



## Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de  
Ingeniería de Minas

*Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos*

# **Estudio de los flujos de contaminación transportados por un sistema de saneamiento y drenaje unitario en tiempo de lluvia para la ciudad de Murcia**

*Trabajo Fin de Máster*

**AUTOR:**

Pablo Espín Leal

**DIRECTOR:**

Dr. Juan Tomás García Bermejo

**CODIRECTOR:**

D. Pedro Daniel Martínez Solano

Cartagena, octubre de 2016



## **RESUMEN**

*En el presente trabajo fin de máster se ha realizado un estudio de los flujos de contaminación movilizados durante el tiempo de lluvia en un sistema de saneamiento y drenaje unitario de dos cuencas urbanas situadas en el sureste de España, más exactamente en la ciudad de Murcia.*

*El lavado de las superficies de cuencas urbanas y de la red de abastecimiento supone un incremento de la carga contaminante en el agua residual, de modo que los vertidos de estas aguas de lavado procedentes de las descargas de sistemas de saneamiento unitarios (DSUs) pueden provocar el flujo de importantes volúmenes de contaminación a los cuerpos de agua receptores.*

*Con el propósito de estudiar y profundizar en el conocimiento de la movilización de contaminación en ambas cuencas se realiza, en primer lugar, el cálculo de los hidrogramas, polutogramas e hietogramas de un conjunto de episodios de estudio.*

*Por medio del empleo de un modelo numérico de la red, se obtienen los hidrogramas asociados a cada uno de los episodios analizados en base a los hietogramas aportados por las estaciones pluviométricas de ambas cuencas. En cuanto a los contaminantes, mediante el empleo de relaciones obtenidas en la bibliografía entre la turbidez (medida in situ) y la concentración de sólidos en suspensión, se han obtenido el conjunto de polutogramas para los eventos estudiados adquiriendo de esta manera la información necesaria para profundizar en el estudio de la movilización de contaminantes.*

*Por último, una vez obtenidos todos los datos que permiten caracterizar el evento en cuanto a sus propiedades hidráulicas, hidrológicas y contaminantes, se puede proceder al estudio de las relaciones entre sus distintos parámetros característicos como pueden ser la concentración máxima y media de SS durante el suceso, la precipitación total, el periodo seco preferente, etc., con el objetivo de establecer herramientas de predicción que permitan mejorar las labores de gestión y operación de la red durante los sucesos tormentosos.*



# ÍNDICE

## ÍNDICE DE CAPÍTULOS

<b>1. SISTEMAS DE SANEAMIENTO Y DRENAJE URBANOS.....</b>	<b>1-1</b>
1.1. EL CICLO HIDROLÓGICO .....	1-1
1.2. SISTEMAS INTEGRALES E INTEGRADOS DE SANEAMIENTO .....	1-3
1.3. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE SANEAMIENTO .....	1-5
1.3.1. Redes unitarias y separativas .....	1-6
1.3.2. Caudales y contaminación en las redes de saneamiento .....	1-7
1.3.3. Descargas de sistemas unitarios .....	1-9
1.3.4. Técnicas de drenaje urbano sostenible .....	1-12
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>2-1</b>
2.1. OBJETIVOS GENERALES .....	2-1
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2-1
<b>3. MARCO LEGISLATIVO ASOCIADO A LAS REDES DE SANEAMIENTO EN TIEMPO DE LLUVIA .....</b>	<b>3-1</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	3-1
3.2. DIRECTIVA MARCO DEL AGUA Y LOS SISTEMAS DE SANEAMIENTO EN TIEMPO DE LLUVIA.....	3-1
3.3. PLAN NACIONAL DE CALIDAD DE AGUAS: SANEAMIENTO Y DEPURACIÓN (2007-2015) .....	3-2
3.4. REAL DECRETO 1290/2012 .....	3-4
3.5. ORDEN AAA/2056/2014. AUTORIZACIONES DE VERTIDO.....	3-5
3.6. IMPLICACIONES DE LA NORMATIVA RELACIONADAS CON LAS DSUS .....	3-5
3.7. MÉTODOS DE DISEÑO DE DEPÓSITOS ANTI-DSU .....	3-6
3.7.1. Normativa alemana: ATV-Standard A 128 (1992) .....	3-6

3.7.2.	Normativa británica: BS 8005-British Standards Sewerage (1987).....	3-7
3.7.3.	Método Austriaco (Norma ÖWWV Regelbatt 19 del 1987).....	3-8
3.7.4.	Manual nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta (2014) .....	3-8
<b>4.</b>	<b>PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA URBANA.....</b>	<b>4-1</b>
4.1.	CONTAMINACIÓN ASOCIADA A CAUDALES RESIDUALES EN TIEMPO SECO .....	4-1
4.1.1.	Constituyentes de las aguas residuales.....	4-1
4.1.2.	Cargas de contaminación en las aguas residuales .....	4-2
4.1.3.	Variación temporal de la contaminación de las aguas residuales en tiempo seco .....	4-3
4.2.	FUENTES DE CONTAMINACIÓN DIFUSA URBANA.....	4-4
4.2.1.	Contaminación atmosférica.....	4-5
4.2.2.	Contaminación procedente de la superficie de la cuenca.....	4-6
4.2.3.	Contaminación en función del uso de la cuenca .....	4-7
4.3.	CONTAMINACIÓN ASOCIADA A LOS DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS EN EL INTERIOR DE CONDUCCIONES.....	4-9
4.3.1.	Problemas causados por los sedimentos en las conducciones.....	4-9
4.3.2.	Caracterización de los depósitos de sedimentos encontrados en el interior de conducciones .....	4-10
4.4.	CONTAMINACIÓN EN TIEMPO DE LLUVIA.....	4-11
4.4.1.	Niveles de caracterización de los contaminantes en redes unitarias .....	4-11
4.4.2.	Comparativa general de contaminantes encontrados en redes unitarias y separativas .....	4-14
4.4.3.	Resultados de estudios de caracterización de flujos de contaminación .....	4-16
<b>5.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO .....</b>	<b>5-1</b>
5.1.	RED DE SANEAMIENTO DEL MUNICIPIO DE MURCIA.....	5-1
5.1.1.	Descripción de las cuencas de estudio .....	5-3
5.2.	MODELO NUMÉRICO DE LA RED DE SANEAMIENTO.....	5-6
5.2.1.	Storm Water Management Model (SWMM) .....	5-6

---

5.2.2.	Modelo numérico del municipio de Murcia .....	5-10
5.3.	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	5-12
5.3.1.	Cálculo teórico del $T_c$ .....	5-12
5.3.2.	Cálculo del $T_c$ con el empleo del modelo numérico de la red.....	5-14
5.4.	ANÁLISIS DE LOS FLUJOS DE AGUA RESIDUAL EN TIEMPO SECO .....	5-16
5.4.1.	Análisis de los hidrogramas .....	5-16
5.4.2.	Análisis de la turbidez.....	5-19
<b>6.</b>	<b>EMPLEO DE LA TURBIDEZ COMO INDICADOR DE LA CONTAMINACIÓN .....</b>	<b>6-1</b>
6.1.	TURBIDEZ EN EL AGUA RESIDUAL.....	6-1
6.2.	MEDIDAS DE TURBIDEZ EN CONTINUO PARA MEJORAR LA GESTIÓN DE LOS FLUJOS DE CONTAMINANTES .....	6-3
6.3.	CORRELACIONES ENTRE LA TURBIDEZ Y EL CONJUNTO DE PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN.....	6-4
6.3.1.	Relación entre los sólidos en suspensión y la turbidez .....	6-4
6.3.2.	Resultados de analíticas en tiempo seco para las cuencas de estudio .....	6-7
6.3.3.	Correlaciones entre parámetros de contaminación en otras cuencas .....	6-7
6.3.4.	Ecuaciones empleadas en este estudio .....	6-10
<b>7.</b>	<b>PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE LLUVIA ESTUDIADOS .....</b>	<b>7-1</b>
7.1.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	7-1
7.1.1.	Resumen de episodios de lluvia analizados .....	7-1
7.1.2.	Caudales y volúmenes en episodios de lluvia .....	7-1
7.1.3.	Concentraciones de sólidos en suspensión en los episodios de lluvia .....	7-5
7.1.4.	Análisis estadístico de la concentración de sólidos en suspensión .....	7-7
7.1.5.	Comparación de CMAX y CMS con otras cuencas estudiadas .....	7-12
7.2.	ANÁLISIS DEL EFECTO DE PRIMER LAVADO .....	7-18
7.2.1.	El concepto de primer lavado.....	7-18
7.2.2.	Curvas de distribución de la masa de contaminantes vs volumen .....	7-20
7.2.3.	Análisis de las curvas M(V) para las cuencas S1 y San Félix.....	7-23

7.3.	ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS HIDROLÓGICO-HIDRÁULICOS Y DE CONTAMINACIÓN .....	7-26
7.3.1.	Relaciones entre parámetros establecidas en otras cuencas .....	7-26
7.3.2.	Correlaciones para las cuencas S1 y San Félix .....	7-29
7.3.3.	Índices de predicción de contaminación .....	7-32
<b>8.</b>	<b>POLUTOGRAMAS DE DISEÑO.....</b>	<b>8-1</b>
8.1.	CÁLCULO Y ESTUDIO DE POLUTOGRAMAS DE DISEÑO .....	8-1
8.1.1.	Elaboración de polutogramas a partir de los índices de predicción .....	8-1
8.1.2.	Cálculo y análisis de polutogramas de diseño para distintos periodos de retorno .....	8-7
8.2.	ÁBACOS DE MOVILIZACIÓN DE MASA .....	8-13
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>9-1</b>
9.1.	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO .....	9-1
9.2.	DESARROLLOS FUTUROS .....	9-2
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEJO I. HIETOGRAMAS, HIDROGRAMAS, POLUTOGRAMAS Y CURVAS M(V) PARA LOS EPISODIOS ANALIZADOS</b>		
<b>ANEJO II. EPISODIOS EMPLEADOS EN EL AJUSTE DE POLUTOGRAMAS DE DISEÑO</b>		
<b>ANEJO III. POLUTOGRAMAS DE DISEÑO PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO</b>		
<b>ANEJO IV. ÁBACOS DE MOVILIZACIÓN DE MASA PARA DISTINTAS LLUVIAS DE DISEÑO</b>		



## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1-1. Ciclo hidrológico (www.aquagroup.com) .....	1-1
Figura 1-2. Efectos de la urbanización en la respuesta de una cuenca a la precipitación (Abellán, 2016) .....	1-2
Figura 1-3. Diagrama básico de control de calidad del agua (Del Río, 2011) .....	1-4
Figura 1-4. Componentes de un sistema de saneamiento en una cuenca urbana (Del Río, 2011) .. .....	1-5
Figura 1-5. Esquema básico de redes unitarias (izquierda) y separativas (derecha) (Blogplastics) .....	1-6
Figura 1-6. Ventajas e inconvenientes de las redes separativas .....	1-6
Figura 1-7. Ventajas e inconvenientes de las redes unitarias .....	1-7
Figura 1-8. Criterios de dimensionamiento de colectores en función de la situación dentro del sistema de saneamiento (Puertas et al. 2008) .....	1-8
Figura 1-9. Funcionamiento de un punto de vertido de una red unitaria en tiempo seco y de lluvia (Seattle Public Utilities) .....	1-9
Figura 1-10. Representación del hidrograma y del polutograma de una cuenca urbana (Suárez et al., 2005).....	1-11
Figura 1-11. Principales Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (Clean Water).....	1-12
Figura 1-12. Esquema de la configuración y del funcionamiento del depósito-aliviadero de la subcuenca Cancelón en Santiago de Compostela (Suárez et al., 2005) .....	1-14
Figura 3-1. Esquema general de posibles estrategias de gestión y control de las DSU en sistemas de saneamiento unitario.....	3-10
Figura 4-1. Patrón de variación diario de los consumidores de oxígeno, sólidos en suspensión y turbidez en las aguas residuales urbanas de la cuenca de Ensanche, Santiago de Compostela (Del Río, 2011).....	4-3
Figura 4-2. Fuentes de contaminación difusas y puntuales (es.slideshare.net) .....	4-5
Figura 4-3. Contaminación del agua de lluvia (Thomas et al., 1993) .....	4-5
Figura 4-4. Depósitos típicos de sedimentos en las redes de saneamiento (Crabtree, 1989) ...	4-11

Figura 4-5. Hietograma, hidrograma y polutograma para un evento lluvioso (Di Modugno et al. 2015) .....	4-13
Figura 4-6. Esquema de subcuencas en Santiago de Compostela (Beneyto, 2004) .....	4-16
Figura 4-7. Correlaciones entre las CMS de los SS y diversos metales pesados (Cagiao, 2002) ... .....	4-17
Figura 4-8. Delimitación de la cuenca Riera d’Horta (en rojo) en Barcelona (Del Río, 2011)	4-20
Figura 4-9. Localización de las ciudades del programa PROMEDSU (Del Río, 2011) .....	4-21
Figura 5-1. Situación del término municipal de Murcia .....	5-1
Figura 5-2. Esquema Sistema Murcia-Este de la red de saneamiento de Murcia .....	5-3
Figura 5-3. Situación de las cuencas S1 y San Félix .....	5-5
Figura 5-4. Estructura del SWMM (Beneyto, 2004) .....	5-7
Figura 5-5. Esquema de capas de SWMM 5.0 (Del Río, 2011) .....	5-8
Figura 5-6. Ejemplo de los Componente Físicos empleados en el modelo de un sistema de drenaje (US-EPA, 2005) .....	5-9
Figura 5-7. Geometría del modelo de la red de saneamiento del municipio de Murcia.....	5-10
Figura 5-8. Localización de los puntos de análisis dentro del modelo de la red de saneamiento ... .....	5-11
Figura 5-9. Cálculo gráfico del tiempo de concentración para un hietograma neto y un hidrograma dado (Sánchez, 2011) .....	5-12
Figura 5-10. Respuesta de la cuenca S1 ante un pulso de lluvia uniforme en toda la cuenca..	5-14
Figura 5-11. Respuesta de la cuenca San Félix ante un pulso de lluvia uniforme en toda la cuenca .....	5-15
Figura 5-12. Patrón diario de caudales y niveles para el punto de análisis de la cuenca S1 medidos en SWMM.....	5-16
Figura 5-13. Patrón diario de niveles para el punto de análisis de la cuenca S1 .....	5-17
Figura 5-14. Patrón diario de caudales y niveles para el punto de análisis de la cuenca San Félix medidos en SWMM .....	5-18
Figura 5-15. Patrón diario de niveles para el punto de análisis de la cuenca San Félix .....	5-18
Figura 5-16. Patrón semanal de turbidez para la cuenca S1 .....	5-20
Figura 5-17. Patrón diario de turbidez para la cuenca S1 .....	5-20
Figura 5-18. Patrón semanal de turbidez para la cuenca San Félix.....	5-21
Figura 5-19. Patrón diario de turbidez para la cuenca San Félix.....	5-21

---

Figura 5-20. Patrón diario de turbidez y de caudal para ambas cuencas.....	5-22
Figura 5-21. Patrones diarios de sólidos en suspensión, turbidez y caudal para la cuenca Ensanche (Del Río, 2011).....	5-22
Figura 6-1. Valores de turbidez de distintas muestras (www.waterontheweb.org).....	6-1
Figura 6-2. Medida de turbidez según el método EPA 180.1(arriba) y según la norma ISO 7027(abajo) (Fondriest Enviromental, 2014) .....	6-2
Figura 6-3. Concentración de sólidos en suspensión totales estimada a partir de la turbidez para la cuenca Ecully (Bertrand-Krajewski, 2004) .....	6-4
Figura 6-4. Elementos involucrados en la relación turbidez-sólidos en suspensión .....	6-5
Figura 6-5. Porcentaje de DBO, Zinc y Plomo asociada a la fracción particulada en la cuenca unitaria “Le Marais”, París (Gromaire et al. 2001) .....	6-6
Figura 6-6. Relación SS-Turbidez para la cuenca Ecully .....	6-8
Figura 6-7. Relación SS-Contaminantes para la cuenca Pau .....	6-9
Figura 6-8. Relaciones SS-Turbidez/DQO/DBO <sub>5</sub> para la cuenca Ensanche en tiempo seco... ..	6-10
Figura 6-9. Relaciones SS-Turbidez/DQO/DBO <sub>5</sub> para la cuenca Ensanche en tiempo de lluvia (Del Río, 2011).....	6-11
Figura 7-1. Ejemplo de ficha resumen de un episodio (Anejo I) .....	7-6
Figura 7-2. Distribución de probabilidad acumulada para las CMAX de SS y SSV en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011) .....	7-8
Figura 7-3. Anatomía de un diagrama de caja y bigotes (Navidi, 2006).....	7-9
Figura 7-4. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMS de SS en ambas cuencas .....	7-10
Figura 7-5. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMAX de SS en ambas cuencas.....	7-11
Figura 7-6. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMS de SS en las cuencas analizadas (Murcia y Santiago de Compostela) .....	7-12
Figura 7-7. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMAX de SS en las cuencas analizadas (Murcia y Santiago de Compostela).....	7-13
Figura 7-8. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMS de SS en las cuencas analizadas (Murcia y PROMEDSU) .....	7-14
Figura 7-9. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMAX de SS en las cuencas analizadas (Murcia y PROMEDSU).....	7-15

Figura 7-10. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMS de SS en las cuencas analizadas (Murcia y Riera d’Horta) .....	7-16
Figura 7-11. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMAX de SS en las cuencas analizadas (Murcia y Riera d’Horta).....	7-17
Figura 7-12. Hidrograma y polutograma para diferentes tipos de lavado (Qin et al. 2016).....	7-18
Figura 7-13. Curvas acumulativas normalizadas para diferentes tipos de lavado (Qin et al, 2016) .....	7-19
Figura 7-14. Curvas M(V) para los SST (Park et al. 2010).....	7-20
Figura 7-15. Ejemplo de dibujo de curva M(V) para los sólidos en suspensión totales (Bertrand Krajewski et al. 1998) .....	7-21
Figura 7-16. Curvas de movilización de masa para distintos valores del coeficiente “b” (Del Río, 2011) .....	7-22
Figura 7-17. Distribución de las curvas M(V) relativas a los sólidos en suspensión para los episodios analizados en la cuenca S1 .....	7-24
Figura 7-18. Distribución de las curvas M(V) relativas a los sólidos en suspensión para los episodios analizados en la cuenca San Félix .....	7-24
Figura 7-19. Ejemplo de ajuste de M(V)-F(X) para el episodio S1_1 .....	7-25
Figura 7-20. Relación entre el $I_{PL}$ y las CMAX de SS en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011) .....	7-27
Figura 7-21. Relación entre el $I_{CMS}$ y las CMS de SS en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011)	7-28
Figura 7-22. Relación entre el $I_{MOVE}$ y las CMOV de SS en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011) .....	7-28
Figura 7-23. Matriz de correlación de los parámetros hidrológicos y las CMS de los sucesos muestreados en la cuenca urbana Fontiñas (Puertas et al., 2008) .....	7-30
Figura 7-24. Principales variables hidráulicas y de contaminación consideradas en el estudio de correlaciones .....	7-31
Figura 7-25. Relación entre el $I_{TPP}$ y el tiempo al pico de los polutogramas para ambas cuencas .....	7-34
Figura 7-26. Relación entre el $I_{CMax}$ y la concentración máxima de sólidos en suspensión para ambas cuencas (puntos excluidos) .....	7-37
Figura 7-27. Relación entre el $I_{CMax}$ y la concentración máxima de sólidos en suspensión para ambas cuencas .....	7-38
Figura 8-1. Principales parámetros de un polutograma de diseño.....	8-1

---

Figura 8-2. Polutograma episodio SF_1 y polutograma de diseño .....	8-3
Figura 8-3. Polutograma episodio S1_5 y polutograma de diseño.....	8-4
Figura 8-4. Polutograma episodio SF_2 y polutograma de diseño .....	8-4
Figura 8-5. Polutograma episodio S1_8 y polutograma de diseño.....	8-4
Figura 8-6. Ejemplo ficha resumen ajuste polutogramas (Anejo II) .....	8-5
Figura 8-7. Metodología para la elaboración de polutogramas a partir de parámetros hidrológico-hidráulicos .....	8-6
Figura 8-8. Cálculo de una lluvia de diseño mediante el software Bloques SWMM.....	8-7
Figura 8-9. Factor regional según localización geográfica .....	8-8
Figura 8-10. Hietogramas de diseño para periodos de retorno de 1 (arriba) y 10 (abajo) años. 8-9	
Figura 8-11. Hidrograma para TR=1 en el punto de análisis de la cuenca San Félix .....	8-9
Figura 8-12. Hidrograma para TR=1 en el punto de análisis de la cuenca S1 .....	8-10
Figura 8-13. Ejemplo ficha resumen de polutogramas de diseño (Anejo III) .....	8-10
Figura 8-14. Gráficas de análisis de distintos periodos de retorno para la cuenca S1.....	8-11
Figura 8-15. Gráficas de análisis de distintos periodos de retorno para la cuenca San Félix... 8-12	
Figura 8-16. Ábaco de movilización de masas para un periodo seco de 10 días en la cuenca S1 .. .....	8-13
Figura 8-17. Ábaco de movilización de masas para un periodo seco de 20 días en la cuenca San Félix .....	8-14
Figura 8-18. Ábaco de movilización de masas para una lluvia de periodo de retorno 1 año en la cuenca San Félix .....	8-15
Figura 9-1. Distribución de las curvas M(V) relativas a los sólidos en suspensión para los episodios analizados en ambas cuencas .....	9-2



## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1-1. Periodos de retorno recomendados por la Norma UNE-EN-752 (Del Río, 2011)....	1-8
Tabla 3-1. Propuesta de actuaciones en el PNCA 2007-2015 (Puertas et al., 2008).....	3-3
Tabla 4-1. Características químicas del agua residual y sus procedencias (Metcalf & Eddy, 1995) .....	4-1
Tabla 4-2. Composición típica del agua residual doméstica bruta (Metcalf & Eddy, 1995) .....	4-2
Tabla 4-3. Resumen de parámetros hidráulicos y de contaminación característicos de las cuencas Cancelón y Ensanche, Santiago de Compostela (Beneyto, 2004; Del Río, 2011) .....	4-4
Tabla 4-4. Fuentes de contaminación antropogénica en las superficies de las calles (Sansalone et al., 1997).....	4-6
Tabla 4-5. Comparación de concentraciones (Percentil 50) de escorrentías de diferentes cuencas y usos de suelo (mg/l) .....	4-8
Tabla 4-6. Contribución a la contaminación movilizada por los sucesos de lluvia en varias cuencas europeas (Gromaire et al., 2001).....	4-9
Tabla 4-7. Características de los depósitos de sedimentos en redes de alcantarillado (Crabtree, 1989) .....	4-10
Tabla 4-8. Resumen de los resultados de movilización de contaminantes en las cuencas Ecully y Chassieu (Métadier et al., 2012).....	4-15
Tabla 4-9. Comparativa de la contaminación entre aguas residuales domésticas y de escorrentía urbana (US-EPA, 1999). .....	4-15
Tabla 4-10. Valores mínimo, medio y máximo de las CMS de algunos de los contaminantes analizados y comparación con la CMDTS (Cagiao, 2002).....	4-17
Tabla 4-11. Comparación de la media de las CMS con la CMDTS para algunos contaminantes de la cuenca Cancelón (Beneyto, 2004).....	4-18
Tabla 4-12. Concentraciones medias de suceso (CMS) de contaminantes para los algunos de los sucesos muestreados en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011) .....	4-19
Tabla 4-13. Análisis de los valores de CMAX y CMS para la cuenca Riera d`Horta (Del Río, 2011) .....	4-20
Tabla 4-14. Principales características de las cuencas seleccionadas para el programa PROMEDSU (Gómez et al., 2002) .....	4-21

Tabla 4-15. Análisis de los valores de CMAX y CMS en todas las cuencas piloto caracterizadas en el PROMEDSU (Suárez et al., 2005) .....	4-22
Tabla 4-16. Resumen de resultados de la cuenca Cascina Scala (Barco et al., 2008).....	4-23
Tabla 5-1. Características de las cuencas de estudio.....	5-4
Tabla 5-2. Principales características del modelo empleado.....	5-11
Tabla 5-3. Cálculo del tiempo de concentración para la cuenca S1 .....	5-13
Tabla 5-4. Cálculo del tiempo de concentración para la cuenca San Félix .....	5-13
Tabla 5-5. Cálculo del TC de la cuenca S1 con una lluvia uniforme en toda la cuenca .....	5-14
Tabla 5-6. Cálculo del TC de la cuenca S1 con una lluvia uniforme en las subcuencas hidrológicamente más alejadas.....	5-15
Tabla 5-7. Cálculo del TC de la cuenca San Félix con una lluvia uniforme en toda la cuenca .....	5-16
Tabla 5-8. Tabla nº 6. Cálculo del TC de la cuenca S1 con una lluvia uniforme en la subcuena hidrológicamente más alejada .....	5-16
Tabla 5-9. Valores y coeficientes característicos de caudales de tiempo seco para la cuenca S1 ... ..	5-17
Tabla 5-10. Valores y coeficientes característicos de caudales de tiempo seco para la cuenca San Félix .....	5-19
Tabla 5-11. Semanas escogidas para el cálculo del patrón diario de turbidez .....	5-19
Tabla 6-1. Factores de conversión entre distintas unidades de turbidez (www.reitec.es).....	6-1
Tabla 6-2. Diferentes siglas de unidades de medida de turbidez y su significado. (www.quimicotecnica.com) .....	6-3
Tabla 6-3. Matriz de correlación de parámetros básicos seleccionados en tiempo de lluvia (tiempo seco) (Del Río, 2011) .....	6-6
Tabla 6-4. Resultados de análisis en tiempo seco para los dos puntos de estudio de la red de Murcia .....	6-7
Tabla 6-5. Comparación de las concentraciones medidas con la información mostrada en la bibliografía .....	6-7
Tabla 7-1. Episodios analizados para cada una de las cuencas .....	7-1
Tabla 7-2. Resumen de precipitación, caudales y volúmenes para los episodios analizados de la cuenca S1 .....	7-2
Tabla 7-3. Resumen de precipitación, caudales y volúmenes para los episodios analizados de la cuenca San Félix .....	7-3



---

Tabla 7-4. Resumen de precipitación, caudales y volúmenes para los episodios analizados en ambas cuencas .....	7-4
Tabla 7-5. Resumen de parámetros de contaminación para ambas cuencas .....	7-5
Tabla 7-6. Rangos de valores del coeficiente b (Saget et al., 1996).....	7-22
Tabla 7-7. Coeficientes b para distintos usos de suelo (Peng et al., 2016) .....	7-23
Tabla 7-8. Coeficientes b de análisis de movilización de los SS en ambas cuencas .....	7-25
Tabla 7-9. Análisis de regresión entre la masa de contaminantes y las características de una lluvia (Gromaire et al. 2001) .....	7-29
Tabla 7-10. Matriz de correlación entre parámetros hidrológico-hidráulicos y de contaminación en la cuenca S1 .....	7-31
Tabla 7-11. Matriz de correlación entre parámetros hidrológico-hidráulicos y de contaminación en la cuenca San Félix .....	7-32
Tabla 7-12. Cálculo del índice de tiempo al pico del polutograma para los episodios analizados en ambas cuencas .....	7-33
Tabla 7-13. Diferencias entre predicciones y valores reales del $T_{PP}$ para la cuenca S1 .....	7-34
Tabla 7-14. Diferencias entre predicciones y valores reales del $T_{PP}$ para la cuenca San Félix .....	7-35
Tabla 7-15. Cálculo de factores de forma de ambas cuencas .....	7-36
Tabla 7-16. Cálculo del índice de concentración máxima para los episodios analizados en ambas cuencas .....	7-36
Tabla 7-17. Diferencias entre predicciones y valores reales de la $C_{Max}$ para ambas cuencas .....	7-38
Tabla 8-1. Precipitaciones diarias máximas para distintos periodos de retorno en Murcia .....	8-8



# CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE SANEAMIENTO Y DRENAJE URBANOS

## ÍNDICE CAPÍTULO 1

<b>1.</b>	<b>SISTEMAS DE SANEAMIENTO Y DRENAJE URBANOS.....</b>	<b>1-1</b>
1.1.	EL CICLO HIDROLÓGICO .....	1-1
1.2.	SISTEMAS INTEGRALES E INTEGRADOS DE SANEAMIENTO .....	1-3
1.3.	ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE SANEAMIENTO .....	1-5
1.3.1.	Redes unitarias y separativas .....	1-6
1.3.2.	Caudales y contaminación en las redes de saneamiento .....	1-7
1.3.3.	Descargas de sistemas unitarios .....	1-9
1.3.4.	Técnicas de drenaje urbano sostenible .....	1-12



# 1. SISTEMAS DE SANEAMIENTO Y DRENAJE URBANOS

## 1.1. EL CICLO HIDROLÓGICO

El agua es un recurso natural único, escaso, insustituible e indispensable para la vida y la mayoría de las actividades socioeconómicas. A nivel mundial, el agua cubre aproximadamente dos terceras partes de la superficie terrestre, lo que suscita una percepción de abundancia. Sin embargo, solo el 3% del total es dulce, mientras que el 97% restante se encuentra en los océanos.

Por otra parte, el agua no es un recurso susceptible de ningún proceso de producción. Existe en cantidad finita por lo que el agua que utilizamos en la actualidad es la misma que se ha utilizado durante millones de años, siendo recirculada constantemente en un sistema entre la tierra y la atmósfera, conocido como ciclo hidrológico.

La figura 1-1 muestra los principales fenómenos asociados a este ciclo a escala global. Como se puede observar, este ciclo origina el tránsito continuo del recurso entre sus diferentes depósitos por medio de los procesos de evaporación, condensación, precipitación, escorrentía, infiltración, transpiración y fusión.

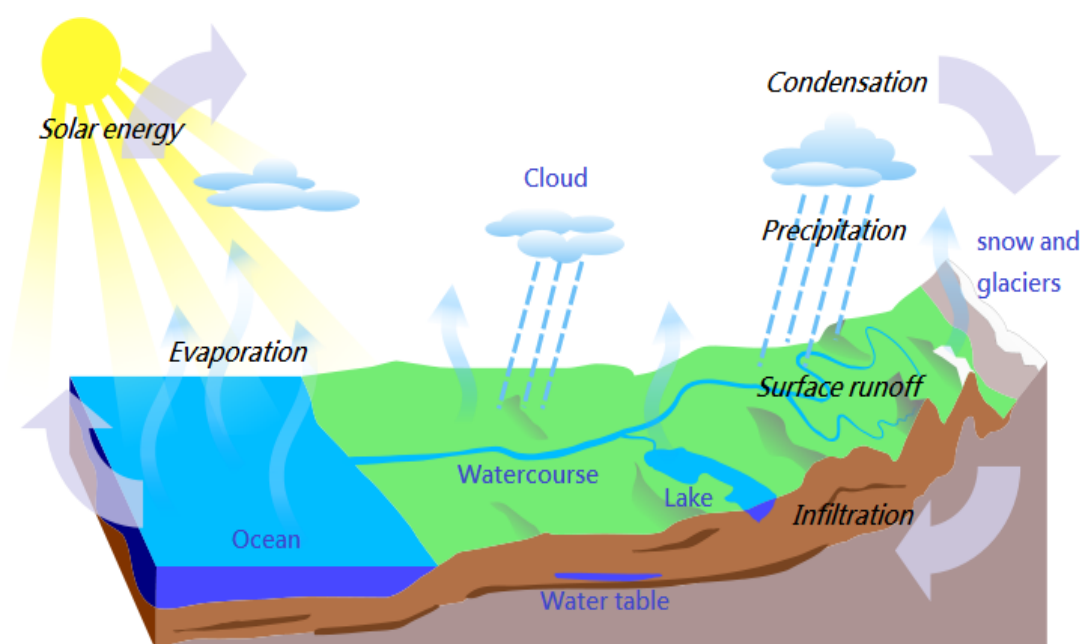


Figura 1-1. Ciclo hidrológico ([www.aquagroup.com](http://www.aquagroup.com))

Cualquier cuenca urbana ha sido en algún momento una cuenca rural. Por lo tanto, pueden considerarse estas como el resultado de una continua alteración debida al efecto de los procesos de urbanización sobre el medio natural llevados a cabo por el hombre.

A continuación, se citan los principales impactos de estos procesos en el ciclo hidrológico.

• **Impactos de la urbanización sobre la distribución del agua**

El principal efecto de la urbanización se puede caracterizar como la redistribución del agua que anteriormente era interceptada por la vegetación o almacenada en la columna suelo (Konrad *et al.*, 2005).

Los cambios se manifiestan principalmente en modificaciones en la superficie de la cuenca y en las vías de escurrimiento natural del flujo (Riccardi, 1997). El aumento de las superficies impermeables implica la reducción de las áreas de infiltración, lo que aumenta el escurrimiento superficial y reduce la percolación e infiltración, así como el escurrimiento subsuperficial y subterráneo.

Por otra parte, todas las acciones de modificación de la superficie natural (como pavimentos, nivelaciones y demás que disminuyen la resistencia al flujo) junto con las propias redes de saneamiento provocan un aumento de la velocidad del flujo superficial y una disminución del tiempo de concentración.

Partiendo de cuencas con las mismas características en cuanto a área, pendiente y forma, una cuenca urbana se diferencia de una natural en los siguientes aspectos (Roca, 2015):

- Mayor escorrentía superficial y velocidad de flujos, lo que se traduce en un aumento de los caudales punta y un menor tiempo de concentración.
- Una menor evaporación, infiltración y almacenamiento en depresiones, lo que unido a lo anterior provoca un incremento de las inundaciones.

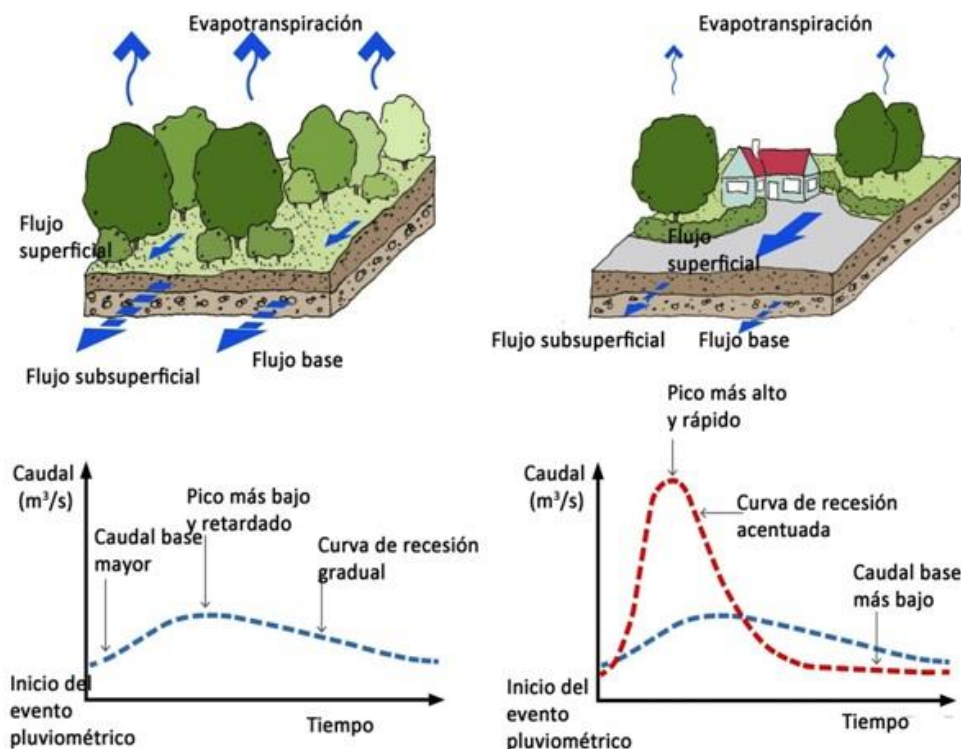


Figura 1-2. Efectos de la urbanización en la respuesta de una cuenca a la precipitación (Abellán, 2016)

- **Impactos de la urbanización sobre la calidad del agua**

Los residuos generados por la actividad humana dentro de las ciudades son en muchas ocasiones depositados sobre las superficies de las cuencas urbanas, de modo que pueden verse movilizados hacia las masas de agua receptoras durante los procesos de precipitación-escorrentía.

Entre las consecuencias de este impacto se encuentran el aumento de la carga de contaminantes, la variación de la temperatura del agua y los efectos sobre la biodiversidad y la salud humana (Abellán, 2016).

- **Otros impactos**

Otro de los efectos a resaltar es la modificación de la geomorfología de los cauces, manifestado principalmente en los siguientes cambios:

- Erosiones en las zonas de vertido provocadas por el incremento de los caudales, lo que puede provocar socavaciones en el lecho, así como la modificación de la sección transversal de los cauces.
- Alteración de los procesos de sedimentación y erosión, lo que a su vez conlleva cambios en las secciones.

Todos estos efectos promueven la necesidad de recurrir a refuerzos en determinadas zonas del cauce, no sólo para proteger ante avenidas, sino para evitar los procesos erosivos motivados por el aumento de los caudales punta debido al incremento de la impermeabilidad de la superficie de la cuenca.

Los cambios en la geomorfología de los cauces provocan a su vez una alteración sobre los hábitats. El aumento de los caudales y el consecuente incremento de la erosión pueden motivar desplazamientos de las comunidades biológicas ribereñas. Asimismo, el arrastre de partículas contaminantes puede afectar gravemente a la vida acuática. Todo este conjunto de alteraciones puede resumirse en los siguientes efectos (Abellán, 2016):

- Desvalorización del paisaje.
- Disminución de la diversidad de la fauna acuática.
- Pérdida de riberas y vegetación ribereña.
- Problemas de eutrofización.
- Introducción de especies alóctonas y desplazamiento de especies autóctonas.

## **1.2. SISTEMAS INTEGRALES E INTEGRADOS DE SANEAMIENTO**

Los sistemas de saneamiento y drenaje urbano han evolucionado a lo largo de la historia junto con las necesidades de mejorar las condiciones higiénicas, el bienestar de la sociedad, la disponibilidad de los recursos hídricos y la protección del medio ambiente. Durante estos últimos veinte años, las tecnologías aplicadas y las demandas sociales se han desarrollado e intensificado notablemente, lo que, unido a un refuerzo de los objetivos relacionados con la calidad de los sistemas acuáticos, han provocado el rechazo de

prácticas que con anterioridad eran aceptadas. En estos casos en los que es necesario romper con la tradición, se plantea la obligación de revisar los conceptos básicos y los hábitos y técnicas implantadas con el objetivo de establecer nuevas estrategias y desarrollar nuevas tecnologías que satisfagan los nuevos requisitos sociales y ambientales.

Este nuevo panorama requiere una aproximación integrada que tenga en cuenta la interrelación y dependencia entre todos los elementos del sistema con el objetivo de conseguir una gestión efectiva y sostenible. Por consiguiente, es necesario superar la visión parcial que se preocupaba exclusivamente de la recogida y conducción de las aguas residuales hasta la masa de agua receptora para avanzar hacia “sistemas integrales e integrados de saneamiento” (Puertas *et al.* 2008).

La planificación y gestión integrada debe basarse en asumir nuevos puntos de vista. Los ingenieros, científicos y medioambientalistas deben unir sus esfuerzos tanto en fase de planificación, como en las de diseño y explotación. Asimismo, la interacción óptima entre las variables instrumentales y las variables ambientales permitirán llegar a resultados óptimos en la gestión de las aguas residuales tanto en tiempo seco como en tiempo de lluvia.

En definitiva, un sistema integral e integrado de saneamiento debe ser operado con criterios de coste-eficacia para solucionar los problemas de drenaje y control de la contaminación, presentando a su vez unos objetivos y estándares de calidad realistas con los usos de aguas receptoras (Puertas *et al.* 2008). La gestión se debe orientar hacia la calidad de las aguas receptoras con el objetivo de facilitar su uso por el hombre y su salud ecológica y ambiental.



Figura 1-3. Diagrama básico de control de calidad del agua (Del Río, 2011)



### 1.3. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE SANEAMIENTO

Una red de saneamiento, comúnmente conocida como red de alcantarillado, es un sistema compuesto por un conjunto de infraestructuras hidráulicas que se encargan de la recogida y transporte de las aguas residuales y pluviales hasta el lugar de tratamiento y vertido.

Tradicionalmente, las redes de saneamiento han seguido la siguiente clasificación:

- *Redes unitarias*: transportan en el mismo conducto aguas residuales y pluviales.
- *Redes separativas*: las aguas residuales y pluviales se evacúan por diferentes conductos.
- *Redes pseudo-separativas*: existe separación entre aguas pluviales y residuales en las calles, pero no en las viviendas. Existe una red doble, una exclusivamente de pluviales en viales, espacios verdes, etc., y otra que recoge el agua residual y pluvial conjuntamente de las viviendas.
- *Redes doblemente separativas*: disponen de conductos diferenciados para aguas residuales urbanas e industriales, además de la red de pluviales.

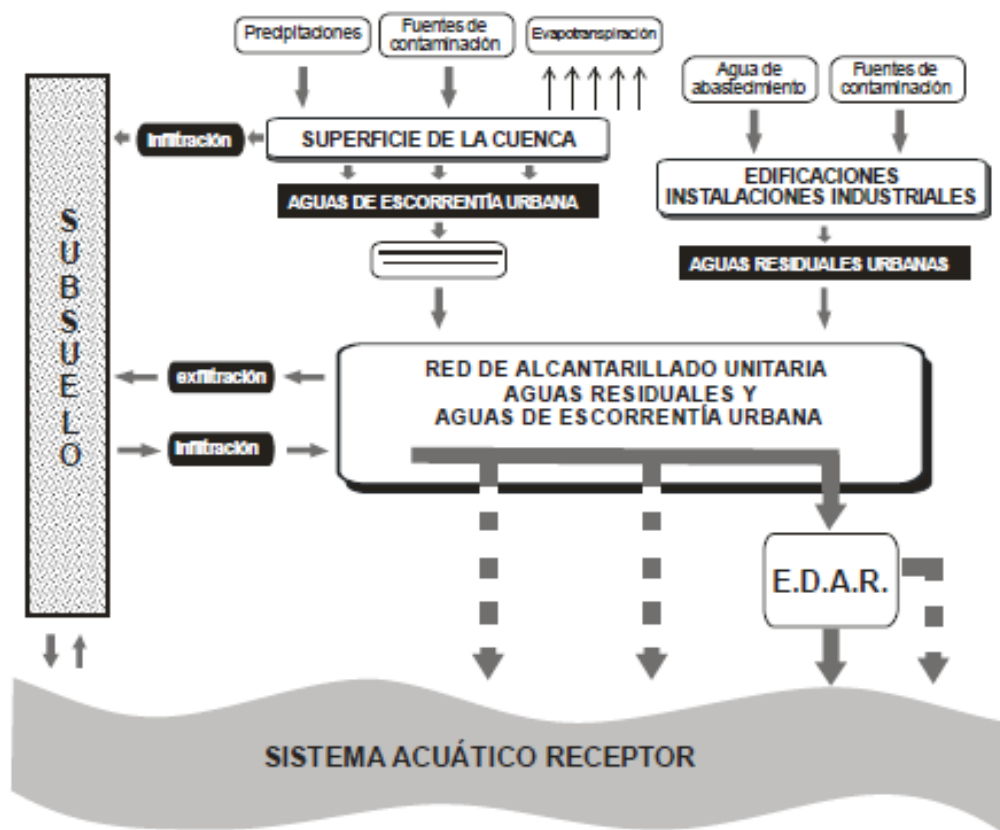


Figura 1-4. Componentes de un sistema de saneamiento en una cuenca urbana (Del Río, 2011)

### 1.3.1. Redes unitarias y separativas

Los dos tipos de redes más habituales que se encuentran en los sistemas de saneamiento son las unitarias y las separativas. Las primeras transportan aguas residuales en tiempo seco, y aguas residuales y pluviales en tiempo de lluvia. Por otro lado, las separativas tienen conducciones independientes para las aguas residuales y para las aguas pluviales.

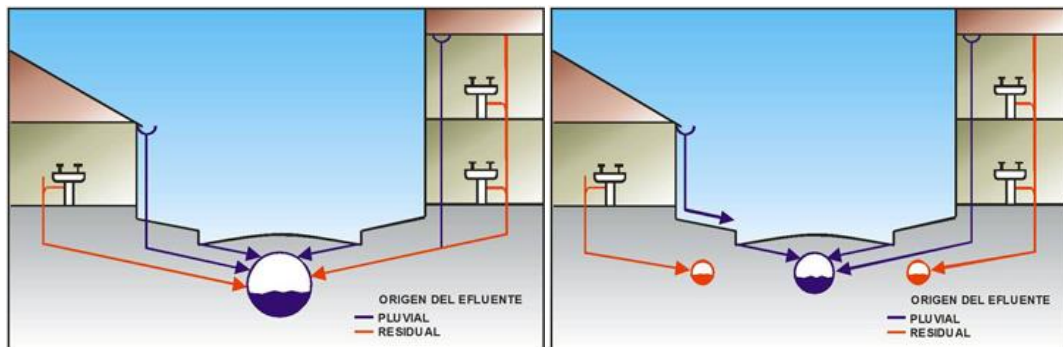


Figura 1-5. Esquema básico de redes unitarias (izquierda) y separativas (derecha) (Blogplastics)

Aunque en primera instancia pueda considerarse que la tipología separativa resulta ventajosa respecto a la unitaria, puede afirmarse que ambas configuraciones presentan inconvenientes y ventajas.

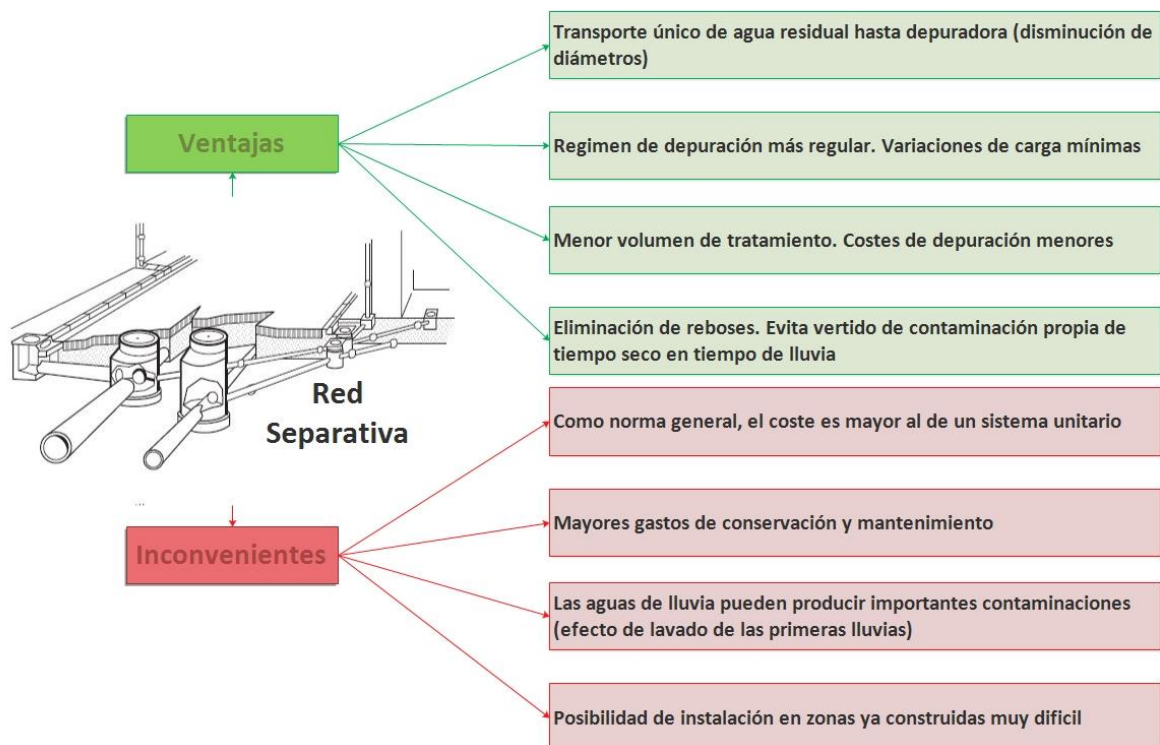


Figura 1-6. Ventajas e inconvenientes de las redes separativas

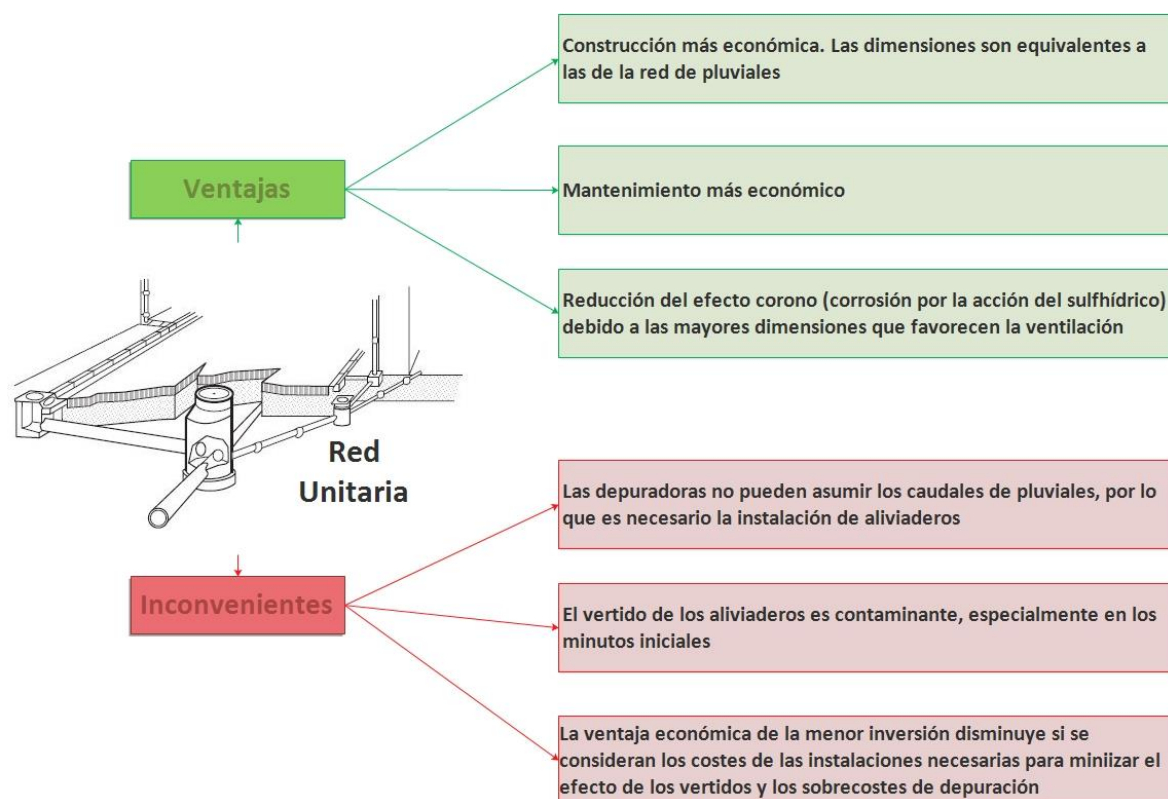


Figura 1-7. Ventajas e inconvenientes de las redes unitarias

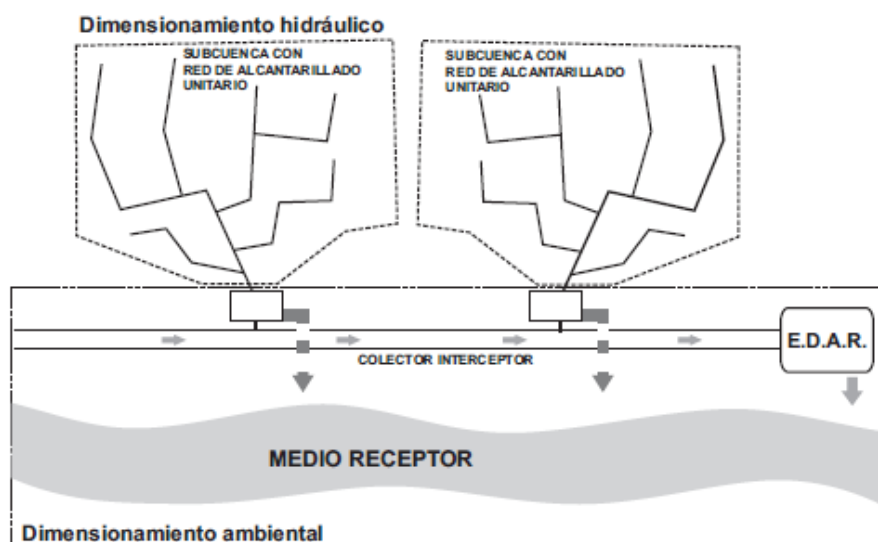
### 1.3.2. Caudales y contaminación en las redes de saneamiento

En el caso de redes unitarias, las interacciones entre los principales componentes del sistema son más importantes que en los sistemas separativos. Durante los episodios lluviosos la red debe de ser capaz de transportar, además de las aguas residuales propias del tiempo seco, las aguas pluviales procedentes del drenaje de la cuenca. Por lo tanto, es necesario el estudio de dos factores principales: los caudales y la contaminación.

