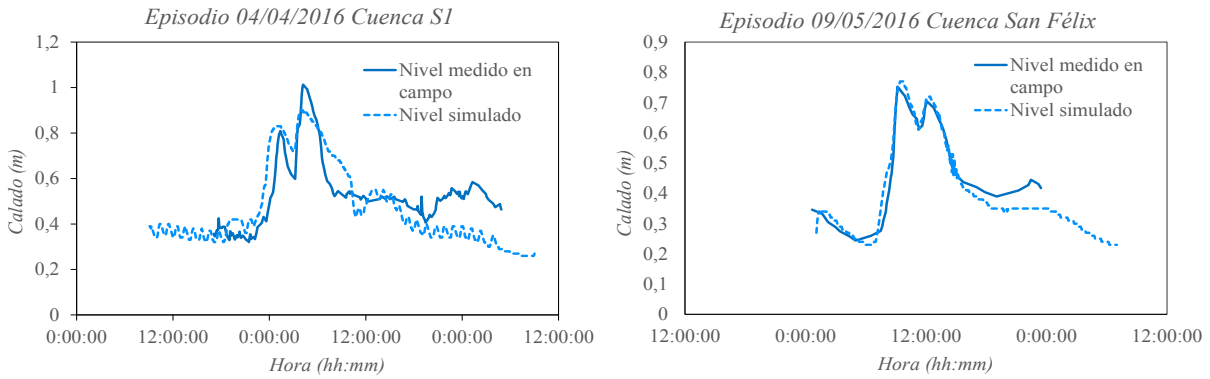

Figura 4 | Comparación de los calados medidos y simulados.

RESULTADOS

Episodios de lluvia analizados

La serie de datos analizada corresponde al periodo comprendido desde junio de 2014 hasta febrero de 2017 en ambas cuencas de estudio. A los 19 episodios cuyos valores ya han sido expuesto por García et al. (2017), se le suma un nuevo episodio en cada una de las cuencas.

En la Tabla 4 se muestran las principales características de los sucesos lluviosos estudiados.

Tabla 4 | Resumen de variables de los episodios lluviosos analizados.

Cuenca	Episodio	Fecha	P_{total} (mm)	*TSP* (días)	Q_{max} (L/s)	*TPH* (min)	$CMAX_{tb}$ (NTU)	*TPP* (min)
S1	S1_1	24/06/2014	12.06	7	2360	130	587.60	96.03
	S1_2	22/09/2014	3.29	5	1520	175.2	521.50	107.12
	S1_3	14/12/2014	30.37	10	2480	110	788.00	100.37
	S1_4	20/05/2015	3.03	24	1560	150	822.20	103.06
	S1_5	11/06/2015	8.69	22	2350	150	767.50	105.33
	S1_6	27/09/2015	8.18	17	2430	109.8	652.20	90.19
	S1_7	15/01/2016	11.16	17	2440	205.2	698.00	120.65
	S1_8	30/01/2016	14.19	15	1970	145.2	728.40	110.65
	S1_9	21/03/2016	27.48	13	2150	155	564.20	119.82
	S1_10	04/04/2016	13.46	12	2580	135	469.30	104.76
	S1_11	20/10/2016	13.00	1	2430	70	451.04	65.35
San Félix	SF_1	17/06/2014	7.34	15	2710	35	626.40	64.81
	SF_2	14/12/2014	30.71	10	2930	60	851.10	99.88
	SF_3	22/03/2015	2.47	1	1580	105	481.10	111.89
	SF_4	11/06/2015	10.13	22	2530	80	770.30	110.18
	SF_5	05/09/2015	56.47	19	3170	95	994.40	132.82
	SF_6	27/09/2015	7.53	17	2590	130	764.60	128.67
	SF_7	15/01/2016	11.57	17	2650	205	829.70	165.61
	SF_8	09/05/2016	6.80	18	2260	180	497.70	156.51
	SF_9	04/06/2016	2.27	22	1680	90	593.20	103.30
	SF_10	13/02/2017	0.97	11	990	120	603.00	113.57

En la Figura 5 se muestran los hidrogramas calculados con el modelo de la red, los hietogramas registrados en los pluviómetros y los polutogramas de turbidez medidos en los puntos de control de las cuencas para distintos episodios analizados.