- **Caudales**

La función principal de una red de saneamiento unitaria es el transporte hacia un determinado punto (una EDAR generalmente) del caudal de agua residual y el caudal de agua pluvial correspondiente a una lluvia con un determinado periodo de retorno. En los casos en los que la lluvia exceda el volumen movilizado para el periodo de retorno de diseño, la práctica tradicional consiste en el vertido del agua excedente al medio receptor mediante la instalación de un conjunto de dispositivos de alivio (aliviaderos). Por lo tanto, el sistema de aliviaderos determina las cargas hidráulicas y de contaminación que llegan a la depuradora y el impacto sobre la masa de agua receptora.

En el cálculo del caudal máximo de diseño participan principalmente dos criterios que varían en función el papel del elemento en el sistema de saneamiento (Puertas *et al.*, 2008). Por un lado, en el caso del diseño del alcantarillado de una subcuenca, el criterio que impera es el de drenaje con el objetivo de evitar inundaciones. Por otro lado, en el caso de los colectores interceptores principales encargados de recoger el agua de diferentes subcuencas, el criterio a seguir viene marcado por el alcance de determinados objetivos ambientales en el sistema acuático receptor.



*Figura 1-8. Criterios de dimensionamiento de colectores en función de la situación dentro del sistema de saneamiento (Puertas et al., 2008)*

En zonas comerciales y grandes poblaciones en las que las interrupciones del tráfico, las alteraciones en la actividad y, en general, cualquier tipo de daño derivado de una inundación pueda ser el motivo de pérdidas de valor considerable, es necesario considerar lluvias de cálculo cuya probabilidad de ocurrencia sea baja. En otros casos como zonas de campo y pequeñas poblaciones puede adoptarse como caudal de diseño aquel producido por una lluvia de mayor probabilidad.

Es necesario tener en cuenta que cuanto mayor sea el caudal de cálculo adoptado, mayor será el coste de las infraestructuras de saneamiento y menor el riesgo de inundaciones, lo que supone una reducción de los perjuicios económicos y sociales.

*Tabla 1-1. Periodos de retorno recomendados por la Norma UNE-EN-752 (Del Río, 2011)*

Parámetro	Periodo de retorno para sobrecarga (años)	Periodo de retorno para inundación (años)
Áreas rurales	1	10
Áreas suburbanas	2	20
Áreas urbanas con riesgo de inundación conocido	2	30
Áreas urbanas sin riesgo de inundación conocido	5	30
Pasos subterráneos de tráfico y ferroviarios	10	30

- **Contaminación**

En cuanto a la contaminación emitida en tiempo de lluvia por los aliviaderos, tradicionalmente se consideraba que era diluida por las aguas pluviales. Este criterio se basaba en la hipótesis de que las aguas de lluvia procedentes del drenaje de la cuenca eran limpias. Sin embargo, en la actualidad se conoce que estas aguas pluviales no están exentas de contaminación, de modo que los vertidos que se producen al medio receptor aportan importantes cargas de sólidos y otras sustancias.

El impacto de una red de saneamiento en el entorno receptor puede diferenciarse en tres tipos de fenómenos de contaminación asociados a las aguas pluviales (Del Río, 2011):

- En primer lugar, el impacto generado por las aguas de escorrentía que llegan de forma directa a través de redes separativas a las masas de agua.
- En segundo lugar, el generado por el vertido desde aliviaderos conocidos como DSU (Descargas de Sistemas Unitarios) o CSO (*Combined Sewer Overflows*). Las aguas vertidas en estos casos son mezcla de aguas pluviales contaminadas y aguas residuales urbanas convencionales.
- En tercer lugar, el daño generado en las depuradoras en tiempo de lluvia. El incremento de caudal que recoge la red acaba llegando a las depuradoras, de modo que, si se supera su capacidad de tratamiento, se produce un rebose en ese punto. Adicionalmente, el proceso de depuración puede quedar alterado ante el incremento de carga, provocando una disminución de rendimiento y afectando finalmente a la masa de agua receptora.

### 1.3.3. Descargas de sistemas unitarios

La mayor parte de los sistemas de saneamiento existentes en España y Europa son de tipo unitario. Durante el tiempo seco, estos sistemas realizan la recogida y transporte del agua residual generada por las actividades humanas, comerciales e industriales. Sin embargo, en tiempo de lluvia los caudales predominantes en la red son los generados por las aguas pluviales de modo que, en el caso de recibir una lluvia de carácter torrencial inusual, los sistemas unitarios pueden no ser capaces de transportar la totalidad de los caudales recogidos a lo largo de la cuenca urbana.

Este hecho tiene como consecuencia la generación de desbordamientos, denominados en este caso Descargas de Sistemas Unitarios (DSUs) o CSOs (*Combined Sewer Overflows*). Tradicionalmente, la solución a este problema ha sido proporcionar ciertas infraestructuras a lo largo de la red unitaria de modo que, durante un evento lluvioso medio o fuerte, se permita desviar los caudales por encima de un cierto nivel en el colector hasta una masa de agua natural. La siguiente figura muestra esquemáticamente el funcionamiento de dichas instalaciones.

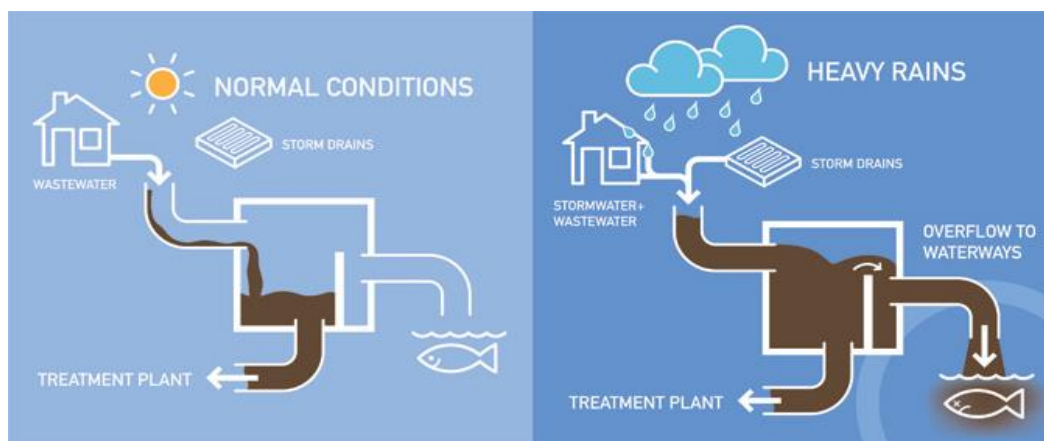


Figura 1-9. Funcionamiento de un punto de vertido de una red unitaria en tiempo seco y de lluvia (Seattle Public Utilities)

Históricamente, para limitar la contaminación emitida por dichas DSUs, así como para el diseño de los denominados dispositivos anti-DSU, se solía adoptar el concepto de dilución. Así, los criterios y normativas más simples permitían los vertidos de las DSU cuando la ratio entre el caudal de agua residual de tiempo seco y el caudal circulante por la red unitaria superaba un cierto valor de dilución de diseño, con valores típicos que oscilaban entre 2 y 8. Esta aproximación asumía que las aguas de escorrentía no están sustancialmente contaminadas. Sin embargo, se ha demostrado que esto no es así, y en la actualidad se sabe que las aguas que circulan por las redes unitarias en tiempo de lluvia contienen una importante carga de contaminación, como demuestran por ejemplo a nivel nacional los trabajos del proyecto PROMEDSU (Programa Nacional de Medición de Descargas de Sistemas Unitarios).

A continuación, el concepto de dilución se fue abandonando y el diseño de los depósitos se comenzó a desarrollar a partir de la idea de capturar el volumen de lluvia correspondiente al denominado *primer lavado* de la cuenca. Dicho concepto asumía que las primeras aguas de escorrentía eran las más contaminadas, de modo que reteniendo éstas se retenía la mayor parte de la contaminación. Los métodos desarrollados a partir de esta filosofía definían un valor de intensidad media para una *lluvia crítica*, que se debía retener en las unidades anti-DSU durante un tiempo predeterminado.

Este es el caso de la propuesta desarrollada en la norma *UNE-EN 752*, sobre “Sistemas de desagües y alcantarillado exteriores a edificios”. Esta normativa propone dos criterios sencillos para la definición de las estructuras anti-DSU:

- El primero está basado en el concepto de lluvia crítica, citando una capacidad de retención del sistema de 10 a 30 L/s/ha (aunque sin establecer ningún tiempo de retención).
- El segundo criterio se sugiere para zonas menos sensibles, y señala como límite para la generación de DSUs diluciones de 5 a 8 veces el caudal medio de tiempo seco (Puertas *et al.*, 2008).

Al igual que en el caso anterior, el criterio de la recogida de las aguas del primer lavado se demostró dependiente de las características de la cuenca de drenaje, así como de las características de la lluvia y no siempre se cumple. Por el contrario, de los resultados de las mediciones realizadas en diversos puntos de la red, el efecto del primer lavado no es del todo constatable, sino que la movilización de la contaminación depende también de otros factores como las características físicas de la cuenca (la forma y la pendiente de la superficie de esta y de su red de drenaje), así como de la distribución y características de la lluvia al igual que otros parámetros como los días precedentes sin precipitación. Esto ha llevado a que los criterios propuestos hasta el momento no se ajusten como reglas fieles para dimensionar instalaciones que minimicen la contaminación de los desbordamientos de los sistemas unitarios.

Así, en la actualidad uno de los objetivos principales es el de conocer la distribución de la carga contaminante a lo largo del episodio de lluvia, lo que se conoce como polutograma (figura 1-10), a partir de la medición del fenómeno de manera independiente en cada cuenca. En dicho polutograma se puede distinguir la concentración máxima de contaminación alcanzada por el suceso ( $C_{max}$ ), así como la concentración media del suceso ( $C_{MS}$ ), obtenida teniendo en cuenta el volumen total de agua escurrida.



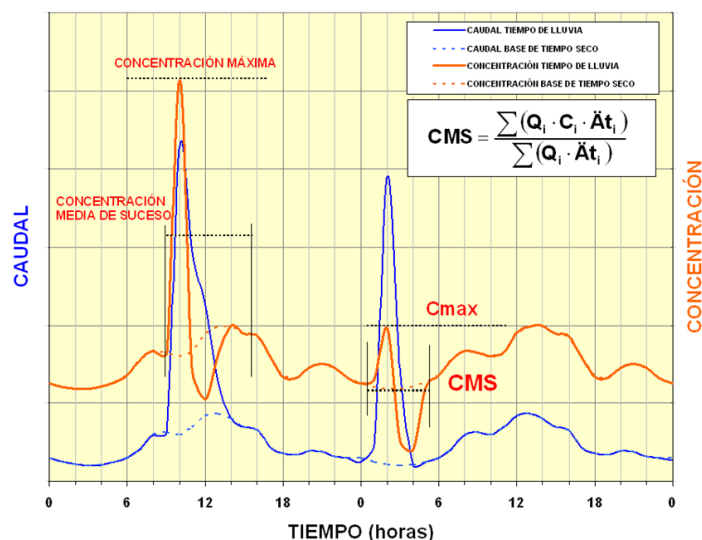


Figura 1-10. Representación del hidrograma y del polutograma de una cuenca urbana (Suárez et al., 2005)

En diversos países, como Estados Unidos, se han establecido políticas que aseguran la retención del 90% de la contaminación emitida por los desbordamientos de las redes de saneamiento a partir del concepto del WQCV (*Water Quality Control Volume*). Dicho término representa el volumen de escorrentía de la lluvia de volumen 1 pulgada (25 litros aproximadamente) sobre la cuenca y que debe ser retenido para asegurar la consecución del objetivo. Dicha lluvia equivale a la lluvia de percentil 90 del año medio (año completo de registro de precipitaciones en el que se han descontado aquellas de periodo de retorno superior a los 2 años) o lo que es lo mismo, la lluvia de periodo de retorno interanual. Por lo tanto, subyace el concepto de que el 90% de la escorrentía del año medio transporta el 90% de la carga contaminante. Se trata pues de un criterio que limita el volumen de la contaminación emitida.

Se puede adoptar un nivel de exigencia mayor siempre y cuando se adquiriera el conocimiento de las necesidades ecológicas del medio receptor, más concretamente los límites de contaminación que sería capaz de autodepurar dicho medio sin sufrir daños, así como su duración en el tiempo. Esto permite establecer los límites de la contaminación de las DSUs. Ejemplo de esto es el *Urban Pollution Management Manual* del Reino Unido (UPM), donde se establecen límites de emisión en función de las características del medio receptor.

Otro nivel de exigencia que ha alcanzado cierta fuerza en Europa viene de limitar el número de desbordamientos anuales, existiendo propuestas de limitarlos a valores de 20 desbordamientos, lo cual no tiene en cuenta las características del medio receptor.

En definitiva, y a la vista de la diversidad de criterios para el diseño de los sistemas de saneamiento desde el punto de vista de los desbordamientos, se debe invertir en conocer cómo se distribuye la contaminación en los sistemas de saneamiento durante los episodios de lluvia y en definir las posibles actuaciones, así como los Programas de gestión y control basados en unos Estándares de Calidad de Aguas – EQS (*Environmental Quality Standards*).

### 1.3.4. Técnicas de drenaje urbano sostenible

Con el objetivo de tener en cuenta la problemática presentada en el anterior apartado, un plan de saneamiento integral de una cuenca debe de considerar en el diseño del sistema elementos nuevos, lo cuales no era usual encontrar anteriormente.

Las Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TDUs), también conocidas como TGEUs (Técnicas de Gestión de Escorrentía Urbana) o SUDs (Sistemas Urbanos Sostenibles), son procedimientos destinados a que el sistema global de saneamiento mejore su eficacia en la recogida, transporte y depuración de las aguas de escorrentía (Anta *et al.*, 2012).

Los principales beneficios de estas técnicas son el control de la cantidad de agua movilizada en los episodios de lluvia y el control de la contaminación. Por un lado, permiten reducir las puntas de caudal causadas por la impermeabilización del terreno, lo que disminuye a su vez posibles problemas de capacidad hidráulica del sistema. Por otro lado, favorecen la reducción de la contaminación vertida mediante procesos de depuración física, química y biológica. En definitiva, estos nuevos elementos permiten el incremento de las tasas de infiltración, la recarga de recursos subterráneos y la disminución tanto de los impactos de los vertidos como de la contaminación movilizada hacia las masas receptoras.

En la siguiente figura se recogen las principales técnicas de drenaje urbano sostenible clasificadas en función del lugar en el que se apliquen dentro del sistema.

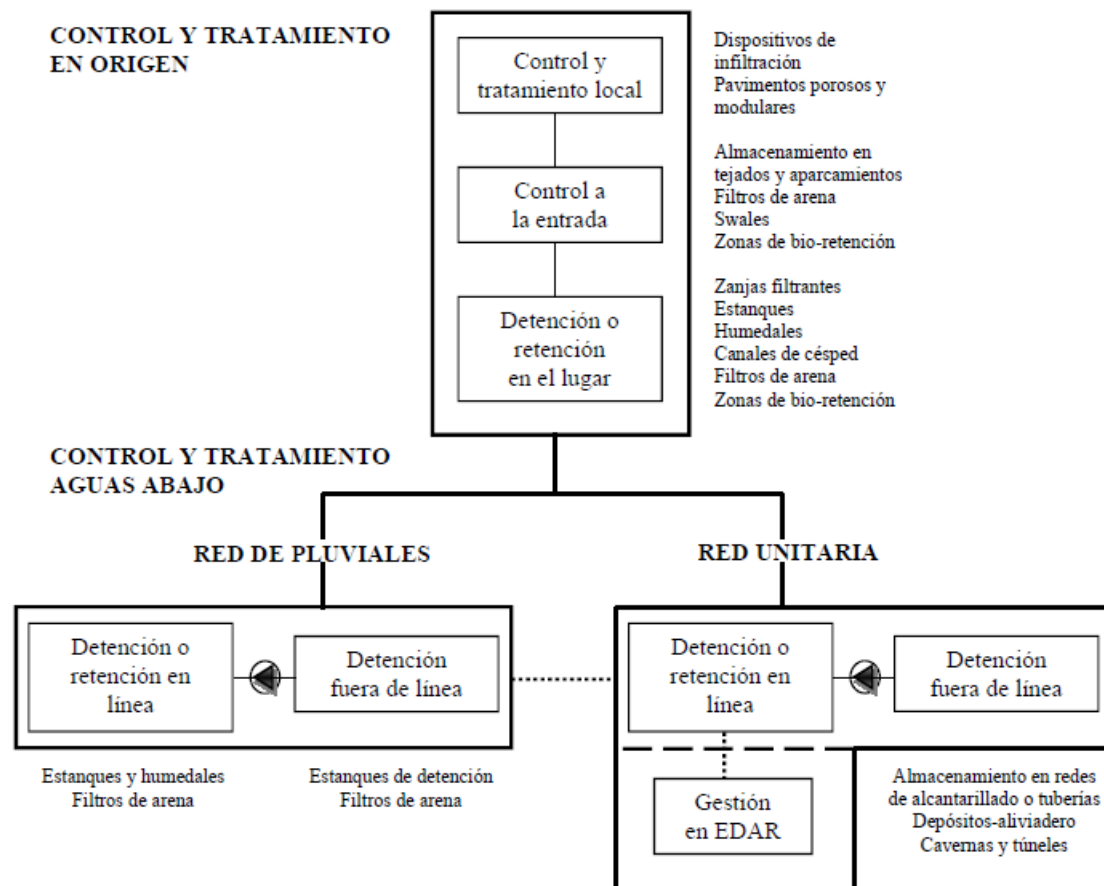


Figura 1-11. Principales Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (Clean Water)



Los sistemas de control en origen están formados por aquellas medidas que se aplican a elementos del sistema de drenaje previamente a su incorporación a la red de saneamiento mientras que los sistemas para el control aguas abajo son aquellos que se emplean en la red de alcantarillado o en los puntos previos al vertido de las aguas pluviales al medio receptor.

Generalmente, resulta mucho más económico prevenir la generación de escorrentía que proceder a su tratamiento posteriormente. Es por este motivo por lo que las TDUs de control en origen se están implantando a un ritmo cada vez mayor. Sin embargo, es habitual complementar estas técnicas con infraestructuras de control y tratamiento aguas abajo, especialmente con la instalación de los denominados tanques de tormentas.

Los tanques de tormenta, también conocidos como depósitos-aliviadero o Sistemas de Control y Tratamiento de Reboses (SCTR), son un tipo de infraestructuras que se sitúan normalmente en los entronques de las redes de alcantarillado de las subcuencas urbanas con los colectores interceptores principales (Suárez *et al.*, 2005). Las misiones fundamentales de los depósitos-aliviadero son (Beneyto, 2004):

- Homogenizar y regularizar los caudales que se dirigen a la depuradora, es decir, reducir los valores punta de caudal y contaminación que llegan a la depuradora.
- Minimizar los contaminantes que se vierten al medio receptor, realizando la captura del primer lavado o proporcionando algún tipo de tratamiento a los reboses.

En cuanto a su tipología, estos se pueden clasificar, según la misión que desempeñe el tanque o tanques que los configuren, en tres grupos principales:

- *Depósitos aliviadero con tanque de primer lavado.* Cuya misión principal es almacenar las primeras aguas de lluvia con mayores concentraciones de contaminantes. Dentro de esta tipología se pueden diferenciar en función de su conexión al alcantarillado, ya sea en línea o fuera de línea.
- *Depósitos-aliviadero con tanque de sedimentación.* Estas infraestructuras funcionan de forma similar a un decantador primario de una EDAR, de modo que el material sedimentable decanta hacia el fondo y se vierte en los reboses el agua clarificada. Al igual que en la tipología anterior, existen dos vertientes: en línea y fuera de línea.
- *Depósitos-aliviadero mixtos.*

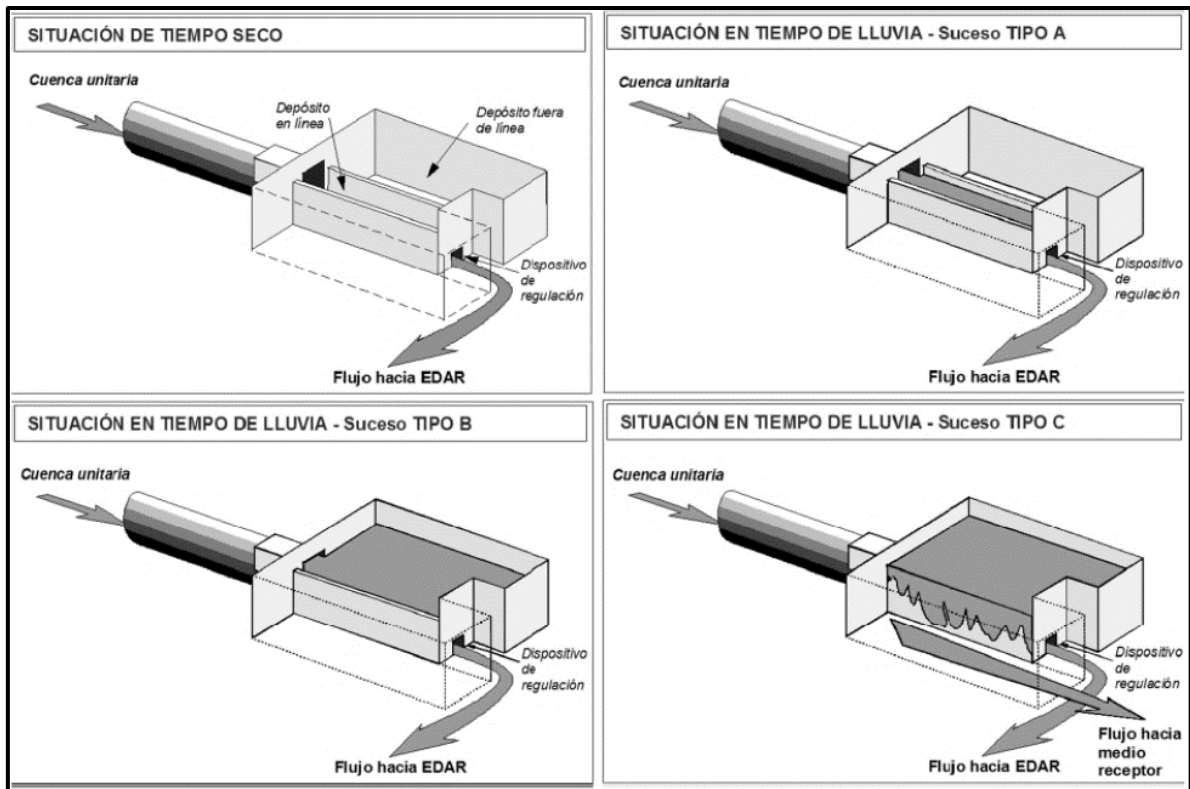


Figura 1-12. Esquema de la configuración y del funcionamiento del depósito-aliviadero de la subcuenca Cancelón en Santiago de Compostela (Suárez et al., 2005)

# CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

## ÍNDICE CAPÍTULO 2

<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>2-1</b>
2.1. OBJETIVOS GENERALES .....	2-1
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2-1



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVOS GENERALES**

El principal objetivo de este trabajo es ampliar y profundizar en el estudio de los flujos de contaminación movilizados durante los episodios lluviosos en cuencas urbanas con sistemas de saneamiento unitarios. Mejorar el conocimiento del origen y desarrollo de este fenómeno es de vital importancia con vista a optimizar su gestión y reducir al mínimo los impactos que los vertidos ejercen sobre las masas de agua receptoras.

Dentro de este contexto, obtener más información sobre la polución transportada por las redes en tiempo húmedo es sumamente importante con el fin de dar cumplimiento a la legislación vigente (R.D 1290/2012) en lo que se refiere a limitación de contaminación por desbordamientos. Dicho Real Decreto propone la fecha de 2019 para que las autorizaciones de vertido de poblaciones con más de 50000 habitantes equivalentes, caso de la ciudad de Murcia, dispongan en sus sistemas de saneamiento de dispositivos capaces de limitar la contaminación emitida, así como de estudios para la minimización de los impactos causados en tiempo húmedo.

Con el propósito final de llegar a estos niveles de control en la red, cuantificar la carga de contaminante en continuo resulta un paso muy significativo. En este sentido, estudiar las relaciones entre parámetros medidos en continuo en la red y los contaminantes típicamente obtenidos mediante analíticas en laboratorio puede convertirse en una herramienta fundamental. Es por este motivo que uno de los objetivos de este trabajo es estudiar y aplicar las correlaciones entre parámetros de contaminación fácilmente medibles (como la turbidez) y contaminantes no medidos en continuo (caso de los sólidos en suspensión).

Por último, se establece como objetivo el estudio de las relaciones existentes entre los principales parámetros hidrológico-hidráulicos que describen un suceso lluvioso y las variables que definen los flujos contaminantes en la red con la misión de desarrollar estrategias de predicción y gestión de la red en tiempo de lluvia.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Con el fin de conseguir los objetivos generales anteriormente expuestos se plantean a continuación los siguientes objetivos específicos:

- Estudio del estado actual del conocimiento en cuanto a la problemática asociada a la gestión de los desbordamientos en redes de saneamiento unitarias en tiempo de lluvia, así como la incidencia de estos vertidos en las masas de agua receptoras.
- Análisis de las relaciones encontradas en la bibliografía entre la turbidez medida en la red en continuo y los parámetros de contaminación relevantes con el fin de obtener la concentración a partir de registros de turbidez.
- Aplicación de un modelo numérico de la red de saneamiento de Murcia con el objetivo de conocer el comportamiento hidrológico-hidráulico de dicho sistema.

- Caracterización de la movilización de contaminantes en diversas cuencas de la red, así como la obtención de las curvas de concentración de contaminantes (polutogramas) asociadas a diversos eventos pluviométricos.
- Elaboración de índices de predicción de la contaminación movilizada en las cuencas de estudio en tiempo de lluvia a partir de variables hidrológico-hidráulicas.
- Definición de polutogramas de diseño a partir de índices de predicción de contaminación.
- Definición de herramientas de gestión y operación del sistema de saneamiento en tiempo de lluvia en base al conocimiento de la movilización de contaminación.

# CAPÍTULO 3: MARCO LEGISLATIVO ASOCIADO A LAS REDES DE SANEAMIENTO EN TIEMPO DE LLUVIA

## ÍNDICE CAPÍTULO 3

<b>3. MARCO LEGISLATIVO ASOCIADO A LAS REDES DE SANEAMIENTO EN TIEMPO DE LLUVIA .....</b>	<b>3-1</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	3-1
3.2. DIRECTIVA MARCO DEL AGUA Y LOS SISTEMAS DE SANEAMIENTO EN TIEMPO DE LLUVIA.....	3-1
3.3. PLAN NACIONAL DE CALIDAD DE AGUAS: SANEAMIENTO Y DEPURACIÓN (2007-2015) .....	3-2
3.4. REAL DECRETO 1290/2012 .....	3-4
3.5. ORDEN AAA/2056/2014. AUTORIZACIONES DE VERTIDO.....	3-5
3.6. IMPLICACIONES DE LA NORMATIVA RELACIONADAS CON LAS DSUS .....	3-5
3.7. MÉTODOS DE DISEÑO DE DEPÓSITOS ANTI-DSU .....	3-6
3.7.1. Normativa alemana: ATV-Standard A 128 (1992) .....	3-6
3.7.2. Normativa británica: BS 8005-British Standards Sewerage (1987).....	3-7
3.7.3. Método Austriaco (Norma ÖWWV Regelbatt 19 del 1987).....	3-8
3.7.4. Manual nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta (2014) .....	3-8





### **3. MARCO LEGISLATIVO ASOCIADO A LAS REDES DE SANEAMIENTO EN TIEMPO DE LLUVIA**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

Como ya se ha comentado en anteriores capítulos, la generación de vertidos a los medios receptores no queda totalmente eliminada con la utilización de sistemas de control y tratamiento de reboses. Es por ello que se hace necesario el desarrollo de un marco legislativo que establezca las condiciones y características de las emisiones de agua en tiempo de lluvia desde los sistemas de saneamiento.

La *Directiva Europea 91/271/CEE* sobre el tratamiento de aguas residuales no es muy detallada en cuanto a los vertidos en tiempo de lluvia desde redes unitarias. Simplemente cita de forma general que las redes de saneamiento deben ser diseñadas para transportar toda el agua durante un suceso lluvioso, minimizando en todo caso los vertidos de las aguas de tormenta. En cuanto a la limitación de vertidos, esta normativa deja en manos de los estados miembros la libertad de determinar la dilución necesaria en el vertido o la imposición de un número máximo de reboses.

En España, la *Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar* (orden del 13 de julio de 1993) fue uno de los primeros ejemplos de normativa en este tema. En este texto se comenta que en el caso del diseño de colectores de sistemas unitarios deberá de tenerse en cuenta el régimen pluviométrico de la zona y precisa que si la capacidad de estos se puede ser sobrepasada podrá existir un aliviadero que permita evacuar al mar el exceso de caudal.

Desarrollada a lo largo de los años 90, la normativa europea *UNE-EN 752: Sistemas de desagües y de alcantarillado exteriores a edificios*, impone los requisitos básicos de comportamiento a los que se deben ajustar los sistemas de desagüe y alcantarillado. Asimismo, incluye como factores en el diseño de los aliviaderos los caudales, el volumen, la duración y frecuencia de las descargas, las concentraciones y cargas contaminantes y la presión hidrobiológica.

En los siguientes apartados de este capítulo se realizará una revisión de las principales normativas actuales relativas a los sistemas de saneamiento en tiempo de lluvia.

#### **3.2. DIRECTIVA MARCO DEL AGUA Y LOS SISTEMAS DE SANEAMIENTO EN TIEMPO DE LLUVIA**

La *Directiva Marco del Agua* (DMA), o *Directiva 2000/60/CE*, establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de agua incidiendo particularmente en los aspectos medioambientales. Los planteamientos más significativos de la DMA se sintetizan en la búsqueda de la convergencia en cuanto a la oferta, la demanda y la gestión del agua, en la mejora de la calidad de las aguas y el medio ambiente, la introducción de

mayor eficacia que permita un ahorro del recurso y una participación más elevada del sector privada y de los usuarios.

En cuanto a los vertidos a las masas de agua, la DMA impone su control con el fin de su eliminación o su progresiva reducción lográndose con ello el buen estado ecológico de todas las aguas para finales del 2015. Así, en su *artículo 10: Planteamiento combinado respecto de las fuentes puntuales y difusas* se exige a los Estados miembros el establecimiento o aplicación de:

- Los controles de emisión basados en las mejores técnicas disponibles.
- Los valores límite de emisión que correspondan.
- En el caso de impactos difusos, los controles y mejores prácticas medioambientales.

A pesar de que la DMA defina el marco común y los objetivos y principios generales, es conveniente señalar la existencia de condiciones y necesidades distintas a lo largo de toda la Unión Europea, por lo que se requieren soluciones específicas. Los programas de medidas deben de ajustarse a los requisitos regionales y locales (ámbito de demarcación hidrográfica, ámbito autonómico e incluso ámbito local). Queda claro que la problemática de los vertidos en tiempo de lluvia desde sistemas de saneamiento debe ser objeto de “programas de medidas específicas locales”, que podrían relacionarse, en principio, con el régimen de lluvias, el tipo de sistema acuático y su clasificación y los objetivos de calidad fijados (AEAS, 2005).

### **3.3. PLAN NACIONAL DE CALIDAD DE AGUAS: SANEAMIENTO Y DEPURACIÓN (2007-2015)**

Desarrollado con el objetivo de cumplir los requisitos establecidos en las *Directivas 2000/60 y 91/271*, este plan recoge la obligación de la Unión Europea de disponer de un instrumento de planificación-programación que defina el camino a seguir para cumplir las obligaciones de dichas Directivas europeas en materia de calidad de aguas de ríos y costas. El plan 2007-2015 continúa la labor realizada por el Plan de Saneamiento y Depuración 1995-2005.

En este Plan también se tienen en cuenta los resultados obtenidos en la caracterización de contaminantes movilizados en tiempo de lluvia en el Programa PROMEDSU. En el apartado *Estado actual del tratamiento de las cargas de episodios de lluvia* señala la importancia del control de la contaminación producida por descargas de sistemas unitarios promovidas por el alivio de la mezcla de agua residual con pluvial durante tormentas.

Además, este Plan marca como líneas de actuación e investigación el diseño y estudio de tanques de tormenta, planeando una inversión de unos 3000 millones de euros para actuaciones de este tipo y otro tanto por ciento del presupuesto para el fomento de labores de I+D+i en este campo. La siguiente tabla muestra un resumen de las inversiones previstas.

**Tabla 3-1. Propuesta de actuaciones en el PNCA 2007-2015**  
(Puertas et al., 2008)

	<b>Inversión prevista en tanques de tormenta (€)</b>	<b>Actuaciones encaminadas a fomentar la I+D+i (€)</b>
ANDALUCÍA	157.600.000	45.008.456
ARAGÓN	60.000.000	13.344.000
CANARIAS	0	21.185.000
CANTABRIA	0	10.000.000
CASTILLAY LEÓN	145.995.000	25.000.000
CASTILLA-LA MANCHA	15.000.000	16.000.000
CATALUÑA	1.048.712.100	25.241.500
CIUDAD AUTÓNOMA DE CEUTA	0	0
CIUDAD AUTÓNOMA DE MELILLA	0	0
COMUNIDAD DE MADRID	580.000.000	51.000.000
COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA	22.895.517	1.760.000
COMUNIDAD VALENCIANA	650.000.000	39.000.000
EXTREMADURA	15.000.000	14.000.000
GALICIA	130.000.000	30.000.000
ISLAS BALEARES	11.900.000	12.200.000
LA RIOJA	3.900.000	3.500.000
PAÍS VASCO	65.043.524	21.000.000
PRINCIPADO DE ASTURIAS	0	16.000.000
REGIÓN DE MURCIA	207.819.760	21.000.000
TOTAL NACIONAL	3.113.865.901	365.238.956

Entre las actuaciones a llevar a cabo en la Región de Murcia cabe destacar (Roca, 2015):

- Ampliación de depuradoras: Cabezo Beaza, Torre Pacheco, Los Dolores, La Unión, Mar Menor Sur, Corvera, Los Martínez del Puerto, Sucina, Valladolides, Lobosillo, La Tercia y La Murta.
- Conexiones: Depuradoras Mar Menor Sur, Torre Pacheco, La Unión, Los Alcázares y Mar Menor Sur.
- Tanques de tormenta: Para aguas pluviales en Los Alcázares, San Javier, Torre Pacheco, La Unión, San Pedro, Playa Honda-Playa Paraíso, El Algar, Los Urrutias, Roldán, Los Nietos, El Albuñón, Mar de Cristal-Islas Menores, El Albuñón, Los Nietos, Balsicas, Los Belones, Lobosillo, La Puebla, Atamaría y El Algar.

Como se puede observar, este Plan tiene plena consideración de las aguas de tormenta y de la presión que estas generan en los medios receptores por los vertidos generados por las DSUs. Por este motivo, considera la instalación de tanques de tormenta como una técnica válida y eficiente de gestación de las aguas pluviales para evitar impactos y el daño de la calidad de los medios acuáticos.

### **3.4. REAL DECRETO 1290/2012**

El *Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico*, incorpora al RDPH artículos que permiten limitar la contaminación producida por los desbordamientos de los sistemas de saneamiento en tiempo de lluvia, teniendo en cuenta que en la práctica no es posible la construcción de sistemas de colectores e instalaciones de depuración que puedan someter a tratamiento la totalidad de las aguas residuales en circunstancias tales como lluvias torrenciales inusuales.

El objetivo principal de este texto fue poner orden en cuanto al tema de los desbordamientos de los sistemas de saneamiento en tiempo de lluvia y de las autorizaciones de vertido a nivel legal, puesto que el texto previo (*RD 11/1995 Y 509/1993*) eran mucho más restrictivo que la Directiva no permitiendo desbordamientos de las aguas procedentes de lluvia. Es evidente que este texto era inaplicable y planteó diversos problemas legales a los organismos gestores del saneamiento.

De este modo, este RD permite las DSUs admitiendo que en la práctica no resulta viable la construcción de sistemas de colectores e instalaciones de depuración que permitan someter a tratamiento la totalidad de las aguas residuales en sucesos de lluvia. Por otra parte, también acepta que estos vertidos no pueden ocasionarse en cualquier circunstancia, de manera que incorporan obligaciones con el objetivo de limitar la contaminación producida por estos desbordamientos. Estas obligaciones se resumen a continuación (Malgrat *et al.*, 2015):

- Los titulares de vertidos industriales y titulares de vertidos urbanos de más de 2000 habitantes equivalentes deben presentar una relación de los puntos de desbordamiento en episodios de lluvia antes del 31/12/2014.
- El MAGRAMA debe redactar las normas técnicas en las que se especifiquen y desarrollen los procedimientos de diseño de las obras e instalaciones para la gestión de las aguas de escorrentía.
- Las confederaciones y comunidades autónomas con competencias para la autorización y denegación de vertidos, deberán incluir en ellas, las condiciones en que los desbordamientos de los sistemas de saneamiento en episodios de lluvia deben realizarse de acuerdo con los criterios fijados por el MAGRAMA en las normas técnicas anteriores.
- Las nuevas solicitudes de autorizaciones de vertido (industriales o urbanos mayores de 2000 he.) antes del 2016 y los titulares de autorizaciones de vertido o solicitudes vigentes o anteriores al 31/12/2015 de zonas urbanas mayores de 50000 he. o mayores de 2000 he. que viertan a zonas de baño en 4 años o como máximo antes del 31/12/2019, deberán: presentar la documentación técnica para describir el sistema, las actuaciones que limiten los desbordamientos y el cronograma de ejecución de estas actuaciones, disponer de un sistema de cuantificación de desbordamientos, informar anualmente sobre los desbordamientos y dotar a los puntos de desbordamiento de sistemas de retención de flotantes y de sólidos gruesos.

### **3.5. ORDEN AAA/2056/2014. AUTORIZACIONES DE VERTIDO**

El objetivo principal de la *Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y declaración de vertido* es desarrollar parcialmente los asuntos expuestos en el RD 1290/2012, estableciendo los modelos oficiales para la solicitud de autorización y declaración de vertidos exigible para todas las demarcaciones gestionadas por la Administración General del Estado.

Entre la información a cumplimentar se encuentra:

- Inventario de los puntos de vertido, donde se incluyen la ubicación, el nombre del medio receptor al que se vierte, tipo de red (unitaria o separativa) y la presencia de cámara de retención.
- Información de los puntos de vertido con cámara de retención, detallando la disposición de la cámara, una breve descripción del tanque, su volumen, el caudal de entrada, etc.
- Características del área drenada asociada al desbordamiento, incluyendo superficie, colectores de procedencia y evacuación, población, carga contaminante, etc.
- Descripción de medidas para limitar la contaminación por las DSUs. Descripción y características del sistema de saneamiento, modelización del mismo, resumen y planificación de las actuaciones previstas incluyendo esquemas y planos de las mismas.
- Elementos de control de las medidas para limitar la contaminación, debiendo indicarse la localización del punto de control, el punto de vertido asociado, tipología de elemento (caudalímetro, limnómetro, toma muestras, etc.) y el objetivo de medición.

### **3.6. IMPLICACIONES DE LA NORMATIVA RELACIONADAS CON LAS DSUS**

A la vista de la información requerida por la normativa asociada a las descargas de sistemas unitarios en tiempo de lluvia, hay que tener en cuenta que obtener y analizar toda esta información no va a ser una cosa trivial, por lo que se requerirá de un trabajo importante de toma de datos y planificación de actuaciones con el objetivo de reducir la contaminación vertida.

Por lo tanto, se pueden definir una serie de implicaciones para los gestores de las DSUs como pueden ser las industrias, ayuntamientos o empresas concesionarias (Malgrat *et al.*, 2015):

- Caracterización de los puntos de desbordamiento de los sistemas de saneamiento en episodios de lluvia, lo que implica que, si no se tiene un inventario de la red, deberán inspeccionarse las redes para localizar y caracterizar los puntos de vertido.
- Implantación de un sistema de control y cuantificación de vertidos.

- Ejecución de actuaciones para reducir los vertidos sólidos y de flotantes al medio receptor, mediante la instalación de rejas y de pantallas deflectoras en los aliviaderos.
- Realización de planes directores integrales de saneamiento, con los siguientes apartados:
  - Levantamiento de la red.
  - Definición de los objetivos de protección del medio receptor.
  - Diagnóstico, haciendo uso de los modelos de simulación.
  - Definición de las actuaciones reductoras del impacto de los desbordamientos en tiempo de lluvia al medio receptor.
  - Presupuesto, financiación, priorización y cronograma de ejecución de las actuaciones previstas.

### **3.7. MÉTODOS DE DISEÑO DE DEPÓSITOS ANTI-DSU**

#### **3.7.1. Normativa alemana: ATV-Standard A 128 (1992)**

Esta normativa, “*Standards for the Dimensioning and Design of Stormwater Structures in Combined Sewers*”, es aplicable a estructuras con aliviadero situadas en redes de alcantarillado unitario como pueden ser los aliviaderos de aguas residuales en tiempo de lluvia, los depósitos-aliviadero y los alcantarillados con capacidad de almacenamiento con aliviadero.

Esta normativa impone que a la EDAR llegue un caudal igual o menor al que es capaz de tratar en todos los procesos (la normativa alemana no permite que haya reboses a continuación del tratamiento primario de una EDAR) y que la contaminación total emitida por los aliviaderos y la EDAR en tiempo de lluvia sea igual o menor que la que se hubiese vertido si el sistema fuese separativo. Para estudiar estas emisiones es necesario determinar la duración y frecuencia de los reboses y los contaminantes que se vierten (el tipo, la cantidad, la concentración, etc.) a lo largo del año. Esta norma utiliza la carga anual de demanda química de oxígeno (DQO) como indicador de la contaminación.

Sin entrar en detalles de la formulación empleada en esta norma, los principales parámetros empleados para el diseño de los elementos de retención y alivio son (Roca, 2015):

- Precipitación media anual.
- Concentración media de DQO de las aguas de escorrentía urbana en tiempo de lluvia.
- Concentración media de DQO en las aguas residuales urbanas en tiempo seco.
- Concentración media de DQO en el efluente de la EDAR.

En relación al volumen de los tanques de tormenta, la norma alemana establece un abanico entre 7.5 y 15 l/s/ha impermeable que varía en función del tiempo de

concentración de la cuenca. Para tiempos de concentración inferiores a 120 minutos, la lluvia crítica viene dada por la fórmula:

$$I_c = 15 \cdot \frac{120}{t_c + 120} \quad (3.1)$$

Siendo:

$I_c$  = lluvia crítica en l/s y ha impermeable.

$t_c$  = tiempo de concentración, en minutos.

para  $t_c > 120$  minuto: lluvia crítica = 7.5 l/s y ha impermeable.

El volumen de un tanque de tormenta así calculado oscila entre un mínimo del orden de 5 m<sup>3</sup>/ha impermeable hasta un máximo de 40 m<sup>3</sup>/ha impermeable. Un valor normal oscila entre 15 y 20 m<sup>3</sup> por hectárea impermeable.

### **3.7.2. Normativa británica: BS 8005-British Standards Sewerage (1987)**

El principal objetivo de los aliviaderos es limitar la cantidad de agua que se conduce a la EDAR y permitir el vertido de agua residual diluida al medio receptor sin causar una contaminación excesiva a los medios acuáticos. Deben utilizarse sólo en los sistemas unitarios o en los parcialmente separativos donde el caudal en tiempo de lluvia pueda ser muy superior al caudal máximo de tiempo seco. De este modo, el medio receptor debe proveer una dilución suficiente al exceso de caudal residual en tiempo de lluvia para satisfacer los requisitos que impongan la autoridad de control de contaminación.

La normativa británica establece que el caudal que debe ser retenido en el sistema de alcantarillado durante los sucesos de lluvia (y, por lo tanto, enviado hacia la EDAR) debe ser igual a:

$$Q = DWF + 1360 \cdot P + 2 \cdot E \quad (3.2)$$

Siendo:

DWF= caudal de tiempo seco (L/día)

P= población abastecida por el alcantarillado aguas arriba (hab)

E= caudal medio industrial (L/día)

Esta fórmula conocida como fórmula A o de Liverpool conduce a la EDAR un valor de unos 20 l/s por cada 1000 habitantes lo que supone una ratio de dilución en los reboses del orden de 6 a 7. Si en una primera aproximación se prescinde del caudal industrial y se expresa el caudal de tiempo seco en función de la dotación, se obtiene la siguiente relación de dilución (Dot= dotación en l/hab·día):

$$\frac{Q}{DWF} = \frac{DWF + 1360 \cdot P}{DWF} = \frac{Dot \cdot P + 1360 \cdot P}{Dot \cdot P} = \frac{Dot + 1360}{Dot} \quad (3.3)$$

Se observa que la fórmula A no es más que una expresión que da una relación de dilución diferente en función de la población a la que sirve la red de alcantarillado. A su vez la

dotación es función de la población, a mayor población mayor dotación. Por lo tanto, la fórmula exige mayor dilución a las poblaciones pequeñas. Para poblaciones elevadas la relación de dilución disminuye al suponer que sus aguas residuales están más diluidas por la diversidad de usos de agua

En cuanto al volumen del tanque de tormenta, la filosofía de esta normativa es que este volumen sea capaz de retener la contaminación producida por la primera lluvia como mínimo. Así, se señala que este volumen corresponde al necesario para que una lluvia de 20 minutos de duración y con una intensidad de 10 l/s/ha no produzca vertidos por el aliviadero de tormenta. Considerando esta normativa, el volumen de depósito así calculado resulta ser de 12 m<sup>3</sup> por hectárea impermeable.

### **3.7.3. Método Austriaco (Norma ÖWWV Regelbatt 19 del 1987)**

La norma *ÖWWV Regelbatt 19* (1987) (la equivalente austriaca de la ATV-A128) fija el valor de 15 l/s/ha impermeable para el diseño de medidas anti-DSU como depósitos de retención de primer lavado. Si el medio hídrico receptor puede presentar eventuales problemas de dilución de los contaminantes o tiene una particular importancia este valor mínimo será de 30 l/s/ha impermeable.

Como en Alemania, el diseño de un depósito de retención se basa sobre la hipótesis de retener el *first flush*. Se consideran dos tipos de depósitos:

- *Catch tanks* (fuera de línea) a menudo posicionados en la periferia de la cuenca.
- *Flow-through tanks* (en línea).

Para el diseño de depósitos, se especifica un volumen mínimo de 15 m<sup>3</sup>/ha impermeable. Cuando se requiere una protección más eficaz debido a la importancia del medio receptor, la *ÖWWV Regelbatt-19* sugiere los valores de 20-26 m<sup>3</sup>/ha impermeables para depósitos fuera de línea y 45 m<sup>3</sup>/ha impermeable para depósito en línea. La norma no permite depósitos con volúmenes totales menores de 50-100 m<sup>3</sup>.

### **3.7.4. Manual nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta (2014)**

El principal objetivo de este manual es establecer unas recomendaciones para el dimensionamiento, diseño y posterior construcción de los tanques de tormenta que forman parte de las redes unitarias de saneamiento.

Históricamente, el diseño de dispositivos anti-DSU ha estado basado en el concepto de dilución, de modo que los vertidos estaban permitidos cuando la ratio entre el caudal de agua residual de tiempo seco y el caudal circulante por la red unitaria superaban el valor de dilución de diseño (con valores típicos de 2 a 8). Esta teoría se basaba en el concepto de “aguas blancas” por el que se asumía que las aguas de escorrentía no estaban muy contaminadas, hecho que ha resultado erróneo gracias a proyectos como el PROMEDSU.

Este concepto de dilución se fue abandonando poco a poco y el diseño se empezó a centrar en la retención del volumen correspondiente a las denominadas “aguas de primer lavado” de la cuenca. Esta aproximación se basa en la idea de retener las primeras aguas de



escorrentía movilizada, notablemente más contaminadas, con el objetivo de reducir considerablemente la polución emitida a los medios receptores.

En este contexto, este manual presenta una serie de estrategias para el dimensionamiento de dispositivos anti-DSU clasificando estas en diferentes niveles de aproximación (MAGRAMA, 2014):

- **Procedimientos de Nivel 1 (N1).** Dimensionamiento parametrizado, fundamentado en criterios de emisión.
- **Procedimientos de Nivel 2 (N2).** Dimensionamiento basado en modelización hidrológico-hidráulica. Fundamentado también en criterios de emisión.
- **Procedimientos de Nivel 3 (N3).** Dimensionamiento basado en modelización hidrológico-hidráulica y asignación de concentraciones de la contaminación emitida, basado también en criterios de emisión.
- **Procedimientos de Nivel 4 (N4).** Dimensionamiento basado en modelización hidrológico-hidráulica y contaminación en régimen no permanente en la cuenca y en el medio natural (basado en criterios de inmisión o de calidad del agua).

Las principales características de estos niveles de diseño se presentan en la figura 3-1.

Este manual, junto con la aprobación del RD 1290/2012 (la normativa que define los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido) y la futura norma técnica que debe redactarse en los próximos meses, deben fijar las bases para resolver la problemática de las DSU y uniformizar el diseño de los tanques en España (Tecnoaqua, 2014).

<p><b>Nivel 1</b></p>	<p><b>ÁMBITO:</b></p> <p>Subcuenca</p>	<p><b>CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO:</b></p> <p>Se basan en estándares de emisión, aunque no están explícitos en la formulación del procedimiento. Estas estrategias se basan en definir los tanques de tormenta en base a un volumen específico (m<sup>3</sup>/ha neta) y una estrategia de caudales máximos hacia la EDAR.</p>	<p><b>VOLUMEN DE DISEÑO FUNCIÓN DE:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamaño de la cuenca</li> <li>- Tipo de medio receptor</li> <li>- Usos del suelo</li> <li>- Estrategia de caudales hacia EDAR</li> </ul>
<p><b>Nivel 2</b></p>	<p><b>ÁMBITO:</b></p> <p>Sistema o subsistema</p>	<p><b>CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO:</b></p> <p>Estas estrategias se basan en criterios de emisión como la definición de un número o tiempo de vertido, o el establecimiento de un volumen de escorrentía vertida hacia el medio receptor.</p>	<p><b>VOLUMEN DE DISEÑO FUNCIÓN DE:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamaño y tipologías de la cuenca (porcentaje de impermeabilidad, pendiente media, etc.)</li> <li>- El tipo de medio receptor, si es que se establecen criterios de emisión en función de este parámetro</li> <li>- Usos del suelo</li> <li>- Estrategia de caudales hacia EDAR</li> </ul>
<p><b>Nivel 3</b></p>	<p><b>ÁMBITO:</b></p> <p>Sistema o subsistema</p>	<p><b>CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO:</b></p> <p>Estas estrategias se basan en criterios de emisión como la definición de un número o tiempo de vertido, o el establecimiento de un volumen de escorrentía vertida hacia el medio receptor. Estos criterios de emisión se complementan con el análisis de la carga de contaminación vertida hacia el medio receptor por la subcuenca de estudio, o por el sistema de saneamiento completo.</p>	<p><b>VOLUMEN DE DISEÑO FUNCIÓN DE:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamaño y tipologías de la cuenca (porcentaje de impermeabilidad, pendiente media, etc.)</li> <li>- El tipo de medio receptor, si es que se establecen criterios de emisión en función de este parámetro</li> <li>- Usos del suelo (serán importantes a la hora de estimar la generación de cargas de contaminación)</li> <li>- Estrategia de caudales hacia EDAR</li> </ul>
<p><b>Nivel 4</b></p>	<p><b>ÁMBITO:</b></p> <p>Sistema o subsistema</p>	<p><b>CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO:</b></p> <p>Estas estrategias se basan en criterios de calidad de aguas que suelen ser de carácter intermitente (dosis-duración-frecuencia). Los parámetros más habituales que recogen estos estándares están relacionados con el descenso del oxígeno disuelto, la generación de puntas de alguna forma de nitrógeno, impactos morfológicos sobre los cauces naturales, impactos producidos por altas cargas de sedimentos, etc.</p>	<p><b>VOLUMEN DE DISEÑO FUNCIÓN DE:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamaño y tipologías de la cuenca (porcentaje de impermeabilidad, pendiente media, etc.)</li> <li>- El tipo de medio receptor, si es que se establecen criterios de emisión en función de este parámetro</li> <li>- Usos del suelo (serán importantes a la hora de estimar la generación de cargas de contaminación)</li> <li>- Estrategia de caudales hacia EDAR</li> </ul> <p>Para la aplicación de estos criterios será necesario desarrollar una aproximación integral de todo el sistema de saneamiento y drenaje (redes unitarias y separativas, aliviaderos, EDAR), así como del medio receptor.</p>

**Figura 3-1. Esquema general de posibles estrategias de gestión y control de las DSU en sistemas de saneamiento unitario**

# CAPÍTULO 4: PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA URBANA

## ÍNDICE CAPÍTULO 4

<b>4. PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA URBANA.....</b>	<b>4-1</b>
4.1. CONTAMINACIÓN ASOCIADA A CAUDALES RESIDUALES EN TIEMPO SECO.....	4-1
4.1.1. Constituyentes de las aguas residuales.....	4-1
4.1.2. Cargas de contaminación en las aguas residuales.....	4-2
4.1.3. Variación temporal de la contaminación de las aguas residuales en tiempo seco.....	4-3
4.2. FUENTES DE CONTAMINACIÓN DIFUSA URBANA.....	4-4
4.2.1. Contaminación atmosférica.....	4-5
4.2.2. Contaminación procedente de la superficie de la cuenca.....	4-6
4.2.3. Contaminación en función del uso de la cuenca.....	4-7
4.3. CONTAMINACIÓN ASOCIADA A LOS DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS EN EL INTERIOR DE CONDUCCIONES.....	4-9
4.3.1. Problemas causados por los sedimentos en las conducciones.....	4-9
4.3.2. Caracterización de los depósitos de sedimentos encontrados en el interior de conducciones.....	4-10
4.4. CONTAMINACIÓN EN TIEMPO DE LLUVIA.....	4-11
4.4.1. Niveles de caracterización de los contaminantes en redes unitarias.....	4-11
4.4.2. Comparativa general de contaminantes encontrados en redes unitarias y separativas.....	4-14
4.4.3. Resultados de estudios de caracterización de flujos de contaminación.....	4-16



## 4. PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA URBANA

### 4.1. CONTAMINACIÓN ASOCIADA A CAUDALES RESIDUALES EN TIEMPO SECO

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental de cara al proyecto y explotación de las infraestructuras tanto de recogida como de tratamiento y evacuación de las aguas residuales.

La contaminación presente en las aguas residuales urbanas procede principalmente de las aguas residuales domésticas y de las aguas residuales industriales. Es necesario tener en cuenta que cada agua residual es única en sus características, aunque en función del tamaño de la población, del sistema de alcantarillado o del grado de industrialización pueden establecerse unos rangos de variación habituales, tanto para los caudales como para las características fisicoquímicas de los mismos.

#### 4.1.1. Constituyentes de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. La tabla 4-1 muestra los principales constituyentes químicos y biológicos, así como su procedencia.

*Tabla 4-1. Características químicas del agua residual y sus procedencias (Metcalf & Eddy, 1995)*

Características		Procedencia	
Constituyentes químicos	Orgánicos	Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
		Grasas y aceites	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
		Pesticidas	Residuos agrícolas
		Fenoles	Vertidos industriales
		Proteínas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
		Agentes tensoactivos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
		COV	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
		Otros	Degradación natural de materia orgánica
		Inorgánicos	Alcalinidad
	Cloruros		Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
Metales pesados	Vertidos industriales		
Nitrógeno	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas		
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales		
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales. Aguas de escorrentía		
Gases	Azufre	Aguas de suministro, aguas residuales domésticas, comerciales e industriales	
	Sulfuro de hidrógeno	Descomposición de residuos domésticos	
	Metano	Descomposición de residuos domésticos	
	Oxígeno	Agua de suministro, infiltración de agua superficial	

### 4.1.2. Cargas de contaminación en las aguas residuales

Dentro de la singularidad de cada agua residual, las aguas urbanas tienen una composición más o menos uniforme que las distingue claramente de las aguas residuales industriales, cuya variedad es mucho mayor. Por lo tanto, cuando la contaminación que circula por la red de alcantarillado procede de industrias o granjas, u otro tipo de origen diferente al doméstico, se puede producir grandes variaciones. Por este motivo y con el objetivo de trabajar con unidades homogéneas a la hora de estimar cargas de contaminación se ha establecido el concepto de habitante equivalente (h-e).

Según la *Directiva 91/271/CEE de 21 de mayo de 1991*, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas (ARU), se define que 1 habitante equivalente aporta “una carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO<sub>5</sub>) de 60 g de oxígeno por día”.

Este tipo de equivalencia posibilita expresar la contaminación de diversas actividades (industriales, granjas, etc.) para un contaminante dado como si hubiera sido producido por población humana. Por ejemplo, una industria que vierte diariamente 60 Kg de DBO<sub>5</sub> equivaldrá en una población de 100 h-e. Asimismo, en el caso de aguas residuales pecuarias, una vaca equivale a 10 h-e y un cerdo a 3 h-e, ambos en base a la DBO<sub>5</sub>.

En términos de concentraciones, es común clasificar las aguas residuales urbanas como fuertes, medias y débiles (tabla 4-2).

*Tabla 4-2. Composición típica del agua residual doméstica bruta (Metcalf & Eddy, 1995)*

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos (SD)	mg/l	250	500	850
<i>SD fijos (SDF)</i>	mg/l	145	300	525
<i>SD volátiles (SDV)</i>	mg/l	105	200	325
En Suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
<i>SS fijos (SSF)</i>	mg/l	20	55	75
<i>SS volátiles (SSV)</i>	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml/l	5	10	20
DBO <sub>5</sub>	mg/l	110	220	400
COT	mg/l	80	160	290
DQO	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco libre	mg/l	12	25	50
Fósforo	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Alcalinidad (como CO <sub>3</sub> Ca)	mg/l	50	100	200
Grasas	mg/l	50	100	150

### 4.1.3. Variación temporal de la contaminación de las aguas residuales en tiempo seco

Al igual que ocurre con los caudales, las concentraciones de los contaminantes del agua residual varían a lo largo del día. Su curva de variación es similar a la que presentan los caudales, mostrando puntas y mínimos cercanos en el tiempo.

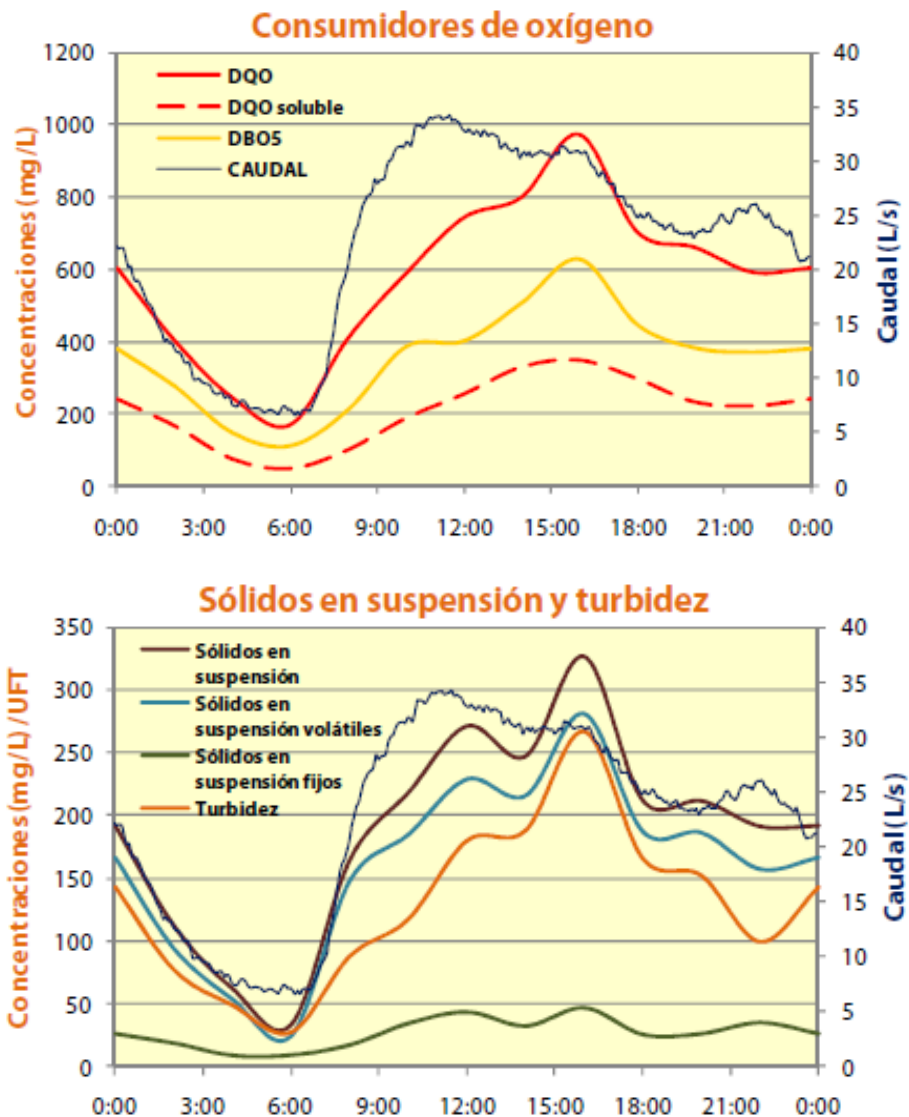


Figura 4-1. Patrón de variación diario de los consumidores de oxígeno, sólidos en suspensión y turbidez en las aguas residuales urbanas de la cuenca de Ensanche, Santiago de Compostela (Del Río, 2011)

A la hora de analizar la movilización de la contaminación en tiempo de lluvia, este tipo de curvas de variación diaria resultan fundamentales para separar la contaminación procedente de la escorrentía urbana de la resuspensión de sedimentos. Asimismo, del análisis de estas curvas puede detectarse la presencia de vertidos industriales de alta carga.

A continuación, se presentan los valores de caudales y contaminante en tiempo seco en las subcuencas de la ciudad de Santiago de Compostela “Cancelón” y “Ensanche”.

**Tabla 4-3. Resumen de parámetros hidráulicos y de contaminación característicos de las cuencas Cancelón y Ensanche, Santiago de Compostela (Beneyto, 2004; Del Río, 2011)**

<b>Cuenca Cancelón</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Coef.punta</b>
Caudales (l/s)	23.8	31.71	16.34	1.33
Sólidos en suspensión (mg/l)	128	402	38	3.14
Sólidos disueltos (mg/l)	254	337	191	1.33
Sólidos totales (mg/l)	128	402	38	3.14
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	24.2	50.5	10.1	2.09
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	194	510	17	2.63
DQO (mg/l)	378	882	50	2.33
C. fecales (UFC/100 ml)	2.30E+06	8.20E+06	3.70E+05	2.69
Zn Total (mg/l)	88.3	168.2	22	1.9
Cu Total (mg/l)	54.2	116.6	13.7	2.15
Pb Total (mg/l)	30.2	84.6	5	2.8
<b>Cuenca Ensanche</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Coef.punta</b>
Caudales (l/s)	23.8	37.3	5.4	1.56
Sólidos en suspensión (mg/l)	257	395	43	1.53
Sólidos disueltos (mg/l)	350	464	203	1.32
Sólidos totales (mg/l)	607	825	276	1.3
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	39.1	54.7	21.7	1.4
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	413	654	100	1.58
DQO (mg/l)	721	1044	183	1.45
C. fecales (UFC/100 ml)	4.20E+08	1.70E+09	1.30E+07	3.99
Zn Total (mg/l)	158.2	222.7	58.8	1.41
Cu Total (mg/l)	220.3	319.9	84.7	1.45
Pb Total (mg/l)	67.8	101.3	21	1.49

## 4.2. FUENTES DE CONTAMINACIÓN DIFUSA URBANA

En general, las fuentes de contaminación hídrica pueden ser clasificadas en dos categorías: fuentes puntuales y fuentes difusas.

- *Fuentes puntuales*: cuando existen sitios puntuales de descargas, generalmente de aguas residuales a través de un colector o canal en un lugar concreto.
- *Fuentes difusas*: originadas por fuentes no fijas. Se producen cuando existe un gran número de pequeñas fuentes de descarga cuyos aportes no son localizados ni continuos. Su caudal, ya sea en su origen o en su acceso a los sistemas acuáticos, es muy difícil de definir.





Figura 4-2. Fuentes de contaminación difusas y puntuales (es.slideshare.net)

La contaminación difusa de origen urbano está relacionada con el incremento de la escorrentía superficial en los núcleos urbanos. La concentración de actividades humanas genera acumulación de polvo, arenas, materia orgánica, nutrientes, metales pesados, etc., sobre las superficies de las cuencas, de modo que la escorrentía generada a partir de los sucesos de lluvia disuelve y arrastra estos materiales vertiéndolos en última instancia en el medio receptor.

A continuación, se analizan cada uno de los posibles focos de la contaminación de la escorrentía urbana.

#### 4.2.1. Contaminación atmosférica

Los contaminantes presentes en la atmósfera, de una u otra forma, son atrapados por la lluvia durante su caída y transportados por la escorrentía por las superficies impermeables. La siguiente figura muestra a modo de ejemplo, la variabilidad de los diferentes parámetros de contaminación durante un episodio de lluvia diferenciando según el uso de la cuenca.

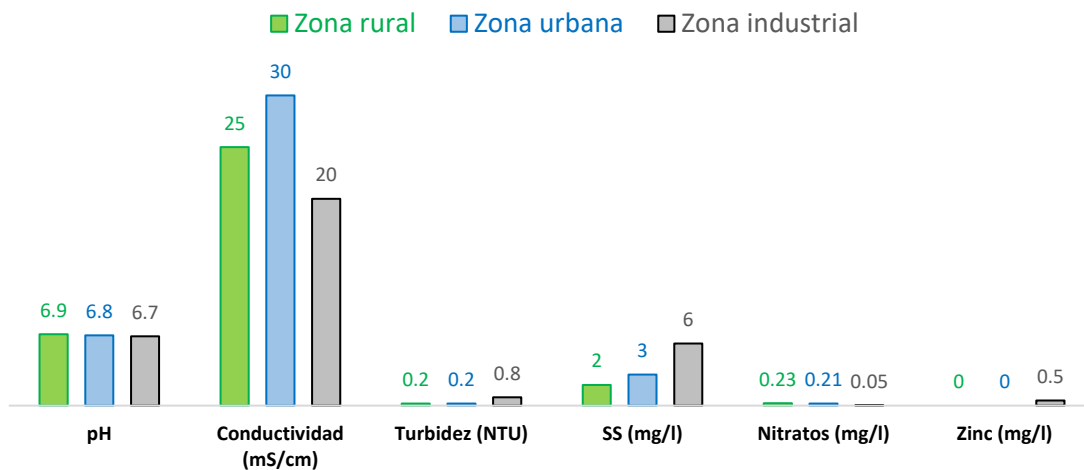


Figura 4-3. Contaminación del agua de lluvia (Thomas et al., 1993)

## 4.2.2. Contaminación procedente de la superficie de la cuenca

### A) Contaminación presente en la superficie de la calle.

Los contaminantes de la superficie de la calle están compuestos principalmente de materia particulada, aunque también incluyen materia soluble y en suspensión que puede ser lavada por la lluvia (aceites, sales, etc.) Entre estas fuentes de contaminación destacan (Sartor *et al.*, 1972):

- **Pavimento.** La superficie de la calle es en sí misma una fuente de materiales contaminantes (asfalto, cemento, pinturas, etc.) La tasa de generación de productos contaminantes depende principalmente de tres factores: la edad y el estado de las superficies, el clima local y las fugas y derrames de combustibles y aceites.
- **Tráfico rodado.** Esta fuente de contaminación aporta una amplia gama de materiales y formas de contaminación. Estas se agrupan en:
  - Fugas de combustible, lubricantes, fluidos hidráulicos y líquidos refrigerantes.
  - Partículas procedentes del desgaste de neumáticos y frenos.
  - Emisiones de los vehículos rotos por vibraciones e impactos (vidrios, plásticos, metales, etc.)
- **Uso de sal para deshielo.** El deshielo de la nieve es un mecanismo que genera aguas de escorrentía. Los principales contaminantes que pueden acompañar a la nieve son cloruros y plomo.

*Tabla 4-4. Fuentes de contaminación antropogénica en las superficies de las calles (Sansalone et al., 1997)*

Contaminante	Frenos	Ruedas	Chasis y carrocería	Combustibles y aceites	Pavimentos de hormigón	Pavimentos de asfalto	Sales de deshielo
Cadmio	X	O					
Cromo		O					
Cobre	O	O					
Hierro		O	O				
Plomo	X	X		X			X
Níquel		O					
Vanadio				O			
Zinc	O	O	O				
Cloruros							O
Sólidos orgánicos						O	
Sólidos Inorgánicos			X		X	O	
HAP				X		O	
Fenoles						O	

O Fuente primaria    X Fuente secundaria

## **B) Contaminación presente en el resto de zonas de la cuenca.**

- Basura y residuos. Las actividades diarias de la población ocasionan el depósito sobre la superficie de la cuenca de materiales como papeles, cartones, vegetales, colillas, etc. Asimismo, los animales que viven en los centros urbanos generan residuos que, por lo general, se depositan en las calles, plazas y aceras. Una vez depositados, dichos residuos se disgregan facilitándose su transporte por las aguas de escorrentía.
- Actividades agrícolas y de jardinería. En los terrenos adyacentes a los núcleos de población es posible observar zonas dedicadas a prácticas agrícolas o pecuarias. Asimismo, los jardines y parques representan pequeñas entidades agrícolas dentro de los núcleos urbanos. En dichos terrenos se emplean fertilizantes, pesticidas y herbicidas que pueden ser movilizadas por las aguas de escorrentía.
- Terrenos con obras y superficies no protegidas. En muchas zonas de la cuenca se encuentran terrenos o solares en obras o abandonados en los que el suelo está más expuesto a procesos de erosión por el viento o la lluvia.

### **4.2.3. Contaminación en función del uso de la cuenca**

El tipo de superficie urbana en la que se genera la escorrentía superficial tiene un papel muy importante en los contaminantes presentes en el agua. Esto implica que las diversas fuentes de contaminación, incluyendo las áreas naturales y las zonas sujetas a la influencia antropogénica (ciudades, superficies agrarias, etc.), determinarán los tipos de contaminantes que se encontrarán en el agua (Carroll et al. 2013).

La sedimentación atmosférica es una de las causantes de esta contaminación pues tiene lugar en todas las superficies de la cuenca, siendo en los tejados la principal fuente contaminante. En el resto de zonas, la actividad humana se convierte en la fuente de contaminación más importante: acumulación de residuos en zonas peatonales, productos derivados del tráfico rodado en calles y avenidas, arrastre de materia orgánica y sólidos en suspensión en jardines, etc.

Son numerosos los estudios que han tratado la influencia de los diferentes usos del suelo en la contaminación del agua de escorrentía (Wang *et al.*, 2013; Stein *et al.*, 2008; Gromaire *et al.*, 2001; Järveläinen *et al.*, 2015). En la tabla 4-5 se representan a modo de resumen los resultados de diversos trabajos realizados en este ámbito.

Como se puede observar, las zonas de tráfico rodado reúnen la mayor cantidad de contaminantes, especialmente en el caso de los sólidos en suspensión (que pueden llegar a concentraciones fuertes) y los metales pesados (vistos con más detalle en el apartado anterior).

Tabla 4-5. Comparación de concentraciones (Percentil 50) de escorrentías de diferentes cuencas y usos de suelo (mg/l)

Lugar	Uso del suelo	SS	DQO	Nitrógeno tot.	Fósforo tot.	Zinc	Plomo
China <sup>1</sup>	Calle con tráfico	394	319	7.3	0.9	0.732	0.58
	Calle residencial	31	31	2.9	0.1	0.136	0.546
	Zona comercial	85	129	7.2	0.46	0.42	0.55
	Tejado de hormigón	30	59	4.9	0.15	0.225	0.53
	Tejado de tejas	20	31	3.7	0.06	*	*
	Campus universitario	52	95	7.2	0.18	*	*
Paris <sup>2</sup>	Tejado	17	27	*	*	2.98	0.39
	Patio	40	63	*	*	0.58	0.11
	Calle	97	135	*	*	0.56	0.14
	Salida alcantarillado	221	331	*	*	1.53	0.21
California <sup>3</sup>	Residencial	28	*	*	*	103	0.008
	Comercial	18	*	*	*	156	0.005
	Industrial	73	*	*	*	550	0.019
	Agrícola	88	*	*	*	234	0.01
	Espacios libres	135	*	*	*	23	0.001
Finlandia <sup>4</sup>	Centro ciudad	334.52	19.85	1.71	0.41	260.86	8.78
	Calles	348.33	58.67	1.66	0.34	205	11
	Autovías	330	31.36	1.7	1.01	102	33.4
	Industrial	278.43	19.85	1.71	0.36	260.86	8.78
	Comercial	278.43	19.85	1.71	0.36	260.86	8.78
	Residencial (multifamiliar)	156.71	11.72	1.76	0.23	231.89	11.4
	Residencial (unifamiliar)	49.93	13.14	1.79	0.09	41.6	1.07
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wang, S. <i>et al</i> (2013). Pollutant concentrations and pollution loads in stormwater runoff from different land uses in Chongqing.</li> <li>2. Gromaire, M. C. <i>et al</i> (2001). Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers.</li> <li>3. Stein, E. D., <i>et al</i> (2008). Comparison of stormwater pollutant loading by land use type.</li> <li>4. Järveläinen, J. (2014). Land-use based stormwater pollutant load estimation and monitoring system design: Case of Lahti city,</li> </ol>							

### 4.3. CONTAMINACIÓN ASOCIADA A LOS DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS EN EL INTERIOR DE CONDUCCIONES

La aplicación de las directrices actuales para el diseño y dimensionamiento de los sistemas de saneamiento unitarios pueden promover el flujo de aguas residuales con insuficiente energía durante los periodos de tiempo seco (Seco, 2014). Este hecho puede provocar la acumulación progresiva de sedimentos debido a una velocidad de agua inferior al límite. Dicha acumulación puede dar lugar a disminuciones de la calidad del agua, sobrecargas del sistema y problemas con los vertidos.

Durante un episodio lluvioso, la velocidad del agua en el interior de las conducciones aumenta, lo que puede producir el arrastre y resuspensión de las partículas acumuladas durante el episodio seco previo. Este efecto tiene una gran repercusión en la contaminación movilizada en tiempo de lluvia, siendo la principal fuente de muchos de los contaminantes. La tabla 4-6 muestra el porcentaje de contribución de las diferentes fuentes de contaminación según diferentes autores.

*Tabla 4-6. Contribución a la contaminación movilizada por los sucesos de lluvia en varias cuencas europeas (Gromaire et al., 2001)*

Parámetro	Referencia	Fuente de Contaminación (%)		
		Aguas residuales urbanas	Escorrentía superficial	Sedimentos en conducciones
SS	<i>Gromaire et al. (2001)</i>	21	15	64
	<i>Krejci et al. (1987)</i>	6	35	59 (20 biopelícula y 39 sedimentos)
	<i>Bachoc (1992)</i>	N/D	N/D	33-44
	<i>Chebbo (1992)</i>	20	56	24
DQO	<i>Gromaire et al. (2001)</i>	34	15	51
	<i>Krejci et al. (1987)</i>	20	22	58 (23 biopelícula y 35 sedimentos)
	<i>Chebbo (1992)</i>	33	45	22

#### 4.3.1. Problemas causados por los sedimentos en las conducciones

La presencia de sedimentos en la red de saneamiento provoca una serie de efectos con consecuencias en la propia red, en su funcionamiento y en última instancia, en el medio receptor (Puertas *et al.*, 2008). Las principales causas de estas dificultades están relacionadas con los siguientes problemas (Seco, 2014):

- Problemas de obstrucción: derivados de la acumulación de sedimentos en ciertos puntos de la red. La reducción de la sección de paso puede provocar pérdidas en la capacidad de desagüe, que a su vez contribuyen al aumento de deposición de sedimentos.
- Reducción de la capacidad hidráulica de la red: debida tanto a la reducción de la sección transversal de los conductos por la acumulación progresiva de sedimentos como al incremento de rugosidad por la textura del lecho de sedimentos.

- Flujos de contaminantes y malos olores: cuando se producen reboses de los sistemas de saneamiento unitarios, además de la contaminación propia de la escorrentía superficial urbana, se vierte al medio receptor la contaminación de las aguas residuales de tiempo seco y también parte de los sedimentos depositados en las conducciones durante el tiempo seco. Además, la influencia del ambiente anaeróbico puede promover la formación de ácido sulfhídrico, cuya acumulación puede provocar problemas por malos olores, corrosión a largo plazo y deterioro de las paredes de la tubería.

#### 4.3.2. Caracterización de los depósitos de sedimentos encontrados en el interior de conducciones

Distintos autores han propuesto diversas clasificaciones para identificar los tipos de sedimentos a efectos del transporte y las condiciones hidráulicas. Las clasificaciones habituales se basan en las características físicas de las partículas, su origen y los modos de transporte de los mismos. Hay que tener en cuenta que la caracterización de los sedimentos es compleja, pues se ve influenciada por las condiciones locales de cada cuenca (naturaleza del suelo, tipos de imbornales, técnicas de limpieza, etc.), la variabilidad espacial y temporal de los sedimentos, las distintas técnicas de muestreo y su nivel de incertidumbre.

El estudio de referencia en la caracterización de los sedimentos depositados en las tuberías fue desarrollado por Crabtree en el año 1989. Dicho trabajo estuvo basado en observaciones descriptivas de la aparición de sedimentos recogidos de los depósitos en tuberías de redes de alcantarillado de Reino Unido. Se presentan 5 categorías de sedimentos, recogidos en la tabla 4-7 y cuya disposición típica en las tuberías se presenta en la figura 4-4.

*Tabla 4-7. Características de los depósitos de sedimentos en redes de alcantarillado (Crabtree, 1989)*

Tipo	Descripción y Localización	Porcentaje por tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ )			Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Contenido en M.O	DQO (g/kg material húmedo)
		50-2	2-0.0063	<0.0063			
<b>A</b>	Material granular. Fondo de tuberías	33	61	6	1720	7	16.9
<b>B</b>	Como el A pero con características cementicias	*	*	*	*	*	*
<b>C</b>	Capa móvil de material fino. Mezclado o por encima del A/B	0	55	45	1170	50	20.5
<b>D</b>	Biopelículas en el entorno del caudal medio	6	62	32	1210	61	49.8
<b>E</b>	Material fino mineral y orgánico en tanques de RAU's	9	69	22	1460	1.5	23

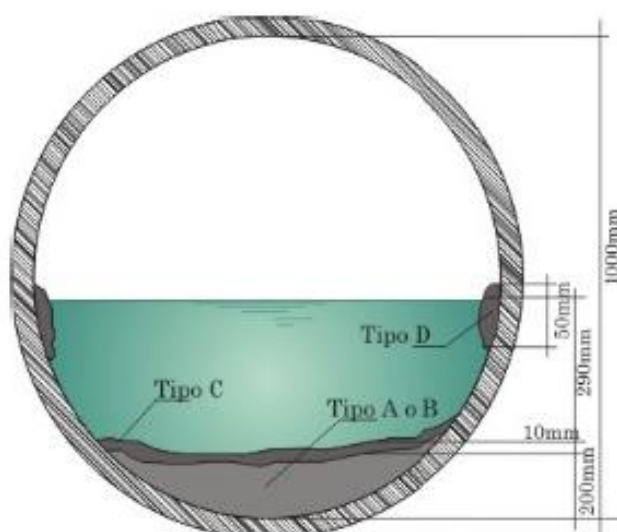


Figura 4-4. Depósitos típicos de sedimentos en las redes de saneamiento (Crabtree, 1989)

Los depósitos de tipo A son material grueso y granular depositado típicamente en el fondo de las tuberías. Muestran un comportamiento no cohesivo por lo que se transportan fácilmente a lo largo de las conducciones. Este tipo de depósitos están asociados habitualmente a pérdidas de capacidad hidráulica, sin embargo, al estar formado principalmente por materiales inorgánicos, esta categoría es la menos significativa respecto al impacto de la contaminación en su vertido.

Por otro lado, las categorías C (capa orgánica) y D (biopelícula) presentan mayor potencial de contaminación durante los episodios de lluvia, puesto que están constituidos en su mayoría por materia orgánica. Su comportamiento cohesivo convierte a este tipo de sedimentos en menos susceptibles al movimiento por las fuerzas hidráulicas. Según Seco (2014), los sedimentos tipo C representan la composición principal de las deposiciones que se encuentran en la región del Mediterráneo, debido a las características de captación, los hábitos de la población y la duración del tiempo seco para la acumulación.

#### 4.4. CONTAMINACIÓN EN TIEMPO DE LLUVIA

Después de analizar todas las fuentes de contaminación de las aguas de escorrentía urbana originadas en la superficie de las cuencas drenantes, las características de la contaminación asociada a las redes unitarias en tiempo seco y las características de los sedimentos encontrados en las redes de alcantarillado, se procede a describir la contaminación movilizada durante los episodios de lluvia.

##### 4.4.1. Niveles de caracterización de los contaminantes en redes unitarias

El nivel de aproximación a utilizar en un estudio de caracterización de la contaminación aportada por las aguas escorrentía urbana o por los reboses de alcantarillado unitario será función de los problemas de impacto sobre el medio receptor (Del Río, 2011). Es decir, será función de los objetivos de calidad del agua que se persigan, que, a su vez, quedarán

condicionados por los recursos disponibles. En el texto *Design and construction of urban stormwater management systems* (ASCE 1993), se jerarquizan los estudios de caracterización de contaminantes en aguas pluviales en tres niveles:

- **NIVEL 1. Cargas medias anuales aportadas por las aguas pluviales**

En este nivel de aproximación se estiman las cargas totales de contaminación aportadas por las aguas de tormenta desde una cuenca urbana o un área urbana durante un año. Este tipo de información es útil cuando se estudian problemas de calidad de aguas a largo plazo, tales como problemas de eutrofización, cargas de tóxicos con efectos crónicos, sedimentación, etc.

Las cargas de contaminación se expresan, según la necesidad o el modelo que se emplee, como:

- Carga anual/área de un uso de suelo determinado y para un año típico (kg/ha/año).
- Carga anual/km de cuneta de un uso del suelo dado (kg/(km·año)).
- Carga anual/volumen de tráfico (kg/(vehículo·año)).
- Carga anual/volumen de escorrentía (kg/(m<sup>3</sup>·año)).
- Carga anual/altura de precipitación para un área específica (kg/(mm·año)).

Estas medidas son datos útiles para obtener un orden de magnitud, por ejemplo, entre la carga contaminante aportada anualmente por DSU o por escorrentía urbana y la aportada por la depuradora, etc.

- **NIVEL 2. Cargas asociadas a sucesos de lluvia**

Este nivel se basa en la estimación de la distribución de cargas asociadas a episodios lluviosos a lo largo de un año y muestra la variabilidad de la contaminación total movilizada o generada durante cada suceso de lluvia. El nivel 2 puede ser útil cuando se analizan sucesos o problemas transitorios de contaminación como pueden ser inconvenientes con el oxígeno disuelto, problemas con concentraciones de indicadores de contaminación bacteriológica, etc.

La carga movilizada se expresa a través de valores medios referidos a cada suceso:

- Carga movilizada/área neta, o hidrológicamente activa, (kg/ha impermeable)
- Carga/km de cuneta de un uso determinado (kg/km cuneta)
- Carga movilizada/volumen de escorrentía o concentración media de suceso (kg/m<sup>3</sup> o habitualmente en mg/L)

- **NIVEL 3. Variación de carga durante un episodio de lluvia**

Este nivel describe los cambios de cargas contaminantes a lo largo del tiempo durante un suceso de lluvia. Este nivel de detalle permite el estudio de los diversos parámetros que entran en juego en la movilización de contaminación como pueden ser las diferentes



fuentes de polución, el efecto de las variaciones de intensidad de lluvia o la relación con los parámetros hidráulicos del suceso.

Entre los valores característicos que definen el suceso se puede encontrar:

- Concentración media del suceso. CMS (mg/l). Definida como el cociente entre la masa total de contaminante movilizada durante el suceso y el volumen total de agua.

$$CMS = \frac{\text{Masa total de contaminante}}{\text{Volumen total de agua}} = \frac{\sum Q_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum Q_i \cdot \Delta t_i} \quad (4.1)$$

Siendo  $Q_i$  el caudal instantáneo,  $C_i$  la concentración instantánea y  $\Delta t_i$  el incremento de tiempo entre las medidas de concentración.

- Concentración máxima del suceso. Determinada por el valor punta de concentración del episodio.
- Tiempo al pico del polutograma. Medido como el tiempo que separa el inicio del suceso y el instante de concentración máxima.

Además de este conjunto de indicadores, el conocimiento de las concentraciones instantáneas con respecto a distintos momentos del episodio lluvioso junto con los hidrogramas e hietogramas asociados permiten la elaboración de polutogramas (representación gráfica de la variación temporal de la concentración de contaminante).

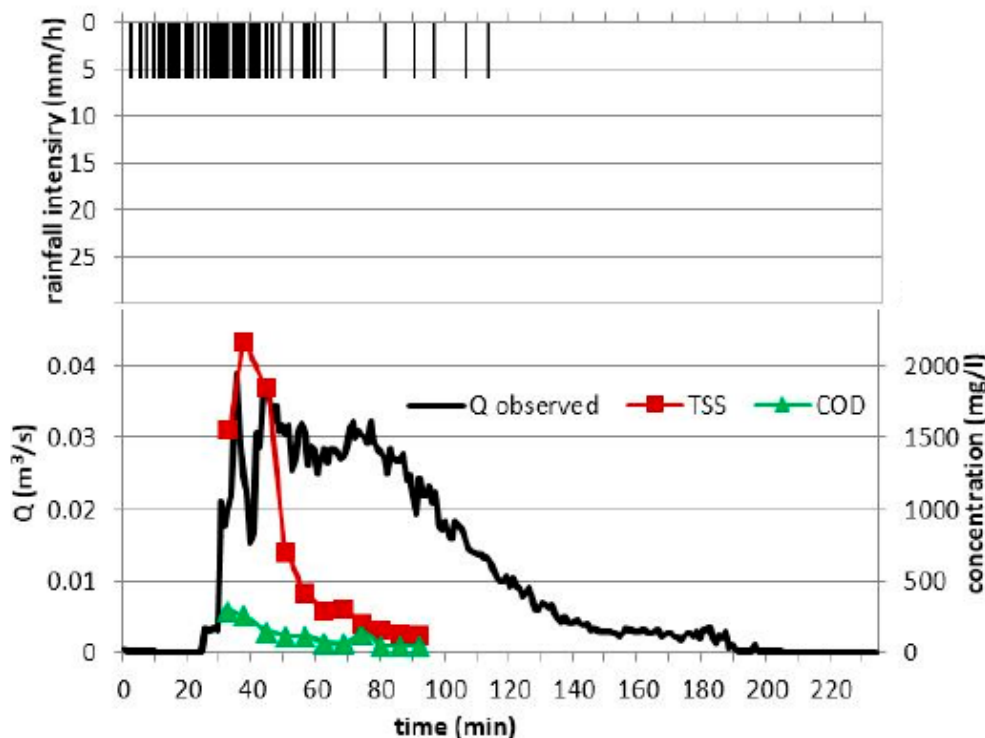


Figura 4-5. Hietograma, hidrograma y polutograma para un evento lluvioso (Di Modugno et al., 2015)

#### 4.4.2. Comparativa general de contaminantes encontrados en redes unitarias y separativas

Debido a su diferente naturaleza, las características de la contaminación transportada en cada tipo de alcantarillado (unitario o separativo) presentan ciertas singularidades.

Así, las **redes separativas** de pluviales se caracterizan por (OTV, 1994):

- Las concentraciones de SS y DQO son muy importantes, y pueden ser superiores a las de las redes unitarias tanto en tiempo seco como en tiempo de lluvia.
- Los SST tienen una composición fundamentalmente mineral (la fracción orgánica es del orden del 30%).
- La relación de biodegradabilidad (DQO/DBO<sub>5</sub>) es débil, del orden de 4 a 6, frente a los 2 a 2.5 de un agua residual de tiempo seco.
- Presencia muy importante de metales pesados y de hidrocarburos.
- Una gran parte de los contaminantes están fijados a los SS.
- La densidad de las partículas y velocidad de caída es mayor que las de las redes unitarias. Importante para los procesos de decantación. La escorrentía de pequeñas lluvias es menos decantable debido a que tienen una fracción orgánica superior.
- El tamaño de las partículas transportadas es grande en general, y es tanto mayor cuanto más aumenta la intensidad de la lluvia.

Mientras que las **redes unitarias** en tiempo de lluvia se caracterizan por los siguientes aspectos (OTV, 1994):

- La fracción mineral de los SS es del orden del 40 al 60%. La relación entre SSV/SS disminuye durante el desarrollo del suceso. Se puede pasar de 70- 80% en tiempo seco a 40% en tiempo de lluvia, lo que se traduce en un aumento del contenido mineral a lo largo de los sucesos.
- La relación entre DQO/DBO<sub>5</sub> es más elevada que para tiempo seco, pero inferior a la que se detecta en redes separativas, mostrando una cierta mayor biodegradabilidad los contaminantes de una red unitaria.
- El contenido global de contaminación es importante: comparado con aguas negras urbanas, tienen concentraciones más altas en SS, DQO y metales, y están más diluidas en DBO<sub>5</sub> y ciertos contaminantes disueltos (nitrógeno y fósforo).
- Los metales pesados (Cd, Cu, Pb, etc.) están en una gran proporción fijados a los SS. Las cargas anuales de metales pesados son más importantes que las de las redes separativas menos para el Pb.

Con el objetivo de comparar la contaminación transportada por las redes unitarias y separativas se recoge en la siguiente tabla los resultados del estudio llevado a cabo por Métadier *et al.* (2012) en las cuencas Chassieu (separativa) y Ecully (unitaria).

**Tabla 4-8. Resumen de los resultados de movilización de contaminantes en las cuencas Ecully y Chassieu (Métadier et al., 2012)**

Contaminante	Variable	Chassieu (separativa)			Ecully (unitaria)		
		Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo
SS	Carga movilizada (kg)	5	371	6404	2	557	4294
	Concentración media (mg/l)	22	144	1421	13	260	1433
DQO	Carga movilizada (kg)	7	352	5823	2	976	7573
	Concentración media (mg/l)	54	129	966	16	441	1354

La importancia de la movilización de los sólidos en suspensión queda indicada con los datos mostrados en la tabla anterior. En el caso de la cuenca separativa, este parámetro muestra concentraciones medias altas típicas de aguas residuales en tiempo seco, llegando a valores propios de aguas fuertemente contaminadas (>350 mg/l).

De manera más global se presenta a continuación las diferencias entre los valores habituales de calidad de la escorrentía urbana y de las aguas residuales urbanas (US-EPA, 1999).

**Tabla 4-9. Comparativa de la contaminación entre aguas residuales domésticas y de escorrentía urbana (US-EPA, 1999).**

Contaminante	Escorrentía urbana		Aguas residuales urbanas		
	Redes separativas		Antes del tratamiento		Tratamiento secundario
	Rango	Valor típico	Rango	Valor típico	Valor típico
DQO (mg/l)	200-275	75	250-10000	500	80
SST (mg/l)	20-2890	150	100-350	200	20
P total (mg/l)	0.02-4.3	0.36	4-25	8	2
N total (mg/l)	0.4-20.0	2	20-85	40	30
Pb (mg/l)	0.01-1.2	0.18	0.02-0.94	0.1	0.05
Cu (mg/l)	0.01-0.40	0.05	0.03-1.19	0.22	0.03
Zn (mg/l)	0.01-2.9	0.02	0.02-7.68	0.28	0.08
CF (UFC/100 ml)	400-50000	-	10 <sup>6</sup> -10 <sup>8</sup>	-	200

Como se puede observar, algunos contaminantes presentes en las aguas pluviales, como DQO y los SST, se vierten al medio con valores típicos superiores a los de vertido por una EDAR con tratamiento secundario. Por lo tanto, las masas movilizadas por la escorrentía hacia el medio receptor a través de los vertidos directos de las redes de pluviales pueden ser superiores a las vertidas por las estaciones de tratamiento.

### 4.4.3. Resultados de estudios de caracterización de flujos de contaminación

En este apartado se exponen los resultados de estudios de caracterización de aguas residuales en tiempo de lluvia realizados en España y en diversas ciudades a lo largo del mundo.

#### A) Cuenca Santiago Este (Santiago de Compostela, España)

Esta cuenca unitaria de Compostela posee un sistema unitario y está formada por 4 subcuencas: Fontiñas, Avenida de Lugo, Cancelón y Bombeo Colegiata del Sar. Su sistema de alcantarillado tiene una longitud aproximada de 19,4 Km, extendiéndose sobre una superficie aproximada de unas 265 ha con un 56% de impermeabilidad. Una de sus principales características es su fuerte pendiente (del orden del 5%).

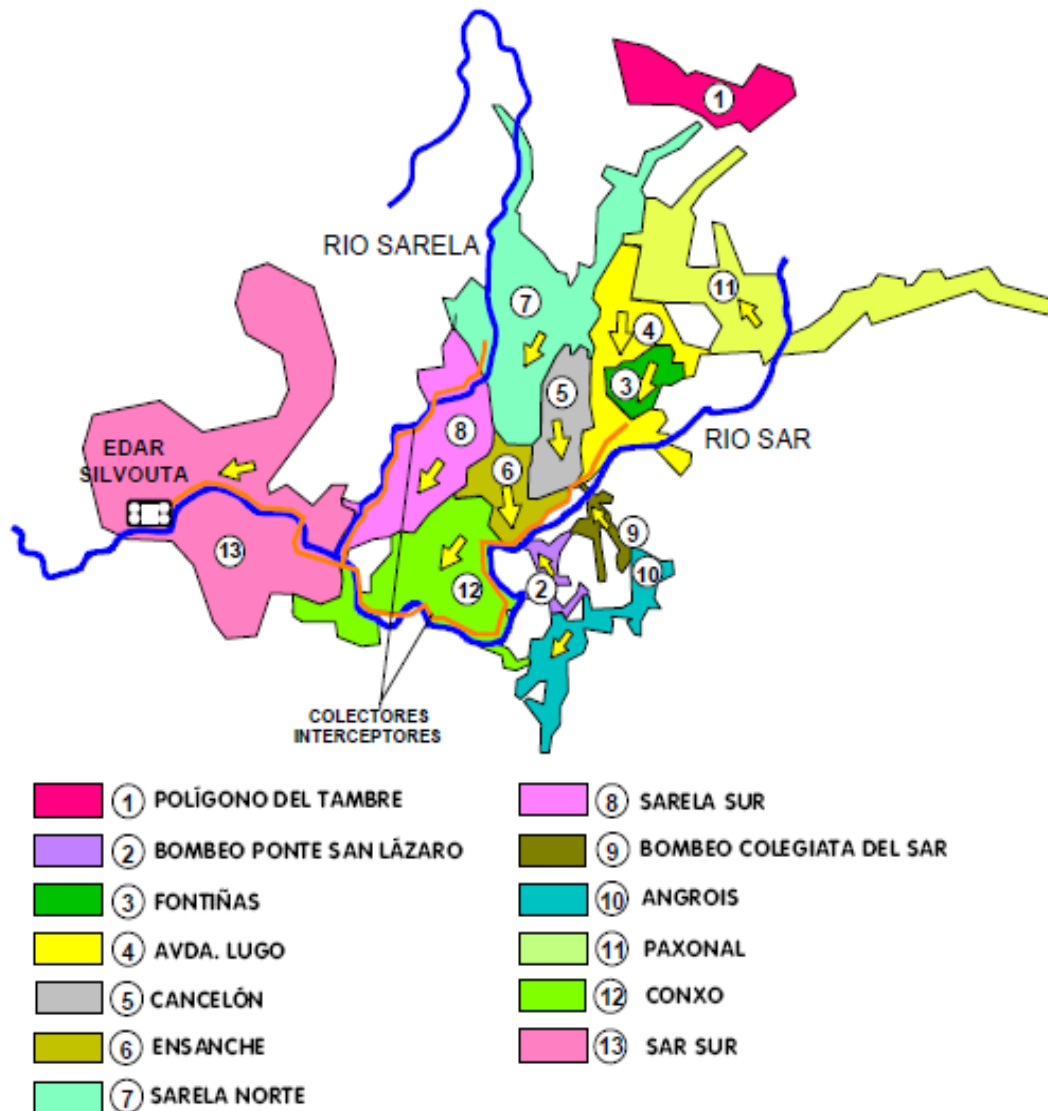


Figura 4-6. Esquema de subcuencas en Santiago de Compostela (Beneyto, 2004)

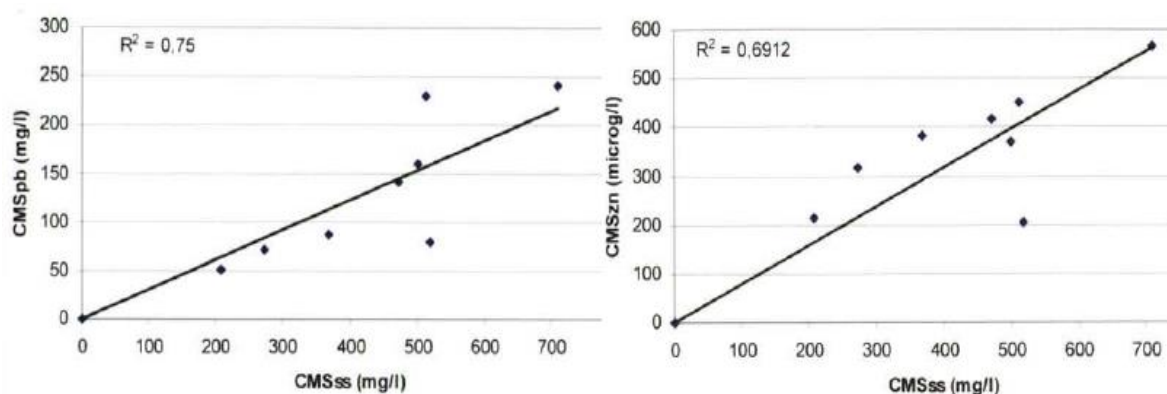
A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores mínimo, medio y máximo de la concentración media de suceso (CMS) de los contaminantes analizados correspondientes a once sucesos de tormenta muestreados en esta cuenca, así como su comparación con la concentración media en tiempo seco (CMDTS).

**Tabla 4-10. Valores mínimo, medio y máximo de las CMS de algunos de los contaminantes analizados y comparación con la CMDTS (Cagiao, 2002)**

Contaminante	CMS			CMDTS (2)	(1) / (2)
	Min	Medio (1)	Máx		
SS (mg/l)	183	415	711	159	2.6
DQO (mg/l)	3	184.3	388	226	0.8
Zn (µg/l)	206	366	567	248	1.5
Cd (µg/l)	0.5	0.8	1	0.4	1.8
Pb (µg/l)	51	133	241	32.4	4.1

Como se puede observar en la tabla anterior, la CMS es superior a la CMDTS para la mayor parte de los contaminantes. Ello indica que, durante el tiempo seco, se origina una acumulación importante de contaminación en la superficie de las calles y tejados, de modo que en los sucesos de lluvia se produce el arrastre y transporte de dicha contaminación hacia los imbornales de la cuenca unitaria (Cagiao, 2002).

En el estudio de esta cuenca también se analizan las tendencias significativas de comportamiento observadas en los diversos contaminantes con el objetivo de establecer relaciones entre los mismos. Algunos de los resultados se presentan en la siguiente figura.



**Figura 4-7. Correlaciones entre las CMS de los SS y diversos metales pesados (Cagiao, 2002)**

Del conjunto de figuras anteriores puede extraerse la conclusión de que la concentración media de sólidos en suspensión en un suceso lluvioso puede jugar un papel trazador del resto de contaminantes a la hora de realizar una estimación de la masa de metales, pues existe una correlación significativa y de sentido positivo entre ambos.

### B) Cuenca Cancelón (Santiago de Compostela, España)

Contenida en la cuenca Santiago Este, la subcuenca unitaria Cancelón presenta una superficie total de 80 ha (45 ha netas) de tipo mixto, con zonas rurales y zonas más urbanizadas. Su población residente es de unos 11.500 habitantes.

La siguiente tabla muestra los resultados de los 13 sucesos muestreados en el estudio llevado a cabo por Beneyto (2004).

*Tabla 4-11. Comparación de la media de las CMS con la CMDTS para algunos contaminantes de la cuenca Cancelón (Beneyto, 2004)*

Parámetro básico	CMS <sub>media</sub>	CMDTS	CMS <sub>media</sub> / CMDTS
ST (mg/l)	442	399	1.1
SST (mg/l)	328	124	2.6
P total (mg/l)	4.6	6.1	0.8
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	67.8	195.9	0.3
DQO total (mg/l)	224	382	0.6
DQO sedimentable (mg/l)	153	145	1.1
Zn (µg/l)	238.3	88.4	2.7
Cd (µg/l)	0.4	0.2	2.5
Pb (µg/l)	131	29.8	4.4
Hg (µg/l)	0.9	0.6	1.5

En base a los resultados mostrados en la tabla anterior se puede afirmar que los sólidos en suspensión y los metales presentan, de forma general, concentraciones más elevadas en los episodios lluviosos que en tiempo seco, lo cual confirma la acumulación y arrastre de sedimentos en la red y la importante relación de los sólidos en suspensión con la contaminación particulada. Para el resto de contaminantes se puede observar el efecto de dilución producido.

### C) Cuenca Ensanche (Santiago de Compostela, España)

La cuenca Ensanche es una de las 13 principales subcuencas del sistema de saneamiento y drenaje de la ciudad de Santiago de Compostela (ver figura 4-6). El Ensanche presenta una red de alcantarillado urbano mayoritariamente unitario que sirve a una población aproximada de 25.000 habitantes. Aunque su superficie es de 38 ha, dado el emplazamiento de las instalaciones empleadas en el estudio de Del Río (2011) del que se extraen estos resultados, el área estudiada corresponde a 20 ha y 13.000 habitantes.

Una de las características principales de esta cuenca es la fuerte pendiente de sus calles, presentado un valor medio de 4.2% y un máximo de 13.3%. Esta característica tendrá importantes consecuencias en el comportamiento tanto hidráulico e hidrológico como de la contaminación.

A continuación, se muestran algunos de los resultados más relevantes del estudio citado anteriormente. La siguiente tabla muestra a modo de resumen las concentraciones medias movilizadas en 5 de los 10 sucesos (denominados con la letra S) analizados en el trabajo de esta cuenca.

**Tabla 4-12. Concentraciones medias de suceso (CMS) de contaminantes para los algunos de los sucesos muestreados en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011)**

Contaminantes	CMDTS	CMS				
	Tiempo seco	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5
DQO (mg/l)	660	652	536	909	1049	1175
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	390	405	260	438	609	655
N total (mg/l)	55.2	80.1	28.3	47.0	41.1	44.8
P total (mg/l)	7.5	10.4	4.9	8.0	8.9	8.6
SS (mg/l)	227	278	362	450	556	811
SD (mg/l)	326	347	97	188	186	237
ST (mg/l)	595	689	472	765	793	1107
Col.F (UFC/100ml)	3.2E+08	5.14E+07	6.71E+06	1.03E+07	1.56E+07	6.82E+07
Cd (µg/l)	0.24	0.30	0.10	-	-	0.4
Pb (µg/l)	59.5	58.3	94.9	92.1	108.9	267.5
Zn (µg/l)	144.8	157.4	330.7	234.9	302.8	440.7

Como se puede observar, el comportamiento de los contaminantes es diferente en función de su tipología. Existen parámetros como el nitrógeno total, los sólidos disueltos o los coliformes totales que muestran concentraciones inferiores en tiempo de lluvia con respecto al tiempo seco. Los consumidores de oxígeno (DQO y DBO<sub>5</sub>) y los sólidos totales presentan por su parte concentraciones medias de suceso del mismo orden o superiores a las medias en tiempo seco.

Por otro lado, los contaminantes cuyas concentraciones medias de suceso son siempre mayores a las medias de tiempo seco son los sólidos en suspensión (tanto totales como volátiles) y todos los metales (a excepción de alguno como el silicio y el boro), hecho que verifica las hipótesis comentadas en las cuencas anteriores sobre la relación entre estos dos parámetros de contaminación.

#### **D) Cuenca Riera d'Horta (Barcelona, España)**

La cuenca urbana de Riera d'Horta, situada en la ciudad de Barcelona es una cuenca unitaria y heterogénea en cuanto a usos y tipos de superficie, coincidiendo en ella actividades de tipo residencial, comercial, industrial y zonas verdes. Su superficie es muy extensa, siendo una de las cuencas más grandes de la ciudad con sus 1208 ha. La población residente es aproximadamente de unos 200.000 habitantes.