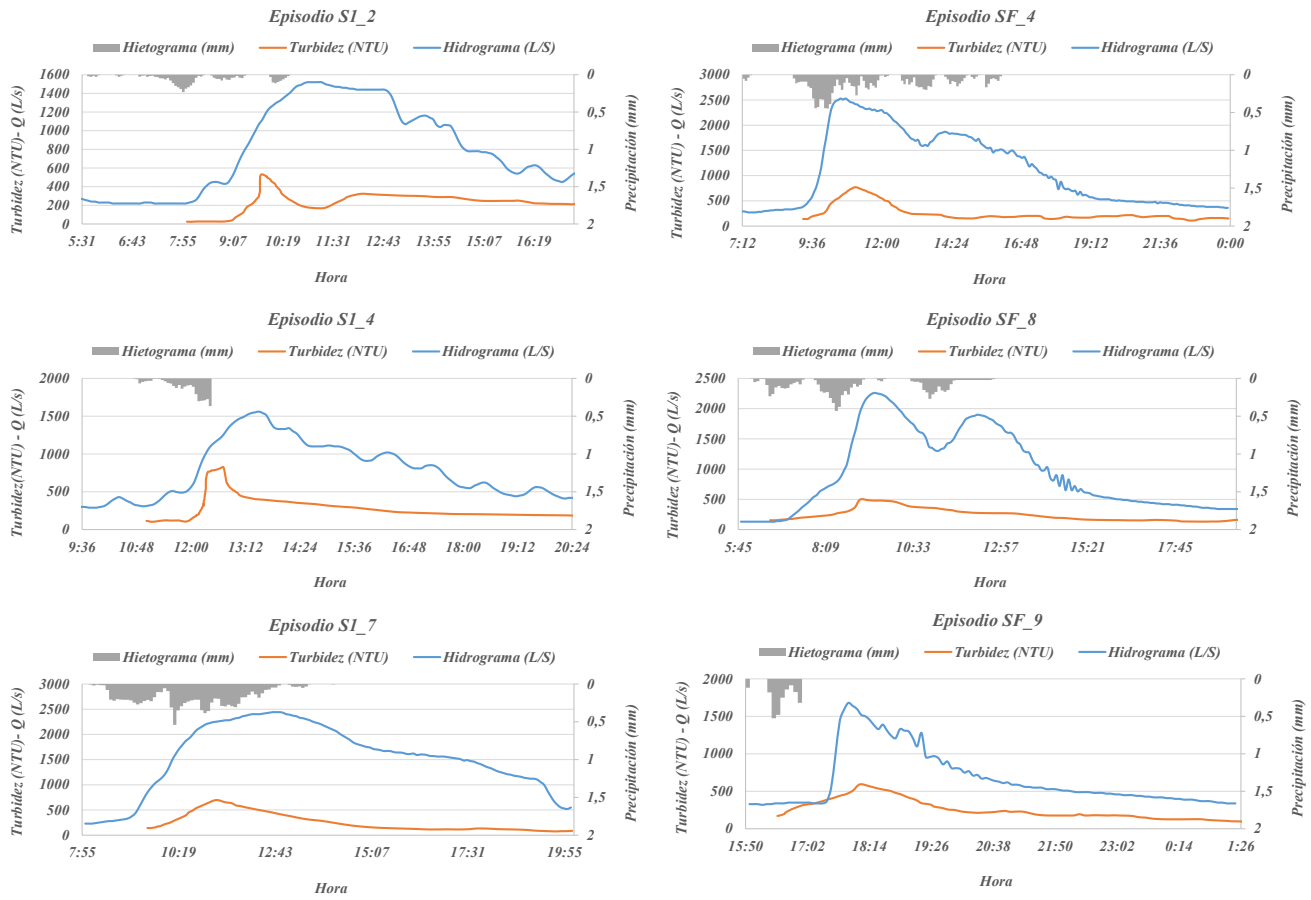

Figura 5 | Hietogramas, hidrogramas y polutogramas de distintos de eventos analizados.