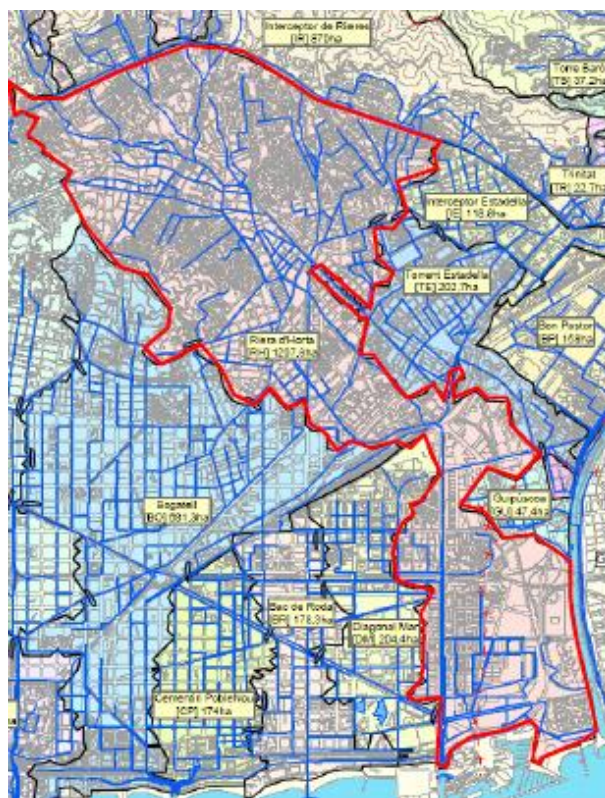


Figura 4-8. Delimitación de la cuenca Riera d'Horta (en rojo) en Barcelona (Del Río, 2011)

A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos en el análisis de los 9 sucesos pluviométricos estudiados en esta cuenca.

Tabla 4-13. Análisis de los valores de CMAX y CMS para la cuenca Riera d'Horta (Del Río, 2011)

Contaminante (mg/l)	CMAX (mg/l)		CMS (mg/l)	
	Máximo	Media	Máximo	Media
DQO	4272	1953	3063	988
DQO soluble	457	193	351	107
N total	139	76	96	45
N orgánico	93	43	67	25
SS	3100	2013	2174	1025
ST	3465	2400	2573	1232

Los resultados mostrados en la tabla anterior ponen en evidencia el alto grado de contaminación que pueden mostrar las aguas residuales en tiempos de lluvia, pues los órdenes de magnitud de contaminación de la mayoría de los parámetros son muy superiores a los valores de los mismos en tiempo seco.

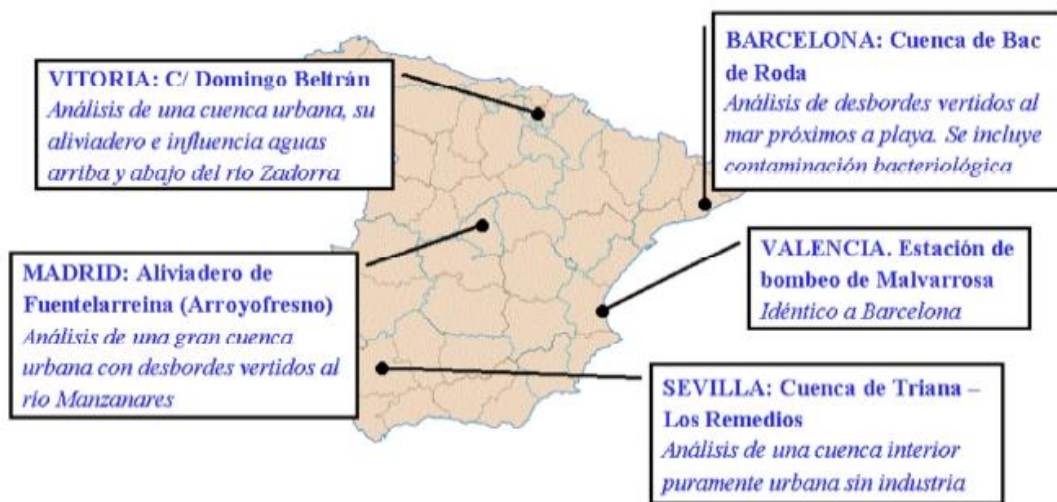
Los sólidos en suspensión es el parámetro que mayores concentraciones presenta lo que indica el alto grado de contaminación particulada de las aguas de esta cuenca. Este hecho se reafirma si se analizan las proporciones de la DQO soluble frente a la DQO. Tanto para las concentraciones máximas como medias, la DQO soluble tan solo representa el 10% de la DQO total.



**E) Programa PROMEDSU (Varias ciudades, España)**

El Programa Nacional de Medición de Descargas de Sistemas Unitarios (PROMEDSU) fue un proyecto promovido por el Ministerio de Medio Ambiente del gobierno español y llevado a cabo entre mayo de 2000 y abril de 2001. El objetivo principal del mismo era la medida de parámetros hidráulicos y de contaminación necesarios para caracterizar los vertidos desde el alcantarillado unitario en cuencas de España.

Las cuencas urbanas fueron elegidas con el propósito de cubrir las diferentes regiones climáticas repartidas a lo largo de toda la península. Todas las cuencas seleccionadas tienen un sistema unitario y su uso principal del suelo es el residencial, aunque se muestran diferencias en cuanto a la densidad de población. Sus características generales se presentan a continuación.



**Figura 4-9. Localización de las ciudades del programa PROMEDSU (Del Río, 2011)**

**Tabla 4-14. Principales características de las cuencas seleccionadas para el programa PROMEDSU (Gómez et al., 2002)**

Ciudad	Barcelona	Madrid	Sevilla	Vitoria	Valencia
Cuenca	Bac de Roda	Arroyo del Fresno	Los Remedios	Almendra	Malvarrosa
Área (ha)	170	3800	135	132	89
Densidad de población (hab/ha)	235	60	380	140	200
Clima	Mediterráneo	Continental	Semiárido	Continental	Mediterráneo

Entre estas 5 cuencas se muestrearon un total de 46 eventos pluviométricos: 13 en Barcelona, 11 en Madrid, 10 en Sevilla, 8 en Vitoria y 4 en Valencia. Para la caracterización de las aguas residuales en tiempo seco se realizaron dos campañas de recogida de datos, una en invierno y otra en verano, en las que se tomaron muestras a lo largo del día.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los resultados más relevantes de este estudio.

**Tabla 4-15. Análisis de los valores de CMAX y CMS en todas las cuencas piloto caracterizadas en el PROMEDSU (Suárez et al., 2005)**

		Madrid	Sevilla	Vitoria	Valencia	Barcelona
CMAX (mg/l)	DQO	2384	3260	2626	967	2333
	DBO <sub>5</sub>	1625	1150	1028	505	-
	SS	2773	3394	1776	1167	2893
CMS (mg/l)	DQO	679.8	833.8	670.9	293.3	455.7
	DBO <sub>5</sub>	384.4	388.8	323.9	166	-
	SS	597.2	733.2	421.3	229.3	579.9
Carga en superficie (g/m <sup>2</sup> )	DQO	0.201	1.297	0.952	2.586	9.406
	DBO <sub>5</sub>	0.106	0.546	0.419	1.488	-
	SS	0.208	1.283	0.674	1.879	16.48

Los principales puntos a destacar tras el análisis de la tabla anterior son los siguientes (Suárez et al., 2005):

- Los valores de concentración máxima y concentración media para la DQO, DBO<sub>5</sub> y SS son muy similares en Madrid, Sevilla, Vitoria y Barcelona (excluyendo la DBO<sub>5</sub>). En la cuenca de Valencia se midieron valores claramente inferiores debido a la existencia de infiltraciones de sistemas de riego.
- Los valores más altos de la carga en superficie se encontraron en las cuencas de Valencia y Barcelona. El motivo más probable de este hecho es el arrastre de los contaminantes depositados en el sistema de alcantarillado puesto que las pendientes de estas redes son extremadamente planas con grades secciones (diseñadas para el drenaje de grandes inundaciones típicas del clima mediterráneo). En tiempo seco, estos conductos de grandes dimensiones promueven velocidades bajas de flujo, lo que puede provocar sedimentación. Cuando un gran caudal es movilizadado en tiempo de lluvia, estos depósitos pueden ser arrastrados y vertidos al medio.
- Como ya se ha comentado anteriormente, la mayor parte de la masa contaminantes medida durante un evento de lluvia está asociada a la escorrentía. Esta contaminación puede venir provocada por el lavado de la superficie o por el arrastre de sedimentos depositados en la red (lo que parece ser el principal origen en Barcelona).

#### **F) Cuenca Cascina Scala (Pavía, Italia)**

Esta cuenca urbana situada en la ciudad de Pavía está compuesta exclusivamente de usos residenciales, presentando una población aproximada de 1500 habitantes. Su extensión

total es de 12.7 ha, donde el 62% de la superficie es totalmente impermeable. La red unitaria tiene una longitud de 2045 m con una pendiente media del 4.2%.

La recolección de datos se realizó durante 23 sucesos de lluvia, aunque el estudio se centró en 8 episodios seleccionados en base a los siguientes criterios:

- Funcionamiento regular de pluviómetros y caudalímetros. Se excluyeron los eventos, que operan bajo condiciones de flujo en presión.
- La profundidad total de lluvia igual a o mayor que 5 mm.
- Intensidad de lluvia máxima de al menos 0,1 mm/min.
- Altura de lluvia máxima de al menos 2 mm por encima de un mínimo de 15 min.
- Integridad de los datos de calidad del agua (no hay muestras faltantes o errores de laboratorio).

La siguiente tabla muestra las concentraciones medias de los principales contaminantes en los sucesos analizados.

**Tabla 4-16. Resumen de resultados de la cuenca Cascina Scala**  
(Barco et al., 2008)

Evento	CMS SS (mg/l)	CMS DBO <sub>5</sub> (mg/l)	CMS DQO (mg/l)
5	393	180	387
7	1428	336	1143
8	383	84	248
13	417	243	544
14	194	207	443
17	257	106	250
19	486	192	475
20	242	126	259
<b>Media</b>	475	184.25	468.625
<b>Máximo</b>	1428	336	1143

Si se comparan estas concentraciones medias con los valores encontrados en la bibliografía para aguas residuales en tiempo seco (Metcalf & Eddy, 1995; tabla 4-2) queda de manifiesto la importancia de la contaminación movilizada en tiempo de lluvia.

Para aguas en tiempo seco fuertemente contaminadas los valores medio de SS, DBO<sub>5</sub> y DQO son respectivamente 350, 400 y 1000 mg/l. Como se puede observar, la movilización de sólidos en suspensión es muy importante pues se alcanzan concentraciones superiores a 350 mg/l en todos los sucesos analizados. En cuanto a los consumidores de oxígeno, se puede apreciar cierto efecto de dilución en la DBO<sub>5</sub> mientras que al DQO muestra valores típicos de agua residual altamente contaminadas.

#### **G) Programa OPUR (Varias cuencas, Francia)**

OPUR (*Observatoire des Pollutants Urbains*) es un programa desarrollado con el objetivo de mejorar el conocimiento de la producción y transferencia de contaminantes en las aguas urbanas. Este programa de investigación organiza sus proyectos en fases de 6 años:

- **OPUR 1** (1994-2000). La primera fase de OPUR se centró en estudiar los contaminantes a escala de una pequeña cuenca urbana (*Le Marais*, en París).
- **OPUR 2** (2000-2006). Creado con el objetivo de ampliar y contrastar los resultados obtenidos en el primer estudio con cuencas urbanas de mayores dimensiones. Con este propósito se estudiaron 6 cuencas urbanas en la ciudad de París, entre las que de nuevo se encontraba *Le Marais*.
- **OPUR 3** (2006-2012). La tercera fase de OPUR se presta especial atención a la prioridad de la Directiva Marco Europea sobre los contaminantes del agua, la calidad microbiológica del agua y los contaminantes emergentes, fuente de preocupación cada vez mayor. Esta investigación cuenta con 5 líneas de principales:
  - Análisis las fuentes y el flujo de contaminantes en el escurrimiento.
  - Análisis de los procesos de transferencia de contaminantes en relación con los diferentes modos de gestión del agua tormenta y con el uso del territorio.
  - Caracterización de la materia orgánica y su efecto sobre la biodisponibilidad de metales pesados en los sistemas acuáticos.
  - Análisis del comportamiento de los contaminantes en las plantas de tratamiento de aguas residuales en tiempo seco y húmedo.
  - Análisis de la fiabilidad de los dispositivos de medición continua de la red y el desarrollo de nuevas herramientas de modelado de contaminantes en tiempo de lluvia.
- **OPUR 4** (2012-2018). Esta fase es una continuación de trabajo realizado en las fases anteriores y se centra principalmente es los siguientes aspectos:
  - Control de las fuentes de contaminación de las aguas pluviales urbanas.
  - Uso de recursos alternativos para el agua potable en la ciudad.
  - Desarrollo de nuevos métodos de vigilancia y caracterización de contaminantes.
  - Modelado del comportamiento de los contaminantes.

Como se puede observar, la temática tratada en este programa es muy amplia. Diversos estudios nombrados en el presente trabajo como los realizados por Bertrand-Krajewski *et al.*, (1998, 2004), Gromaire *et al.*, (2001), Métadier *et al.*, (2012) están enmarcados dentro de este programa por lo que sus resultados son comentados en los apartados correspondientes.

# CAPÍTULO 5: DESCRIPCIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO

## ÍNDICE CAPÍTULO 5

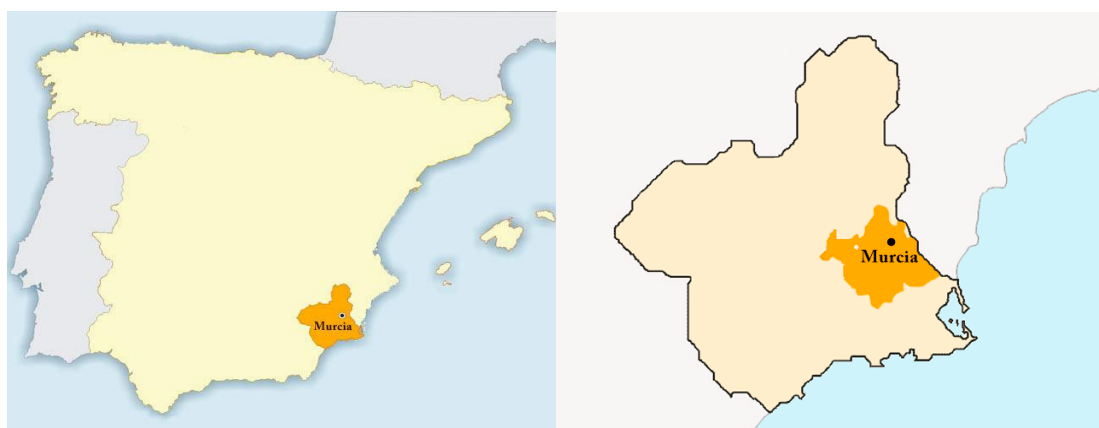
<b>5. DESCRIPCIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO .....</b>	<b>5-1</b>
5.1. RED DE SANEAMIENTO DEL MUNICIPIO DE MURCIA.....	5-1
5.1.1. Descripción de las cuencas de estudio .....	5-3
5.2. MODELO NUMÉRICO DE LA RED DE SANEAMIENTO .....	5-6
5.2.1. Storm Water Management Model (SWMM) .....	5-6
5.2.2. Modelo numérico del municipio de Murcia.....	5-10
5.3. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	5-12
5.3.1. Cálculo teórico del $T_c$ .....	5-12
5.3.2. Cálculo del $T_c$ con el empleo del modelo numérico de la red.....	5-14
5.4. ANÁLISIS DE LOS FLUJOS DE AGUA RESIDUAL EN TIEMPO SECO .....	5-16
5.4.1. Análisis de los hidrogramas .....	5-16
5.4.2. Análisis de la turbidez.....	5-19



## 5. DESCRIPCIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO

### 5.1. RED DE SANEAMIENTO DEL MUNICIPIO DE MURCIA

El Valle de Murcia tiene una topografía muy particular. Los dos cauces naturales de mayor envergadura, el Segura y el Guadalentín (también llamado Sangonera o Reguerón) tienen sus márgenes a cotas más elevadas que gran parte de las zonas colindantes. Este factor, unido a las bajas pendientes, suele hacer inviable la canalización por gravedad de las aguas.



*Figura 5-1. Situación del término municipal de Murcia*

Además, este valle aluvial está caracterizado por la presencia de una extensísima red de acequias y azarbes que cruzan la red de alcantarillado, con terrenos muy poco cohesivos con alto nivel freático, que dificultan así su operación, mantenimiento y desarrollo.

Otro fenómeno a tener en cuenta en la explotación de la red de drenaje es la escasez de lluvia en esta cuenca. Este déficit de precipitación perdura durante todo el año, pero por la propia estructura y características de la cuenca, se experimentan lluvias de forma torrencial que producen desbordamientos en el sistema de saneamiento y ocasionan inundaciones en viales públicos.

A continuación, se presentan algunos datos geográficos del sistema:

- Extensión de la cuenca 275,51 Km<sup>2</sup>.
- Más de 439.889 habitantes en el municipio.
- De ellos, 170.000 repartidos en población diseminada.
- Existen 52 pedanías en un radio superior a 40 Km.

La red de alcantarillado del término municipal de Murcia es en su mayor parte de sistema unitario (transporta tanto las aguas residuales como las pluviales). En ella coexisten colectores de gran antigüedad, como el San Félix, con otros construidos recientemente usando las más modernas técnicas de túneles, hincas, instalación sin zanja, rehabilitados con sistemas de manga, etc.

Estas condiciones hacen que la evacuación de aguas residuales utilizando únicamente la fuerza de la gravedad sea difícil, por lo que se disponen de multitud estaciones de bombeo para conducir las aguas hacia las depuradoras. Además, se disponen de redes de vacío en algunas zonas. Estas estaciones de bombeo elevan el agua a un colector contiguo (elevaciones o volteos) en su mayor parte por falta de cota, impulsan dicha agua por conducciones a presión con trazados relativamente largos (impulsiones), o vacían las cámaras de los tanques de tormentas o de laminación. Los bombeos de agua residual permiten salvar los obstáculos del terreno a cambio de un coste energético y de mantenimiento de los equipos e instalaciones.

La configuración de la red arterial de colectores está íntimamente relacionada con la ubicación de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), pues la red debe necesariamente desembocar en alguna de ellas. De esta manera, se tienen dos grandes sistemas de colectores y una serie de sistemas de menor longitud, vinculados cada uno de ellos normalmente a su correspondiente EDAR. Todos estos sistemas son independientes:

- Sistema Murcia-Este.
- Sistema El Raal,
- Sistemas de Avileses, Baños y Mendigo, Barqueros, Cabezo de la Plata, Corvera, Gea y Truyols, La Murta, Lobosillo, Los Martínez del Puerto, Sucina, Valladolides y Zeneta.
- Sistemas de Mossa Trajectum, El Valle Golf Resort, Hacienda de Riquelme, La Peraleja, Sucina Golf, Los Bronchos, La Nueva Tercia, Trampolín y Corvera Golf.

En cuanto las características y magnitudes principales de la red de saneamiento de Murcia se destacan:

- Longitud de red de alcantarillado: 1.582 Km, mayoritariamente unitaria (98%)
- Tipología de red: longitud de red visitable 50 Km y no visitable 1.532 Km.
- Diámetros de la red comprendidos entre 200 y 2.000 mm, cuyo material predominante es el hormigón.
- Acometidas de saneamiento existentes (domiciliarias, industriales y otras): 72.753 unidades.
- Pozos de registro de alcantarillado: 48.387 unidades.
- Imbornales y sumideros: 37.598 unidades, repartidos por Murcia ciudad (36%) y pedanías (64%)
- Estaciones de bombeo de aguas residuales y pluviales: 186
- Tanques de tormenta: 9 instalaciones existentes
- EDAR: 14
- Redes por sistema por vacío: 2

Si se sigue el camino inverso de una gota de agua residual o pluvial, es decir, desde que llega a la EDAR hasta que es recogida por los colectores de la red secundaria, el esquema arborescente es el que sigue.



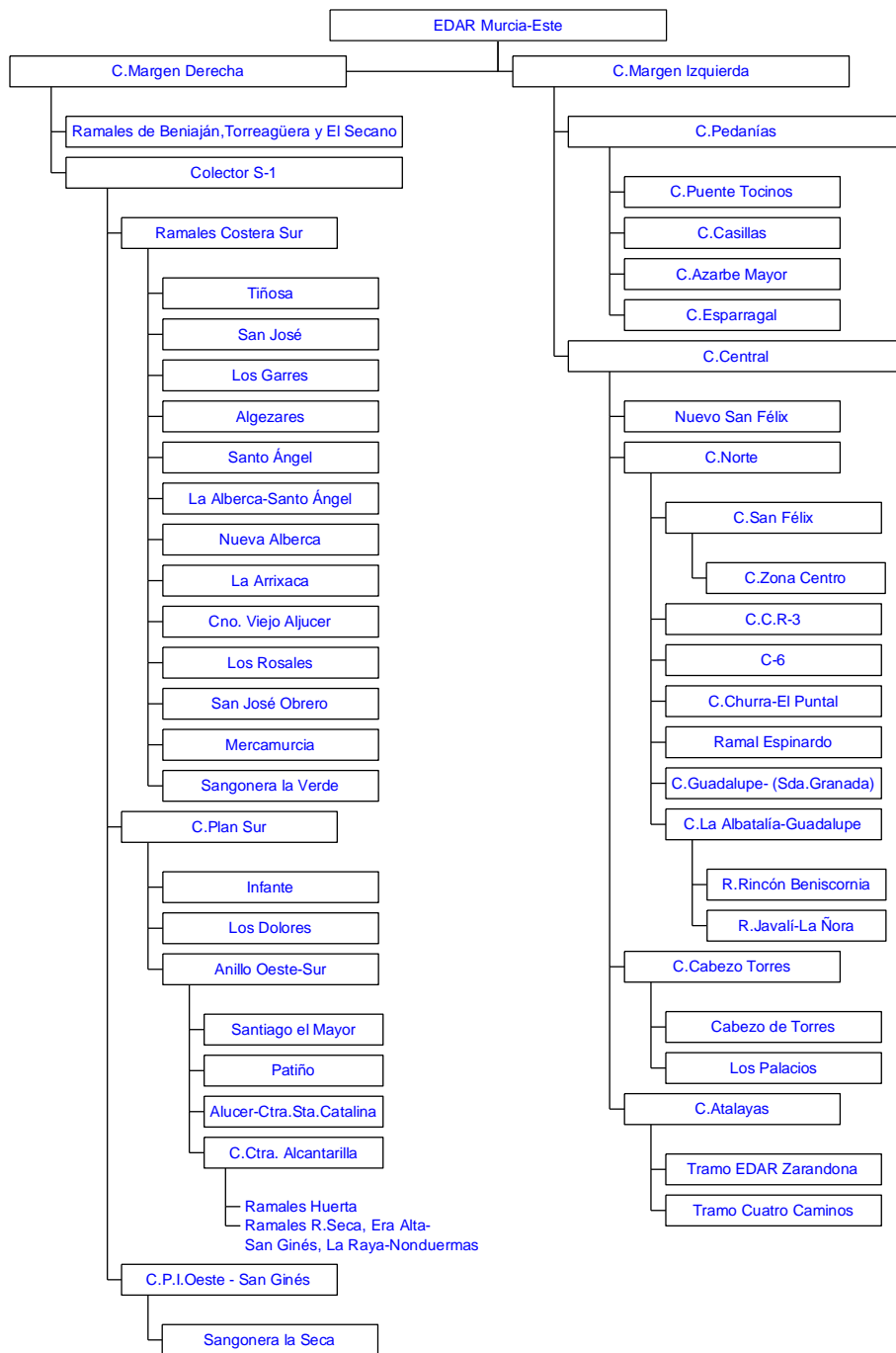


Figura 5-2. Esquema Sistema Murcia-Este de la red de saneamiento de Murcia

Dentro de este extenso sistema, este estudio se centra en dos puntos de análisis principales: la cuenca S1 y San Félix. Estas cuencas están representadas en la figura 5-3.

### 5.1.1. Descripción de las cuencas de estudio

A continuación, se muestra la tabla resumen de las características de las cuencas de estudio S1 y San Félix.

*Tabla 5-1. Características de las cuencas de estudio*

<b>Cuenca S1</b>	
Área (km <sup>2</sup> )	47.53
Densidad de población (hab/km <sup>2</sup> )	2685
Grado de impermeabilidad (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.21
Pendiente media (m/m)	0.0012736
Longitud del cauce principal (km)	17

<b>Cuenca San Félix</b>	
Área (km <sup>2</sup> )	14.89
Densidad de población (hab/km <sup>2</sup> )	14250
Grado de impermeabilidad (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.47
Pendiente media (m/m)	0.0042528
Longitud del cauce principal (km)	10.75



## 5.2. MODELO NUMÉRICO DE LA RED DE SANEAMIENTO

### 5.2.1. Storm Water Management Model (SWMM)

El *Storm Water Management Model* (modelo de gestión de aguas pluviales) de la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (US-EPA) es un modelo numérico que permite simular el comportamiento hidrológico-hidráulico de un sistema de drenaje urbano, tanto en términos de cantidad de agua como de calidad de la misma. Este modelo lleva más de treinta años de uso en los Estados Unidos y se ha difundido por todo el mundo, siendo una herramienta de cálculo reconocida a nivel mundial.

Este software fue desarrollado entre 1969 y 1971 por tres grupos principalmente: Metcalf & Eddy, Inc; la Universidad de Florida, y la Water Resources Engineers, Inc. La versión original del programa ha sido objeto de mejoras a lo largo de los últimos años, aunque los algoritmos de simulación de acumulación y lavado de contaminantes prácticamente no han evolucionado.

Las numerosas aplicaciones de este software pueden ser clasificadas en tres grupos principales:

- **Modelo de planificación:** este tipo de modelos se emplean con el objetivo de analizar de forma global los problemas de la escorrentía urbana y para estimar tanto la efectividad como los costes de las posibles mejoras del sistema. Permiten seleccionar episodios hidrológicos de interés a la hora de realizar los diseños de las redes, los cuales serán posteriormente analizados con modelos de diseño. Estos modelos se caracterizan por tener escalones de tiempo relativamente largos (del orden de horas) y tiempos de simulación extensos (meses y años).
- **Modelo de diseño:** desarrollados con el objetivo de realizar simulaciones de un único suceso de lluvia. Permiten el conocimiento sobre los caudales y contaminantes circulantes desde el momento en que la precipitación cae, se introduce y circula por todo el sistema de alcantarillado. Estos modelos son una herramienta muy útil para resolver los problemas de inundaciones y contaminación en las áreas urbanas, pues posibilitan la predicción de caudales y concentraciones en cualquier punto de la red y la selección de las mejores opciones de diseño. Puesto que su objetivo fundamental es la simulación de sucesos independientes, estos modelos se caracterizan por tener escalones de tiempo cortos (minutos) y duraciones de simulación reducidas (horas). Los datos que se requieren para la elaboración de los mismos puede ser desde moderados hasta muy extensos, dependiendo del propósito final del modelo.
- **Modelo de operaciones:** las cualidades de este software también posibilitan su empleo en la toma de decisiones de control en tiempo real durante los sucesos de lluvia. Los datos de precipitación pueden ser introducidos desde las estaciones telecomandadas, de modo que se realice la predicción del sistema a corto plazo.

Desde sus inicios, hasta la versión 5.0, el programa estaba estructurado en bloques de cálculo donde cada bloque simulaba numéricamente algún proceso hidrológico o hidráulico en particular. Estos bloques eran (Butler *et al.*, 2004):

- RUNOFF, encargado de simular la generación de escorrentía superficial y de los contaminantes originada por la precipitación en la cuenca de estudio.
- TRANSPORT, centrado en propagar el flujo y los contaminantes a través del sistema de alcantarillado. Este bloque simula el flujo no permanente usando la aproximación de la onda cinemática.
- EXTRAN, el cual propaga el flujo (pero no los contaminantes) resolviendo las ecuaciones completas del régimen no permanente unidimensional (ecuaciones de Saint Venant).
- STORAGE/TREATMENT, encargado de estudiar el comportamiento del flujo y los contaminantes a través de depósitos de almacenamiento o estaciones de tratamiento de agua.

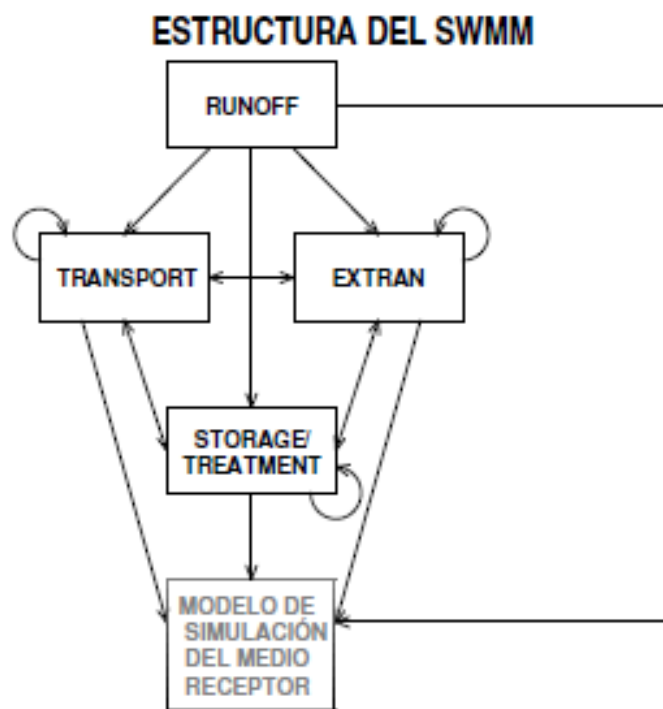


Figura 5-4. Estructura del SWMM (Beneyto, 2004)

SWMM fue desarrollado inicialmente en lenguaje FORTRAN entre los años 1969 y 1971, y tal vez fue uno de los primeros modelos numéricos desarrollado especialmente para sistemas de drenaje urbanos. Desde entonces, SWMM ha sido objeto de numerosas mejoras y actualizaciones.

La EPA's Water Supply and Water Resources Division y la firma consultora CDM acordaron en 2002 el desarrollo de una nueva versión de SWMM totalmente reescrita con el objetivo de aplicar técnicas más modernas de programación y mejorar su mantenimiento, extensión y uso. De este modo, la nueva versión 5.0 de SWMM presenta dos grandes cambios respecto a las versiones anteriores:

- Todo el código fue escrito sobre una plataforma independiente empleando el lenguaje de programación C.



- Una nueva interfaz gráfica de usuario escrita en Delphi que trabaja bajo el sistema operativo Windows.

Al mismo tiempo, con el fin de que los resultados numéricos producidos por SWMM 5.0 fuera compatibles con los proporcionados por la versión 4.4 se desarrolló un programa de certificación de calidad. De este modo en octubre de 2004 la versión 5.0 es entregada a dominio público junto con el nuevo manual de usuario, los nuevos códigos de programación y el resto de documentos asociados con este software.

SWMM 5.0 considera la red como un conjunto de elementos y flujos diversos (Objetos) dentro de módulos o capas, de modo que cada una de dichas capas representa un proceso hidrológico-hidráulico (es equivalente a la estructura de bloques de las versiones anteriores).

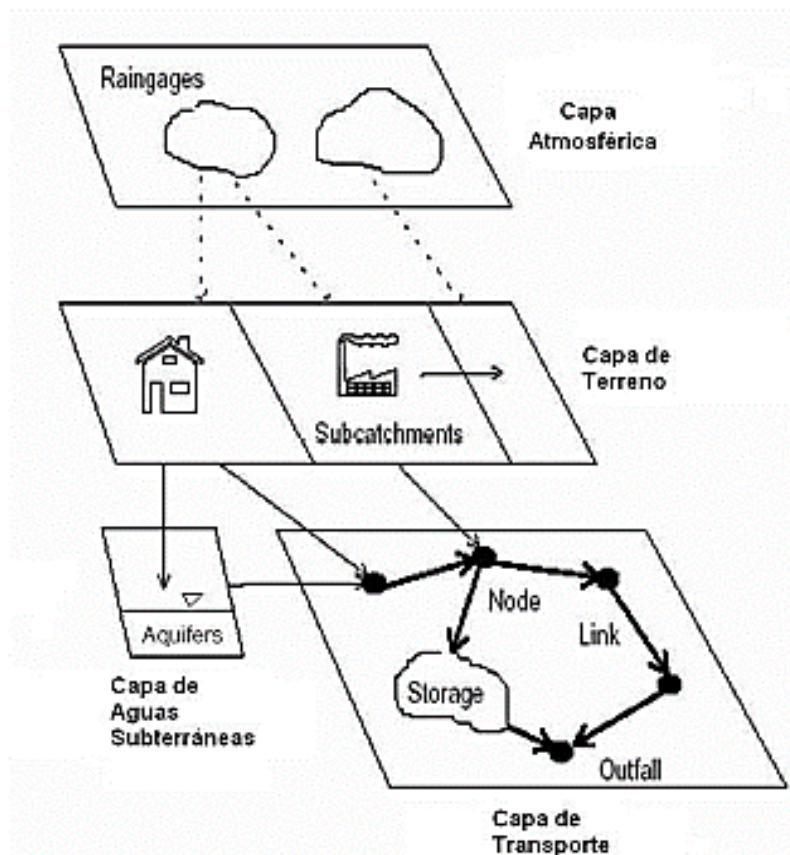


Figura 5-5. Esquema de capas de SWMM 5.0 (Del Río, 2011)

Estos módulos y sus correspondientes objetos son los siguientes (US-EPA, 2005):

- El **Módulo Atmosférico**, desde el cual se analiza la lluvia caída y los contaminantes depositados sobre la superficie del suelo, que se analiza en el Módulo de Superficie del Suelo. SWMM utiliza el objeto Pluviómetro (Rain Gage) para representar las entradas de lluvia en el sistema.
- El **Módulo de Superficie del Suelo**, que se representa a través de uno o más objetos cuenca (Subcatchment). Estos objetos reciben la precipitación del Módulo Atmosférico en forma de lluvia o nieve, y generan flujos de salida en forma de

infiltración para el Módulo de Aguas Subterráneas y también como escorrentía superficial y cargas de contaminantes para el Módulo de Transporte.

- El **Módulo de Aguas Subterráneas** recibe la infiltración del Módulo de Superficie del Suelo y transfiere una parte de la misma como flujo de entrada para el Módulo de Transporte. Este módulo se ajusta utilizando los objetos Acuíferos (Acuíferos).
- El **Módulo de Transporte** contiene una red con elementos de transporte (canales, tuberías, bombas y elementos de regulación) y unidades de almacenamiento y tratamiento que transportan el agua hacia los Nudos de Vertido (Outfall) o las estaciones de tratamiento. Los flujos de entrada de este Módulo pueden provenir de la escorrentía superficial, de la interacción con el flujo subterráneo, de los caudales sanitarios correspondientes a periodos sin lluvia, o de hidrogramas de entrada definidos por el usuario. Los componentes del Módulo de Transporte se modelan con los objetos Nudos y Líneas.

A modo de ejemplo se muestra a continuación un esquema resumen de los principales elementos de un sistema de drenaje modelado en SWMM 5.0.

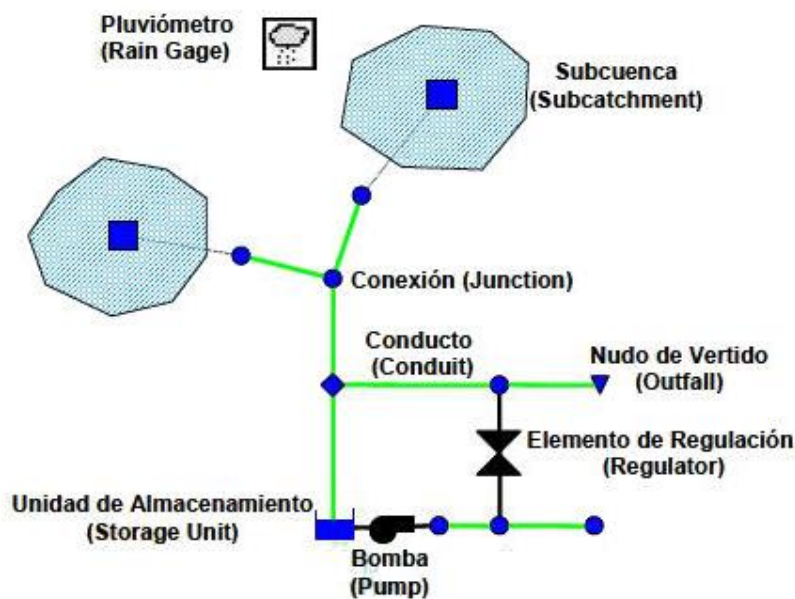


Figura 5-6. Ejemplo de los Componente Físicos empleados en el modelo de un sistema de drenaje (US-EPA, 2005)

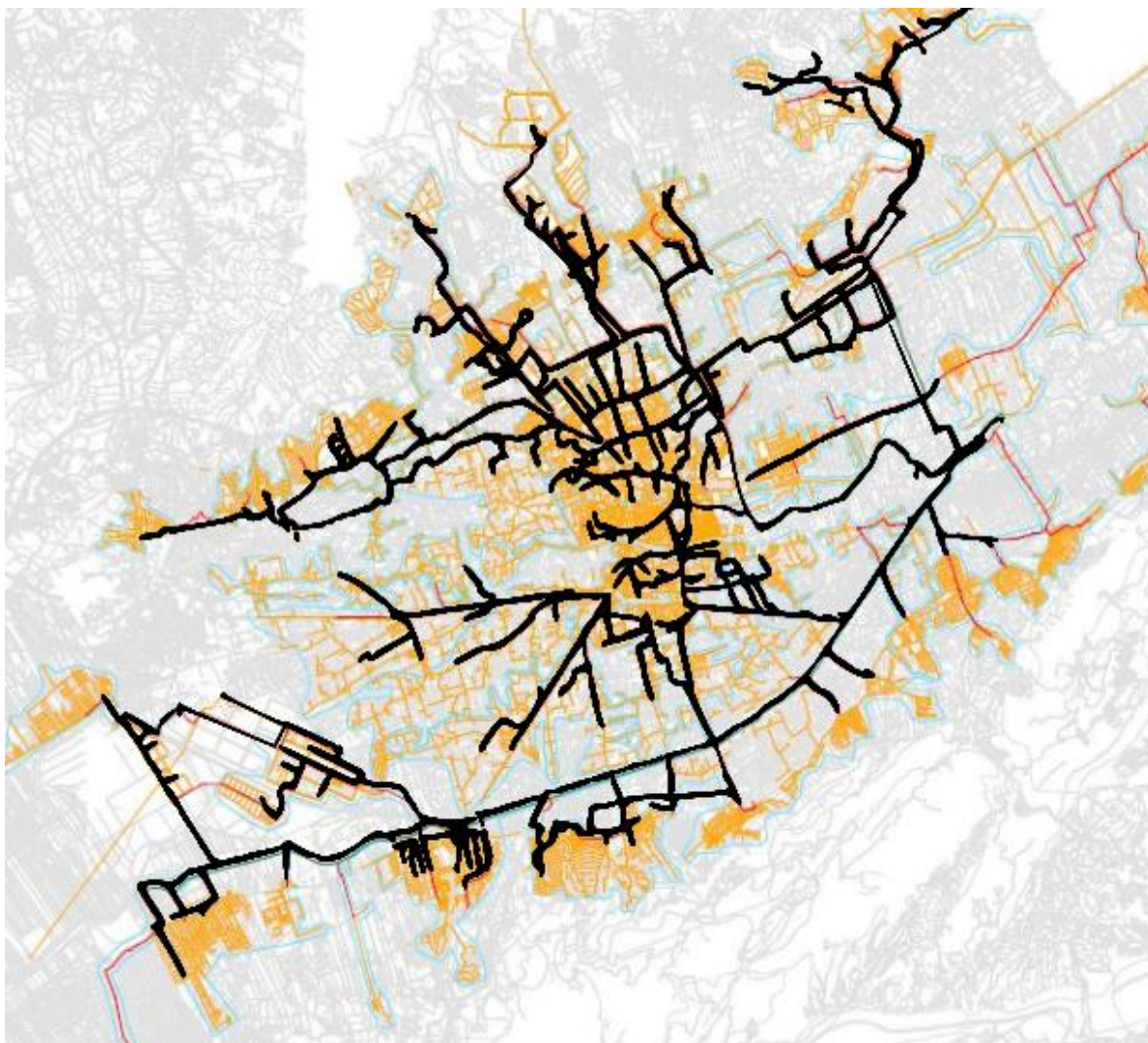
Los pluviómetros (Rain Gages) son los objetos que suministran los datos de entrada de la precipitación sobre una o varias cuencas. Para su representación el usuario puede introducir tanto una serie temporal definida por el mismo como un archivo externo de datos de lluvia.

Además de los pluviómetros, para poder modelar la escorrentía superficial son necesarias las subcuencas (Subcatchment). Estos objetos representan la unidad hidrológica básica de superficie de terreno con sus correspondientes características topográficas, hidrológicas e hidráulicas (área, pendiente media, pluviómetros asociados, etc.).

En cuanto a la red de drenaje, esta se representa en SWMM mediante dos tipos principales de objetos: elementos tipo nodo (Node) y tipo conector (Link). En el primer grupo se engloban elementos como las uniones (Junction) encargadas de unir dos o más conectores, las descargas (Outfall), los elementos de almacenamiento (Storage Unit) y los divisores de flujo (Dividers).

### 5.2.2. Modelo numérico del municipio de Murcia

A continuación, se muestran diversas imágenes del modelo de la red de saneamiento del municipio de Murcia con el que se ha trabajado en este estudio.



*Figura 5-7. Geometría del modelo de la red de saneamiento del municipio de Murcia*

Dentro de este complejo sistema, los puntos de análisis de las cuencas S1 y San Félix se encuentran situados en la zona sur y centro respectivamente. La siguiente figura muestra su localización en el mapa.



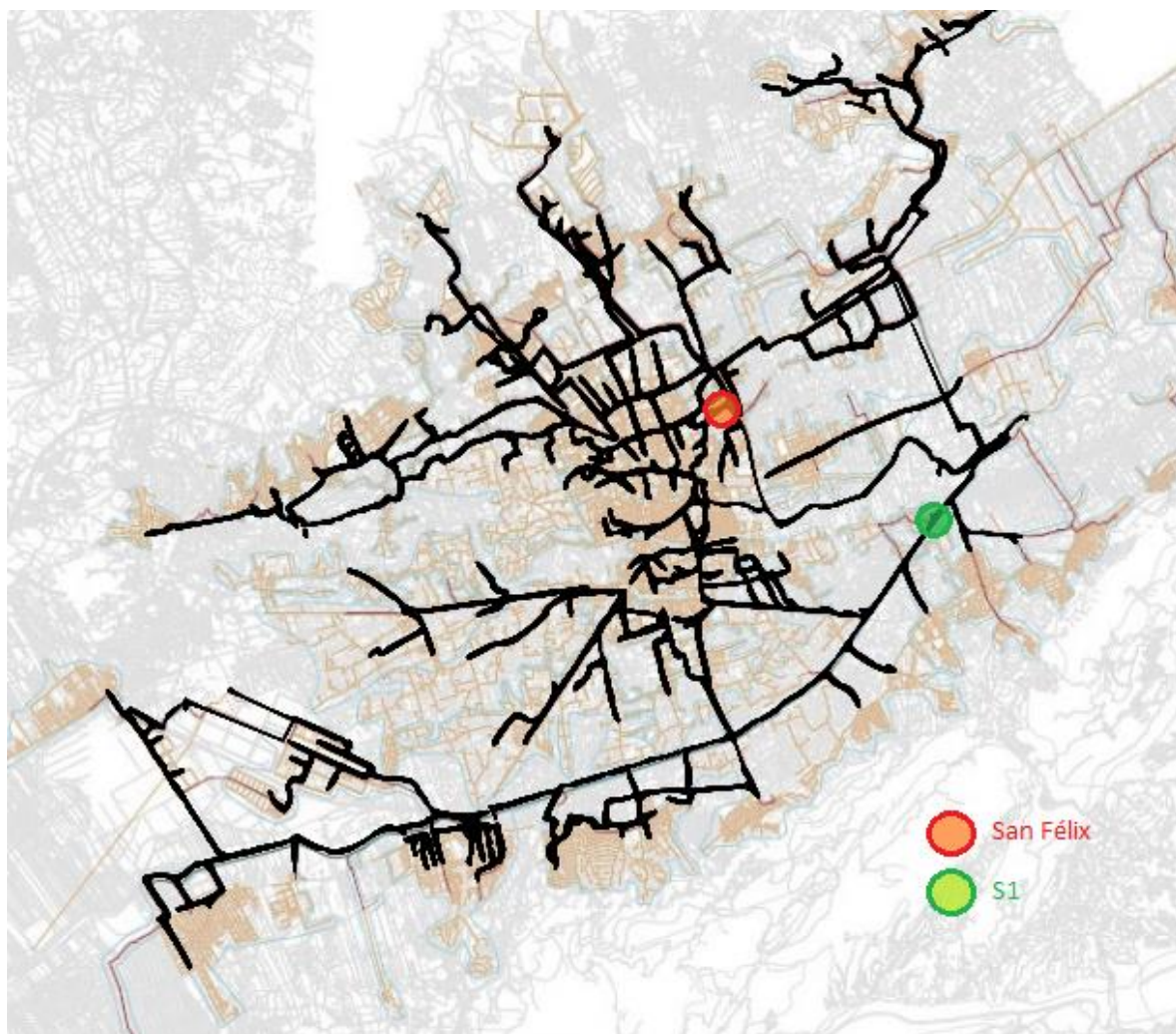


Figura 5-8. Localización de los puntos de análisis dentro del modelo de la red de saneamiento

Mostrado el modelo de la red y la localización de los puntos de análisis en el mismo, se procede a mostrar algunos datos relevantes de este modelo empleado.

Tabla 5-2. Principales características del modelo empleado

<b>Características hidrológicas</b>	Pluviómetros	39
	Subcuencas	4553
<b>Características hidráulicas</b>	Nudos de conexión	6073
	Nudos de vertido	58
	Depósitos	70
	Conductos	6304
	Bombas	100

### 5.3. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Se define el tiempo de concentración ( $T_c$ ) como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado (el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida) (Gisbert *et al.*, 2011).

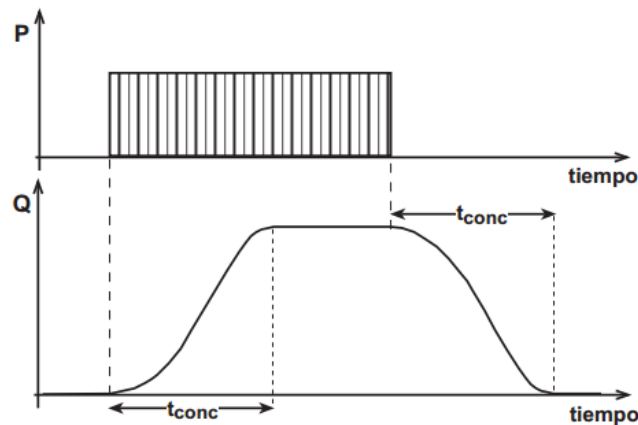


Figura 5-9. Cálculo gráfico del tiempo de concentración para un hietograma neto y un hidrograma dado (Sánchez, 2011)

#### 5.3.1. Cálculo teórico del $T_c$

El tiempo de concentración,  $T_c$ , se puede descomponer de dos sumandos: tiempo de escorrentía,  $T_E$ , y tiempo de recorrido,  $T_R$  (Puertas *et al.* 2008):

$$T_c = T_E + T_R \quad (5.1)$$

El **tiempo de escorrentía** es el que tarda la lluvia más alejada en llegar al cauce o red de alcantarillado. Depende de la distancia a recorrer por el agua de lluvia, de la pendiente y grado de impermeabilidad del terreno. Varía en la práctica entre un mínimo de 3 minutos y un máximo de 20 minutos, con valores normales entre 5 y 10 minutos. Su evaluación está sujeta a claras incertidumbres. Conforme aumenta la superficie desaguada disminuye el peso del tiempo de escorrentía en el total del tiempo de concentración.

Se entiende por **tiempo de recorrido** al tiempo que tarda el agua que discurre por un cauce, o por la red de alcantarillado, en alcanzar el punto de concentración. Depende de las condiciones hidráulicas del cauce o de los colectores.

Cuando en una cuenca predomina la circulación en flujo canalizado por una red de cauces definidos (es decir, predomina el tiempo de recorrido sobre el tiempo de escorrentía), el tiempo de concentración relacionado con la intensidad media de la precipitación se podrá deducir de la fórmula incluida en la Instrucción de carreteras 5.2-I.C:

$$T_c = 0.3 \cdot \frac{L^{0.76}}{S^{0.19}} \quad (5.2)$$

siendo  $L$  la longitud del cauce principal en km y  $J$  la pendiente media (m/m).

Según Témez (1978), la circulación de las aguas encuentra condiciones más favorables en las zonas urbanas que en las rurales y, en consecuencia, el tiempo de concentración será menor. Asimismo, existen una serie de expresiones de carácter global que suministran el tiempo de concentración total en zona urbana, como es el caso de una modificación de la expresión 5.2 de Témez:

$$T'_c = \frac{T_c}{1 + 3\sqrt{\mu \cdot (2 - \mu)}} \quad (5.3)$$

siendo  $T'_c$  el tiempo de concentración global de la zona urbana en horas,  $T_c$  el tiempo de concentración en zona no urbana (obtenido con la expresión 5.2) en horas y  $\mu$  el grado de impermeabilidad de la cuenca (calculado como el cociente entre la superficie impermeable y la superficie total). La fórmula anterior supone las zonas urbanizadas repartidas en la cuenca y no muy concentradas en una de sus partes, pues en esos casos el tiempo de concentración dependerá también de la situación de dichas zonas.

Una vez conocida la formulación a emplear, se procede al cálculo de los tiempos de concentración teóricos de las cuencas de estudio. La siguiente tabla resumen los cálculos realizados.

Tabla 5-3. Cálculo del tiempo de concentración para la cuenca S1

Cuenca S1	
Longitud del cauce principal (km)	17
Pendiente media (m/m)	0.0012736
Área (km <sup>2</sup> )	47.53
Grado de impermeabilidad (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.21
Tiempo de concentración* (min)	550.12
Tiempo de concentración** (min)	<b>193.75</b>
* tiempo de concentración calculado con la expresión 5.2	
** tiempo de concentración calculado con la expresión 5.3	

Tabla 5-4. Cálculo del tiempo de concentración para la cuenca San Félix

Cuenca San Félix	
Longitud del cauce principal (km)	10.75
Pendiente media (m/m)	0.0042528
Área (km <sup>2</sup> )	14.89
Grado de impermeabilidad (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.47
Tiempo de concentración* (min)	308.81
Tiempo de concentración** (min)	<b>87.14</b>
* tiempo de concentración calculado con la expresión 5.2	
** tiempo de concentración calculado con la expresión 5.3	

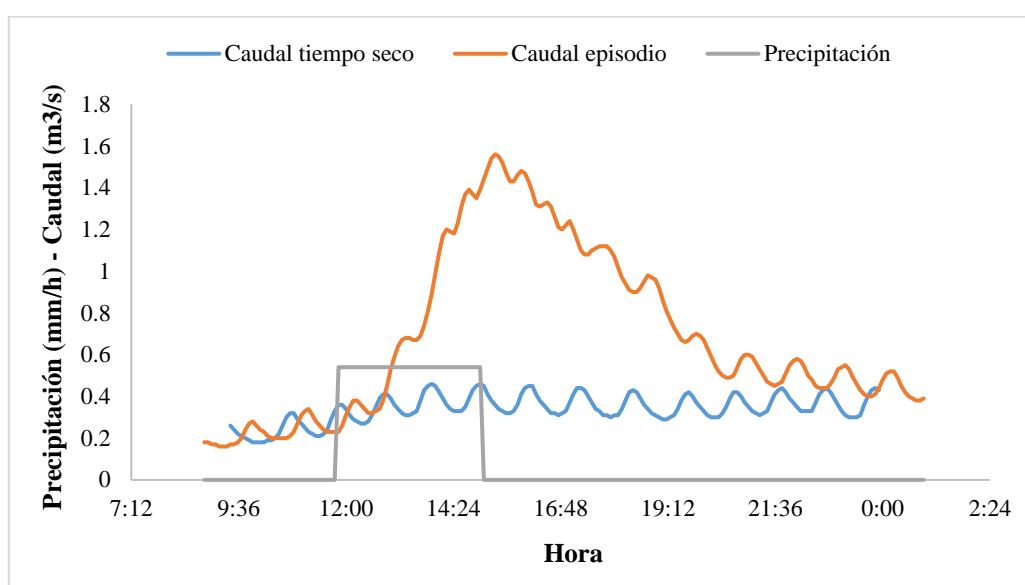
### 5.3.2. Cálculo del $T_c$ con el empleo del modelo numérico de la red

A continuación, se realiza el cálculo del tiempo de concentración empleando el modelo numérico de la red en el software SWMM. Para ello se realizará el cálculo del tiempo de concentración en base a lo representado en la figura 5-9.

Con este propósito se introducirán pulsos de lluvia en las subcuencas del modelo que conforman las cuencas de estudio y se observarán los tiempos desde los instantes de referencia.

- **Cuenca S1**

En primer lugar, se realizan los cálculos introduciendo el pulso de precipitación a todas las subcuencas que conforman la cuenca S1. A continuación se presentan los resultados.



*Figura 5-10. Respuesta de la cuenca S1 ante un pulso de lluvia uniforme en toda la cuenca*

*Tabla 5-5. Cálculo del TC de la cuenca S1 con una lluvia uniforme en toda la cuenca*

Precipitación uniforme en toda la cuenca	
Hora de inicio de la escorrentía (1)	11:55
Hora de caudal máximo (2)	15:20
Tiempo de concentración (2) - (1)	<b>205 minutos</b>

Con el objetivo de contrastar este último cálculo realizado, se presenta a continuación la respuesta de la cuenca S1 a un pulso de lluvia acaecido en sus subcuencas hidrológicamente más alejadas.

Tabla 5-6. Cálculo del TC de la cuenca S1 con una lluvia uniforme en las subcuencas hidrológicamente más alejadas

Precipitación en la cuenca 4029_Sangonera I	
Hora de inicio de la escorrentía (1)	11:55
Hora de caudal máximo (2)	15:20
Tiempo de concentración (2) - (1)	<b>205 minutos</b>
Precipitación en la cuenca 2014_S1 La Paloma	
Hora de inicio de la escorrentía (1)	11:55
Hora de caudal máximo (2)	15:15
Tiempo de concentración (2) - (1)	<b>200 minutos</b>

Como puede observarse, ambos valores del tiempo de concentración aportan resultados cercanos a los valores calculados en base a la formulación teórica. Por lo tanto, el tiempo de concentración asumido para la cuenca S1 será de **193.75 minutos**, resultado del cálculo teórico.

- **Cuenca San Félix**

A continuación, se presentan los cálculos para la cuenca San Félix. Al igual que en el caso de la cuenca S1, se realizan los cálculos tanto para un pulso de lluvia uniforme en toda la cuenca como para una lluvia localizada en las subcuencas hidrológicamente más alejadas.

Como puede observarse, los valores del tiempo de concentración en el caso de aplicar el pulso de lluvia en las cuencas más lejanas aportan resultados más cercanos a los valores calculados en base a la formulación teórica. Por lo tanto, el tiempo de concentración asumido para la cuenca San Félix será de **87.14 minutos**, resultado del cálculo teórico.

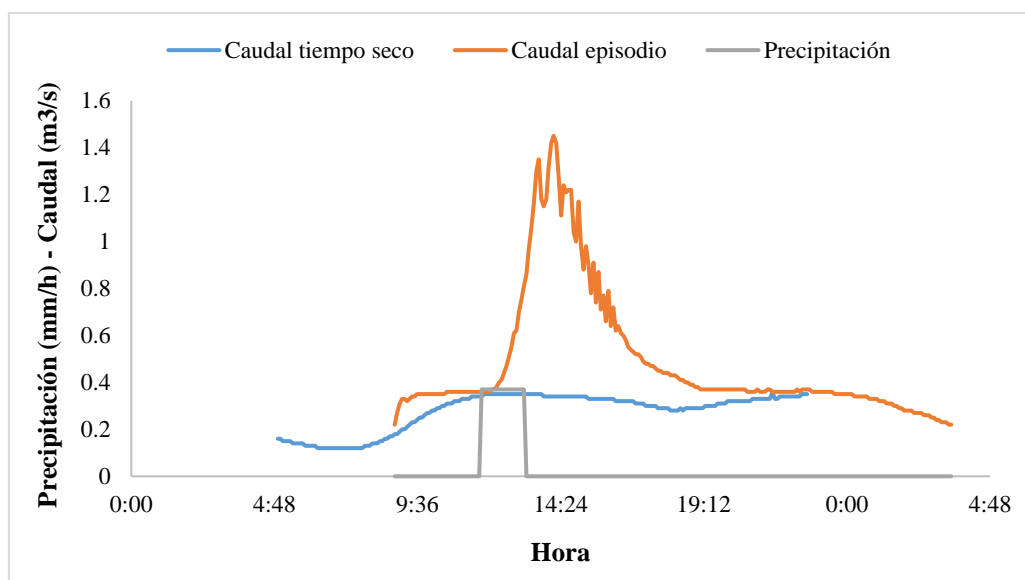


Figura 5-11. Respuesta de la cuenca San Félix ante un pulso de lluvia uniforme en toda la cuenca

Tabla 5-7. Cálculo del TC de la cuenca San Félix con una lluvia uniforme en toda la cuenca

Precipitación uniforme en toda la cuenca	
Hora de inicio de la escorrentía (1)	11:55
Hora de caudal máximo (2)	13:40
Tiempo de concentración (2) - (1)	<b>105 minutos</b>

Tabla 5-8. Tabla nº 6. Cálculo del TC de la cuenca S1 con una lluvia uniforme en la subcuenca hidrológicamente más alejada

Precipitación en la cuenca 4074_Colector Central	
Hora de inicio de la escorrentía (1)	11:55
Hora de caudal máximo (2)	13:15
Tiempo de concentración (2) - (1)	<b>80 minutos</b>

## 5.4. ANÁLISIS DE LOS FLUJOS DE AGUA RESIDUAL EN TIEMPO SECO

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de las cuencas de estudio en tiempo seco se analizan a continuación sus hidrogramas y sus patrones de turbidez a lo largo de los días ausentes de lluvia.

### 5.4.1. Análisis de los hidrogramas

Para la determinación del patrón diario de caudales en tiempo seco se han empleado dos fuentes de datos. Por un lado, se ha obtenido el comportamiento del sistema en tiempo seco mediante una simulación del modelo numérico ausente de precipitación, adquiriendo mediante este proceso tanto el caudal como el nivel suministrados por el programa. Por otro lado, se han contrastado los resultados de esta simulación mediante los datos de nivel en los puntos de análisis medidos en campo. Todo este conjunto de información se presenta a continuación.

- **Cuenca S1**

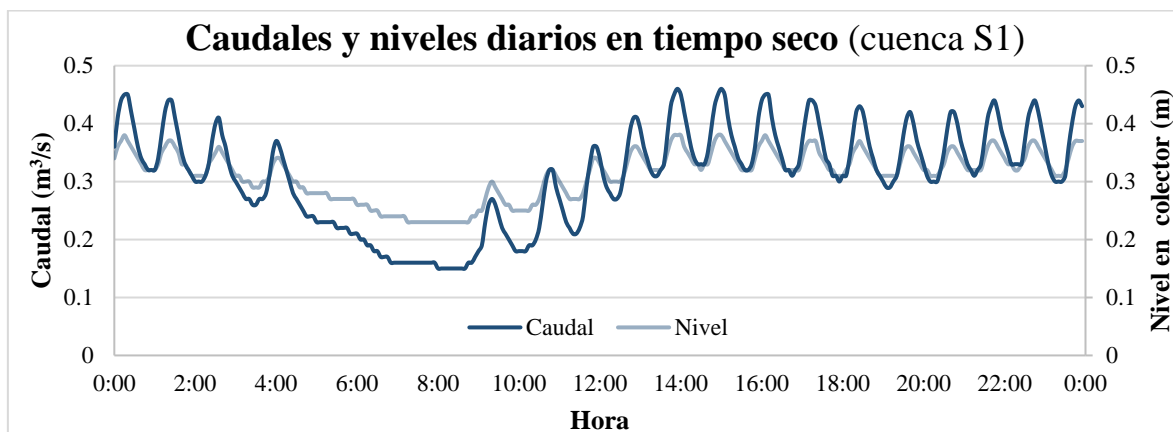


Figura 5-12. Patrón diario de caudales y niveles para el punto de análisis de la cuenca S1 medidos en SWMM



Como se puede observar en la figura 5-12, existen dos zonas claramente diferenciadas en el patrón diario de caudales. Una de ellas corresponde al valle característico que se genera en las horas de madrugada en los sistemas de saneamiento debido a la ausencia de consumo que se produce en estos instantes del día. A partir de ciertas horas de la mañana, el caudal comienza a aumentar hasta llegar a las horas centrales del día, en las que el flujo se mantiene aproximadamente constante.

La figura 5-13 muestra la comparación entre los niveles medidos en campo y los niveles resultado en la simulación con SWMM. Como se puede observar, ambos niveles coinciden prácticamente en su totalidad, por lo que se puede definir como correcto el patrón diario aportado por el modelo de la red.

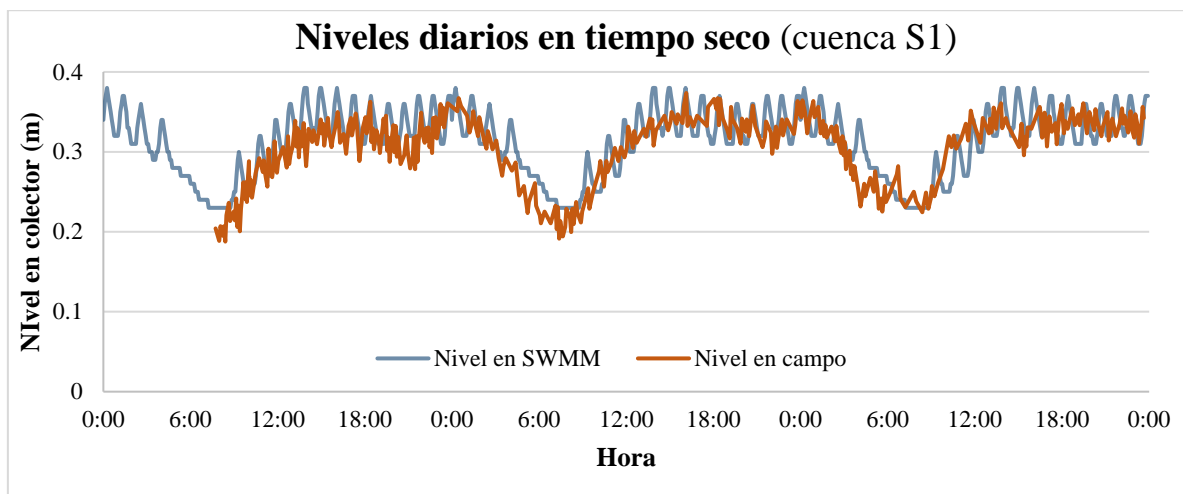


Figura 5-13. Patrón diario de niveles para el punto de análisis de la cuenca S1

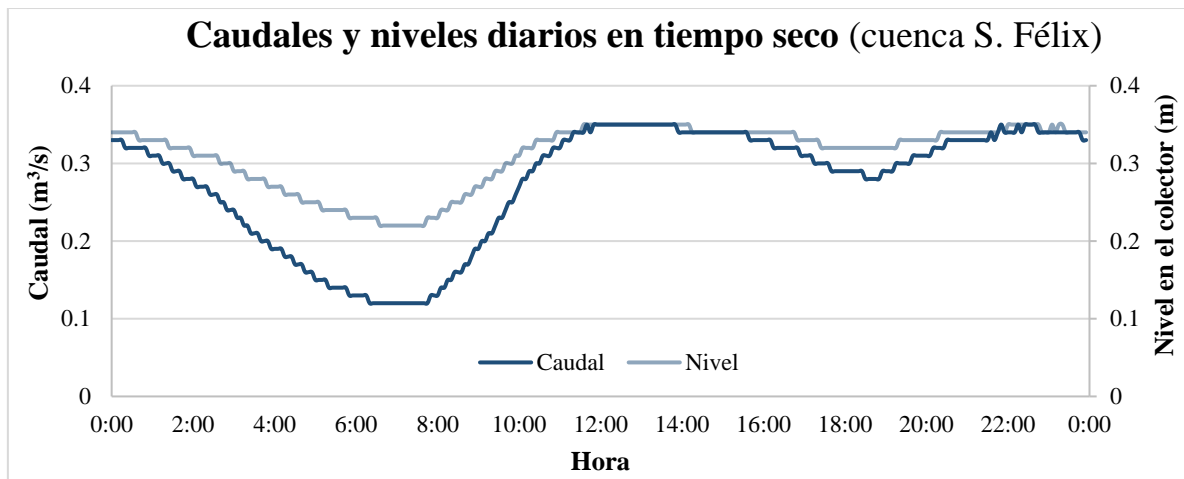
La siguiente tabla muestra los valores característicos y coeficientes que permiten definir el patrón de caudal en tiempo seco establecido.

Tabla 5-9. Valores y coeficientes característicos de caudales de tiempo seco para la cuenca S1

	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo	Coficiente punta	Coficiente de mínimos
Caudal diario	0.31 m <sup>3</sup> /s	0.46 m <sup>3</sup> /s	0.15 m <sup>3</sup> /s	1.48	0.48

- **Cuenca San Félix**

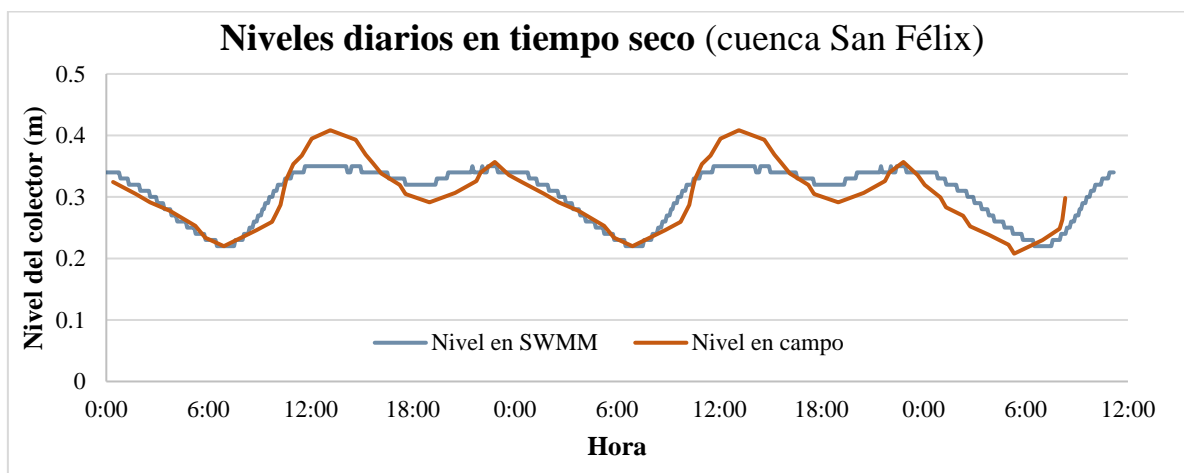
Para el estudio de esta cuenca se ha seguido la misma metodología aplicada en la cuenca S1. A continuación se presentan los resultados.



*Figura 5-14. Patrón diario de caudales y niveles para el punto de análisis de la cuenca San Félix medidos en SWMM*

Los resultados mostrados en la figura 5-14 muestran la existencia de dos puntas de caudal correspondientes prácticamente a las dos comidas del día: una punta sobre las 12 del mediodía y otra punta menos acusada sobre las 10 de la noche.

Como se puede observar, los valores pico del primer caudal punta del día y el posterior descenso caudal muestran algunas diferencias (5 cm aproximadamente) entre el dato aportado por el software y la información obtenida en campo. A pesar de esta pequeña diferencia, se ha optado por seguir la metodología de la cuenca anterior y aceptar el patrón diario aportado por el modelo como correcto.



*Figura 5-15. Patrón diario de niveles para el punto de análisis de la cuenca San Félix*

La siguiente tabla muestra a los valores característicos y coeficientes que permiten definir el patrón de caudal en tiempo seco establecido.



**Tabla 5-10. Valores y coeficientes característicos de caudales de tiempo seco para la cuenca San Félix**

	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo	Coeficiente punta	Coeficiente de mínimos
Caudal diario	0.27 m <sup>3</sup> /s	0.35 m <sup>3</sup> /s	0.12 m <sup>3</sup> /s	1.27	0.44

### 5.4.2. Análisis de la turbidez

Dada la naturaleza de este parámetro y la técnica empleada para su registro en continuo, puede producirse el ensuciamiento del dispositivo de medida debido a la deposición de impurezas sólidas. Por lo tanto, existen ciertos periodos en los que la turbidez en ambos puntos de muestreo presenta valores anómalos. Por este motivo y con el objetivo de obtener la curva característica diaria, se han seleccionado para ambas cuencas una serie de semanas completas dentro del periodo del que se tienen datos (años 2014, 2015 y 2016) en las que la turbidez muestra valores correctos.

**Tabla 5-11. Semanas escogidas para el cálculo del patrón diario de turbidez**

Cuenca	Año	Mes	Nº de Semana dentro del mes
S1	2014	Mayo	1 y 2
		Junio	1 y 2
		Julio	4
		Agosto	2,3 y 4
		Septiembre	1
		Noviembre	3
	2015	Diciembre	5
		Mayo	1,2 y 4
		Junio	1 y 5
		Septiembre	2
		Octubre	1,2 y 4
		Noviembre	2
		Total	21 semanas

Cuenca	Año	Mes	Nº de Semana dentro del mes
San Félix	2014	Junio	2 y 3
		Julio	1 y 2
		Enero	2
	2015	Junio	4
		Julio	4
		Septiembre	2
		Total	8 semanas

Una vez definida la serie de datos a analizar, se procede al cálculo de los patrones semanales y diarios de este parámetro.

- **Cuenca S1**

La siguiente figura muestra la curva característica semanal de la turbidez obtenida al realizar la media ponderada de todas las semanas incluidas en la tabla 5-11 para la cuenca S1.

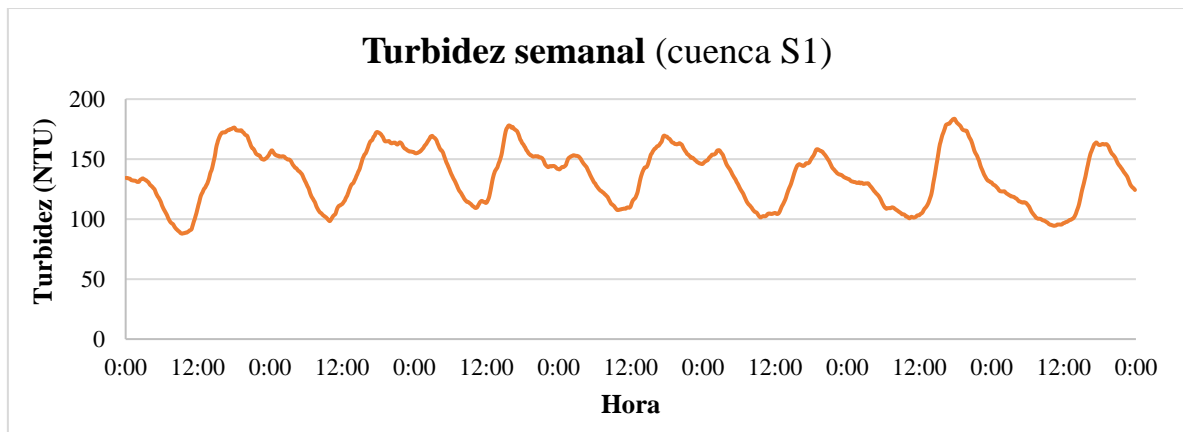


Figura 5-16. Patrón semanal de turbidez para la cuenca S1

Para estudiar con mayor profundidad las posibles diferencias entre días, en la figura 5-17 se presenta la turbidez promediada para cada uno de los días de la semana.

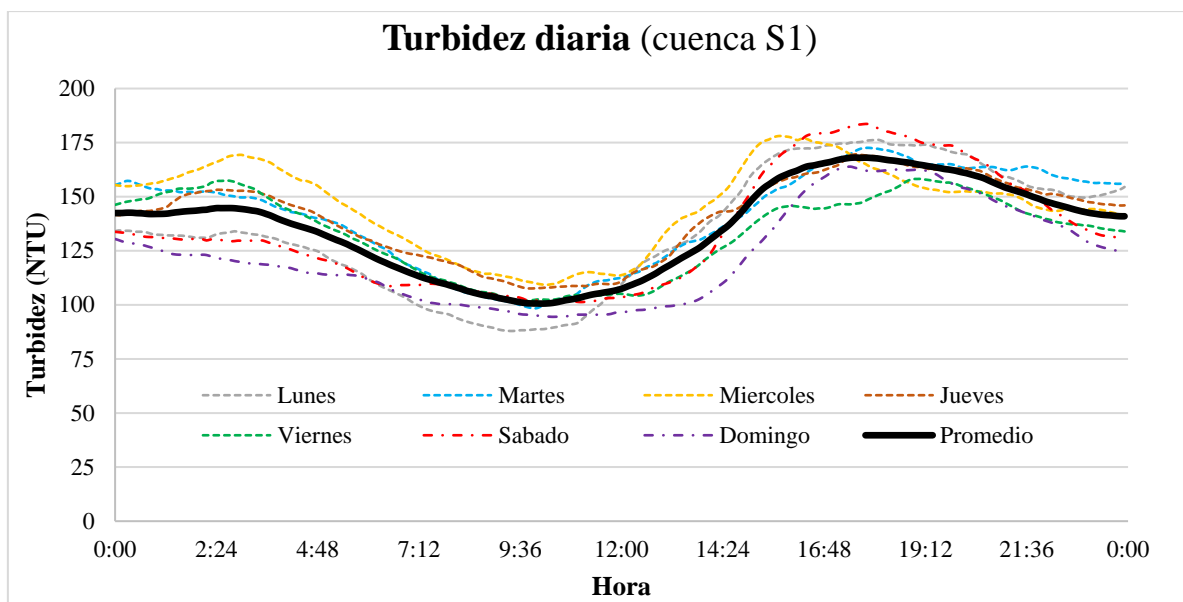


Figura 5-17. Patrón diario de turbidez para la cuenca S1

Como se puede observar, las diferencias entre el conjunto de días laborales y los fines de semana son prácticamente inapreciables. Por consiguiente, se acepta como patrón único diario de la turbidez para esta cuenca el promedio de todos los días de la semana (línea continua negra de la figura anterior).

- **Cuenca San Félix**

Para esta cuenca se ha seguido la metodología empleada en la cuenca anterior. En las siguientes figuras se muestran los resultados.

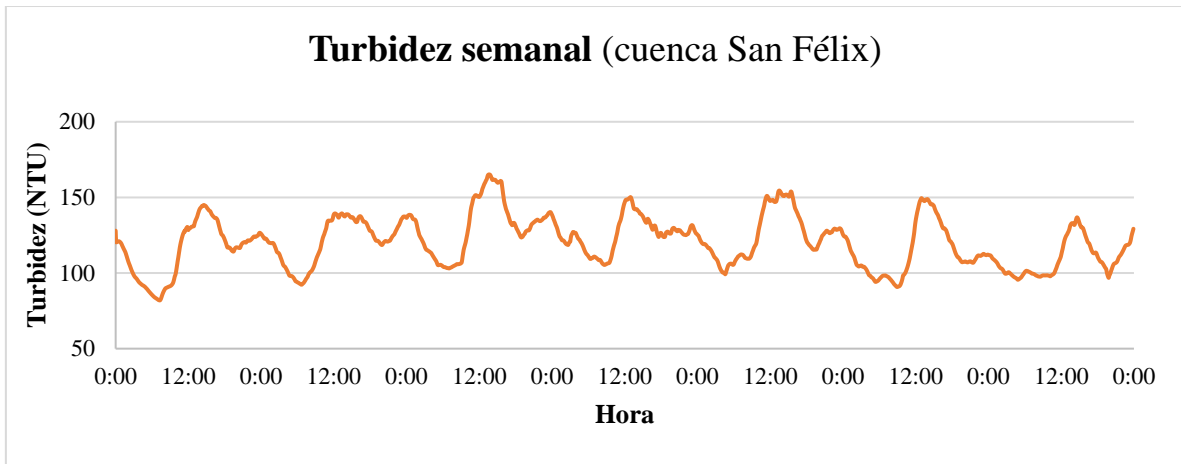


Figura 5-18. Patrón semanal de turbidez para la cuenca San Félix

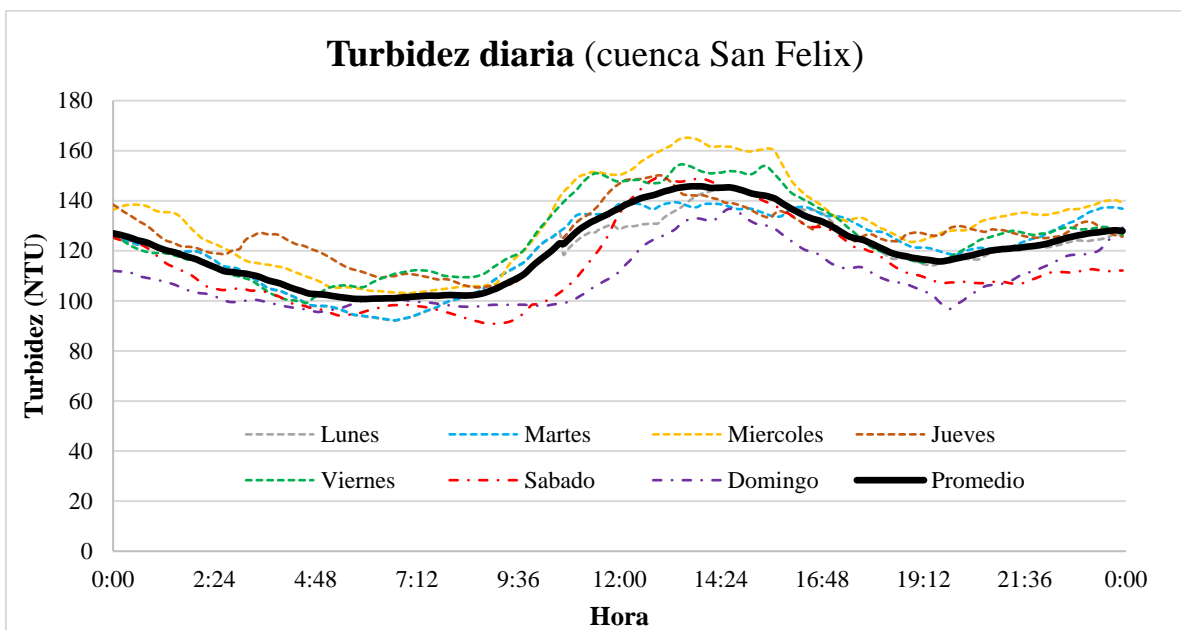


Figura 5-19. Patrón diario de turbidez para la cuenca San Félix

Al igual que en la cuenca S1, se ha escogido como único patrón diario de turbidez el promedio de todos los días de la semana, dada la escasa diferencia entre ellos.

Si se representa conjuntamente el patrón diario de caudal y de turbidez se puede observar como ambas variables muestran sus máximos aproximadamente a las mismas horas del día, tal y como muestran otras cuencas revisadas en este trabajo.

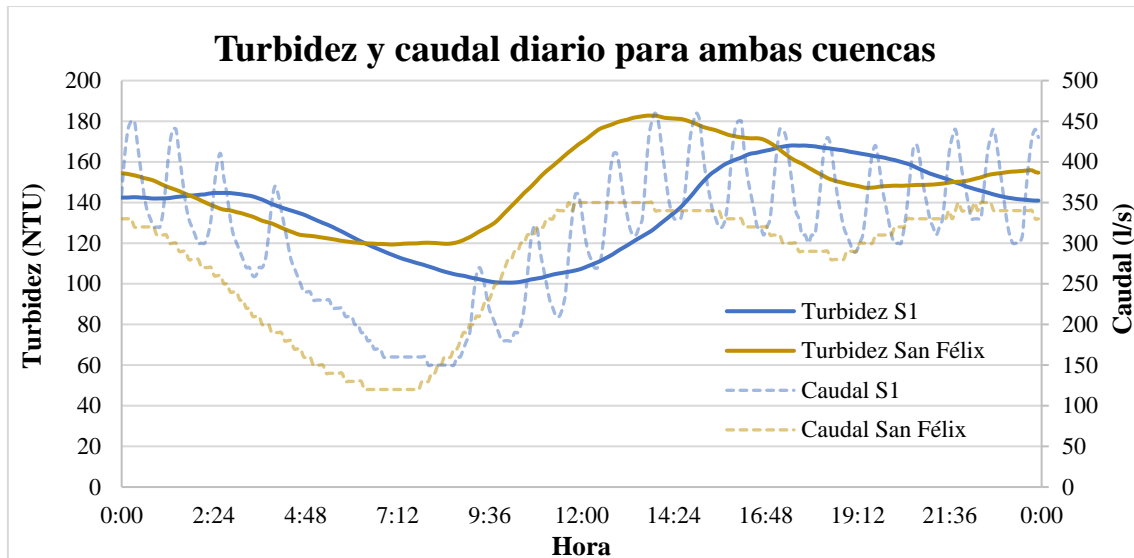


Figura 5-20. Patrón diario de turbidez y de caudal para ambas cuencas

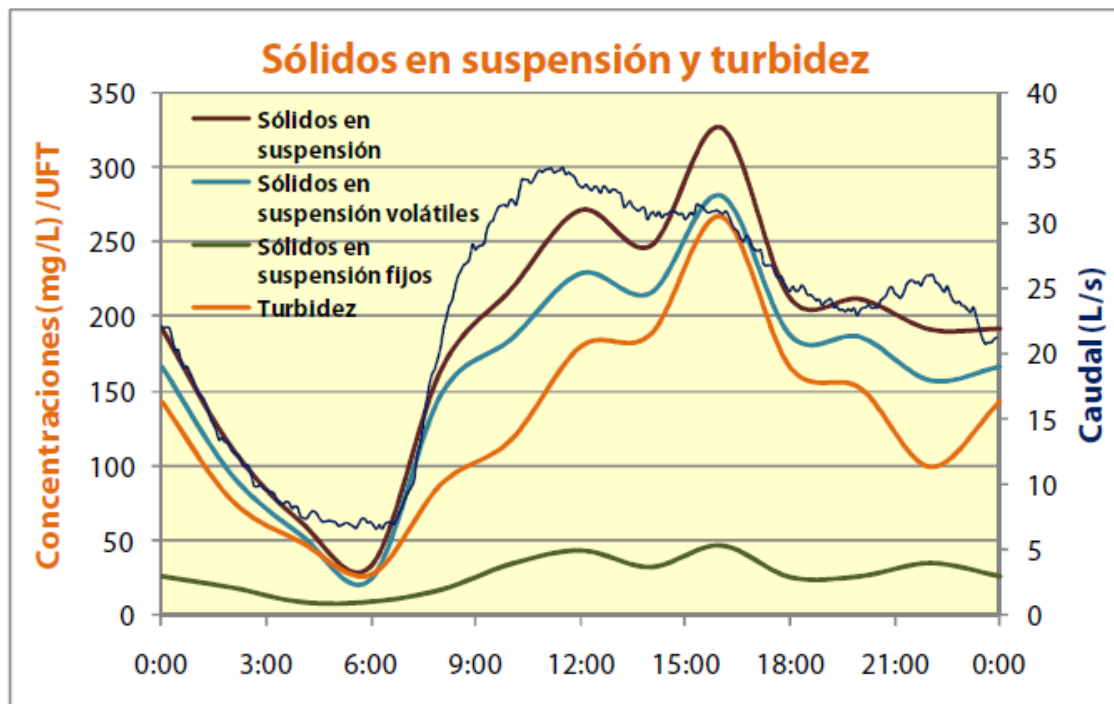


Figura 5-21. Patrones diarios de sólidos en suspensión, turbidez y caudal para la cuenca Ensanche (Del Río, 2011)

# CAPÍTULO 6: EMPLEO DE LA TURBIDEZ COMO INDICADOR DE CONTAMINACIÓN

## ÍNDICE CAPÍTULO 6

<b>6. EMPLEO DE LA TURBIDEZ COMO INDICADOR DE LA CONTAMINACIÓN .....</b>	<b>6-1</b>
6.1. TURBIDEZ EN EL AGUA RESIDUAL.....	6-1
6.2. MEDIDAS DE TURBIDEZ EN CONTINUO PARA MEJORAR LA GESTIÓN DE LOS FLUJOS DE CONTAMINANTES .....	6-3
6.3. CORRELACIONES ENTRE LA TURBIDEZ Y EL CONJUNTO DE PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN.....	6-4
6.3.1. Relación entre los sólidos en suspensión y la turbidez .....	6-4
6.3.2. Resultados de analíticas en tiempo seco para las cuencas de estudio .....	6-7
6.3.3. Correlaciones entre parámetros de contaminación en otras cuencas .....	6-7
6.3.4. Ecuaciones empleadas en este estudio .....	6-10



## 6. EMPLEO DE LA TURBIDEZ COMO INDICADOR DE LA CONTAMINACIÓN

### 6.1. TURBIDEZ EN EL AGUA RESIDUAL

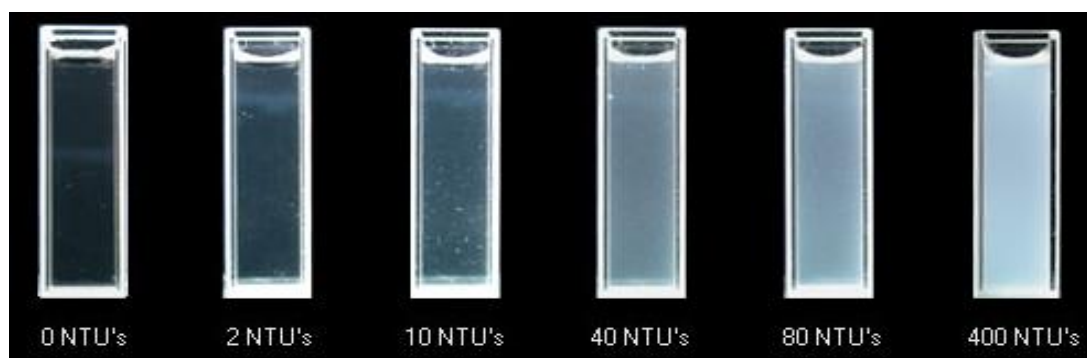
Se puede definir el concepto turbidez (o turbiedad) como una medida de la claridad relativa de un líquido. Es una característica óptica que expresa la cantidad de luz que es dispersada por el material presente en el líquido cuando esta se hace pasar a través del mismo. Por lo tanto, cuanto mayor sea la intensidad de luz dispersada, mayor será la turbidez.

Entre los materiales que hacen que la turbidez del agua aumente pueden encontrarse materia inorgánica (arcillas, limos, etc.) así como materia orgánica (algas, plancton, organismos microscópicos, materia en descomposición, etc.). Dado el origen de estos compuestos, existirá una fuerte relación entre la turbidez y los parámetros de contaminación, especialmente en el caso de los sólidos en suspensión.

Puesto que la turbidez es una propiedad óptica del agua resulta un parámetro de medición compleja, ya que las unidades de medida no tienen un valor inherente (son una medida cualitativa no cuantitativa). Como medida cualitativa, es necesario tener en cuenta el método de medición para evitar problemas de unidades y conversiones. La unidad de medida adoptada por el estándar ISO es la FTU (Unidad de turbidez de Formazina), que es idéntica al NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*, Unidad Nefelométrica de Turbidez). Los otros dos métodos usados para medir este parámetro y sus unidades de medida son la JTU (Unidad de Turbidez de Jackson) y la unidad de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). La siguiente tabla muestra la conversión entre las diversas unidades.

*Tabla 6-1. Factores de conversión entre distintas unidades de turbidez (www.reitec.es)*

Unidades	JTU	FTU/NTU	$\text{SiO}_2$ (mg/l)
JTU	1	19	2.5
FTU/NTU	0.053	1	0.13
$\text{SiO}_2$ (mg/l)	0.4	7.5	1



*Figura 6-1. Valores de turbidez de distintas muestras (www.waterontheweb.org)*

Para facilitar la interpretación de las medidas de turbidez, existen diversos métodos estandarizados de medidas entre los que se pueden destacar el Método EPA 180.1 y la norma ISO 7027, esta última con mayor calado en Europa. A continuación, se presentan los diversos métodos de medida nombrados en esta última norma:

- Medidas mediante tubo de evaluación de transparencia. Aplicable a aguas puras y ligeramente contaminadas.
- Medidas mediante disco de evaluación de transparencia. Especialmente aplicable a aguas superficiales.
- Medidas de radiación difusa. Aplicable a aguas de baja turbidez (aguas para bebida).
- Medidas de atenuación de luz incidente. Aplicable a aguas con fuerte turbidez (aguas residuales o contaminadas).

Como se ha comentado anteriormente, el método de medida lleva asociado unas unidades con distinto significado. En América del Norte, donde se impone el método EPA 180.1, es común medir la turbidez empleando instrumentos con una fuente de luz blanca (como una lámpara de tungsteno o una luz LED blanca) y un ángulo detector de 90 grados para medir la dispersión de la luz en la muestra.

En las regiones de Europa, Asia y el Pacífico es usual emplear una fuente de luz infrarroja con un ángulo detector de 90 o 180 grados para medir la dispersión o la atenuación de la luz en la muestra (el ángulo de detección elegido depende de lo turbia que esté el agua).

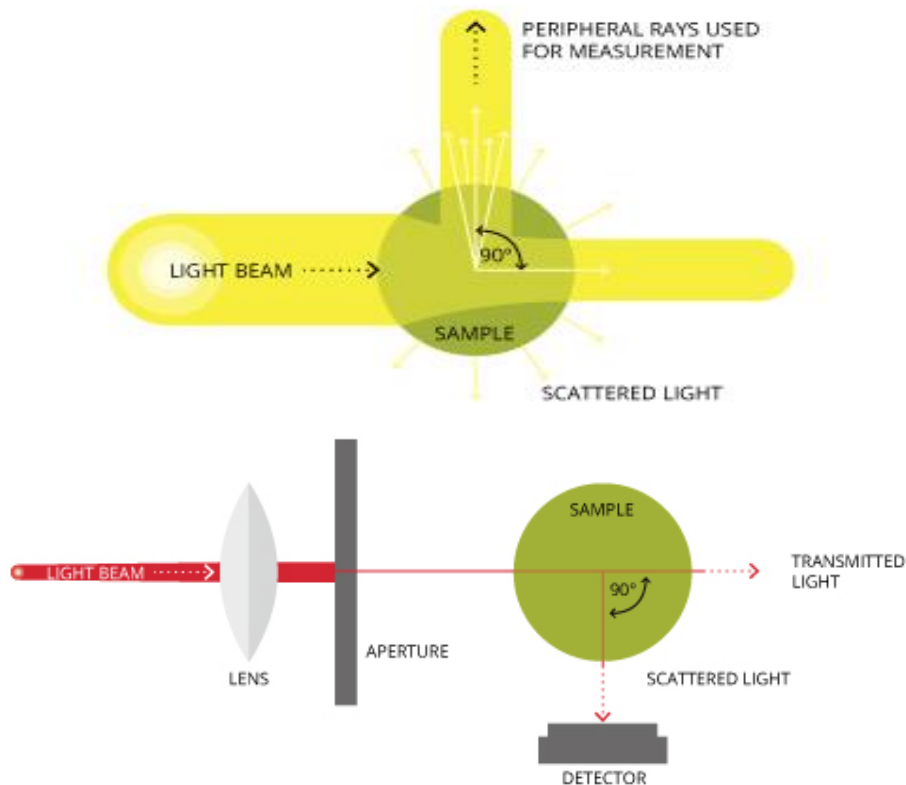


Figura 6-2. Medida de turbidez según el método EPA 180.1(arriba) y según la norma ISO 7027(abajo) (Fondriest Environmental, 2014)



El valor de la muestra de turbidez no sólo dependerá de las propiedades ópticas del agua, sino también se verá influenciada por las propiedades ópticas del medidor (longitud de onda de la fuente de luz, ancho de banda espectral, ángulo del detector, etc.). De modo que, a mayor cantidad de sustancias que causen turbidez dentro de la muestra, mayores variaciones entre lecturas de los distintos métodos. La siguiente tabla muestra las diferencias entre las siglas de las unidades de medida.

*Tabla 6-2. Diferentes siglas de unidades de medida de turbidez y su significado. (www.quimicotecnica.com)*

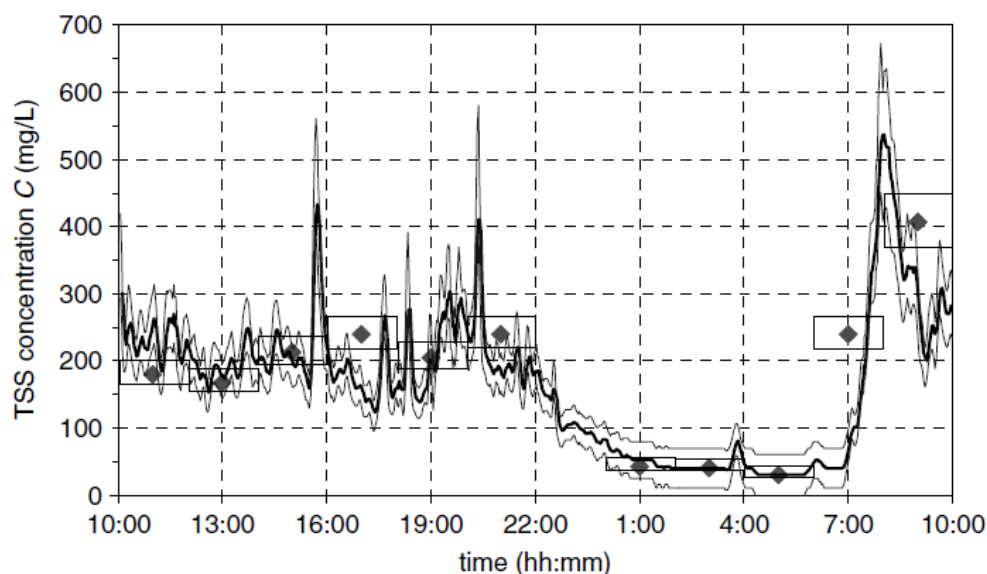
Letra	Propiedad	Unidad	Medidor Indicado
N	Dispersión nefelométrica, ángulo detector de 90°	NTU	Ángulo detector 90°, luz blanca
T	Luz Blanca	NTU	Ángulo detector 90°, luz blanca
F	Luz Infrarroja	FNU	Luz infrarroja, ángulo detector 90°
R	Detectores duales (inicialmente en 90° y después en un ángulo distinto a 90°)	FNUR	Luz infrarroja, ángulo detector 90° (al inicio), ratio-metric (2° ángulo detector diferente a 90°)
A	Atenuación (detector en 180°)	FAU	Luz infrarroja, detector 180°
B	Retrodispersión (detector en <90°)	FBU	Luz infrarroja, detector <90°

## 6.2. MEDIDAS DE TURBIDEZ EN CONTINUO PARA MEJORAR LA GESTIÓN DE LOS FLUJOS DE CONTAMINANTES

La reducción del impacto de los vertidos de los sistemas sanitarios unitarios se ha convertido en una prioridad para las entidades encargadas de estas operaciones. Por esta razón, la supervisión y control continuo de las aguas no tratadas vertidas al medio es una cuestión clave para la correcta gestión del sistema y la protección del entorno.

El control basado únicamente en el análisis de muestras puntuales es técnica y económicamente inviable si se requiere un estudio de la red extenso en espacio y tiempo. Por lo tanto, es necesario recurrir a herramientas de determinación indirecta en tiempo real de los parámetros contaminantes. Dentro de este aspecto cobra importancia la turbidez.

Son numerosos los estudios (Bersinger *et al.*, (2013); Bertrand-Krajewski *et al.*, (1998), (2004); Del Río, (2011)) que ponen de manifiesto la posibilidad de emplear mediciones en continuo de este parámetro para monitorizar la evolución de los flujos de contaminantes a través de funciones de correlación directas. Por tanto, valores en continuo de turbidez pueden ser empleados para diversos propósitos, como la estimación de las cargas de contaminantes por requisitos legislativos, la operación, planificación y rehabilitación de los sistemas de alcantarillado o la modelización en tiempo real del sistema.



*Figura 6-3. Concentración de sólidos en suspensión totales estimada a partir de la turbidez para la cuenca Ecully (Bertrand-Krajewski, 2004)*

No obstante, es necesario tener en cuenta que el empleo de la turbidez para estos fines requiere de una correcta calibración de la instrumentación, así como de un mantenimiento adecuado de los equipos. Además, es necesario un tratamiento estadístico de datos de series temporales continuas para establecer las funciones de correlación adecuadas para cada sistema, pues estas pueden ser diferentes para cada lugar de estudio.

Dada la importancia de este aspecto, son numerosos los estudios que han tratado de establecer las funciones de correlación entre parámetros medidos en continuo en la red con otros parámetros como pueden ser los sólidos en suspensión o los consumidores de oxígeno. Dentro del panorama nacional cabe destacar el proyecto PROMEDSU (Programa de Medidas de Descargas desde Sistemas Unitarios) o las labores llevadas a cabo por el grupo de Agua y Medio Ambiente de la Universidad de Coruña.

En los siguientes apartados se realizará una revisión de los trabajos llevados a cabo en distintas cuencas urbanas con el objetivo de establecer una ecuación sencilla que permita relacionar los parámetros de los que se tiene información en ambas cuencas de estudio (turbidez), con el resto de indicadores de contaminación de las aguas (sólidos en suspensión, DBO<sub>5</sub>, DQO, etc.). El propósito final es poder conocer la movilización de contaminación que se produce en un episodio lluvioso a través de variables fácilmente medibles en la red, como es el caso de la turbidez.

### **6.3. CORRELACIONES ENTRE LA TURBIDEZ Y EL CONJUNTO DE PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN**

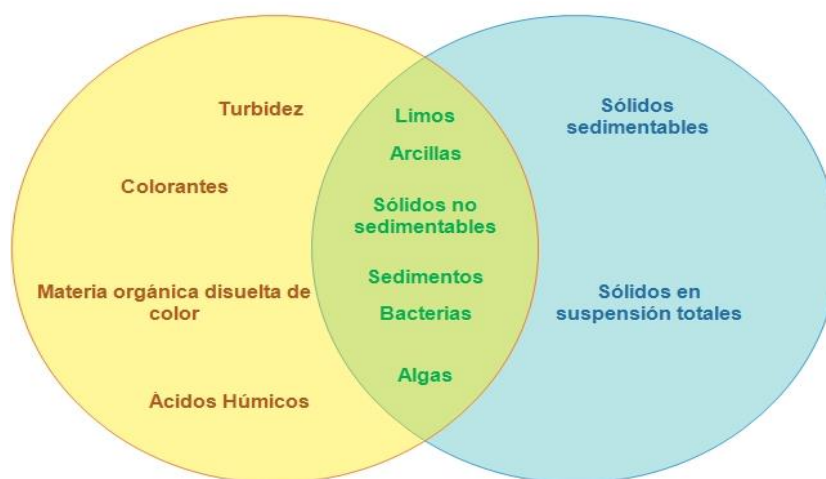
#### **6.3.1. Relación entre los sólidos en suspensión y la turbidez**

Conocidos también como no filtrables, los sólidos en suspensión son aquella fracción de la materia presente en el agua que queda retenida al hacer pasar un volumen conocido de

líquido por un filtro. Para el proceso de separación suelen emplearse filtros de fibra de vidrio (Whatman) con un tamaño nominal de paso de 1.2 micrómetros, así como filtros de policarbonato. Es conveniente resaltar que los resultados que se obtienen empleando ambos tipos de filtros pueden presentar algunas diferencias dada la diferente estructura de ambos (Metcalf & Eddy, 1995).

La turbidez y la concentración de sólidos en suspensión están, de manera directa o indirecta, relacionados con las partículas presentes en el agua. Por un lado, la turbidez se determina por la cantidad de luz dispersada o atenuada por la materia presente en el líquido. Esta medición puede verse alterada por la materia orgánica disuelta de color no incluida en las medidas de sólidos en suspensión totales, ya que esta puede causar infravaloraciones en las lecturas al absorber la luz en lugar de dispersarla.

Por otro lado, los sólidos en suspensión totales son una medida relacionada con la fracción de materia no filtrable presente en el agua. Este concepto incluye los sólidos sedimentables, que a su vez no tendrán influencia directa con la turbidez. La siguiente figura muestra de manera gráfica el área de superposición entre estos dos términos.



**Figura 6-4. Elementos involucrados en la relación turbidez-sólidos en suspensión**

Durante un episodio de lluvia, los sólidos en suspensión son el principal vector de contaminación. Así, en la cuenca *Le Marais* (presentada anteriormente en el capítulo 4), entre el 60% y el 95% de la materia orgánica, el 65% y el 99% del zinc y los hidrocarburos y entre el 90% y el 99% del cadmio, cobre y plomo están asociados a la fracción particulada de la masa movilizadada (Puertas *et al.*, 2008; Gromaire *et al.*, 2001).

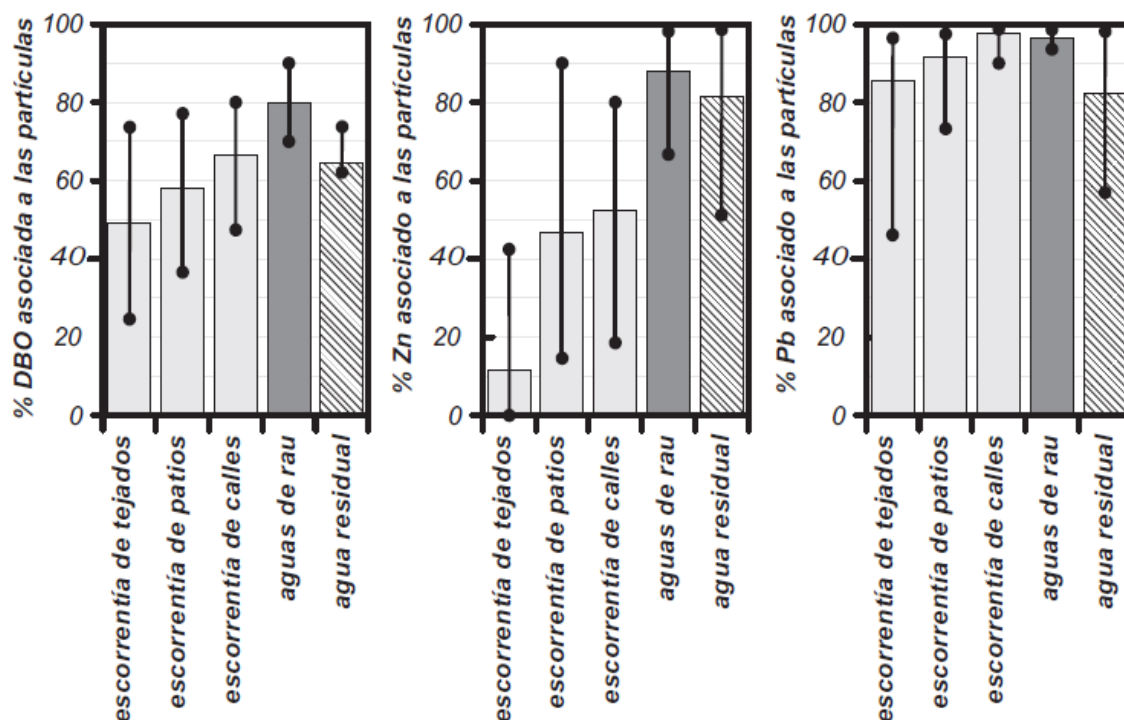


Figura 6-5. Porcentaje de DBO, Zinc y Plomo asociada a la fracción particulada en la cuenca unitaria “Le Marais”, París (Gromaire et al., 2001)

En la cuenca urbana *Ensanche* (Santiago de Compostela, España), se estudiaron las correlaciones entre los distintos parámetros contaminantes. En este trabajo se demuestra que, tanto para el caso de tiempo seco como para los episodios de lluvia, las relaciones entre la turbidez, los consumidores de oxígeno y los sólidos en suspensión presentan correlaciones altas (tabla 6-3).

Tabla 6-3. Matriz de correlación de parámetros básicos seleccionados en tiempo de lluvia (tiempo seco) (Del Río, 2011)

	DQO	DBO <sub>5</sub>	N total	P total	SS	Turbidez
DQO	1	<b>0.97</b> (0.94)	<b>0.82</b> (0.6)	<b>0.95</b> (0.74)	<b>0.95</b> (0.91)	<b>0.88</b> (0.94)
DBO <sub>5</sub>		1	<b>0.83</b> (0.52)	<b>0.96</b> (0.64)	<b>0.96</b> (0.80)	<b>0.91</b> (0.87)
N total			1	<b>0.91</b> (0.84)	<b>0.77</b> (0.69)	<b>0.68</b> (0.56)
P total				1	<b>0.93</b> (0.79)	<b>0.85</b> (0.66)
SS		Sim.			1	<b>0.95</b> (0.89)
Turbidez						1

Puede observarse como los coeficientes de correlación muestran valores más altos en tiempo de lluvia, claro ejemplo de la movilización de contaminación procedente de los sedimentos depositados en la red durante el periodo seco previo al episodio.