Índices de predicción de contaminación

En este apartado se presentan los índices multivariable que configuran el modelo estadístico desarrollado por García et al. (2017). Mediante este conjunto de índices se puede obtener, en función de variables hidrológico-hidráulicas, los parámetros fundamentales que permiten la construcción de los denominados polutogramas de diseño. Dichos parámetros son el tiempo al pico del polutograma (*TPP*) y la concentración máxima de turbidez en el agua residual ($CMAX_{TB}$).

El objetivo principal de este aparto es continuar con el desarrollo y mejora del modelo estadístico mediante la introducción de nuevos datos de lluvia en el ajuste de los índices de predicción presentados a continuación.

Índice de tiempo al pico del polutograma (I_{TPP})

El índice del tiempo al pico del polutograma predice el tiempo que trascurre desde el inicio del episodio hasta el instante en el que se alcanza el valor máximo de turbidez en el suceso lluvioso. Este índice está definido por la siguiente expresión:

$$I_{TPP}=\left(\frac{TPH}{Tc}\right)^{0.13}\left(\frac{P_{TOTAL}}{P_{TOTAL\text{-}ANUAL}}\right)^{0.02} \qquad (1)$$

donde $P_{TOTAL\text{-}ANUAL}$ es la precipitación anual media en la zona de estudio (350 mm para esta región).

Como se puede observar, el segundo término de la Ecuación (1) relacionado con la precipitación, $P_{TOTAL}/P_{TOTAL\text{-}ANUAL}$, tiene una influencia menor que la relación entre el tiempo al pico del hidrograma y el tiempo de concentración de la cuenca, *TPH/Tc*. Su inclusión está justificada por la mejora del ajuste que este segundo término produce, (aumentando el coeficiente R^2 de 0.86 a 0.96).

La Figura 6 muestra la relación lineal que existe entre el índice de tiempo al pico del polutograma definido en la Ecuación (1) y el *TPP*. Dicha relación queda definida por la expresión:

$$TPP = 427.71\ I_{TPP} - 281.34 \qquad (2)$$

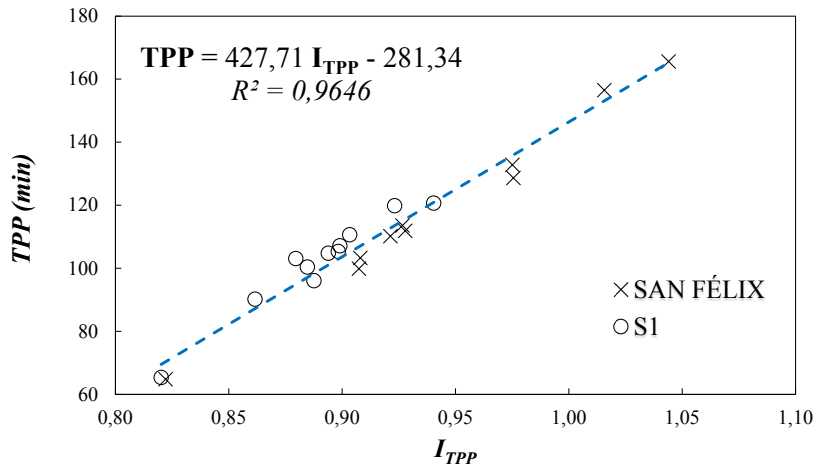

Figura 6 | Ajuste lineal del TPP con el índice de predicción I_{TPP}.

Índice de concentración máxima (I_{CMAXTB})

El objetivo del Índice de concentración máxima, I_{CMAXTB}, es estimar el valor superior que alcanza la turbidez en un evento dado en función de variables cuantificables relacionadas con la lluvia. Junto con el I_{TPP}, permite estimar los dos principales valores que localizan el pico del polutograma en tiempo y magnitud. Se puede obtener como:

$$I_{CMAXTB} = \left(\frac{P_{TOTAL}}{P_{TOTAL\text{-}ANUAL}}\ S \right)^{0.3} (TSP_R)^{0.3} F_{FORMA} \qquad (3)$$

donde TSP_R es la relación de días secos consecutivos anteriores al evento lluvioso en el último mes.

La Ecuación (3) es adimensional y puede ser dividida en 3 términos principales. El primero de los términos está relacionado con la energía del evento lluvioso, así un incremento de la precipitación total para una determinada cuenca provoca un mayor lavado de los sedimentos. Del mismo modo, para dos cuencas con diferente pendiente y suponiendo el resto de parámetros fijos, se producirá una mayor concentración máxima en aquella que presente una mayor pendiente. Por otro lado, el segundo término refleja el efecto de la acumulación de depósitos a lo largo de la cuenca durante el periodo de precipitaciones previo a la lluvia. Finalmente, el último término está relacionado con las características geométricas de la cuenca, definido como:

$$F_{FORMA} = \frac{10A}{L^2} \qquad (4)$$

donde A es el área de la cuenca en km^2 y L es la longitud del cauce principal de km. En la Tabla 5 se muestran los valores de este factor para ambas cuencas.

Tabla 5 | Valores del factor de forma para las dos cuencas estudiadas.

Cuenca	Pendiente, *S* (m/m)	Longitud Cauce, *L* (km)	Área, *A* (km^2)	F_{FORMA}
S1	0.0013	17.00	47.53	1.645
San Félix	0.0043	10.75	14.89	1.288

La Figura 7 muestra la relación entre el I_{CMAXTB} calculado según el Ecuación (3) para cada una de las lluvias analizadas y la turbidez máxima medida en dichos episodios. Como se puede observar, la mayor parte de las lluvias se ajustan correctamente a una expresión lineal a excepción de 4 casos:

a) S1_4. Se trata de un episodio con muy baja precipitación (3 mm), de modo que el índice de predicción arroja valores muy bajos aunque el periodo seco previo es muy extenso (24 días).

b) S1_9 y S1_10. Los valores de turbidez máxima se encuentran por debajo de la tendencia del resto de episodios. La posible causa de este fenómeno parece estar relacionada con la energía de ambos sucesos ya que las lluvias de estos dos días están caracterizadas por tener una intensidad media de precipitación baja (inferior a 1 mm/h), lo que se puede traducir en un lavando lento de la cuenca y la red.

c) SF_8. Al igual que en el caso del episodio S1_4, la precipitación total es muy baja (2.3 mm).

Excluyendo las lluvias anteriormente comentadas, la relación entre I_{CMAXTB} y $CMAX_{TB}$ se ajusta a una línea con un coeficiente de correlación R^2= 0.9. Dicha relación viene representada por:

$$CMAX_{TB} = 5343.2\ I_{CMAXTB} + 356.85 \qquad (5)$$

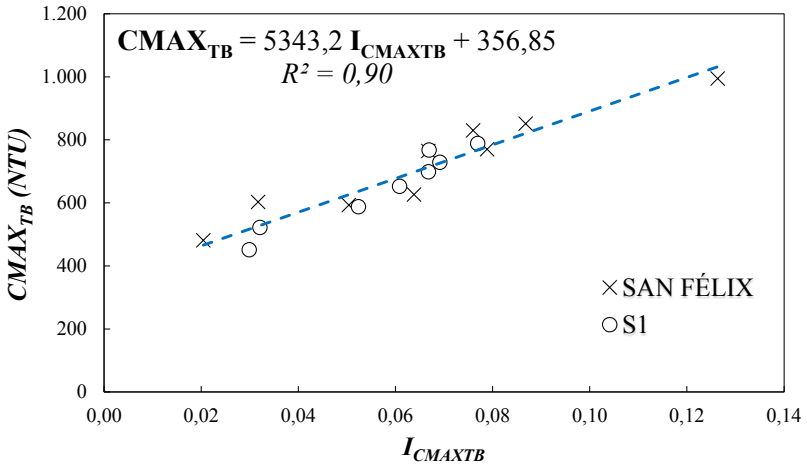

Figura 7 | Ajuste lineal del $CMAX_{TB}$ con el índice de predicción I_{CMAXTB}.