Como se puede ver, las relaciones entre la turbidez y los parámetros contaminantes (especialmente los sólidos en suspensión) muestran correlaciones muy altas. En base a estos resultados, para el estudio de las cuencas S1 y San Félix se emplearán los sólidos en suspensión como parámetro modelo de la movilización de contaminación pues,

además de tener una relación muy alta con la turbidez, su vínculo con los consumidores de oxígeno también es elevado.

### 6.3.2. Resultados de analíticas en tiempo seco para las cuencas de estudio

Con el objetivo de estudiar las diversas relaciones mostradas en la bibliografía entre la turbidez y los sólidos en suspensión, a continuación se presentan los resultados de dos análisis realizados en los puntos de muestreo de las cuencas S1 y San Félix.

*Tabla 6-4. Resultados de análisis en tiempo seco para los dos puntos de estudio de la red de Murcia*

Punto toma		Punto cuenca S1		Punto toma		Punto cuenca San Félix	
<b>Fecha</b>		1-6-15 10:00		<b>Fecha</b>		9-11-15 10:30	
<b>Conductividad</b>	2170.00	μs/cm a 25°C		<b>Conductividad</b>	2290.00	μs/cm a 25°C	
<b>DBO<sub>5</sub></b>	385.00	mg O <sub>2</sub> /L		<b>DBO<sub>5</sub></b>	280.00	mg O <sub>2</sub> /L	
<b>DQO</b>	620.00	mg O <sub>2</sub> /L		<b>DQO</b>	519.00	mg O <sub>2</sub> /L	
<b>pH</b>	7.37	unid. pH		<b>pH</b>	7.63	unid. pH	
<b>SS</b>	257.00	mg/L		<b>SS</b>	265.00	mg/L	
<b>Turbidez</b>	92.89	NTU		<b>Turbidez</b>	119.17	NTU	

Si se examinan los datos de la tabla anterior, puede observarse como los parámetros de contaminación se sitúan dentro de las concentraciones medias típicas de las aguas residuales urbanas en tiempo seco. A continuación, se comparan estos valores con la información sobre concentración de contaminantes mostrada en la bibliografía (tabla 4-2).

*Tabla 6-5. Comparación de las concentraciones medidas con la información mostrada en la bibliografía*

Contaminante	Concentración en S1 (mg/l)	Concentración en San Félix (mg/l)	Concentración según Metcalf & Eddy		
			Débil	Media	Fuerte
DBO <sub>5</sub>	385	280	110	220	400
DQO	620	519	250	500	1000
SS	257	265	100	220	350

En general las aguas de ambas cuencas se muestran unos valores de contaminación media-fuerte, especialmente fuerte en el caso de los consumidores de oxígeno en la cuenca S1.

### 6.3.3. Correlaciones entre parámetros de contaminación en otras cuencas

A continuación, se muestran los diversos estudios encontrados en la bibliografía en los que se presentan ecuaciones de relación entre la turbidez y los distintos parámetros contaminantes.

Para cada una de estas relaciones se presentan los resultados y se comparan con los análisis en tiempo seco de las cuencas S1 y San Félix mostrados en el apartado anterior.

### A) Cuenca Ecully (Lyon, Francia)

Estudiada en el trabajo de Bertrand-Krajewski (2004), esta cuenca urbana situada en la ciudad de Lyon presenta una extensión de 245 ha. Es principalmente de tipo residencial de media densidad, con una impermeabilidad de 42 %, un coeficiente de escurrimiento de 0.15 y una pendiente media del 2.7 %. Su sistema de alcantarillado es unitario, de modo que el punto de salida donde se llevan a cabo las medidas está constituido por un ovoide de 1.8 metros sin depósitos.

Los datos empleados en la definición de esta correlación fueron tomados durante 3 periodos de tiempo seco (28 de mayo de 2003, 4 y 18 de junio de 2003). A continuación, se presentan las relaciones obtenidas para esta cuenca en conjunto con los datos para las cuencas del municipio de Murcia.

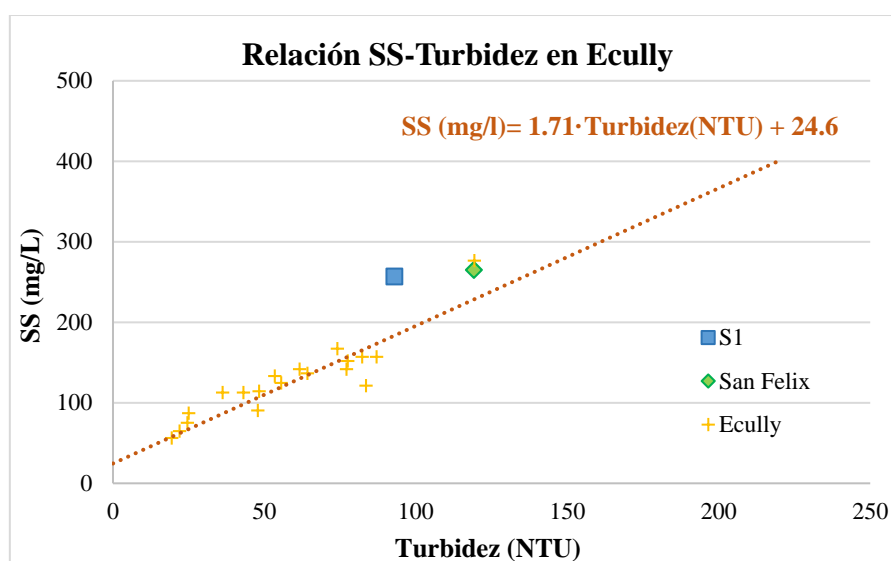


Figura 6-6. Relación SS-Turbidez para la cuenca Ecully

Como se muestra en la anterior figura, los datos de la cuenca francesa muestran en general valores inferiores de concentración y turbidez que las cuencas S1 y San Félix. A pesar de esto, la relación obtenida no se aleja de los puntos de las cuencas murcianas. El posible motivo de la baja concentración en sólidos en suspensión en la cuenca Ecully radica en la no presencia de depósitos en el punto de muestreo, lo que provoca que las medidas de sólidos en las cuencas S1 y San Félix sean superiores.

### B) Cuenca ciudad de Pau (Francia)

El sistema unitario de la zona urbana de la ciudad de Pau (Suroeste de Francia) drena alrededor de 50 Km<sup>2</sup> en los que se encuentran unos 150000 habitantes. La mayoría de la superficie se compone de barrios residenciales, aunque también están presentes varias áreas de actividades comerciales e industriales. La impermeabilidad del suelo es aproximadamente del 80 %. La red de alcantarillado es de 800 Km de largo y presenta una pendiente aproximada del 1%.

En el trabajo realizado por Bersinger *et al.* (2013), se analizaron un total de 108 muestras de agua residual con el objetivo de establecer la correlación entre turbidez, SS y DQO.

Dichas muestras fueron tomadas tanto en tiempo seco como en episodios lluviosos, por lo que la regresión se calcula para el total de análisis. Se establecieron las siguientes relaciones entre estos parámetros.

$$SS = Turbidez^{1.0124} \cdot e^{0.2894} \quad (6.1)$$

$$DQO = Turbidez^{0.917} \cdot e^{1.559}$$

Donde tanto la DQO como los SS se miden en mg/l y la turbidez en NTU.

La siguiente figura muestra la comparación del conjunto de medidas de la cuenca Pau junto con los datos de SS y DQO de las cuencas S1 y San Félix.

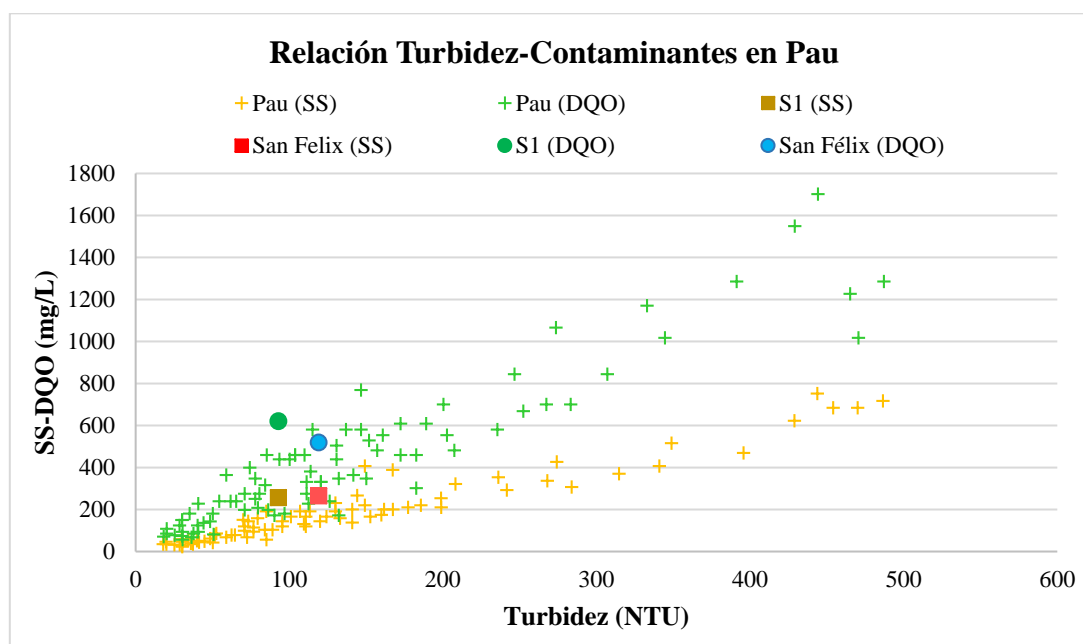


Figura 6-7. Relación SS-Contaminantes para la cuenca Pau

Como se expone en la figura anterior, tanto los sólidos en suspensión como la DQO de ambas cuencas se integran perfectamente en la nube de puntos de la cuenca de Pau. Este hecho puede ser indicativo de la validez de interpolar este tipo de expresiones a las cuencas estudiadas en la red de Murcia.

### C) Cuenca Ensanche (Santiago de Compostela, España)

Las características de esta cuenca han sido expuestas ya en el apartado 4.4.3. *Resultados de estudios de caracterización de flujos de contaminación*. Por lo tanto, se procede a continuación a presentar las principales relaciones entre los parámetros de contaminación y la turbidez calculadas en esta cuenca en tiempo seco.

$$SS = 1.1878 \cdot Turbidez + 36.419$$

$$DQO = 3.049 \cdot Turbidez + 174.86 \quad (6.2)$$

$$DBO_5 = 1.7713 \cdot Turbidez + 112.76$$

Donde tanto la DQO como la DBO<sub>5</sub> y los SS se miden en mg/l y la turbidez en NTU. Los valores del coeficiente r<sup>2</sup> obtenidos fueron 0.79, 0.89 y 0.76 para los SS, la DQO y la



DBO<sub>5</sub> respectivamente. Una vez mostradas las ecuaciones de ajuste, se presenta a continuación la integración de los datos de las cuencas S1 y San Félix a la nube de puntos de la cuenca Ensanche.

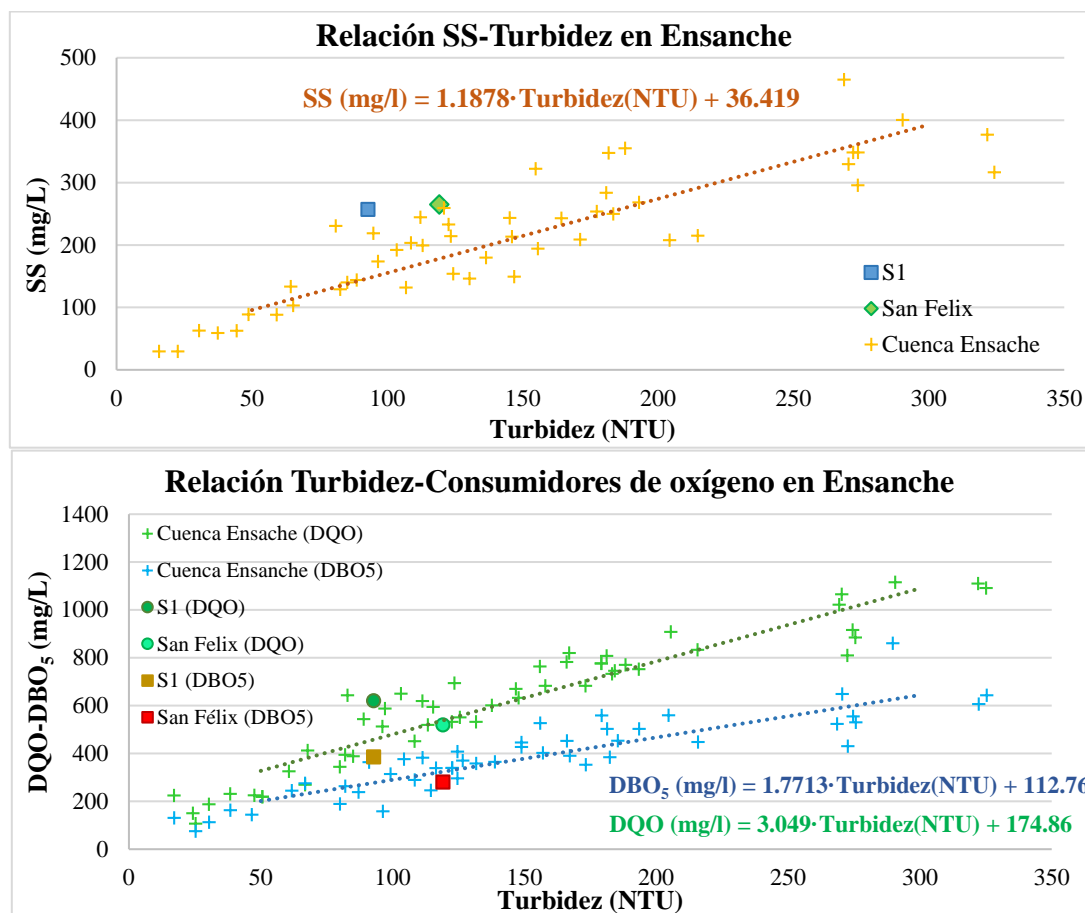


Figura 6-8. Relaciones SS-Turbidez/DQO/DBO<sub>5</sub> para la cuenca Ensanche en tiempo seco

La adición de las relaciones entre parámetros para las cuencas S1 y San Félix encaja perfectamente en el conjunto de datos de la cuenca Ensanche. En el caso de los sólidos en suspensión los valores para las cuencas murcianas se muestran levemente superiores a la recta de regresión obtenida, aunque puede considerarse que están bien integrados en el conjunto de datos de los que esta se obtiene.

### 6.3.4. Ecuaciones empleadas en este estudio

Una vez revisadas las relaciones entre la turbidez y los sólidos en suspensión encontradas en la bibliografía, es necesario definir cuáles serán las expresiones a utilizar en el cálculo de la contaminación asociada a los episodios analizados en las cuencas de estudio.

En vista de los resultados del apartado anterior, se ha optado por el empleo de las ecuaciones calculadas en la cuenca Ensanche en tiempo de lluvia. Dichas ecuaciones están presentes en la Tesis Doctoral “*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*”, realizada por Del Río (2011).



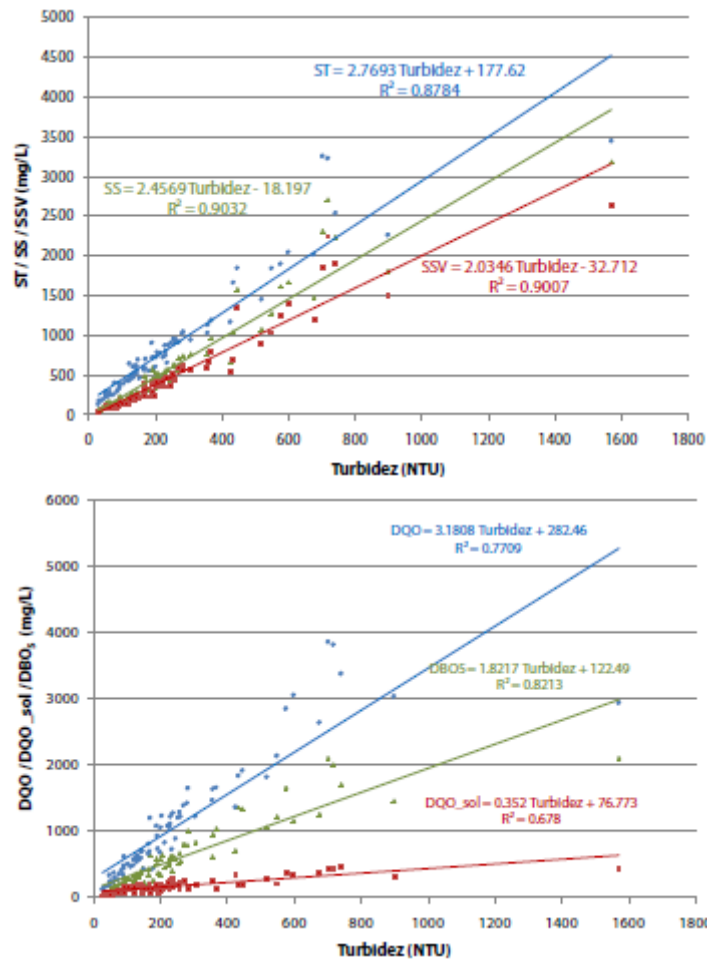


Figura 6-9. Relaciones SS-Turbidez/DQO/DBO5 para la cuenca Ensanche en tiempo de lluvia (Del Río, 2011)

Como ya se ha comentado anteriormente, el parámetro de contaminación que se analiza en el presente trabajo es la concentración de sólidos en suspensión. Por lo tanto, la ecuación a emplear en el cálculo de la movilización de masa es la siguiente:

$$SS = 2.4569 \cdot \text{Turbidez} - 18.197 \quad (6.3)$$

Donde los SS se miden en mg/l y la turbidez en NTU.

Además de por la correcta integración de los datos de las cuencas S1 Y San Félix en la nube de puntos de la cuenca Ensanche para el tiempo seco, la principal razón de la selección de esta ecuación radica en el hecho de que esté calculada en base exclusiva al tiempo húmedo. Puesto que el estudio de este proyecto se centra en el análisis de concentraciones de contaminantes en episodios de lluvia, es muy importante que las expresiones que relacionen la turbidez y los sólidos en suspensión se adapten a las condiciones específicas del tiempo lluvioso, término que no cumplan las otras dos relaciones revisadas.

Por último, es necesario tener en cuenta que las funciones de correlación no son totalmente extrapolables de unas cuencas a otras, pues estas pueden ser diferentes en función de las características de las redes, las propiedades de los sólidos presentes en la red, etc. Un aspecto importante a desarrollar en futuros trabajos es la calibración y

validación de estas expresiones para las cuencas de estudio de la ciudad de Murcia, pues la aplicación de las funciones de correlación debe de ser ajustada para cada sistema.

# CAPÍTULO 7: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE LLUVIA ESTUDIADOS

## ÍNDICE CAPÍTULO 7

<b>7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE LLUVIA ESTUDIADOS .....</b>	<b>7-1</b>
7.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	7-1
7.1.1. Resumen de episodios de lluvia analizados .....	7-1
7.1.2. Caudales y volúmenes en episodios de lluvia .....	7-1
7.1.3. Concentraciones de sólidos en suspensión en los episodios de lluvia .....	7-5
7.1.4. Análisis estadístico de la concentración de sólidos en suspensión .....	7-7
7.1.5. Comparación de CMAX y CMS con otras cuencas estudiadas .....	7-12
7.2. ANÁLISIS DEL EFECTO DE PRIMER LAVADO .....	7-18
7.2.1. El concepto de primer lavado.....	7-18
7.2.2. Curvas de distribución de la masa de contaminantes vs volumen .....	7-20
7.2.3. Análisis de las curvas M(V) para las cuencas S1 y San Félix.....	7-23
7.3. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS HIDROLÓGICO-HIDRÁULICOS Y DE CONTAMINACIÓN .....	7-26
7.3.1. Relaciones entre parámetros establecidas en otras cuencas .....	7-26
7.3.2. Correlaciones para las cuencas S1 y San Félix .....	7-29
7.3.3. Índices de predicción de contaminación .....	7-32



## 7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE LLUVIA ESTUDIADOS

### 7.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 7.1.1. Resumen de episodios de lluvia analizados

La serie de datos de turbidez a la que se ha tenido acceso comprende los años 2014, 2015 y 2016. Dentro de este periodo se han seleccionado un conjunto de episodios lluviosos para cada una de las cuencas basándose en el criterio de que la turbidez en los mismos no mostrara valores anómalos.

La siguiente tabla muestra las fechas del conjunto de sucesos lluviosos estudiados.

*Tabla 7-1. Episodios analizados para cada una de las cuencas*

Cuenca	Año	Fecha	Indicador del episodio
S1	2014	24-6	S1_1
		22-9	S1_2
		14-12	S1_3
	2015	20-5	S1_4
		11-6	S1_5
		27-9	S1_6
	2016	15-1	S1_7
		30-1	S1_8
		21-3	S1_9
		4-4	S1_10
Total		10 episodios	

Cuenca	Año	Fecha	Indicador del episodio
San Félix	2014	17-6	SF_1
		14-12	SF_2
	2015	22-3	SF_3
		11-6	SF_4
		5-9	SF_5
		27-9	SF_6
	2016	15-1	SF_7
		9-5	SF_8
		4-6	SF_9
Total		9 episodios	

Una vez establecidas las lluvias a analizar, se procede a la presentación de los resultados del análisis de los flujos de agua y contaminación.

#### 7.1.2. Caudales y volúmenes en episodios de lluvia

En las siguientes tablas se muestran los resultados de los principales parámetros hidrológicos e hidráulicos de los episodios analizados en cada una de las cuencas del municipio de Murcia.

En cuanto a la información de la lluvia, se muestran la precipitación total, la intensidad media, la intensidad máxima diezminutal y un parámetro muy importante en la movilización de contaminación, los días secos precedentes. Los datos de caudal y volumen son obtenidos mediante la simulación numérica de la lluvia con el software SWMM 5.0.

**Tabla 7-2. Resumen de precipitación, caudales y volúmenes para los episodios analizados de la cuenca S1**

<b>Precipitación</b>				
Episodio	Días secos precedentes (días)	Precipitación total (mm)	Intensidad media (mm/h)	Intensidad diezminutal máxima (mm/h)
S1_1	7	12.06	1.90	4.24
S1_2	5	3.29	0.67	2.55
S1_3	10	30.37	1.22	7.62
S1_4	24	3.03	1.35	3.86
S1_5	22	8.69	1.16	4.24
S1_6	17	8.18	2.80	5.87
S1_7	17	11.16	2.09	5.33
S1_8	15	14.19	3.70	8.25
S1_9	13	27.48	0.99	4.39
S1_10	12	13.46	0.71	7.05
<b>Caudal</b>				
Episodio	Caudal máximo (l/s)	Caudal medio (l/s)	$Q_{max}/Q_{med.tiemp.seco}$	Tiempo al pico del hidrograma (min)
S1_1	2360	1567.34	5.06	130
S1_2	1520	960.00	3.10	175.2
S1_3	2480	1617.77	5.22	110
S1_4	1560	790.00	2.55	150
S1_5	2350	1393.44	4.49	150
S1_6	2430	1580.00	5.10	109.8
S1_7	2440	1690.00	5.45	205.2
S1_8	1970	1190.00	3.84	145.2
S1_9	2150	1700.87	7.81	155
S1_10	2580	1390.00	4.48	135
<b>Volumen</b>				
Episodio	Vol. total del episodio (m <sup>3</sup> )	Correspondiente a tiempo seco (m <sup>3</sup> )	Correspondiente a escorrentía (m <sup>3</sup> )	Vol. escorrentía/ Vol. total
S1_1	74292	12975	61317	0.83
S1_2	32349	10242	22107	0.68
S1_3	184911	36918	147993	0.80
S1_4	32628	14592	18036	0.55
S1_5	75246	18495	56751	0.75
S1_6	50091	10884	39207	0.78
S1_7	65745	12891	52854	0.80
S1_8	63048	14661	48387	0.77
S1_9	210663	39162	171501	0.81
S1_10	99084	21297	77787	0.79

Tabla 7-3. Resumen de precipitación, caudales y volúmenes para los episodios analizados de la cuenca San Félix

Precipitación				
Episodio	Días secos precedentes (días)	Precipitación total (mm)	Intensidad media (mm/h)	Intensidad diezminutal máxima (mm/h)
SF_1	15	7.34	4.63	19.67
SF_2	10	30.71	1.23	8.86
SF_3	1	2.47	0.99	2.76
SF_4	22	10.13	1.40	5.32
SF_5	19	56.47	2.26	18.76
SF_6	17	7.53	2.44	5.28
SF_7	17	11.57	2.28	4.71
SF_8	18	6.80	1.01	4.84
SF_9	22	2.27	2.27	6.04
Caudal				
Episodio	Caudal máximo (l/s)	Caudal medio (l/s)	$Q_{max}/Q_{med.tiemp.seco}$	Tiempo al pico del hidrograma (min)
SF_1	2710	945.00	10.04	35.0
SF_2	2930	1396.53	10.85	60.0
SF_3	1580	746.67	5.85	105.0
SF_4	2530	1217.95	9.37	80.0
SF_5	3170	1726.96	11.74	95.0
SF_6	2590	1073.25	9.59	130.0
SF_7	2650	1173.92	9.81	205.0
SF_8	2260	989.42	8.37	180.0
SF_9	1680	680.19	6.22	90.0
Volumen				
Episodio	Vol. total del episodio (m <sup>3</sup> )	Correspondiente a tiempo seco (m <sup>3</sup> )	Correspondiente a escorrentía (m <sup>3</sup> )	Vol. escorrentía/Vol. total
SF_1	32493	10467	22026	0.68
SF_2	155853	31638	124215	0.80
SF_3	25536	11028	14508	0.57
SF_4	64308	17046	47262	0.73
SF_5	195837	30993	164844	0.84
SF_6	38637	9846	28791	0.75
SF_7	60222	15729	44493	0.74
SF_8	46305	13149	33156	0.72
SF_9	22038	10335	11703	0.53

- **Precipitación y tiempo seco**

En cuanto al periodo seco previo al episodio, el valor medio presentado es de 15 días, con un mínimo de 1 día y un máximo de 24 días. Esta variabilidad de días secos precedentes permitirá el análisis de la influencia que este factor tiene en la movilización de masa.

La precipitación total medida también juega un papel importante en el análisis de la concentración, por lo que se han escogido episodios que sean representativos de la diversidad de tormentas típica de la zona de estudio. Las lluvias analizadas muestran una precipitación total acumulada media de 14.1 mm, con un máximo de 56.5 mm y un mínimo de 2.3 mm.

Por último, la intensidad media del conjunto de episodios es de 2 mm/h aproximadamente, mostrando unos valores diezminutales máximos de 20 mm/h y mínimos de 1 mm/h.

- **Caudal y volumen**

Las características hidráulicas del suceso también tendrán importancia en la movilización de contaminantes durante el suceso.

Los caudales máximos durante la lluvia se sitúan en valores medios de 2300 l/s, con máximos cercanos a los 3200 l/s y mínimos de 1500 l/s. En cuanto al valor medio, el caudal promedio de todos los sucesos es de 1300 l/s, siendo 680 l/s el mínimo y 2420 l/s el máximo.

En cuanto a los volúmenes, se diferencia entre el correspondiente a tiempo seco y a la escorrentía, siendo más importante este último en la movilización de contaminación. Teniendo en cuenta el conjunto de episodios de ambas cuencas, el volumen total movilizado promedio es de 80500 m<sup>3</sup>, con máximo de 210663 m<sup>3</sup> y mínimo de 22038 m<sup>3</sup>.

En promedio, el porcentaje de volumen asociado a la escorrentía es del 74%, aunque se muestran valores máximos cercanos al 85% y mínimos próximos al 55%.

En la siguiente tabla se resume toda esta información asociados a los valores medios de las principales variables hidrológico-hidráulicas.

*Tabla 7-4. Resumen de precipitación, caudales y volúmenes para los episodios analizados en ambas cuencas*

<b>Parámetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>
Días secos precedentes (días)	1	15	24
Precipitación total (mm)	2.3	14.1	56.5
Intensidad media (mm/h)	0.67	1.85	4.65
Intensidad diezminutal máxima (mm/h)	1	6.62	19.67
Caudal máximo (l/s)	1520	2290	3170
Caudal medio (l/s)	680	1292	2420
Vol. total del episodio (m3)	22038	80488	21633
Correspondiente a tiempo seco (m3)	9846	18018	39162
Correspondiente a escorrentía (m3)	11703	62470	171501



### 7.1.3. Concentraciones de sólidos en suspensión en los episodios de lluvia

Las concentraciones máximas y medias, así como la masa total movilizada y el tiempo al pico del polutograma se presentan en la siguiente tabla para cada uno de los episodios analizados.

*Tabla 7-5. Resumen de parámetros de contaminación para ambas cuencas*

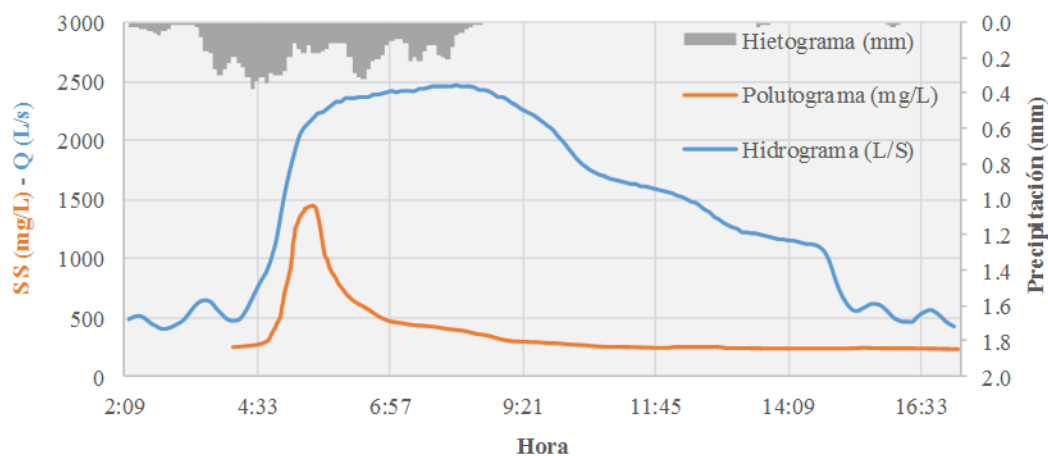
Cuenca S1				
Episodio	Concentración máxima (mg/l)	Concentración media (mg/l)	Masa movilizada (kg)	Tiempo al pico del polutograma(min)
S1_1	1425.48	409.07	30390.59	96.03
S1_2	1263.08	613.16	19835.08	107.12
S1_3	1917.84	402.03	74339.71	100.37
S1_4	2001.87	715.45	23343.64	103.06
S1_5	1867.47	538.08	40488.74	105.33
S1_6	1584.19	545.61	27330.30	90.19
S1_7	1696.72	699.49	45988.18	120.65
S1_8	1771.41	570.01	35937.85	110.65
S1_9	1367.99	343.39	72339.45	119.82
S1_10	1201.16	564.94	55976.73	104.76
Cuenca San Félix				
Episodio	Concentración máxima (mg/l)	Concentración media (mg/l)	Masa movilizada (kg)	Tiempo al pico del polutograma(min)
SF_1	1520.81	599.33	19474.06	64.81
SF_2	2072.87	668.26	104150.17	99.88
SF_3	1163.82	684.89	17489.23	111.89
SF_4	1874.35	766.15	49269.41	110.18
SF_5	2424.94	645.56	126425.09	132.82
SF_6	1860.35	737.70	28502.49	128.67
SF_7	2020.29	1062.94	64012.35	165.61
SF_8	1204.60	722.41	33451.14	156.51
SF_9	1439.24	763.24	16820.35	103.30

Si se analizan conjuntamente los valores de ambas cuencas, los sólidos en suspensión presentan en promedio una concentración media de suceso de 635 mg/l, con un mínimo de 344 mg/l y un máximo de 1063 mg/l. Las concentraciones máximas varían entre los 1164 mg/l y 2425 mg/l. En cuanto a los sólidos en suspensión movilizadas, el valor medio es de 46610 kg por episodio, siendo el mínimo 16820 kg y el máximo 126425 kg.

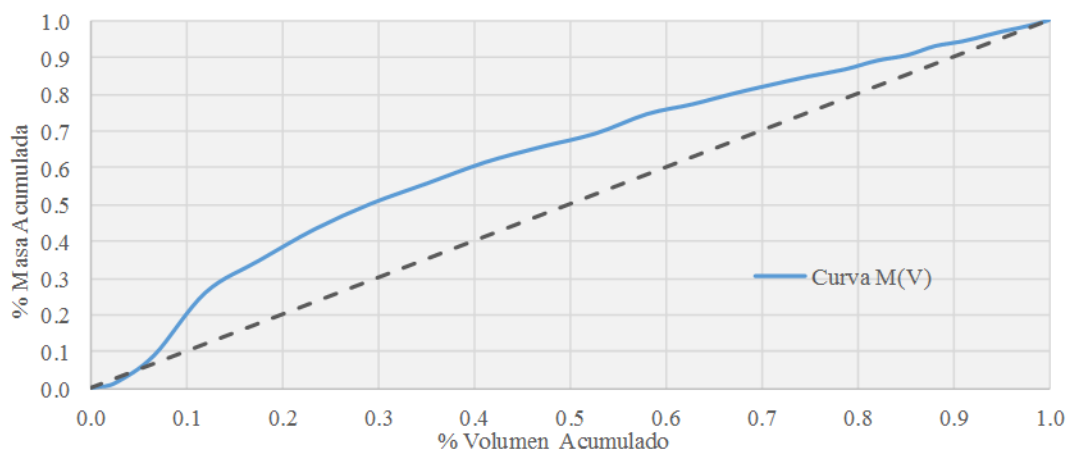
A continuación, se muestran a modo de ejemplo los hietogramas, hidrogramas y polutogramas de un episodio. En el Anejo 1 se exponen con mayor detalle.

**Episodio: S1\_1**

**Hietograma, hidrograma y polutograma**



**Curva M(V)**



Episodio	S1_1
Cuenca	S1
Fecha Inicio	24-06-14 4:00
Fecha Final	24-06-14 17:10
Duración (h)	13.17
P. seco (días)	7

Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	12.06	Vol.total (m3)	74292	SS tot.mov (kg)	30390.59
I.media (mm/h)	1.9	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	61317	CMS (mg/l)	409.07
I.10' máx (mm/h)	4.24	Q.medio (l/s)	1567.3	CMAX (mg/l)	1425.5
		Q.máx (l/s)	2360	T <sub>pp</sub> (min)	96.03
		T <sub>PH</sub> (min)	130		

Figura 7-1. Ejemplo de ficha resumen de un episodio (Anejo I)

#### 7.1.4. Análisis estadístico de la concentración de sólidos en suspensión

El análisis exploratorio de datos (*Exploratory Data Analysis*) tiene como objetivo identificar el modelo teórico más adecuado para representar la población de la cual proceden los datos muestrales. Dicho análisis se basa en gráficos y estadísticos que permiten explorar la distribución identificando características tales como:

- Valores atípicos o *outliers*.
- Saltos o discontinuidades.
- Concentraciones de valores.
- Forma de la distribución, etc.

A continuación, se presentan las técnicas más habituales:

- **Gráficos de distribución de probabilidad acumulada**

La elaboración de gráficos de probabilidad es una de las herramientas más empleadas para determinar si una distribución particular se ajusta a una serie de datos o para comparar distribuciones de diferentes muestras.

Para elaborar un gráfico de distribución de probabilidad los valores a analizar se ordenan en orden descendente y a cada uno se le asigna una probabilidad de ocurrencia. Para ello se puede emplear la siguiente fórmula (Burton *et al.*, 2002):

$$P(x_i) = (i - 0.5) / n \quad (7.1)$$

Donde  $i$  indica la posición del valor  $x_i$  en la serie de medidas ordenadas y  $n$  el número total de observaciones.

Los pares de valores  $x_i - P(x_i)$  se pueden representar en gráficas con tramas especiales denominadas tramas probabilísticas. Para saber si la distribución se ajusta correctamente se realizan las siguientes comprobaciones:

- Se verifica que los puntos graficados forman aproximadamente una línea recta.
- A cada curva se le asocia su intervalo de confianza, con un cierto nivel de significación, que se plasma en dos curvas que acompañan a la recta de regresión por ambos lados. Se considera que el ajuste es tanto más fiable cuanto más estrecho es el intervalo entre las curvas.
- La estadística de Anderson-Darling será pequeña y el valor  $p$  asociado será mayor que el nivel  $\alpha$  escogido. El valor del estadístico de Anderson-Darling mide en qué grado los datos siguen una distribución particular. Mientras mejor se ajuste la distribución a los datos, menor será el valor de este.

Usualmente, para la realización del ajuste de funciones de distribución a una serie de datos dada se emplea software estadístico. En el caso de este estudio se ha optado por el programa MINITAB (versión 17).

En cuanto al tipo de distribución, según diversos autores (Suárez *et al.*, 2005; Burton *et al.*, 2002), la distribución lognormal proporciona el mejor ajuste para los valores de

concentraciones. Por el contrario, las acumulaciones de masas se ajustan tanto a distribuciones de tipo normal como lognormal.

La distribución lognormal es, a menudo, buena opción para conjuntos de datos en los que se presentan valores atípicos. Esta distribución es frecuentemente utilizada para expresar el comportamiento de observaciones con asimetría positiva, en donde la mayoría de los valores ocurren en las proximidades de un valor mínimo.

Esta distribución se deriva de la distribución normal de la siguiente manera: Si  $X$  es una variable aleatoria normal con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ , entonces la variable aleatoria  $Y=e^X$  tiene distribución lognormal con parámetros  $\mu$  y  $\sigma^2$ .

A modo de ejemplo se presenta a continuación los resultados obtenidos para las concentraciones máximas de sólidos en suspensión en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011).

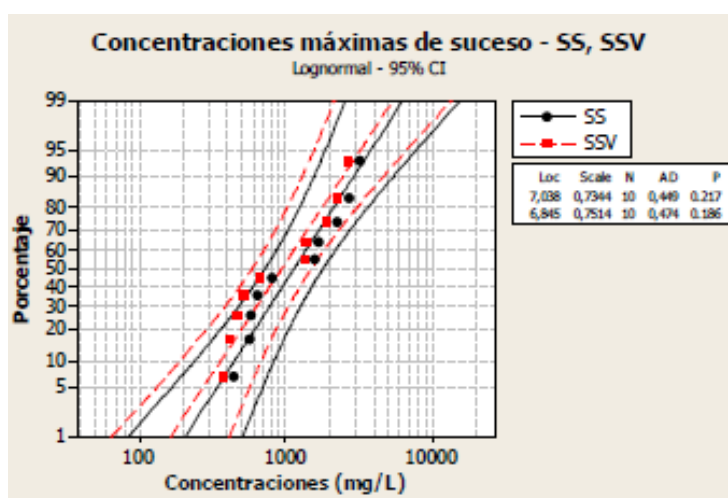


Figura 7-2. Distribución de probabilidad acumulada para las CMAX de SS y SSV en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011)

Se dispuso de 10 datos que, ordenados, permitieron establecer percentiles que dan una idea sobre la probabilidad de que un cierto valor de concentración de concentración sea superado en un episodio de lluvia. La lectura de los gráficos es, en esencia, la siguiente:

- Desde el eje de abscisas: la probabilidad de que, por ejemplo, la concentración de SS no supere el valor de 1000 es del 40%.
- Desde el eje de ordenadas: se entra con un valor de probabilidad, por ejemplo, el 90% de probabilidad de no ser superado, y se obtiene el valor correspondiente de 3000 mg/l de concentración de SS.

• **Diagramas de caja y bigotes (diagramas *box-whisker*)**

Un diagrama de caja y bigotes es un tipo de representación gráfica en la que se incluye información relacionada con la distribución de datos. Este tipo de gráficos pueden ser empleados para realizar comparaciones entre concentraciones obtenidas para diferentes parámetros de contaminación, o para comparar un mismo contaminante en distintas cuencas.

Estos diagramas incluyen la mediana, el primer y el tercer cuartil (rango intercuartil) y cualquier dato atípico que se presente en una muestra. El rango intercuartil es la diferencia entre el tercer y el primer cuartil. Puesto que el 75% de los datos son menores que el tercer cuartil y que 25% de los datos son menores que el primer cuartil, la mitad de los datos está entre el primero y el tercer cuartil. Por tanto, el rango intercuartil representa la distancia necesaria para atravesar la mitad de los datos centrales.

Se definen los datos atípicos como aquellos puntos que son inusualmente grandes o pequeños. Si  $IQR$  es el rango intercuartil, entonces con el propósito de dibujar diagramas de caja, cualquier punto que está a más de  $1.5 IQR$  por arriba del tercer cuartil, o que está a más de  $1.5 IQR$  por debajo del primer cuartil se considera un dato atípico.

Un diagrama de caja y bigotes consta de una caja cuyo lado inferior es el primer cuartil y el lado superior es el tercer cuartil. La mediana se dibuja como una línea horizontal y los datos atípicos se grafican por separado. Lo que se extiende desde la parte superior a la inferior de la caja son líneas verticales llamadas “bigotes” y terminan en los puntos más extremos que no son atípicos.

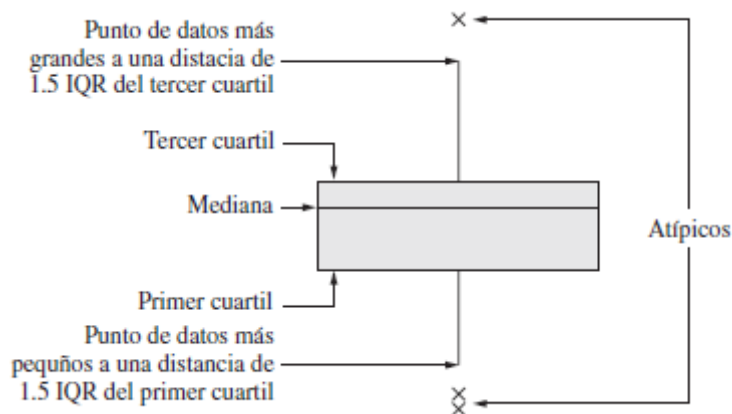
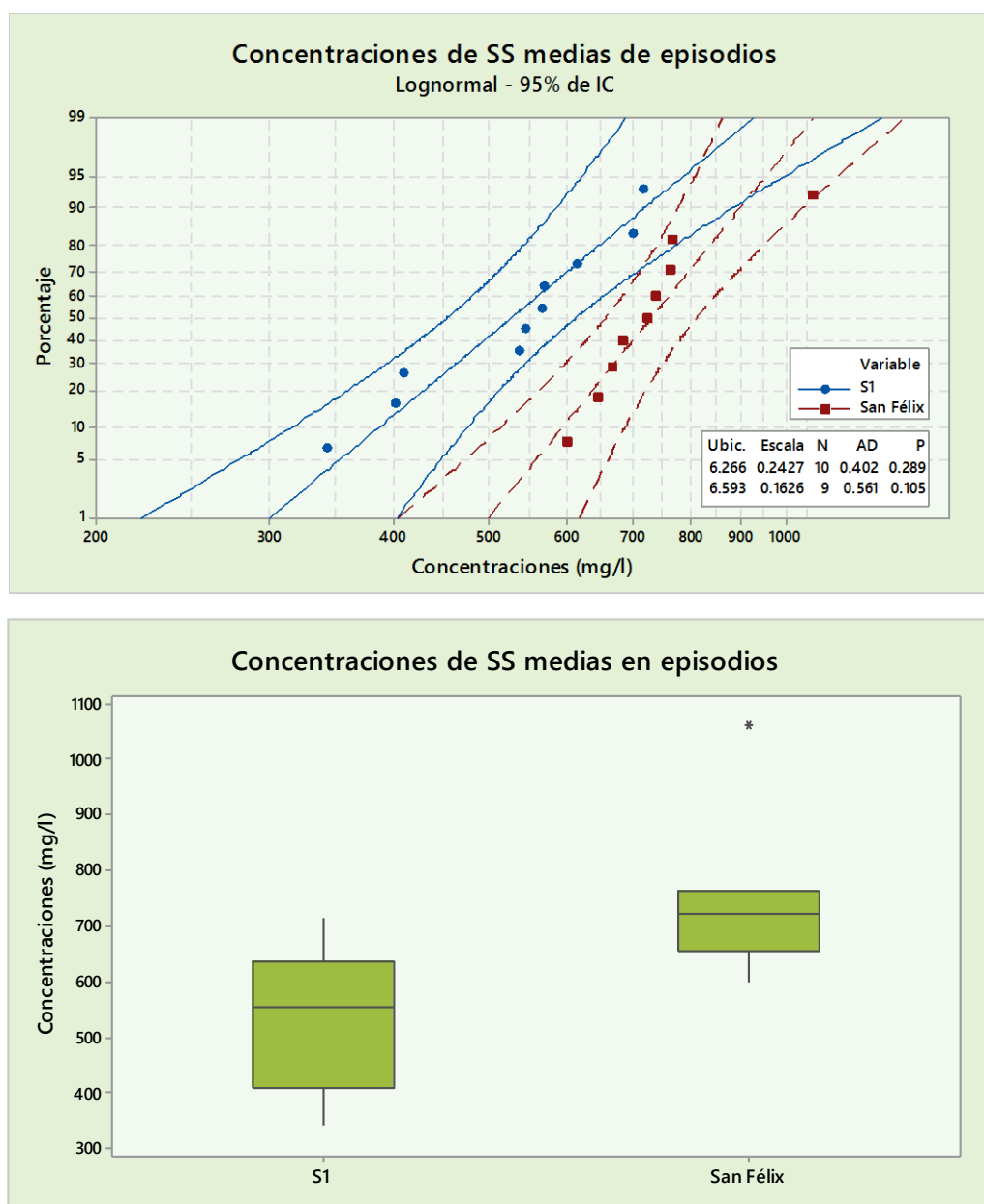


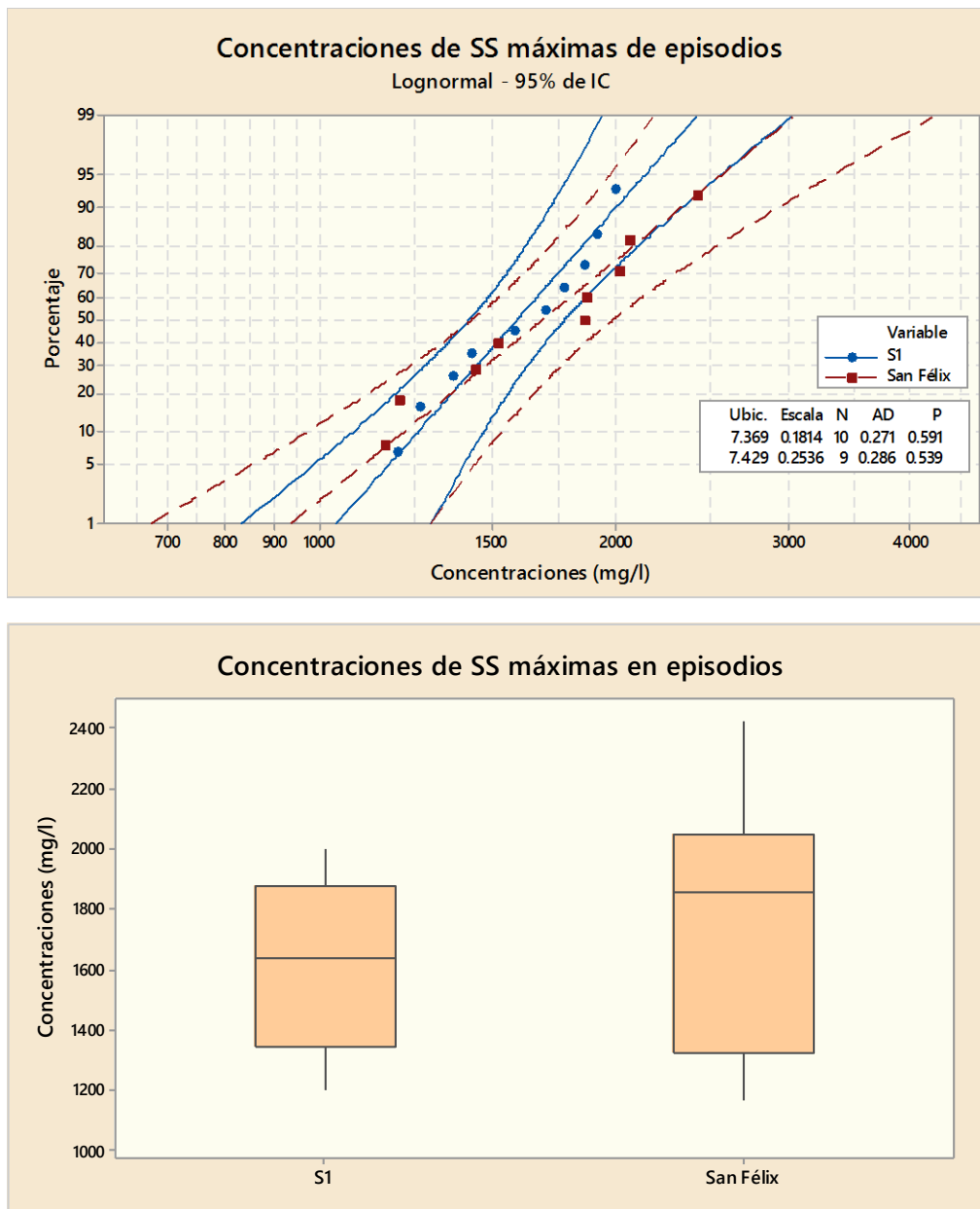
Figura 7-3. Anatomía de un diagrama de caja y bigotes (Navidi, 2006)

A continuación, se realiza el ajuste, análisis y comparación con otras cuencas estudiadas de los datos de concentración media y máximas de sólidos en suspensión en los episodios estudiados en las cuencas S1 y San Félix



**Figura 7-4. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMS de SS en ambas cuencas**

- Los valores de concentración media para los SS se sitúan en torno a los 540 mg/l en la cuenca S1 y los 740 mg/l en la cuenca San Félix. Ambas cuencas presentan un grado de concentración de agua pluvial mixta que puede calificarse de “muy fuerte” (Metcalf & Eddy, 1995).
- La cuenca San Félix presenta valores superiores de CMS a los obtenidos en la cuenca S1. Este hecho puede deberse a las características de cada una de ellas. La cuenca San Félix transporta las aguas procedentes del principal núcleo poblacional del municipio, lo que implica una mayor tasa de contaminación, superficies más impermeables y, en definitiva, mayor masa movilizada en los episodios.