DISCUSIÓN

Elaboración de polutogramas a partir de los Índices de Predicción

Un polutograma es la representación de la variación de la concentración de un determinado contaminante a lo largo del tiempo. Por lo tanto, del análisis del conjunto formado por el hietograma, el hidrograma y el polutograma de un determinado suceso se puede extraer información muy importante acerca de la movilización de contaminantes en dicha lluvia.

Definidos los índices de predicción que permiten conocer el valor máximo de turbidez y el instante en el que se produce, es posible proceder a la construcción de los denominados polutogramas de diseño.

La forma característica de estas curvas de contaminación puede ser ajustada a partir de un conjunto de funciones y valores representados en la Figura 8.

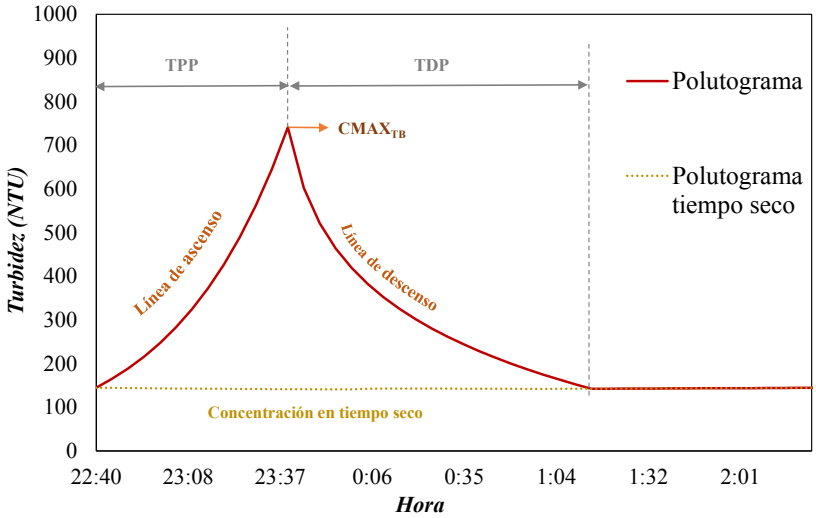

Figura 8 | Principales parámetros de un polutograma de diseño.

La línea de ascenso del polutograma se ajusta a la siguiente ecuación exponencial:

$$C_a = ab^x = C_0 \left[\left(\frac{CMAX_{TB}}{C_0} \right)^{1/N_a} \right]^n \qquad (6)$$

donde N_a es el número de intervalos cincominutales en el que el tiempo de ascenso (tiempo al pico del polutograma) es dividido; n indica el intervalo de cálculo ($0 \leq n \leq N_a$) en unidades de 5 minutos; mientras que C_a y C_0 son los valores de turbidez en el intervalo n y en el inicio del polutograma respectivamente.

El tiempo de descenso del polutograma (*TDP*) se define como el intervalo de tiempo entre el instante de turbidez máxima y el momento en el que la concentración alcanza valores propios del tiempo seco. Este valor ha sido ajustado para cada una de las cuencas mediante una relación lineal en función del tiempo al pico del polutograma:

$$\text{S1} \rightarrow TDP = 3.5TPP - 125$$
$$\text{San Félix} \rightarrow TDP = 4.24TPP - 40 \qquad (7)$$

donde *TDP* y *TPP* están expresados en minutos.

Las diferencias entre los *TDP* medidos y calculados en las lluvias estudiadas presentan un error relativo medio del 13% para la cuenca S1 y de un 14% para la cuenca San Félix.

Conocido el tiempo de descenso del polutograma se puede determinar la curva de descenso del mismo. Para dicho ajuste se emplea una función logarítmica:

$$C_d = a\ln(x) + b = CMAX_{TB} + \left(\frac{C_{TS} - CMAX_{TB}}{\ln(N_d - N_a + 1)} \right) \ln(n - N_a + 1) \qquad (8)$$

donde N_d es el número de intervalos de cincos minutos en el que el tiempo de descenso es dividido; n indica el intervalo de cálculo ($N_a \leq n \leq N_d$) en unidades de 5 minutos; mientras que C_d y C_{TS} son los valores de turbidez en el intervalo n y en el final del *TDP* respectivamente.