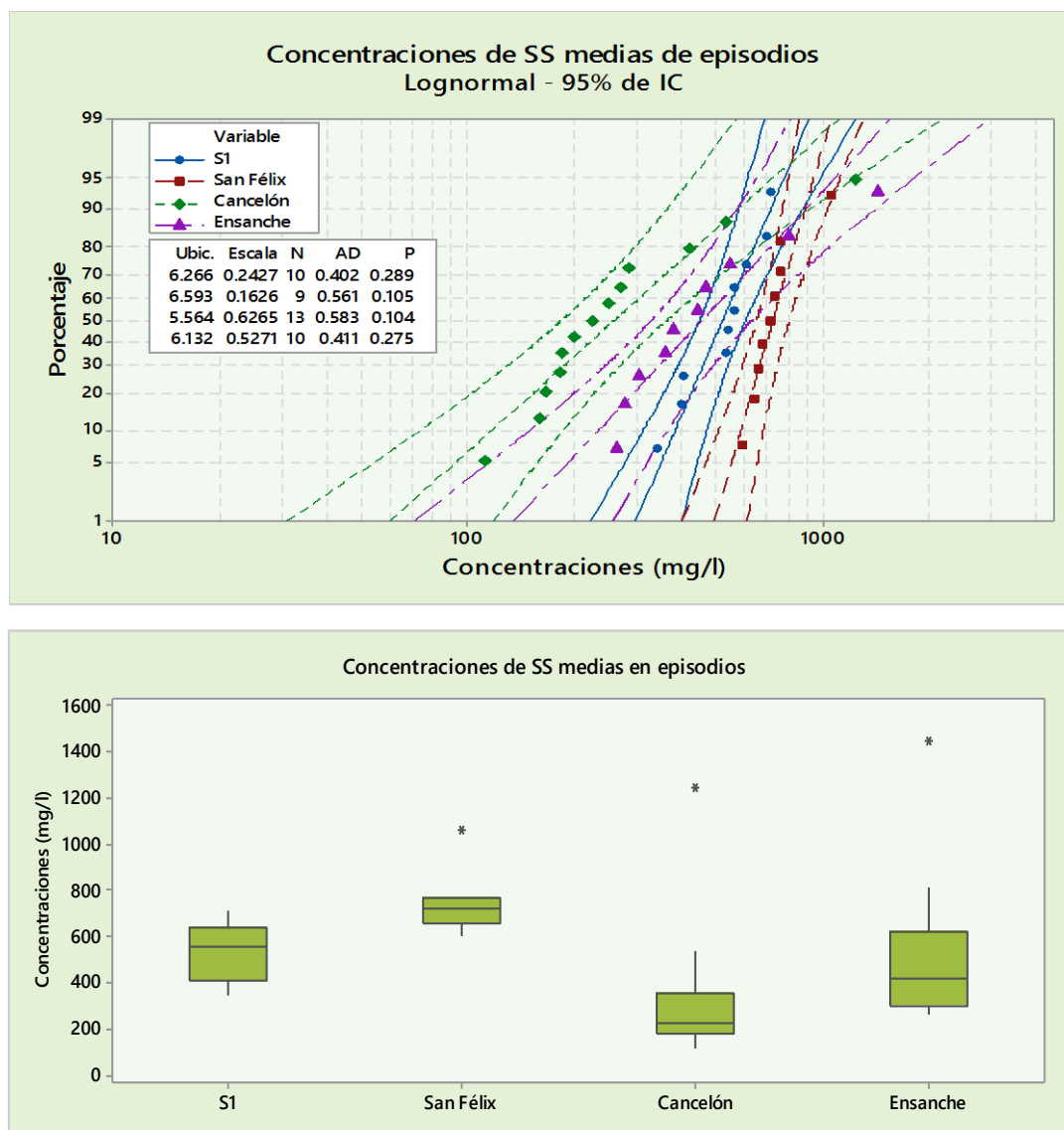
*Figura 7-5. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMAX de SS en ambas cuencas*

- Los valores de concentración máxima para los SS se sitúan en torno a los 1600 mg/l en la cuenca S1 y los 1730 mg/l en la cuenca San Félix. Estos picos de concentración suponen en promedio unos factores punta de 3 y 2.4, lo que indica la importancia de la contaminación asociada a los sólidos en suspensión en la parte inicial de los hidrogramas
- Al igual que ocurría en el caso de la concentración media del episodio, en el caso de la concentración máxima la cuenca San Félix muestra valores superiores a los de la cuenca S1, hecho que puede deberse al mismo motivo comentado en la CMS.

### 7.1.5. Comparación de CMAX y CMS con otras cuencas estudiadas

Una vez analizadas las concentraciones medias de suceso y las concentraciones máximas para cada una de la cuencas de la ciudad de Murcia se procede a su comparación con las siguientes cuencas unitarias estudiadas en España, cuyas características ya han sido expuestas en el apartado 4.4.3. *Resultados de estudios de caracterización de flujos de contaminación.*

- **Cuencas de Santiago de Compostela**



**Figura 7-6. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMS de SS en las cuencas analizadas (Murcia y Santiago de Compostela)**

- En cuanto a las concentraciones medias, tanto la cuenca San Félix como la S1 muestran generalmente valores superiores a los de las cuencas de Santiago de Compostela. En estas últimas cuencas las CMS muestran valores medios de 550 mg/l y 330 mg/l para Ensanche y Cancelón respectivamente.



- Como se puede observar en el gráfico de probabilidades acumuladas, la pendiente que forman los puntos de las cuencas murcianas es mayor que la de las cuencas de Santiago de Compostela. Esto está provocado por una menor variabilidad de las concentraciones medias de suceso, lo cual también se puede observar en los gráficos de caja y bigotes (menor amplitud de los diagramas).

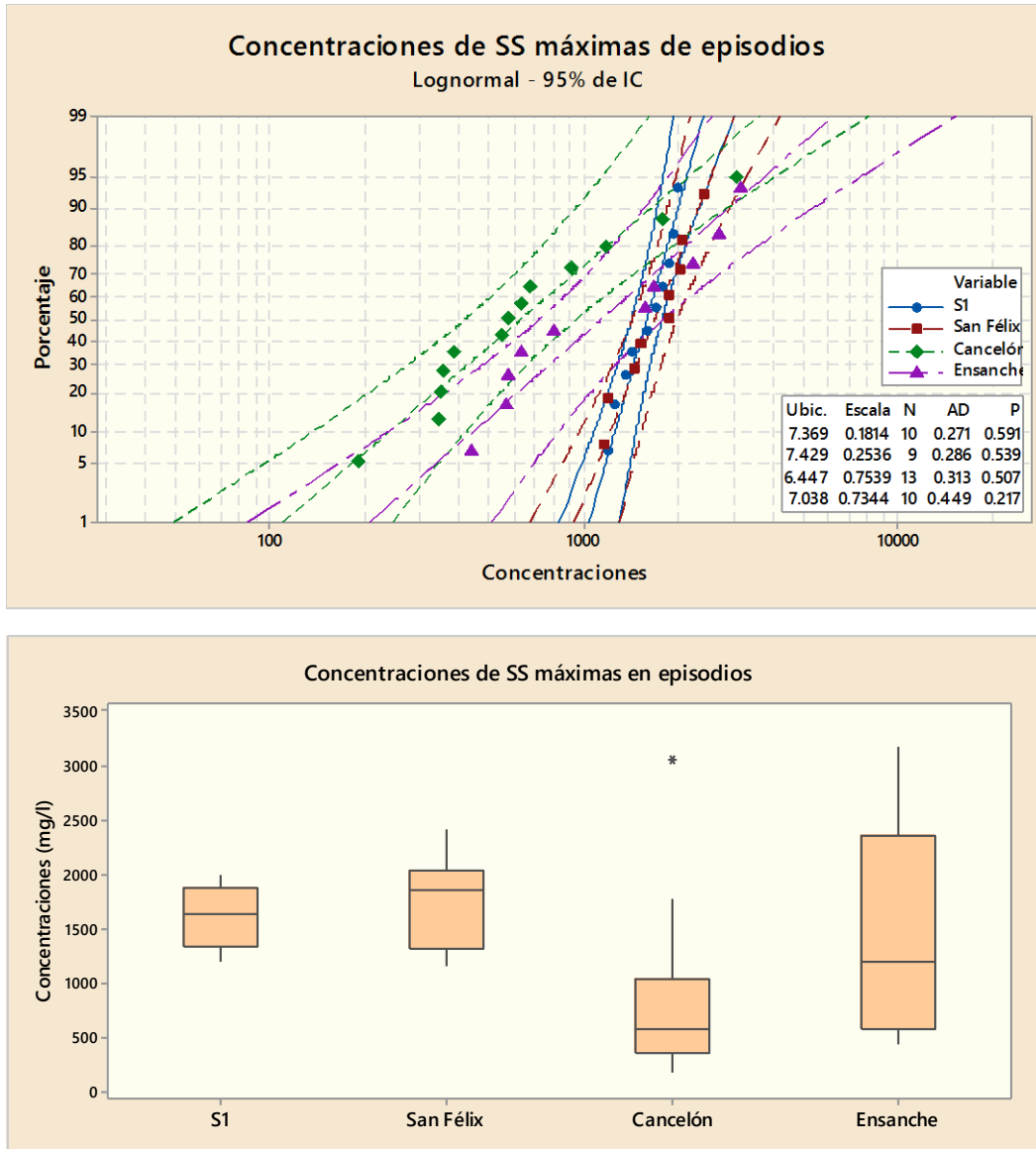
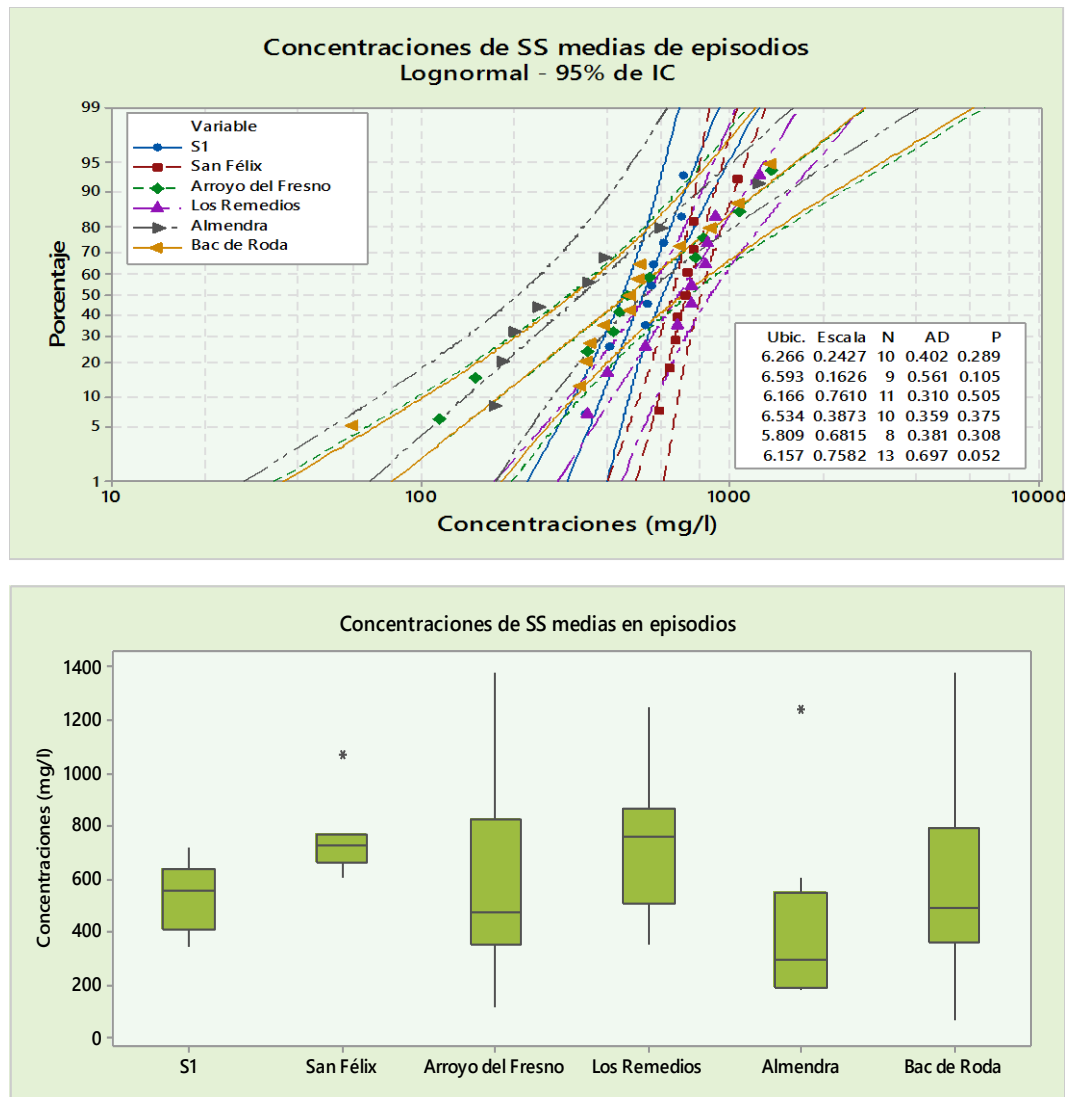


Figura 7-7. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMAX de SS en las cuencas analizadas (Murcia y Santiago de Compostela)

- En el caso de las concentraciones máximas se repiten las valoreaciones mencionadas en el caso de la CMS. Las cuencas murcianas muestran en general valores superiores de CMAX a los 1500 mg/l y 850 mg/l que muestran respectivamente las cuencas Ensanche y Cancelón. En el caso de la cuenca Ensanche, la dispersión de los datos es mayor que en el resto de unidades analizadas.

- Al igual que ocurre en el caso de las concentraciones medias de sucesos, la pendiente formada por los datos de concentración máxima en las cuencas S1 y San Félix es superior a las de los valores de las cuencas de Santiago de Compostela. El motivo es el mismo que el comentando anteriormente.

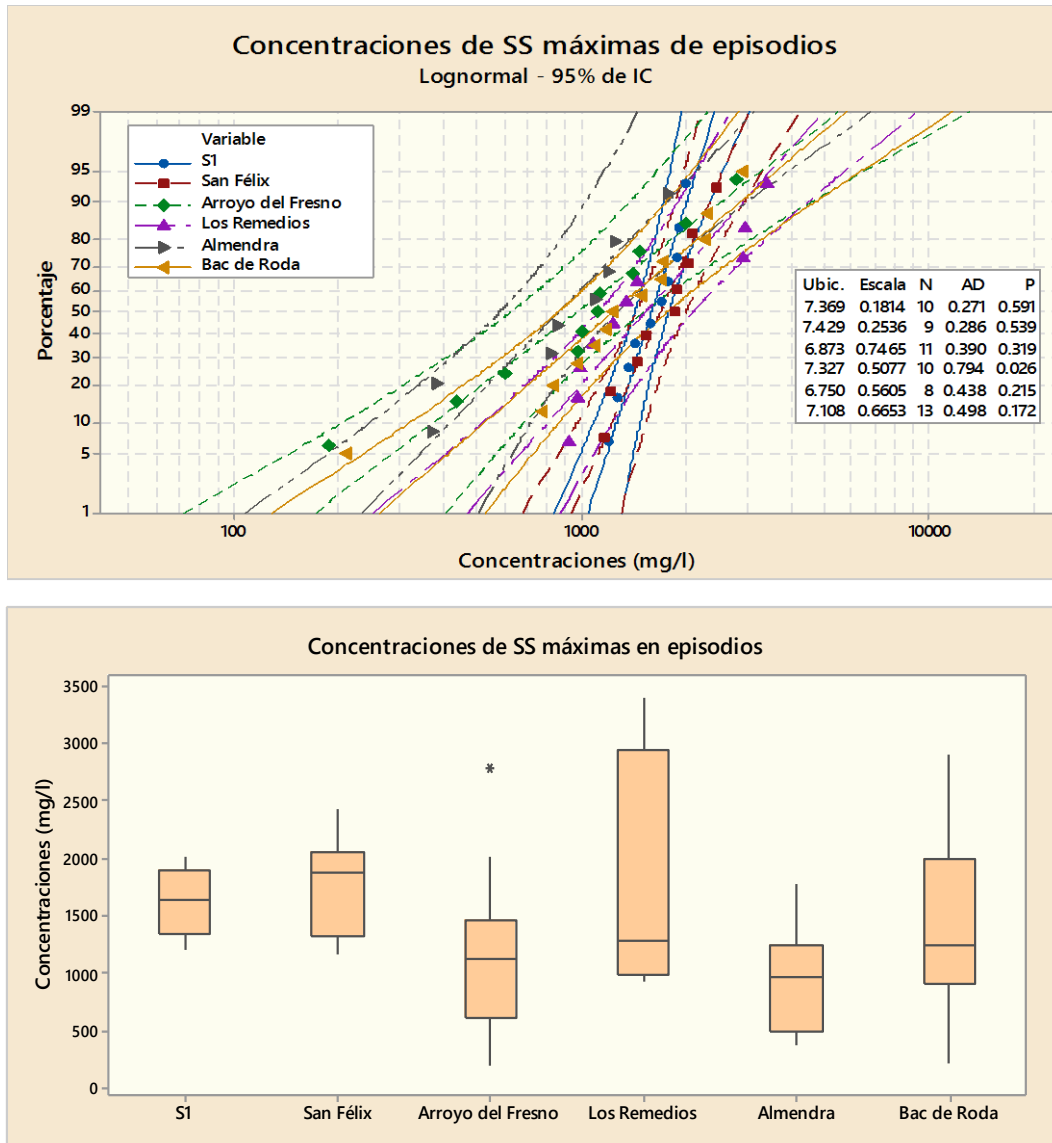
- **Cuencas de programa PROMEDSU**



*Figura 7-8. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMS de SS en las cuencas analizadas (Murcia y PROMEDSU)*

- Si comparan los valores obtenidos para las cuencas murcianas con los mostrados en las cuencas Arroyo del Fresno (superficie similar a la San Félix), los Remedios y Bac de Roda (ambas con climas similares a los de las cuencas S1 y San Félix), puede observarse que las diferencias no son muy acusadas. Para las del PROMEDSU, las CMS se establecen en 600, 730 y 580 mg/l para las cuencas Arroyo del Fresno, los Remedios y Bac de Roda respectivamente.

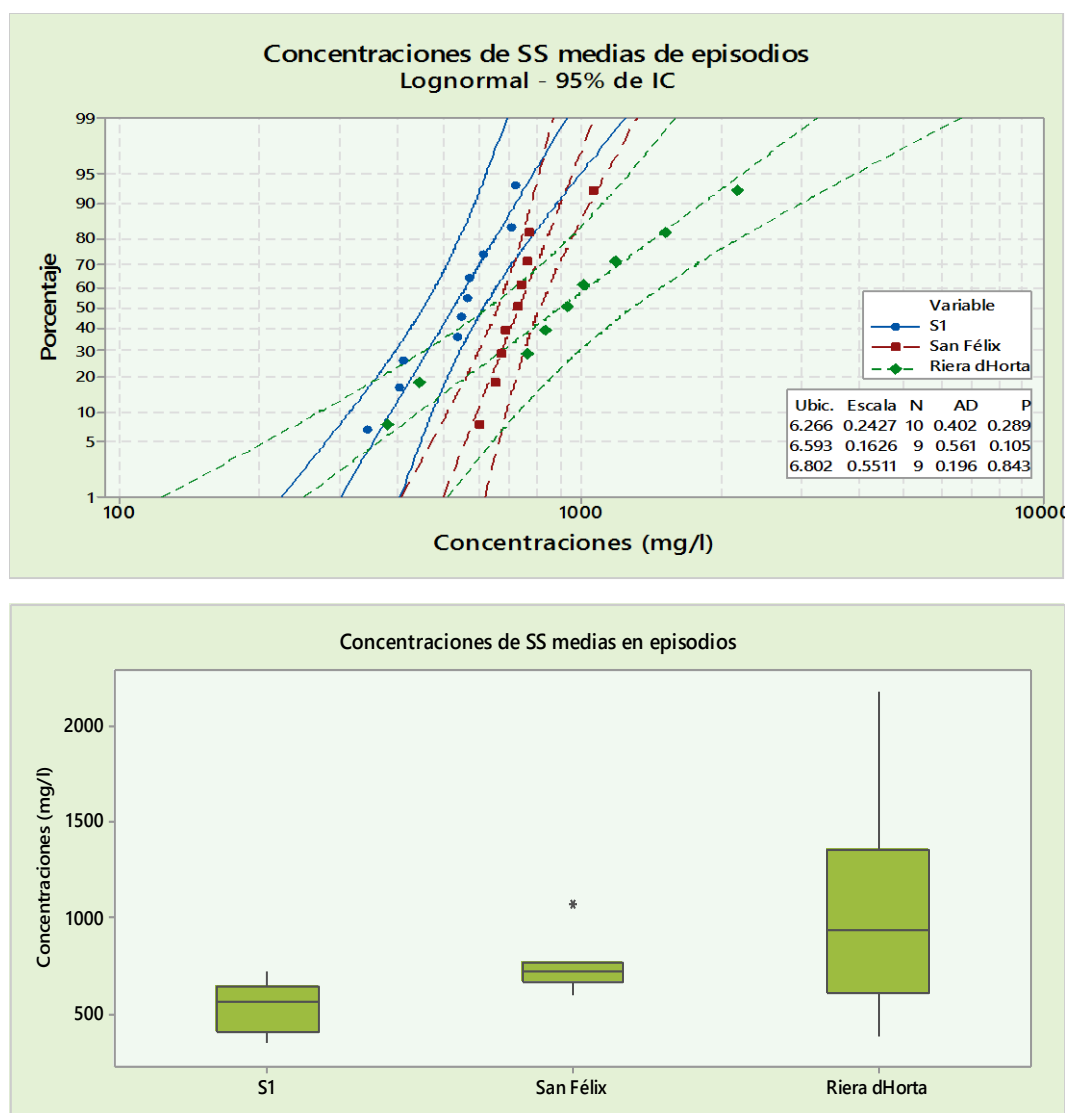
- La pendiente de los puntos de las cuencas S1 y San Félix muestra el mismo comportamiento que el comentado en el caso de la comparación con las cuencas gallegas.



**Figura 7-9. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMAX de SS en las cuencas analizadas (Murcia y PROMEDSU)**

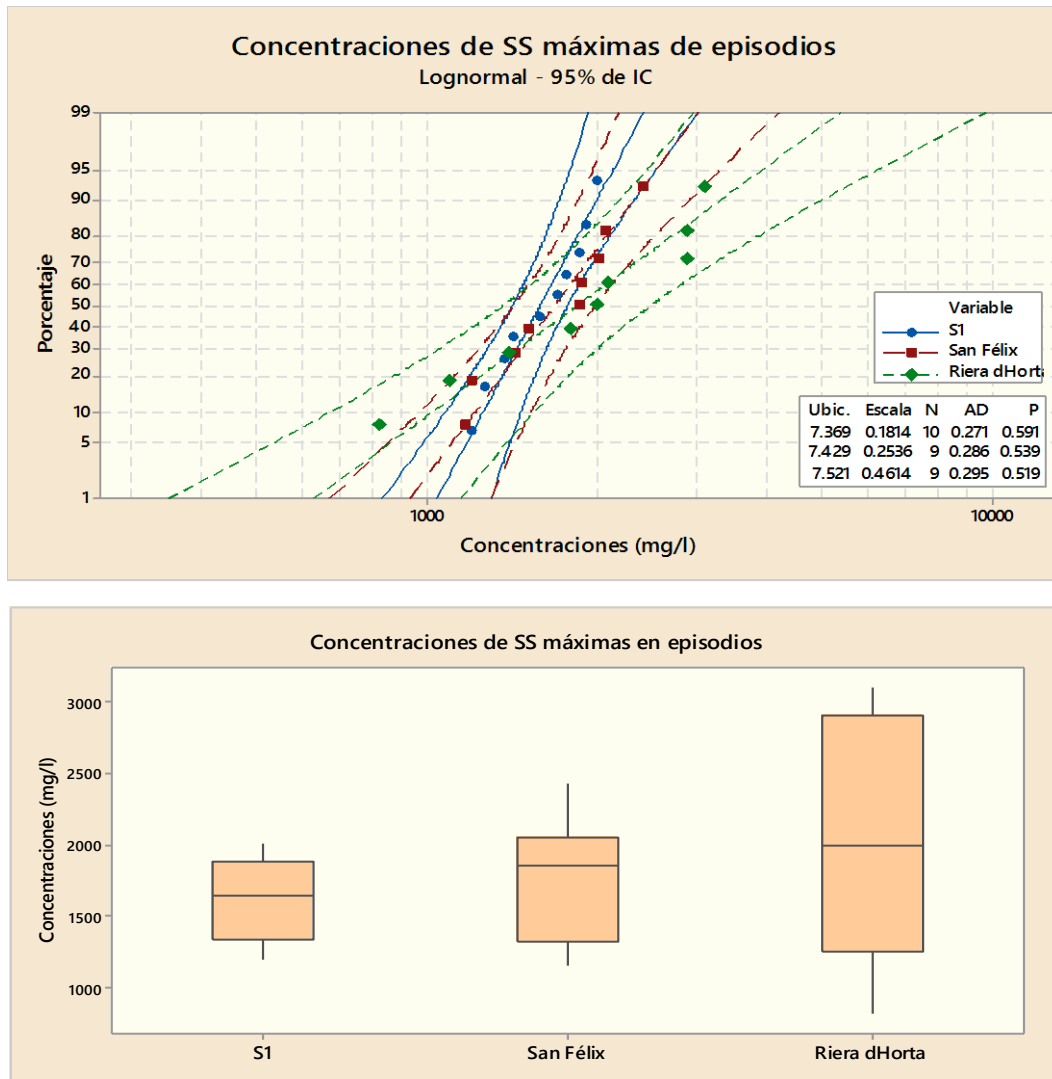
- En cuanto a las concentraciones máximas, las cuencas murcianas muestran valores dentro de los rangos delimitados por todas las cuencas del PROMEDSU. Si se analizan los valores medios se puede observar como las cuencas S1 y San Félix muestran resultados ligeramente superiores.

• Cuenca Riera d'Horta



**Figura 7-10. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMS de SS en las cuencas analizadas (Murcia y Riera d'Horta)**

- En el caso de la cuenca de la ciudad de Barcelona, los resultados de concentración tanto media como máxima de suceso se muestran por encima de las cuencas murcianas.
- En el caso de la concentración media de suceso, la cuenca Riera d'Horta muestra valores superiores (sobre los 1025 mg/l) a los 540 mg/l de la cuenca S1 y los 740 mg/l de la cuenca San Félix.
- En cuanto a las concentraciones máximas de suceso, la cuenca barcelonesa muestra también valores superiores, aunque las diferencias no son tan grandes como en el caso de la concentración media de episodio.



**Figura 7-11. Diagrama de distribución de datos y distribuciones de probabilidad acumuladas para las CMAX de SS en las cuencas analizadas (Murcia y Riera d'Horta)**

La principal conclusión que se puede extraer del análisis de ambas técnicas estadísticas aplicadas a las concentraciones de sólidos en suspensión en diversas cuencas es que el agua pluvial mixta que transcurre por los sistemas de saneamiento unitarios en tiempo de lluvia muestra un grado de contaminación superior al de un agua de concentración media típica. Como se ha puntualizado, el rango de valores de los parámetros de contaminación se ve influenciado por factores como las características de las cuencas y el tipo de clima de la zona.

En cuanto a la comparación de los resultados de las cuencas de estudio S1 y San Félix, puede concluirse que los valores están dentro del rango expuesto en otros estudios de cuencas españolas.

## 7.2. ANÁLISIS DEL EFECTO DE PRIMER LAVADO

### 7.2.1. El concepto de primer lavado

El término primer lavado (*first flush*) se ha empleado habitualmente para indicar el mayor valor de la concentración de contaminantes en el agua residual durante la primera parte de un suceso lluvioso. En base a este concepto, el efecto de primer lavado puede ser definido como un fenómeno en el que se elimina una mayor proporción de cargas contaminantes debido al lavado producido por la escorrentía durante el comienzo de un evento de lluvia.

El concepto de primer lavado fue planteado a principios de la década de los 70 y, hoy en día, sigue siendo objeto de debate para numerosos investigadores. Thornton y Saul (1987) definieron este fenómeno como el periodo inicial de la escorrentía de la tormenta durante el cual la concentración de contaminantes es significativamente mayor que la observada en la mayor parte de la duración de la tormenta. Otro enfoque para definir este efecto se basa en la relación entre el porcentaje de masa acumulada normalizada y el volumen acumulado normalizado, representación conocida como curvas M(V). Según Geiger (1987), el primer lavado ocurre cuando esta curva tiene una pendiente inicial mayor que 45 grados. Relacionada también con esta gráfica es la definición aportada por Bertrand-Krajewski *et al.* (1998), que explica el primer lavado como aquel fenómeno que ocurre cuando al menos el 80% de la masa de contaminantes se descarga en el primer 30% del volumen de escorrentía.

Por otra parte, Qin *et al.* (2016) divide el lavado de contaminante en tres tipos: primer lavado, lavado intermedio y lavado final. Estos se diferencian por el momento en los que se aporta la mayor proporción de carga contaminante y se pueden identificar visualmente mediante la comparación de los tiempos al pico del polutograma y del hidrograma. Los tres tipos de lavado se presentan en la siguiente figura.

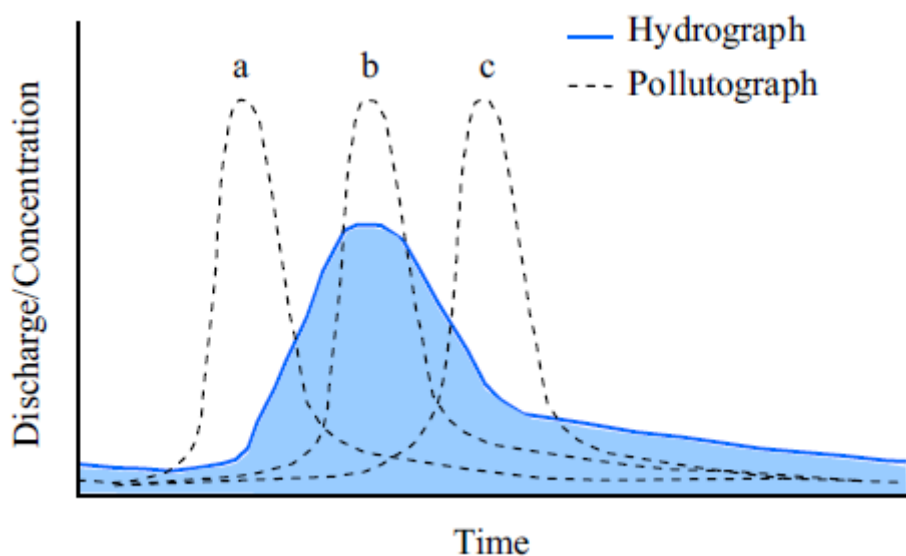


Figura 7-12. Hidrograma y polutograma para diferentes tipos de lavado (Qin *et al.*, 2016)

Según el análisis conjunto del hidrograma y del polutograma, el fenómeno de primer lavado se produce cuando el pico de concentración de contaminantes aparece antes del pico de caudal durante un evento de precipitación (curva a). El lavado intermedio tiene lugar cuando los máximos de contaminación y caudal ocurren simultáneamente (curva b), mientras que el lavado final se presenta cuando el pico de concentración aparece después del de escorrentía (curva c).

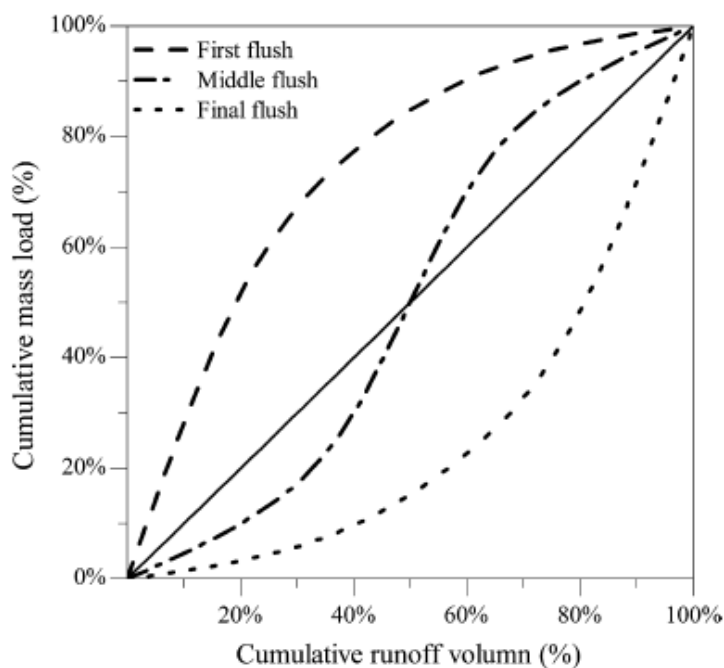


Figura 7-13. Curvas acumulativas normalizadas para diferentes tipos de lavado (Qin et al., 2016)

En cuanto a los factores que influyen en este fenómeno, Gupta *et al.* (1996) destacan:

- Hora del día.
- Condiciones de tiempo seco.
- Duración del periodo de tiempo seco previo.
- Magnitud y características del contaminante en tiempo seco.
- Tipo de lluvia.
- Características de la red de alcantarillado.
- Forma y área de la cuenca drenante.
- Sedimentos acumulados en la red.

A pesar de que se conocen los elementos que intervienen, no hay relaciones múltiples de regresión lineal claras y generales establecidas para explicar la forma y variedad de los polutogramas y curvas M(V) (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2004). En el apartado 7.3.3. *Índices de predicción* se procederá al estudio de estas relaciones para las cuencas S1 y San Félix.

### 7.2.2. Curvas de distribución de la masa de contaminantes vs volumen

Como ya se ha comentado en el anterior apartado, la variación de los flujos de masa contaminante durante una tormenta se describe mediante dos curvas principalmente: el polutograma  $C(t)$  y el hidrograma  $Q(t)$ . Puesto que estas curvas varían en función del episodio, es habitual incluir en la descripción del suceso lluvioso otro tipo de información como puede ser el hietograma  $P(t)$ , el tiempo seco precedente, las características de la cuenca, etc.

Asimismo, estudiar y comparar las diferentes distribuciones de contaminación en cada evento lluvioso requiere de una representación adimensional del fenómeno (Bertrand-Krajewski *et al.* 1998). Es en este punto donde adquieren importancia las curvas de distribución de la masa contaminante vs volumen, también llamadas curvas  $M(V)$ . Estas curvas son el resultado de graficar el conjunto de puntos resultado de representar en ordenadas la masa de contaminante dividida por la masa total y en abscisas el volumen acumulado dividido por el volumen total en cada instante de la tormenta.

Suponiendo que la concentración  $C_i$  y el caudal  $Q_i$  varían linealmente entre dos intervalos de medida  $\Delta t_i$ , la curva  $M(V)$  puede ser definida mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\sum_{i=1}^j C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t_i} = f \left( \frac{\sum_{i=1}^j Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta t_i} \right) = f \left( \frac{\sum_{i=1}^j V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \right) \quad (7.2)$$

Donde  $N$  es el número total de medidas,  $j$  es un índice que va desde 1 hasta  $N$  y  $V_i$  es el volumen descargado durante el intervalo de tiempo  $\Delta t_i$ .

El procedimiento de representación de las curvas  $M(V)$  viene descrito en la figura 7-15. Esta misma metodología ha sido la empleada en el apartado 7.2.3. *Análisis de las curvas  $M(V)$  para las cuencas SI y San Félix* con el objetivo de analizar la distribución de la masa contaminante en las cuencas estudiadas en este trabajo.

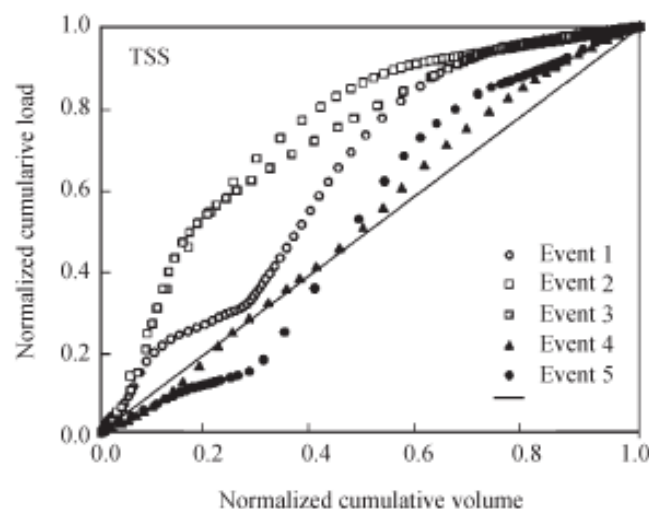


Figura 7-14. Curvas  $M(V)$  para los SST (Park *et al.*, 2010)



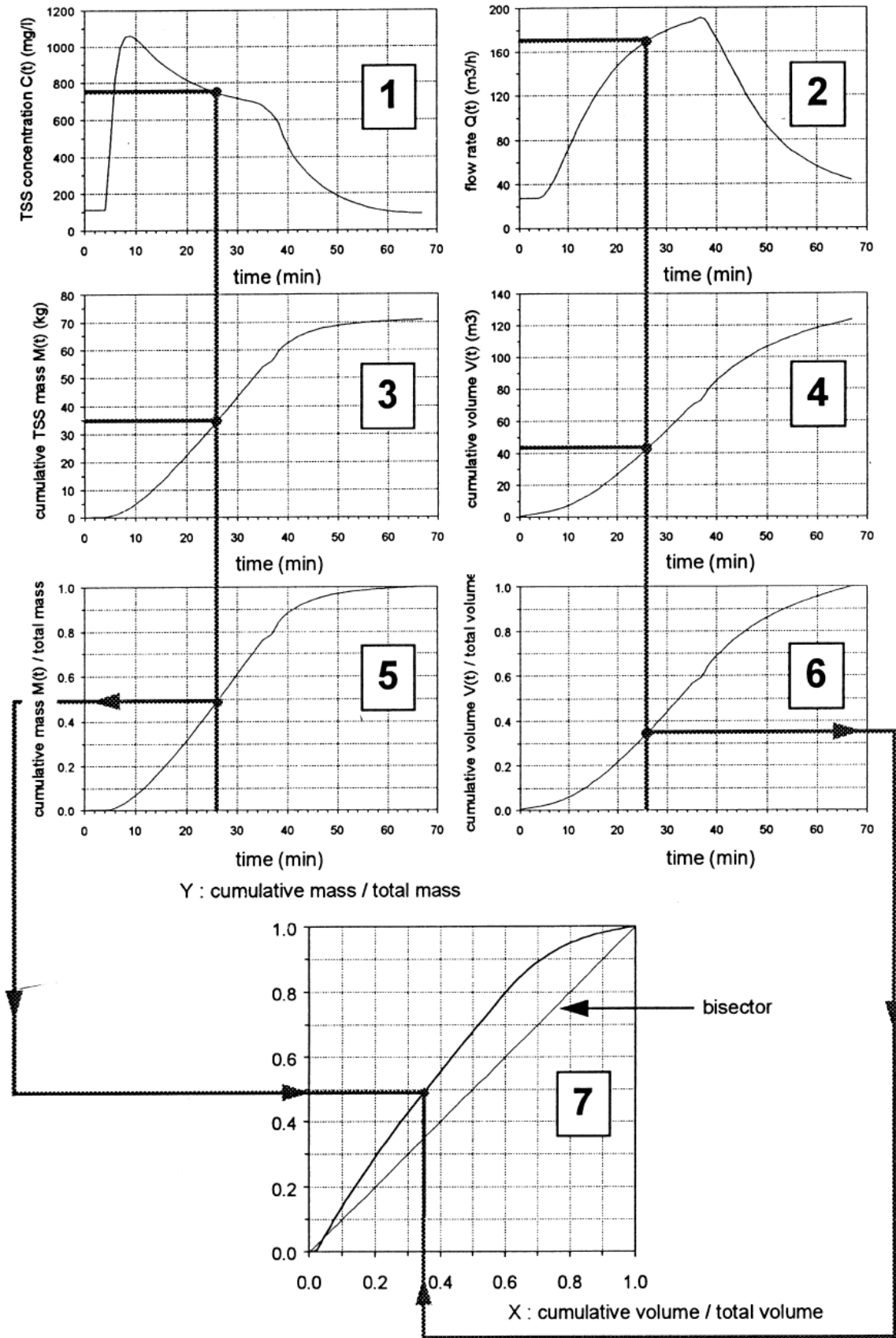


Figura 7-15. Ejemplo de dibujo de curva  $M(V)$  para los sólidos en suspensión totales (Bertrand Krajewski et al., 1998)

Este tipo de curvas pueden ajustarse aproximadamente a una función potencial del tipo:

$$F(x) = x^b \quad (7.3)$$

Donde  $x$  corresponde a  $V(x)$ ,  $0 \leq x \leq 1$ ,  $F(0)=0$  y  $F(1)=1$ .

El ajuste experimental entre la curva  $M(V)$  y  $F(x)$  arroja generalmente resultados satisfactorios con coeficientes de correlación  $r^2 \geq 0.9$ .

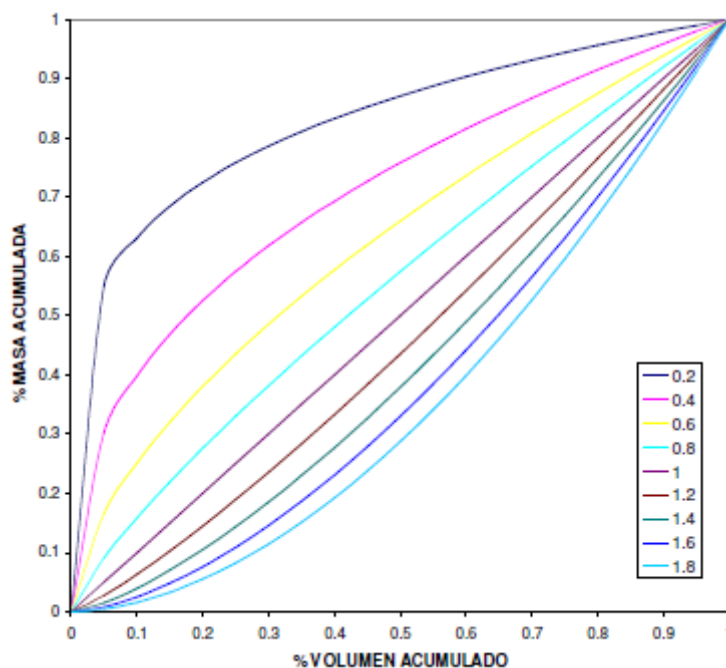


Figura 7-16. Curvas de movilización de masa para distintos valores del coeficiente “b” (Del Río, 2011)

El rango de valores adoptado por el parámetro  $b$  ha sido estudiado por numerosos investigadores. Saget *et al.* (1996) han analizado la diferencia entre los coeficientes  $b$  calculados en sistemas unitarios y en redes de pluviales. Para ello estudiaron un total de 80 eventos en 7 cuencas separativas y 117 lluvias en 7 cuencas unitarias. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7-6. Rangos de valores del coeficiente  $b$  (Saget *et al.*, 1996)

Contaminante	Tipo de alcantarillado	Mínimo	Medio	Máximo	Desviación estándar
SS	Pluviales	0.152	0.769	2.023	0.307
	Unitario	0.274	0.926	1.506	0.186
DQO	Pluviales	0.282	0.681	1.375	0.215
	Unitario	0.265	0.852	1.233	0.171
DBO <sub>5</sub>	Pluviales	0.271	0.669	1.379	0.238
	Unitario	0.449	0.832	1.203	0.170

Como puede observarse, el parámetro  $b$  calculado para un mismo sistema muestra grandes diferencias en función del episodio lluvioso. Por este motivo, no resulta aconsejable sustituir las curvas  $M(V)$  de una cuenca por una curva media ya que la pérdida de información sería importante.

Además de tener en cuenta el tipo de red, Peng *et al.* (2016) han estudiado las variaciones del coeficiente  $b$  diferenciando entre diversos usos de suelo. Con este propósito analizaron la movilización de masa durante 6 episodios de lluvia en un total de 5 áreas de drenaje representativas: 2 con sistemas unitarios (situadas en zonas residenciales) y 3 con redes separativas (una zona comercial, una residencial y otra de oficinas). La siguiente tabla muestra el resumen de los resultados.

Tabla 7-7. Coeficientes  $b$  para distintos usos de suelo (Peng *et al.*, 2016)

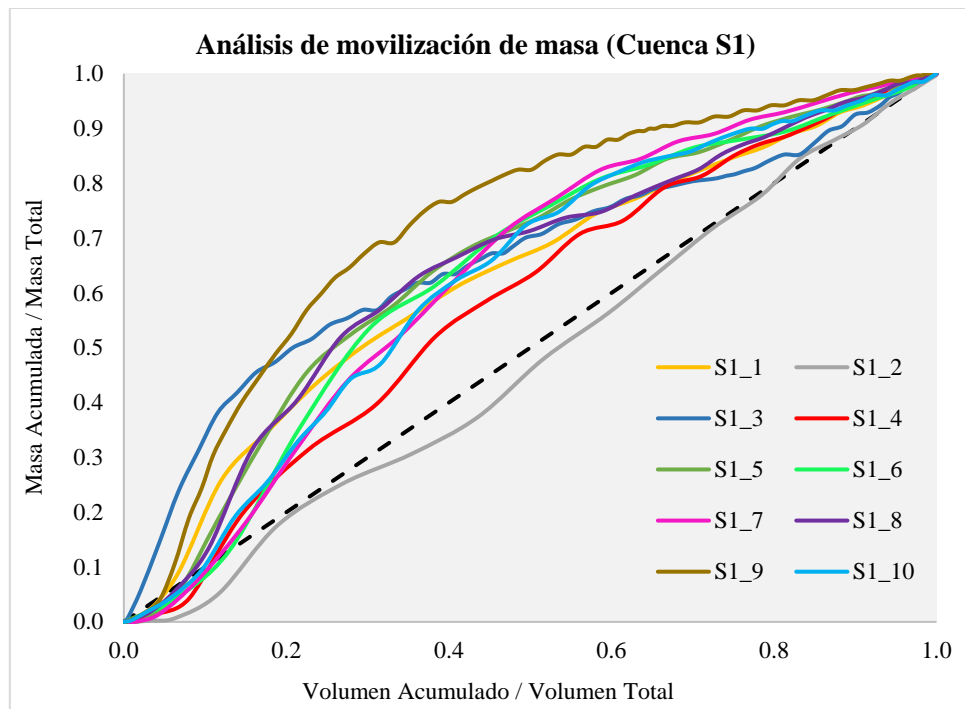
Tipo de sistema	Uso del suelo	Contaminante	Rango de valores del coeficiente $b$
<b>Unitario</b>	Residencial (alta densidad)	DQO	0.77-1.32
		SS	0.72-1.37
<b>Unitario de emisión directa</b>	Residencial (media densidad)	DQO	0.82-1.6
		SS	0.64-1.01
<b>Separativo</b>	Oficinas	DQO	0.52-1.22
		SS	0.8-1.22
	Comercial	DQO	0.47-1.14
		SS	0.44-1.14
	Residencial	DQO	0.86-1.53
		SS	0.72-1.62

La variabilidad de los rangos del coeficiente de ajuste  $b$  demuestra la complejidad de este fenómeno. Estas diferencias no sólo están determinadas por el tipo de sistema de saneamiento, sino también se ven influenciadas por el tipo de contaminante analizado. Por lo tanto, el análisis de movilización de masas es un trabajo necesario para conocer el comportamiento de la cuenca de estudio y poder obtener información fundamental para el diseño de los sistemas de control y tratamiento de reboses.

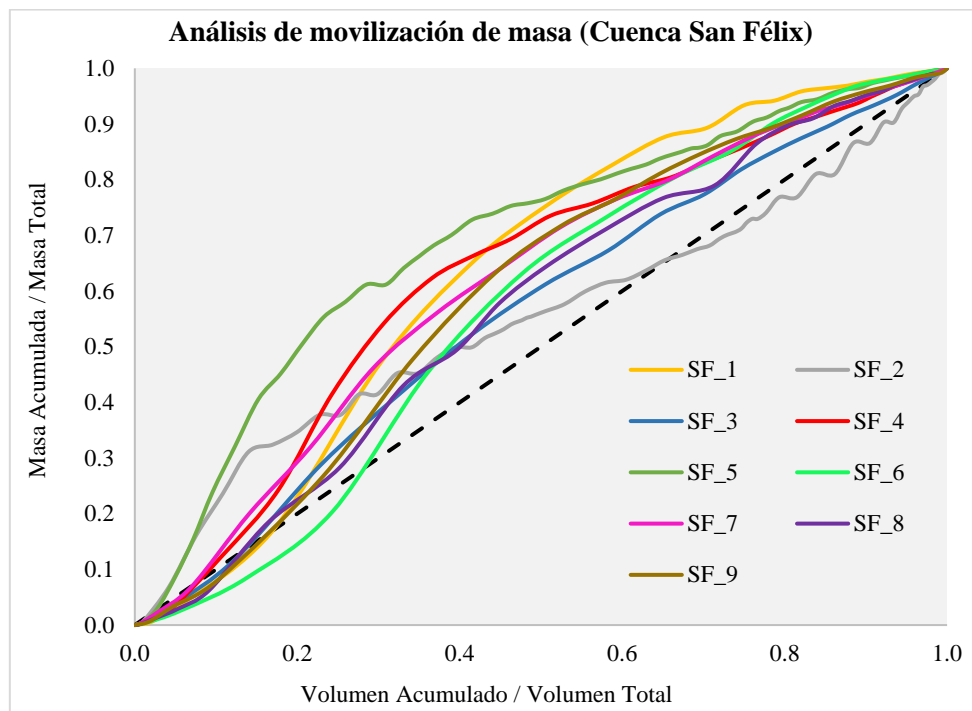
### 7.2.3. Análisis de las curvas $M(V)$ para las cuencas S1 y San Félix

En el este apartado se estudia el comportamiento de los sólidos en suspensión a través de la elaboración de las curvas  $M(V)$  de los diversos episodios analizados en ambas cuencas.

Además de estas curvas, para cada suceso se calcula el coeficiente de ajuste  $b$  (ver ecuación 7.3) con el objetivo de comparar y analizar sus valores con respecto a información encontrada en la bibliografía.



**Figura 7-17.** Distribución de las curvas  $M(V)$  relativas a los sólidos en suspensión para los episodios analizados en la cuenca S1



**Figura 7-18.** Distribución de las curvas  $M(V)$  relativas a los sólidos en suspensión para los episodios analizados en la cuenca San Félix

Analizando visualmente las dos figuras anteriores puede afirmarse que el fenómeno de primer lavado está presente en ambas cuencas. Para un estudio más detallado de este efecto se muestran a continuación los valores del coeficiente  $b$  para cada uno de los sucesos examinados.

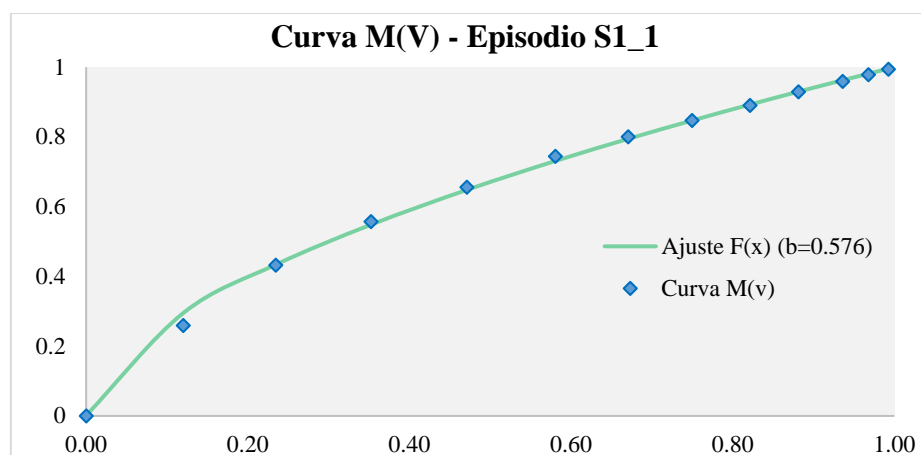


Figura 7-19. Ejemplo de ajuste de  $M(V)$ - $F(X)$  para el episodio S1\_1

Tabla 7-8. Coeficientes  $b$  de análisis de movilización de los SS en ambas cuencas

Cuenca S1		Cuenca San Félix	
Episodio	Coefficiente b	Episodio	Coefficiente b
S1_1	0.576	SF_1	0.5
S1_2	1.100	SF_2	0.824
S1_3	0.429	SF_3	0.738
S1_4	0.674	SF_4	0.515
S1_5	0.499	SF_5	0.394
S1_6	0.548	SF_6	0.718
S1_7	0.600	SF_7	0.579
S1_8	0.530	SF_8	0.761
S1_9	0.304	SF_9	0.619
S1_10	0.530		
<b>Mínimo</b>	0.304	<b>Mínimo</b>	0.394
<b>Máximo</b>	1.100	<b>Máximo</b>	0.824
<b>Medio</b>	0.579	<b>Medio</b>	0.628
<b>Mediana</b>	0.539	<b>Mediana</b>	0.619

Observando los resultados obtenidos se puede concluir que se produce un efecto de primer lavado en prácticamente todos los episodios analizados ya que los valores del coeficiente  $b$  se sitúan por debajo de la unidad. En el caso de tener que definir un valor representativo de este coeficiente en cada una de las cuencas se opta por elegir la mediana. Por lo tanto, el coeficiente  $b$  adopta un valor característico de 0.539 y 0.619 para las cuencas S1 y San Félix respectivamente.

El único evento en el que este coeficiente es mayor que 1 y, por lo tanto, el fenómeno de primer lavado no está presente, es el episodio S1\_2. Esta lluvia se caracteriza por tener un volumen pequeño (3.29 mm) repartido en una duración de 5 horas, así como un corto periodo de tiempo seco precedente (5 días). Por lo tanto, la coincidencia de un suceso lluvioso poco energético unido al corto periodo seco precedente pueden ser las causas principales del valor del coeficiente  $b$  en este episodio.

Por otro lado, los episodios S1\_9 y SF\_5 son los sucesos que presentan un coeficiente  $b$  más bajo y, por lo tanto, un primer lavado más acusado. Ambas lluvias se caracterizan

por tener una precipitación total de cierta magnitud (27.5 y 56.5 mm respectivamente) con una intensidad diezminutal máxima elevada (4.4 y 18.8 mm/h). Este hecho, unido a periodos secos precedentes cercanos a las 2 semanas pueden ser los causantes de este mayor efecto de primer lavado.