Todo este proceso de cálculo viene reflejado en la Figura (9).

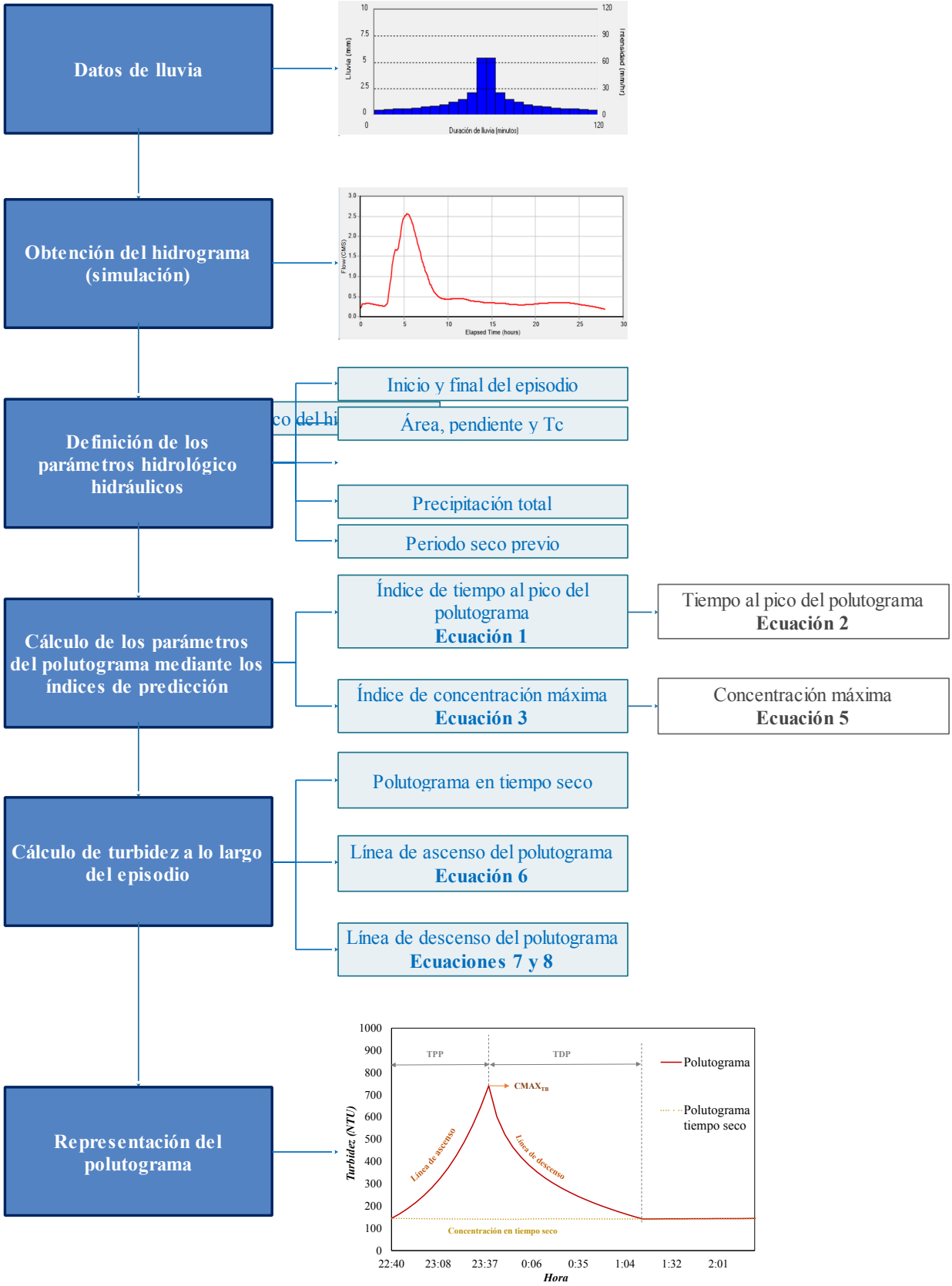

Figura 9 | Metodología para la elaboración de polutogramas de diseño.

A modo de ejemplo se presenta en la Figura (10) la comparación de los polutogramas medidos en campo y los polutogramas de diseño en algunos de los eventos lluviosos analizados. Como se puede observar, el ajuste entre ambos polutogramas presenta buenos resultados, demostrando la validez del modelo estadístico desarrollado.

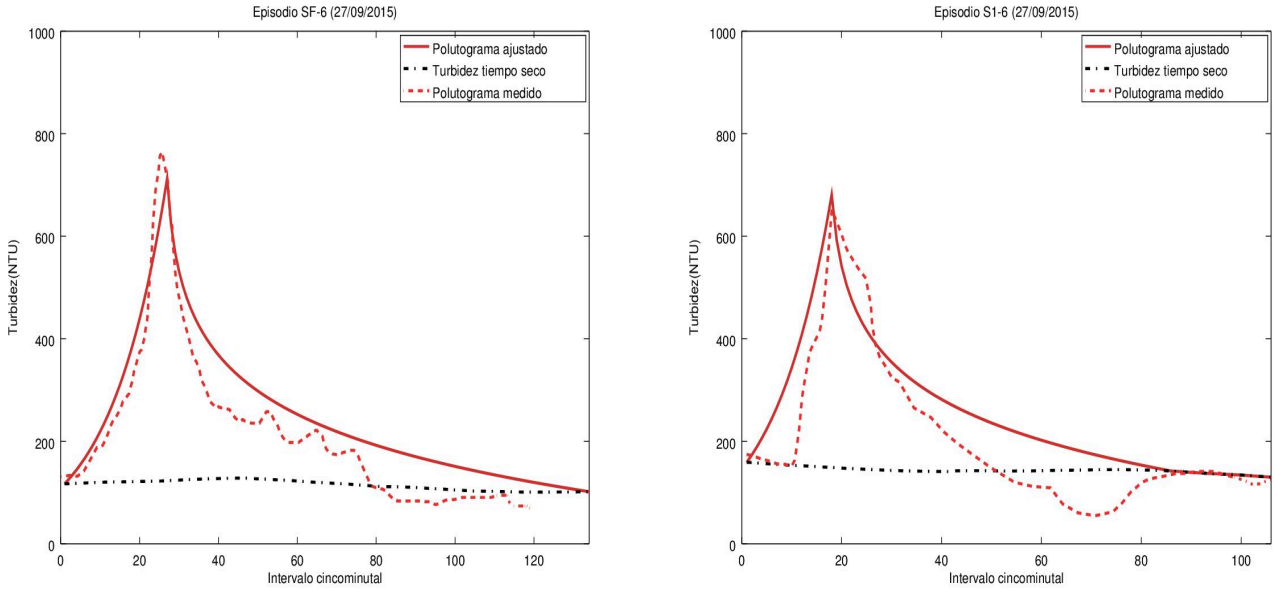

Figura 10 | Comparación entre polutogramas medidos y polutogramas de diseño.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha continuado con el ajuste del modelo estadístico presentado por García et al. (2017), incluyendo en el estudio dos nuevos episodios de lluvia.

Siguiendo con la metodología anterior, se ha escogido la turbidez como el principal indicador de la contaminación en el agua residual basándose en estudios previos de la relación que existe entre este parámetro y el resto de contaminantes presentes en el agua.

Por medio de datos de turbidez, precipitación y caudal, se ha procedido al desarrollo de dos índices de predicción de contaminación capaces de obtener dos parámetros fundamentales del polutograma: el tiempo al pico y el valor de turbidez máxima. En base a estos dos índices se presenta una metodología de construcción de polutogramas cuyo resumen viene presentado en la Figura 9.

El modelo estadístico formulado presenta una gran correlación para las cuencas S1 y San Félix situadas en la ciudad de Murcia. Dicho modelo constituye una herramienta de gran utilidad para la mejora del conocimiento del transporte de contaminantes, pudiendo ser utilizado en labores de diseño de tanques anti-DSUs, en la gestión de la red en tiempo de lluvia o sirviendo de herramienta de alerta.

Como se ha comentado, el objetivo principal del modelo desarrollado es la definición de polutogramas. Para ello se han ajustado una curva de ascenso (Ecuación 6) y una de descenso (Ecuación 8), tomando como base los valores del tiempo al pico del polutograma (*TPP*) y de la concentración máxima de turbidez ($CMAX_{TB}$), junto con el valor del tiempo de descenso (*TDP)*. Los polutogramas obtenidos con este conjunto de ecuaciones se ajustan de manera correcta a los polutogramas reales medidos durante las lluvias estudiadas (Figura 10). De este modo, a partir de variables hidrológico-hidráulicas como la precipitación total, el tiempo seco precedente a la lluvia, o el tiempo hasta el instante de caudal máximo, pueden simularse los polutogramas generados para múltiples escenarios.

Aunque el trabajo es específico para las cuencas S1 y San Félix de Murcia, esta metodología puede ser usada como punto de partida para otras cuencas. Extender la aplicación de esta metodología a otros puntos de estudio podría llevar a la

estandarización de los coeficientes y a la definición de un polutograma de diseño que pueda servir de referencia para otros estudios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores están agradecidos por el apoyo financiero recibido por parte de la Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia S.A. a través del proyecto: "Estudio de flujos de contaminación transportados por un sistema de saneamiento y drenaje unitario en tiempo de lluvia para la ciudad de Murcia" ref-C-74/2016.

REFERENCIAS

Anta, J., Cagiao, J., Suárez, J., Peña, E. 2009. Análisis de la movilización de sólidos en suspensión en una cuenca urbana separativa mediante la aplicación del muestreo en continuo de la turbidez. *Ingeniería del Agua*, 16 (3), 189–200.

Bersinger, T., Pigot, T.; Bareille, G., Le Hecho, I. 2013. Continuous monitoring of turbidity and conductivity: A reliable, easy and economic tool for sanitation management. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 171, 151-162.

BOE. 2012. *Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico*. BOE 227 (20 septiembre 2012): 66167-66194.

Del Río, H. 2011. Estudio de los Flujos de Contaminación Movilizados en Tiempo de Lluvia y Estrategias de Gestión en un Sistema de Saneamiento y Drenaje unitario de una Cuenca Urbana Densa de la España Húmeda. *Tesis Doctoral*, Universidade da Coruña, A Coruña, España.

García, J.T., Espín-Leal, P., Vigueras-Rodríguez, A., Castillo, L.G., Carrillo, J.M., Martínez-Solano, P.D., Nevado-Santos, S. 2017. Urban Runoff Characteristics in Combined Sewer Overflows (CSOs): Analysis of Storm Events in Southeastern Spain. *Water*, 9, 303, doi: 10.3390/w9050303.

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), 521-533.

Gupta, K., Saul, A.J. 1996. Specific relations for the first flush load in combined sewer flows. *Water Research*, 30, 1244–1252.

Hannouche, A., Chebbo, G., Ruban, G., Tassin, B., Lemaire, B. 2011. Relation between turbidity and total suspended solids concentration within a combined sewer system. *Water Science and Technology*, 64(12), 2445-2452.

LeBoutillier, D.W., Kells, J.A., Putz, G.J. 2000. Prediction of pollutant load in stormwater runoff from an urban residential area. *Canadian Water Resources Journal*, 25(4), 343-359.

Métadier, M., Bertrand-Krajewski, J.L. 2012. The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes. *Water Research*, 46, 6836–6856.

Suárez, J., Cagiao, J. 2005. Vertidos de sistemas de saneamiento unitario en tiempo de lluvia: control de impactos sobre ríos. *Ingeniería y territorio*, 71, 44-45.