En base a estas conclusiones puede afirmarse que son dos los principales factores involucrados en el fenómeno del *first flush*. Por un lado, se encuentra el periodo seco precedente, que está fuertemente relacionado con la cantidad de sedimentos depositados en la red de saneamiento y drenaje. Por otro lado, entra en juego un factor relacionado con la energía del suceso lluvioso que posibilita la movilización de una fuerza de corte suficiente para arrastrar los contaminantes depositados en el sistema. En siguientes apartados se estudian estos factores con el objetivo de establecer relaciones empíricas entre estos y los principales parámetros de contaminación.

### 7.3. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS HIDROLÓGICO-HIDRÁULICOS Y DE CONTAMINACIÓN

#### 7.3.1. Relaciones entre parámetros establecidas en otras cuencas

El análisis de las relaciones entre los parámetros hidrológico-hidráulicos desarrollados en cada suceso de lluvia y las concentraciones y cargas contaminantes movilizadas durante el mismo pueden llegar a ser una herramienta de gran utilidad a la hora de predecir el comportamiento de una cuenca urbana ante la movilización de contaminación. Mediante estas relaciones se hace posible la definición de parámetros difícilmente medibles en campo, como son las concentraciones a lo largo de un suceso, mediante variables sencillas como son las relacionadas con la lluvia y el caudal.

Son numerosos los autores que han establecido relaciones de este tipo en diversas cuencas de estudio con el objetivo de conocer la movilización de contaminación en cada suceso en términos cuantitativos sin la necesidad de tomar muestras ni analíticas, sino simplemente con la instalación de pluviómetros y medidores de caudal. Este hecho puede suponer un importante ahorro económico a la vez que implica una mayor sencillez en la gestión y explotación del sistema.

En el trabajo llevado a cabo por Gupta *et al.* (1996) donde se estudiaron dos cuencas en Reino Unido (Great Harwood y Clayton-le-Moors), se analizaron un conjunto de indicadores de contaminación en base a parámetros como la intensidad media de lluvia, la precipitación total, la duración de la tormenta, el tiempo seco precedente a la misma, etc.

En base al estudio de 30 y 31 tormentas en las cuencas Great Harwood y Clayton-le-Moors respectivamente, estos autores obtuvieron las siguientes relaciones para los episodios de verano.

*Great Harwood*

$$LOAD_{ff} = 1.35 \cdot (STDURN)^{0.68} \cdot (RFINT_{max})^{0.68} \cdot (ADWP)^{0.28}$$

$$R^2 = 0.65$$

Clayton – le – Moors

$$LOAD_{ff} = 0.92 \cdot (STDURN)^{0.73} \cdot (RFINT_{max})^{0.93} \cdot (ADWP)^{0.14}$$

$$R^2 = 0.71$$

(7.4)

Donde  $LOAD_{ff}$  es la masa acumulada de sólidos en suspensión debida al primer lavado (kg),  $STDURN$  es la duración de la tormenta (min),  $RFINT_{max}$  es la intensidad máxima de lluvia (mm/h) y  $ADWP$  es periodo seco precedente al episodio (h).

En el estudio de la cuenca Ensanche situada en Santiago de Compostela, Del Río (2011) trabajó en tres tipos de índices de predicción del comportamiento de la contaminación:

- Índice de primer lavado ( $I_{PL}$ ), gracias al cual la concentración máxima de contaminante es predicha. Este índice representa la máxima capacidad instantánea de lavado de la superficie de la cuenca y la red de saneamiento, lo que indica el efecto de primer lavado del suceso.

$$I_{PL} = DTSP \cdot \frac{(Q_{max} / Q_{mTS})}{(\Delta t_{PL} / t_c)} \quad (7.5)$$

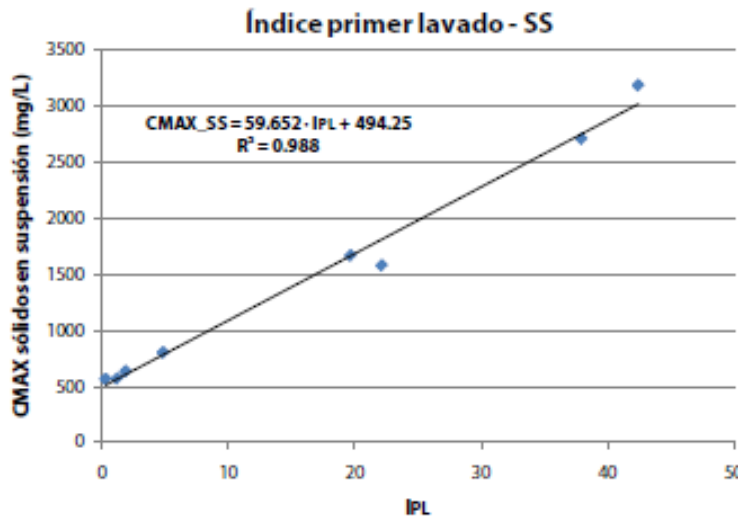


Figura 7-20. Relación entre el  $I_{PL}$  y las  $C_{MAX}$  de SS en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011)

- Índice de concentración media del suceso ( $I_{CMS}$ ), que relaciona la CMS de los contaminantes con los parámetros hidrológico-hidráulicos. Este índice surge a partir del  $I_{PL}$  considerándose que una vez que se ha alcanzado la  $C_{MAX}$ , comienza una disminución del aporte de contaminación proporcional al volumen de agua pluvial del suceso.

$$I_{CMS} = DTSP \cdot \frac{(Q_{max} / Q_{mTS})}{\left( \frac{\Delta t_{PL}}{t_c} \cdot \frac{V_{SUC}}{A_{neta}} \right)} \quad (7.6)$$

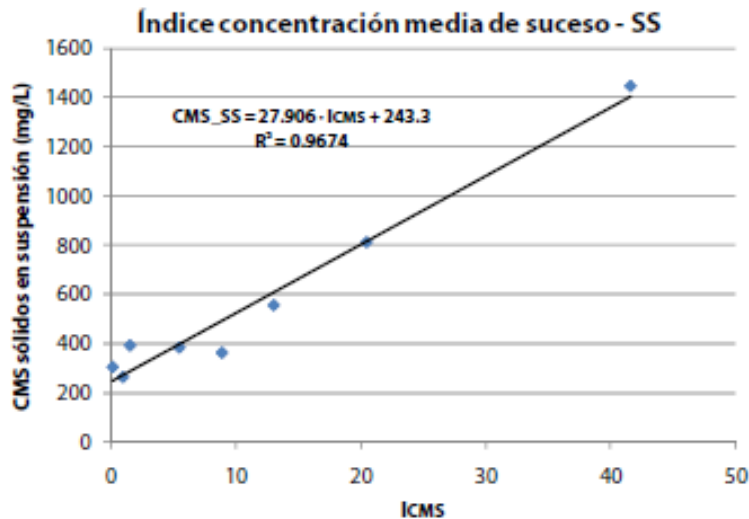


Figura 7-21. Relación entre el ICMS y las CMS de SS en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011)

- Índice de movilización específica ( $I_{MOVE}$ ), que predice la movilización de masa de los sólidos en suspensión en tiempo de lluvia. Esta ecuación consta de dos términos, uno representa el potencial de acumulación de contaminación en la cuenca y el otro el potencial de lavado de dicha contaminación acumulada.

$$I_{MOVE} = DTSP + \left( \frac{Q_{max}}{Q_{mTS}} \right)^{\left( \Delta t - \frac{Q_{mTS}}{Q_m} \right)} \quad (7.7)$$

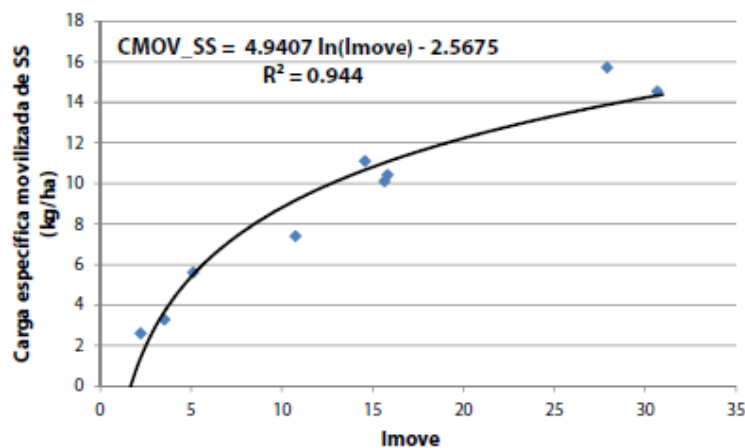


Figura 7-22. Relación entre el  $I_{MOVE}$  y las CMOV de SS en la cuenca Ensanche (Del Río, 2011)

En todas estas ecuaciones, las variables involucradas son las siguientes:

- DTSP: días de tiempo seco precedente (días).
- $Q_{max}$ : caudal máximo registrado en el suceso muestreado (L/s).
- $Q_m$ : caudal medio de suceso (L/s).
- $Q_{mTS}$ : caudal medio diario de tiempo seco (L/s).



- $\Delta t_{pi}$ : tiempo transcurrido desde el comienzo del suceso hasta el instante en el que se alcanza el caudal máximo en el hidrograma (min).
- $\Delta t$ : tiempo de duración del suceso de lluvia (min).
- $t_c$ : tiempo de concentración de la cuenca (min)
- $V_{SUC}$ : volumen de agua pluvial mixta en el suceso muestreado ( $m^3$ ).
- $A_{neta}$ : área neta de la cuenca drenante (ha).

Gromaire *et al.* (2001) también obtuvieron un conjunto de expresiones que relacionaban la cantidad de contaminante movilizado en un episodio de lluvia en la cuenca parisina de Marais. Estos autores realizaron el análisis de la correlación entre parámetros en un total de 31 eventos, relacionando la masa movilizada de SS, SSV, DQO y DBO<sub>5</sub> con las características de la lluvia y el caudal circulante. Los parámetros que mostraron mejores ajustes fueron la intensidad máxima de lluvia, la duración del periodo seco precedente y, en menor medida, la precipitación total del suceso.

**Tabla 7-9. Análisis de regresión entre la masa de contaminantes y las características de una lluvia (Gromaire et al., 2001)**

	Coeficiente de correlación			Ajuste multivariable	
	$I_{max}$ (1)	Periodo seco precedente (2)	$P_{total}$ (3)	Ecuaciones de ajuste	$R^2$
SS	0.76	0.70	0.47	$2.9 \cdot (1) + 26.3 \cdot (2) + 21.9 \cdot (3) + 41$	0.88
SSV	0.72	0.70	0.46	$1.4 \cdot (1) + 15.6 \cdot (2) + 12.4 \cdot (3) + 59$	0.83
DQO	0.67	0.68	0.40	$2.5 \cdot (1) + 28.1 \cdot (2) + 19.1 \cdot (3) + 120$	0.73
DBO <sub>5</sub>	0.49	0.56	0.64	$0.4 \cdot (1) + 13.4 \cdot (2) + 20.2 \cdot (3) - 15$	0.73

La introducción de estas variables en el ajuste aporta una posible explicación del suceso reproducido. Durante el periodo seco anterior a un episodio lluvioso, las partículas contenidas en el agua residual se acumulan y depositan en el interior de las redes, de modo que su arrastre durante la lluvia dependerá en cierta medida de la energía máxima del flujo. Sobre esta última idea se sustentará la búsqueda de índices de predicción para las cuencas S1 y San Félix. Para ello, en primer lugar, se estudiarán las relaciones entre los parámetros mediante la construcción de matrices de correlación. En segundo lugar, se calcularán los índices que más se ajusten a las cuencas objeto del presente trabajo.

### 7.3.2. Correlaciones para las cuencas S1 y San Félix

A la hora de realizar un análisis de los registros de datos de cada episodio es importante el conocimiento de las correlaciones entre las distintas variables. En este sentido, las matrices de correlación se convierten en una herramienta muy útil cuando se generan modelos empíricos pues permiten analizar la dependencia entre los distintos parámetros de manera conjunta.

Una matriz de correlación es una matriz formada por  $n$  filas y  $n$  columnas, constituida por los coeficientes de correlación de cada pareja de variables. Se trata de una matriz simétrica en la que cada valor muestra el grado de relación entre los pares de valores. El estadístico más empleado para reflejar dicha relación suele ser el coeficiente de correlación de Pearson, que refleja el grado de linealidad existente entre dos variables cuantitativas. Se suele representar con la letra  $r$  y se obtiene tipificando el promedio de los productos de las puntuaciones diferenciales de cada caso (desviaciones de la media) en las dos variables correlacionadas.

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n S_x S_y} \quad (7.8)$$

Donde  $x_i$  e  $y_i$  se refieren a los valores diferenciales de cada par,  $n$  al número de casos y  $S_x$  y  $S_y$  a las desviaciones típicas de cada variable. El coeficiente de correlación de Pearson toma valores entre -1 y 1. Un valor cercano a 1 (en valor absoluto) indica un alto grado de correlación. De este modo, el valor de una variable se podrá predecir a partir del valor de la otra empleando una transformación lineal. Si el coeficiente de correlación es inferior a 0.7 la correlación es leve y por debajo de 0.5 casi inexistente.

A modo de ejemplo se presenta la matriz de correlación de algunos parámetros hidrológico-hidráulicos y la concentración media de suceso de contaminantes muestreados en una cuenca separativa de Santiago de Compostela.

	DTSP	Precipitación TOTAL	Intensidad máxima horaria	Caudal máximo	Caudal medio	Volumen del suceso	DQO	SST	SDT	ST
DTSP	1	-0.31	-0.26	-0.38	-0.47	-0.26	0.81	0.54	0.4	0.62
P	-0.31	1	0.91	0.96	0.94	-0.32	-0.56	0.03	-0.31	-0.45
I <sub>h</sub>	-0.26	0.91	1	0.91	0.86	-0.34	0.19	0.03	-0.21	-0.34
Q <sub>h</sub>	-0.38	0.96	0.91	1	0.97	-0.28	-0.7	0.09	-0.08	-0.16
Q <sub>m</sub>	-0.47	0.94	0.86	0.97	1	-0.05	-0.84	-0.01	-0.46	-0.38
Volumen	-0.26	-0.32	-0.34	-0.28	-0.05	1	-0.7	-0.54	-0.66	-0.66
DQO	0.81	-0.56	0.19	-0.7	-0.84	-0.7	1	0.82	0.47	0.73
SST	0.54	0.03	0.03	0.09	-0.01	-0.54	0.82	1	0.27	0.96
SDT	0.4	-0.31	-0.21	-0.08	-0.46	-0.66	0.47	0.27	1	0.47
ST	0.62	-0.45	-0.34	-0.16	-0.38	-0.66	0.73	0.96	0.47	1

Figura 7-23. Matriz de correlación de los parámetros hidrológicos y las CMS de los sucesos muestreados en la cuenca urbana Fontiñas (Puertas et al., 2008)

A continuación se presentan las matrices de correlación entre los parámetros de contaminación  $C_{Max}$  (Concentración máxima de sólidos en suspensión) y  $T_{PP}$  (tiempo al pico del polutograma) y los principales parámetros hidrológico-hidráulicos, los cuales son:

- $P_{\text{seco}}$ : días de tiempo seco precedentes al episodio (días).
- $Q_{\text{Max}}$ : caudal máximo del episodio (l/s).
- $T_{\text{PH}}$ : tiempo al pico del hidrograma (minutos).
- $P_{\text{Total}}$ : precipitación total del episodio (mm).
- $I_{10' \text{Max}}$ : intensidad diezminutal máxima registrada (mm/h).

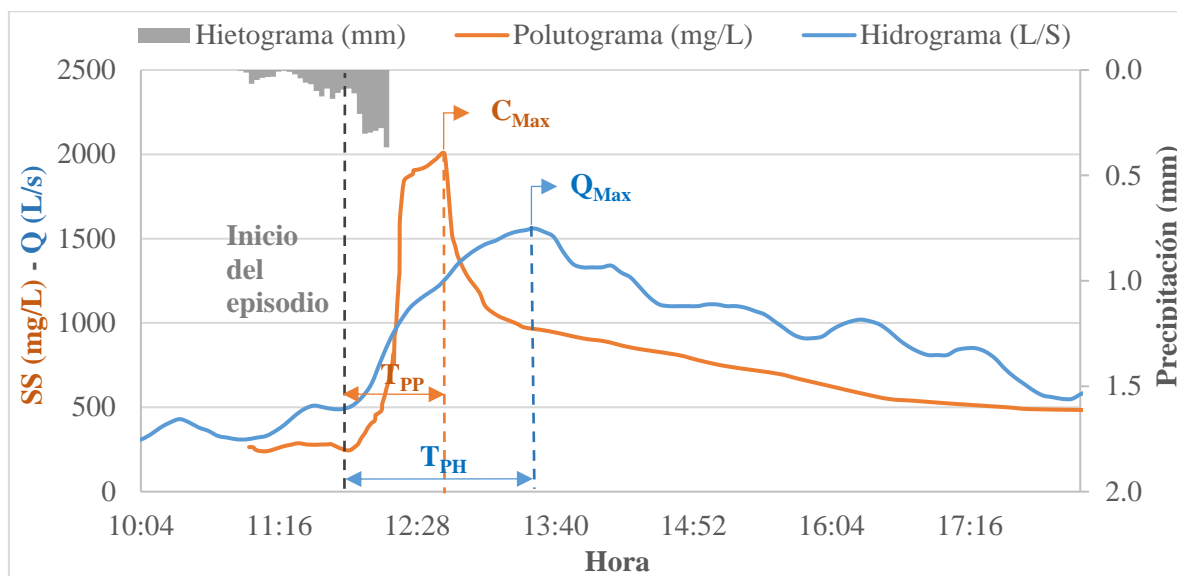


Figura 7-24. Principales variables hidráulicas y de contaminación consideradas en el estudio de correlaciones

Para la definición del inicio de episodio se siguen criterios hidráulicos, de modo que tanto el tiempo al pico del polutograma como el del hidrograma están referidos al mismo instante: el momento en el que el caudal se sitúa por encima del patrón de caudal del día seco para una hora dada.

Dichas matrices han sido obtenidas con el programa de análisis estadístico MINITAB (versión 17). Se han marcado en rojo los valores muy correlacionados, en verde los valores con correlación significativa, en azul los levemente correlacionados y en negro los que la correlación no es significativa.

Tabla 7-10. Matriz de correlación entre parámetros hidrológico-hidráulicos y de contaminación en la cuenca S1

	$P_{\text{seco}}$	$Q_{\text{max}}$	$T_{\text{PH}}$	$P_{\text{total}}$	$I_{10' \text{max}}$	$C_{\text{Max}}$	$T_{\text{PP}}$
$P_{\text{seco}}$	1.00	-0.01	0.09	-0.29	0.02	0.68	0.07
$Q_{\text{max}}$		1.00	-0.35	0.24	0.55	0.02	-0.31
$T_{\text{PH}}$			1.00	-0.32	-0.43	-0.10	0.79
$P_{\text{total}}$				1.00	0.50	0.01	0.24
$I_{10' \text{max}}$		SIM			1.00	0.21	-0.06
$C_{\text{Max}}$						1.00	-0.08
$T_{\text{PP}}$							1.00

**Tabla 7-11. Matriz de correlación entre parámetros hidrológico-hidráulicos y de contaminación en la cuenca San Félix**

	<b>P<sub>seco</sub></b>	<b>Q<sub>max</sub></b>	<b>T<sub>PH</sub></b>	<b>P<sub>total</sub></b>	<b>I<sub>10'max</sub></b>	<b>C<sub>Max</sub></b>	<b>T<sub>PP</sub></b>
<b>P<sub>seco</sub></b>	1.00	0.28	0.12	0.10	0.13	0.32	0.19
<b>Q<sub>max</sub></b>		1.00	-0.12	0.74	0.61	0.84	0.06
<b>T<sub>PH</sub></b>			1.00	-0.18	-0.61	-0.08	0.94
<b>P<sub>total</sub></b>				1.00	0.59	0.80	0.11
<b>I<sub>10'max</sub></b>		SIM			1.00	0.48	-0.52
<b>C<sub>Max</sub></b>						1.00	0.16
<b>T<sub>PP</sub></b>							1.00

De las matrices anteriores cabe destacar las siguientes conclusiones:

- En ambas cuencas existe una buena correlación entre el tiempo al pico del polutograma y el tiempo al pico del hidrograma.
- Es posible que exista alguna relación entre el tiempo al pico del polutograma y la precipitación total ya que presenta coeficientes con valores positivos en ambas cuencas.
- Se muestra cierta correlación entre el periodo seco precedente al episodio y la concentración máxima de sólidos en suspensión, especialmente en la cuenca S1.
- Con más intensidad en la cuenca San Félix, se observa cierta relación entre la concentración máxima de sólidos en suspensión, la precipitación total y el caudal máximo.

### 7.3.3. Índices de predicción de contaminación

Analizadas las matrices de correlación calculadas en el apartado anterior, se pueden observar las tendencias entre los distintos parámetros que rigen el comportamiento de la cuenca en cuanto a la contaminación movilizada.

No obstante, es importante remarcar que ninguno de los parámetros analizados refleja, de manera individual, relación significativa que pueda ser empleada como herramienta de predicción de los fenómenos ocurridos durante un episodio. Por este motivo, se analizan y calculan a continuación unos índices multivariable con los principales parámetros hidrológico-hidráulicos estudiados e incluidos en las matrices anteriores. El objetivo final es poder predecir, por un lado, la concentración máxima de sólidos en suspensión en los episodios lluviosos (pico del polutograma) y, por otro lado, el tiempo transcurrido desde el inicio del suceso hasta que se produce dicho máximo (tiempo al pico del polutograma).

Se ha trabajado en dos índices principales de predicción de comportamiento:

- Índice de tiempo al pico del polutograma (I<sub>T<sub>PP</sub></sub>).
- Índice de concentración máxima (I<sub>C<sub>Max</sub></sub>).

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

El índice de tiempo al pico del polutograma predice, como ya se ha comentado, el tiempo que transcurre desde el inicio del episodio hasta que se alcanza el valor máximo de concentración de sólidos en suspensión en el suceso. La ecuación que lo describe es la siguiente:

$$I_{TPP} = \left( \frac{T_{PH}}{T_C} \right)^{0.13} \cdot (P_{Total})^{0.02} \quad (7.9)$$

Como ya adelantaban las matrices de correlación en ambas cuencas, la relación entre el tiempo al pico del polutograma y del hidrograma queda manifiesta en este índice de predicción. Por otro lado, se ha introducido el término precipitación total, aunque su influencia en el índice es mucho menor que la del  $T_{PH}$ , y el tiempo de concentración de la cuenca con el objetivo de incluir indirectamente las características de las mismas.

La siguiente tabla muestra el cálculo de este índice para cada episodio estudiado de cada cuenca.

*Tabla 7-12. Cálculo del índice de tiempo al pico del polutograma para los episodios analizados en ambas cuencas*

Cuenca	Episodio	Tiempo al pico del hidrograma $T_{PH}$ (min)	Precipitación total $P_{Total}$ (mm)	$I_{TPP}$ $(T_{PH}/T_C)^{0.13} \cdot (P_{Total})^{0.02}$
S1	S1_1	130.00	12.06	<b>0.998</b>
S1	S1_2	175.20	3.29	<b>1.011</b>
S1	S1_3	110.00	30.37	<b>0.995</b>
S1	S1_4	150.00	3.03	<b>0.989</b>
S1	S1_5	150.00	8.69	<b>1.010</b>
S1	S1_6	109.80	8.18	<b>0.969</b>
S1	S1_7	205.20	11.16	<b>1.057</b>
S1	S1_8	145.20	14.19	<b>1.016</b>
S1	S1_9	155.00	27.48	<b>1.038</b>
S1	S1_10	135.00	13.46	<b>1.005</b>
San Félix	SF_1	35.00	7.34	<b>0.924</b>
San Félix	SF_2	60.00	30.71	<b>1.020</b>
San Félix	SF_3	105.00	2.47	<b>1.043</b>
San Félix	SF_4	80.00	10.13	<b>1.036</b>
San Félix	SF_5	95.00	56.47	<b>1.096</b>
San Félix	SF_6	130.00	7.53	<b>1.097</b>
San Félix	SF_7	205.00	11.57	<b>1.174</b>
San Félix	SF_8	180.00	6.80	<b>1.142</b>
San Félix	SF_9	90.00	2.27	<b>1.021</b>

Una vez calculado el índice para cada episodio, se presenta el mismo junto al tiempo al pico del polutograma y se establece un ajuste lineal.

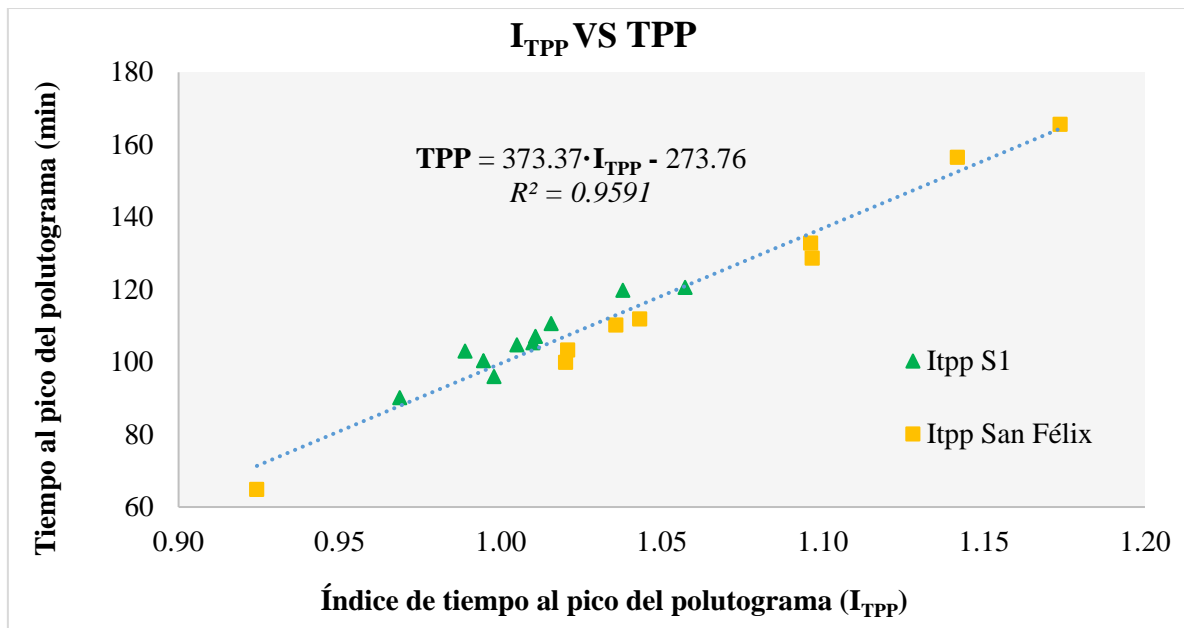


Figura 7-25. Relación entre el  $I_{TPP}$  y el tiempo al pico de los polutogramas para ambas cuencas

Siguiendo lo expuesto en la figura anterior, la ecuación que relaciona el índice de tiempo al pico del polutograma y el tiempo al pico del mismo es la siguiente:

$$T_{PP} = 373.37 \cdot I_{TPP} - 273.76 \quad (7.10)$$

Con el propósito de comparar los resultados de la anterior ecuación con los valores reales medidos en campo, se presenta a continuación una tabla resumen con las diferencias entre ambos números en cada episodio.

Tabla 7-13. Diferencias entre predicciones y valores reales del  $T_{PP}$  para la cuenca S1

Episodio	TPP (min)	$I_{TPP}$	Predicción De $T_{PP}$	Error absoluto (min)	Error relativo (%)
S1_1	96.03	1.00	99.37	3.34	3.48
S1_2	107.12	1.01	104.01	3.11	2.90
S1_3	100.37	0.99	98.21	2.16	2.15
S1_4	103.06	0.99	96.14	6.91	6.71
S1_5	105.33	1.01	103.73	1.61	1.52
S1_6	90.19	0.97	88.85	1.34	1.49
S1_7	120.65	1.06	120.75	0.10	0.09
S1_8	110.65	1.02	105.76	4.89	4.42
S1_9	119.82	1.04	113.79	6.03	5.03
S1_10	104.76	1.01	101.93	2.83	2.70

Tabla 7-14. Diferencias entre predicciones y valores reales del  $T_{PP}$  para la cuenca San Félix

Episodio	TPP (min)	$I_{TPP}$	Predicción De $T_{PP}$	Error absoluto (min)	Error relativo (%)
SF_1	64.81	0.92	72.86	8.04	12.41
SF_2	99.88	1.02	107.39	7.51	7.51
SF_3	111.89	1.04	115.68	3.79	3.39
SF_4	110.18	1.04	113.02	2.84	2.58
SF_5	132.82	1.10	134.79	1.97	1.48
SF_6	128.67	1.10	134.98	6.30	4.90
SF_7	165.61	1.17	162.69	2.92	1.76
SF_8	156.51	1.14	151.21	5.30	3.39
SF_9	103.30	1.02	107.63	4.33	4.19

Analizando los resultados de las dos tablas anteriores puede considerarse que el ajuste muestra unos buenos resultados. El error absoluto medio es de 3.23 minutos en el caso de la cuenca S1 y de 4.78 minutos en el caso de la cuenca San Félix. En cuanto al error relativo, su valor es de 3.05% y 4.62% para la cuenca S1 y San Félix respectivamente.

• **Índice de concentración máxima ( $I_{CM_{Max}}$ ).**

El índice de concentración máxima  $I_{CM_{Max}}$  surge con el objetivo de poder estimar la concentración máxima de los sólidos en suspensión a partir de parámetros fácilmente medibles en la red. Junto con el  $I_{TPP}$  comentado anteriormente, este índice de predicción permite conocer tanto la magnitud del polutograma como la localización en el tiempo del caudal más contaminado. El conocimiento de ambas variables puede convertirse en una herramienta de gestión muy importante, tal y como se verá en siguientes apartados (Capítulo 8). La ecuación que describe el  $I_{CM_{Max}}$  es la siguiente:

$$I_{CM_{Max}} = (P_{Total} \cdot i)^{0.3} \cdot (P_{seco})^{0.3} \cdot F_{forma} \quad (7.11)$$

Esta expresión se puede descomponer en 3 términos principales: uno relacionado con la energía del suceso, otro relacionado con la acumulación de depósitos en el sistema y un último relacionado con las características geométricas de la cuenca.

- El producto de la precipitación por la pendiente media de la cuenca. Este término guarda relación con la energía del flujo durante el episodio lluvioso, de modo que un incremento de la lluvia total para una determinada cuenca provoca un mayor lavado de sedimentos con el consecuente aumento de la concentración máxima de sólidos. Del mismo modo para dos cuencas con distinta pendiente (suponiendo el resto de parámetros fijos), se producirá una mayor concentración máxima en aquella que presente una pendiente media mayor.
- El periodo seco precedente al suceso lluvioso. Durante el tiempo sin precipitaciones se produce la sedimentación y acumulación de depósitos a lo largo de los conductos de la red debido a las bajas velocidades de circulación y a las variaciones de caudal. Estos materiales depositados pueden ser arrastrados durante las tormentas provocando

un incremento de la concentración de sólidos en suspensión presente en el agua residual.

- Factor de forma de la cuenca. Se introduce también un factor adimensional obtenido mediante una relación de parámetros geométricos básicos de la cuenca. Dicho término sigue la siguiente expresión:

$$F_{forma} = \frac{10 \cdot Area_{cuenca}}{(Longitud_{Cauce.principal})^2} \quad (7.12)$$

Donde ambas variables se encuentran expresadas en km.

Tabla 7-15. Cálculo de factores de forma de ambas cuencas

Cuenca	Pendiente media (m/m)	Longitud del cauce principal (km)	Área (km <sup>2</sup> )	Factor de forma
S1	0.00127	17	47.53	1.645
San Félix	0.00425	10.75	14.89	1.288

Tabla 7-16. Cálculo del índice de concentración máxima para los episodios analizados en ambas cuencas

Cuenca	Episodio	Precipitación total P <sub>Total</sub> (mm)	Periodo seco precedente P <sub>seco</sub> (días)	I <sub>CMax</sub> (P <sub>Total</sub> ·i) <sup>0.3</sup> ·(P <sub>seco</sub> ) <sup>0.3</sup>
S1	S1_1	12.06	7	<b>0.842</b>
S1	S1_2	3.29	5	<b>0.516</b>
S1	S1_3	30.37	10	<b>1.237</b>
S1	S1_4	3.03	24	<b>0.806</b>
S1	S1_5	8.69	22	<b>1.076</b>
S1	S1_6	8.18	17	<b>0.978</b>
S1	S1_7	11.16	17	<b>1.074</b>
S1	S1_8	14.19	15	<b>1.112</b>
S1	S1_9	27.48	13	<b>1.299</b>
S1	S1_10	13.46	12	<b>1.023</b>
San Félix	SF_1	7.34	15	<b>1.026</b>
San Félix	SF_2	30.71	10	<b>1.396</b>
San Félix	SF_3	2.47	1	<b>0.328</b>
San Félix	SF_4	10.13	22	<b>1.268</b>
San Félix	SF_5	56.47	19	<b>2.032</b>
San Félix	SF_6	7.53	17	<b>1.074</b>
San Félix	SF_7	11.57	17	<b>1.221</b>
San Félix	SF_8	6.80	18	<b>1.059</b>
San Félix	SF_9	2.27	22	<b>0.810</b>

Calculado el índice para cada episodio se presenta a continuación su ajuste a la concentración máxima de sólidos en suspensión.



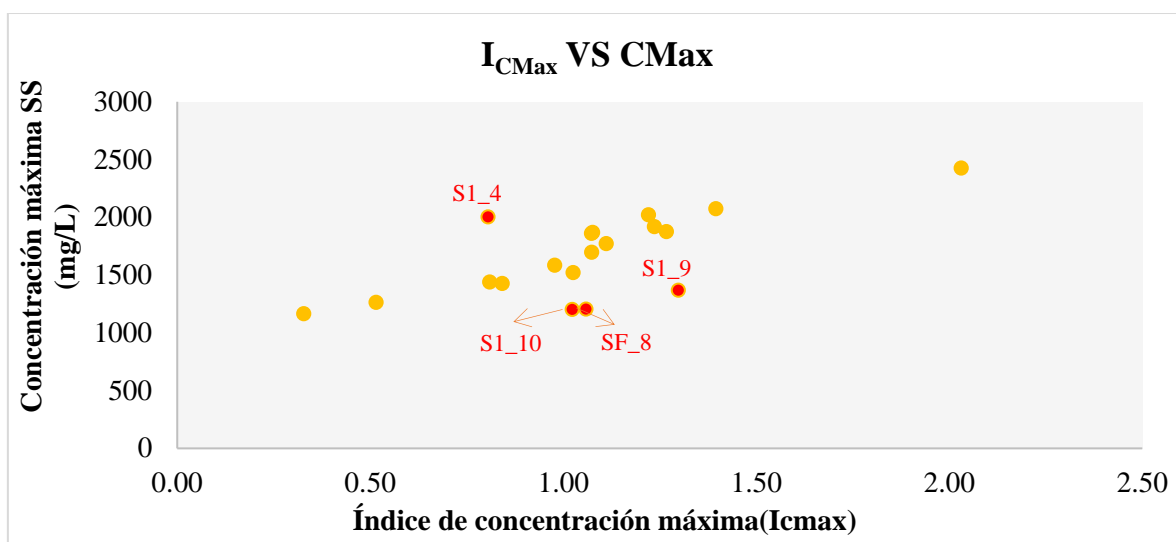


Figura 7-26. Relación entre el  $I_{C_{Max}}$  y la concentración máxima de sólidos en suspensión para ambas cuencas (puntos excluidos)

Como se puede apreciar en la anterior figura, existen 4 sucesos en lo que las concentraciones máximas de sólidos en suspensión calculadas no se ajustan a la tendencia general que muestran el conjunto de datos. Estos sucesos han sido:

- *SI\_4*. Se trata de un episodio con muy baja precipitación (3 mm). De modo que, aunque el periodo seco previo es muy extenso (24 días), el índice de predicción arroja valores más bajos de concentración máxima.
- *SI\_9* y *SI\_10*. En cuanto a estos episodios, las concentraciones máximas calculadas están por debajo de la tendencia que siguen el resto de datos. La posible causa de este fenómeno está relacionada con la energía de ambos sucesos. Las lluvias en estos dos días están caracterizadas por tener una intensidad media de precipitación baja (inferior a 1 mm/h), por lo que la cuenca y la red fueron lavándose lentamente.
- *SF\_8*. Al igual que en el caso del episodio *SI\_4*, en este evento la precipitación es muy baja (2.3 mm).

Por esa serie de motivos, si se descartan el conjunto de episodios comentados anteriormente se obtienen un correcto ajuste lineal entre el  $I_{C_{Max}}$  y la concentración máxima de sólidos en suspensión en cada evento (figura 7-27).

En base al ajuste lineal de ambos parámetros, la ecuación que relaciona el índice de concentración máxima y la concentración máxima es al siguiente:

$$C_{Max} = 821.46 \cdot I_{C_{Max}} + 851.16 \quad (7.13)$$

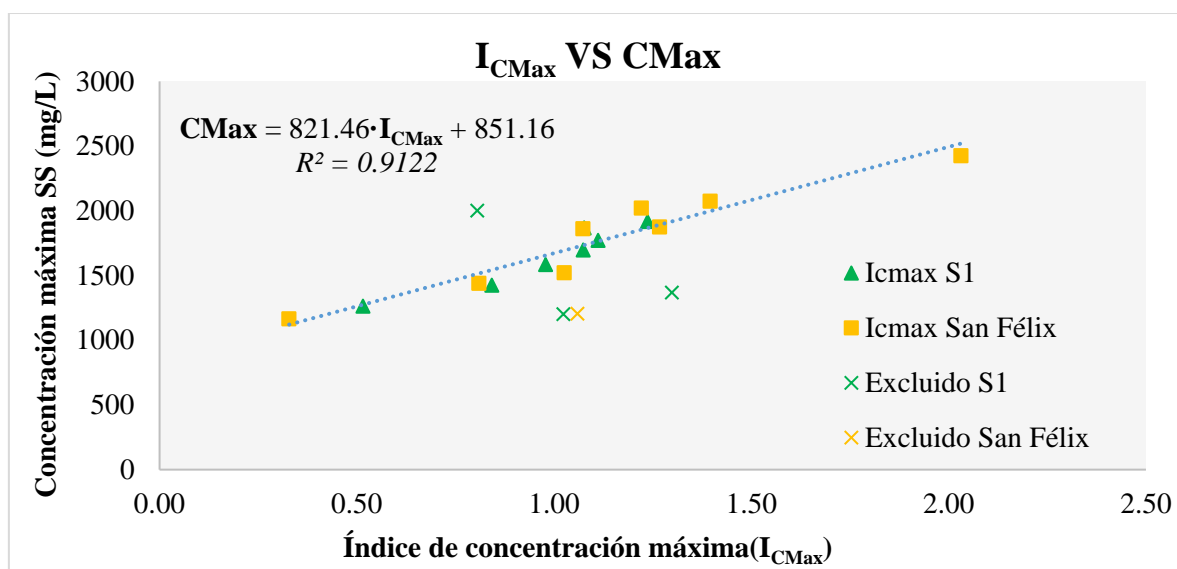


Figura 7-27. Relación entre el IC<sub>Max</sub> y la concentración máxima de sólidos en suspensión para ambas cuencas

Con el objetivo de contrastar los resultados de la anterior ecuación con los valores reales medidos en campo, se presenta a continuación un resumen con las diferencias entre ambos números para cada suceso.

Tabla 7-17. Diferencias entre predicciones y valores reales de la C<sub>Max</sub> para ambas cuencas

Episodio	C <sub>Max</sub> (mg/l)	I <sub>C<sub>Max</sub></sub>	Predicción De C <sub>Max</sub>	Error absoluto (mg/l)	Error relativo (%)
S1_1	1425.48	0.842	1543.41	117.94	8.27
S1_2	1263.08	0.516	1275.16	12.08	0.96
S1_3	1917.84	1.237	1867.33	50.51	2.63
S1_5	1867.47	1.076	1735.59	131.88	7.06
S1_6	1584.19	0.978	1655.14	70.94	4.48
S1_7	1696.72	1.074	1733.62	36.90	2.17
S1_8	1771.41	1.112	1764.59	6.82	0.39
SF_1	1520.81	1.026	1694.25	173.44	11.40
SF_2	2072.87	1.396	1997.96	74.91	3.61
SF_3	1163.82	0.328	1121.29	42.53	3.65
SF_4	1874.35	1.268	1892.82	18.47	0.99
SF_5	2424.94	2.032	2520.00	95.06	3.92
SF_6	1860.35	1.074	1733.27	127.08	6.83
SF_7	2020.29	1.221	1854.63	165.66	8.20
SF_9	1439.24	0.810	1516.80	77.56	5.39

En base a los resultados mostrados en la anterior tabla puede afirmarse que el ajuste calculado presenta unos resultados correctos. El error absoluto medio es de 61 mg/l para la cuenca S1 y de 94.8 mg/l para la San Félix. Por otro lado, el error relativo presenta valores inferiores al 6% (3.71% para la cuenca S1 y 5.5% para la cuenca San Félix).

Si se analizan las variables que actúan en los índices de predicción se llega a la conclusión de que los factores principales que entran en juego en la movilización de contaminación son los que ya han sido comentados en el apartado 7.3.1. *Relaciones entre parámetros establecidas en otras cuencas*:

- La energía del episodio lluvioso. Entendida como el producto de la precipitación total y la pendiente de la cuenca.
- La acumulación de depósitos en la superficie de la cuenca y de los conductos. Expresado por medio del tiempo seco precedente al episodio.



# CAPÍTULO 8: POLUTOGRAMAS DE DISEÑO

## ÍNDICE CAPÍTULO 8

<b>8. POLUTOGRAMAS DE DISEÑO.....</b>	<b>8-1</b>
8.1. CÁLCULO Y ESTUDIO DE POLUTOGRAMAS DE DISEÑO .....	8-1
8.1.1. Elaboración de polutogramas a partir de los índices de predicción .....	8-1
8.1.2. Cálculo y análisis de polutogramas de diseño para distintos periodos de retorno .....	8-7
8.2. ÁBACOS DE MOVILIZACIÓN DE MASA .....	8-13



## 8. POLUTOGRAMAS DE DISEÑO

### 8.1. CÁLCULO Y ESTUDIO DE POLUTOGRAMAS DE DISEÑO

Una vez definidos los índices de predicción que permiten conocer la concentración máxima de sólidos en suspensión y el tiempo al pico del polutograma para una lluvia dada, es posible analizar el comportamiento de la cuenca en cuanto a movilización de masa para cualquier lluvia dada. Con este propósito se estudian a continuación los polutogramas obtenidos a través de lluvias de diseño para distintos periodos de retorno, lo que se ha denominado polutogramas de diseño.

#### 8.1.1. Elaboración de polutogramas a partir de los índices de predicción

Un polutograma es la representación de la concentración de un determinado contaminante a lo largo del tiempo. Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, del análisis del conjunto formado por el hidrograma, el hietograma y el polutograma de un determinado suceso se puede extraer información muy importante acerca de la movilización de masas en un episodio. Es por este motivo por el que el conocimiento de este gráfico resulta fundamental para las tareas de gestión de la contaminación.

Los polutogramas presentan una serie de parámetros característicos a partir de los cuales se puede proceder a su definición y representación. Dichos parámetros vienen recogidos en la siguiente figura.

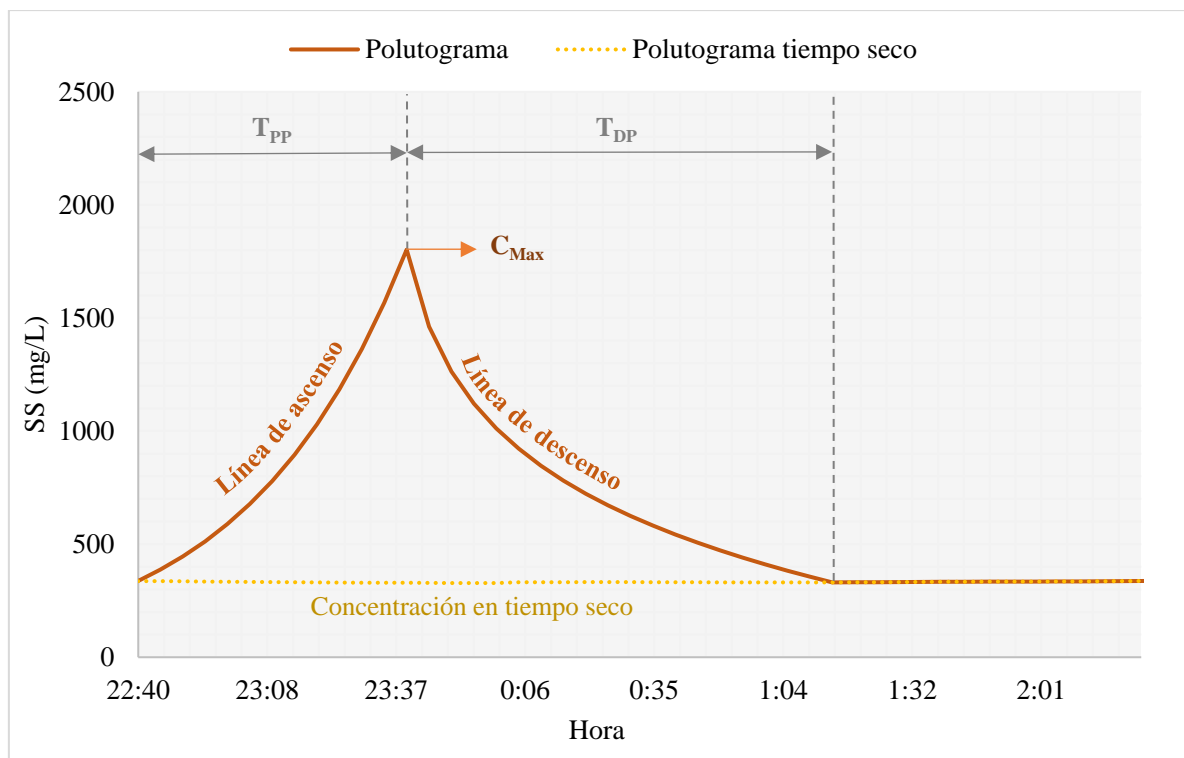


Figura 8-1. Principales parámetros de un polutograma de diseño

Por lo tanto, si se consigue definir y ajustar la medida de estas características para un determinado evento de lluvia se podrá representar y obtener el polutograma asociado al mismo.

Para realizar este ajuste en las cuencas de estudio S1 y San Félix se han empleado los datos de los episodios analizados en apartados anteriores (10 eventos en la cuenca S1 y 9 en la San Félix) con el objetivo de obtener un polutograma patrón que sirva para calcular la concentración para cualquier lluvia dada. Este polutograma patrón presenta las siguientes características:

- **Duración**

Es la misma que la del hidrograma del suceso analizado.

- **Concentración máxima**

Se calcula con el empleo de los índices de predicción definidos en el apartado 7.3.3 (ecuaciones 7.9 y 7.10). Para ello es necesario tener información de las características de la cuenca (área, pendiente media y longitud del cauce principal), de la precipitación total y de periodo seco precedente al suceso.

- **Tiempo al pico del polutograma ( $T_{PP}$ )**

Al igual que para la concentración máxima, para su cálculo se emplean los índices de predicción del apartado 7.3.3 (ecuaciones 7.11, 7.12 y 7.13). Por lo tanto, es necesario conocer el tiempo al pico del hidrograma, el tiempo de concentración de la cuenca y la precipitación total del suceso.

- **Línea de ascenso del polutograma**

Definida mediante las concentraciones de contaminante registradas desde el inicio del episodio hasta el instante de concentración máxima, es decir, mediante las concentraciones durante el tiempo al pico del polutograma. Para su cálculo se sigue el siguiente proceso:

- Se divide el tiempo al pico en intervalos de tiempo iguales (5 minutos).
- Se supone como concentración inicial del suceso la concentración en tiempo seco para la hora de comienzo del episodio.
- Se ajusta la línea de ascenso a una ecuación exponencial con la siguiente forma:

$$C(\text{mg} / \text{l}) = a \cdot b^x = C_{\text{inicial}} \cdot \left[ \left( \frac{C_{\text{Max}}}{C_{\text{inicial}}} \right)^{\frac{1}{N_a}} \right]^n \quad (8.1)$$

Donde  $C_{\text{inicial}}$  es la concentración en tiempo seco para la hora de inicio del polutograma (mg/l),  $C_{\text{Max}}$  es la concentración máxima del suceso (mg/l),  $N_a$  es el número total de intervalos de ascenso y  $n$  el intervalo para el que se está calculando la concentración ( $0 < n < N_a$ ).



• **Tiempo de descenso del polutograma ( $T_{DP}$ )**

Corresponde al intervalo de tiempo comprendido entre el instante de concentración máxima hasta el momento en el que la concentración alcanza valores de 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. Estos ajustes son los siguientes:

$$\begin{aligned} S1 &\rightarrow T_{DP} = 3.5 \cdot T_{PP} - 125 \\ San\ Félix &\rightarrow T_{DP} = 4.24 \cdot T_{PP} - 40 \end{aligned} \quad (8.2)$$

Donde  $T_{DP}$  es el tiempo de descenso del polutograma (min) y  $T_{PP}$  es el tiempo al pico del mismo (min).

Para ajustar estos coeficientes se han seguido dos tipos de comprobaciones. Por un lado, se ha verificado visualmente que para cada suceso coincide el  $T_{DP}$  con la intersección entre el polutograma real y el polutograma en tiempo seco. Por otro lado, estas ecuaciones se han calculado de modo que se minimice la diferencia entre la concentración media real del suceso y la concentración media obtenida con el polutograma de diseño. De esta manera se obtienen unos errores relativos medios del 12.9% para la cuenca S1 y del 14% para la cuenca San Félix.

Es necesario puntualizar que el ajuste de la concentración media del episodio resulta una tarea complicada. Dada la naturaleza de las medidas de turbidez (a partir de las cuales obtenemos las concentraciones de sólidos en suspensión), los valores de concentración que estas arrojan en el intervalo de tiempo posterior al  $T_{DP}$  son difíciles de predecir. Tras dicho intervalo existen episodios en los que la turbidez muestra valores inferiores a los propios del tiempo seco (efecto de dilución del agua residual por el agua de lluvia, ver figura 8-2 y 8-3), a la vez que sucesos en los que la turbidez presenta medidas superiores a las propias de tiempo seco (figura 8-4 y 8-5). Es por este motivo por el que se ha decidido ajustar lo más perfectamente la subida y bajada del polutograma mediante las ya citadas líneas de ascenso y descenso, mientras que en las horas del suceso posteriores al  $T_{DP}$  se ha optado por suponer que los sólidos en suspensión siguen las concentraciones típicas del tiempo seco.

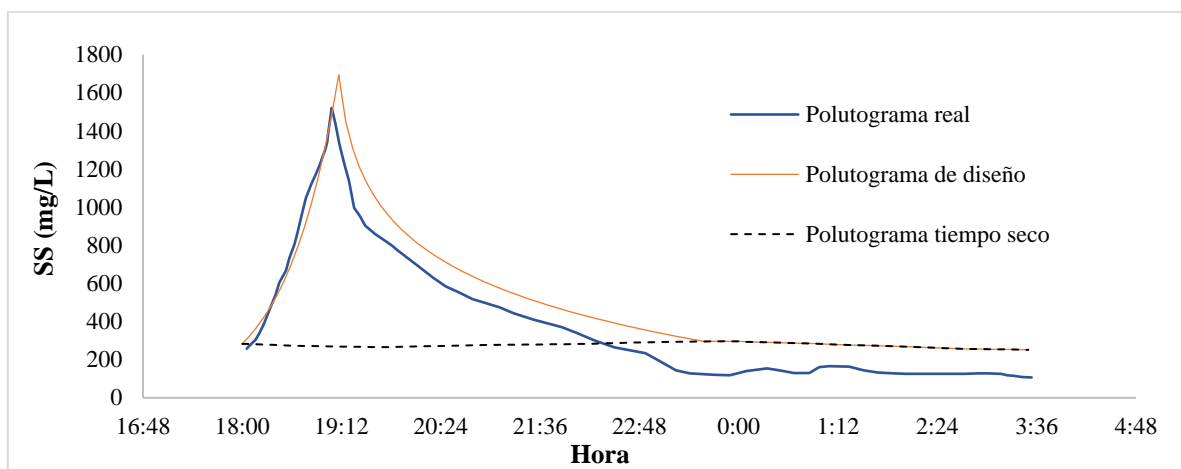


Figura 8-2. Polutograma episodio SF\_1 y polutograma de diseño

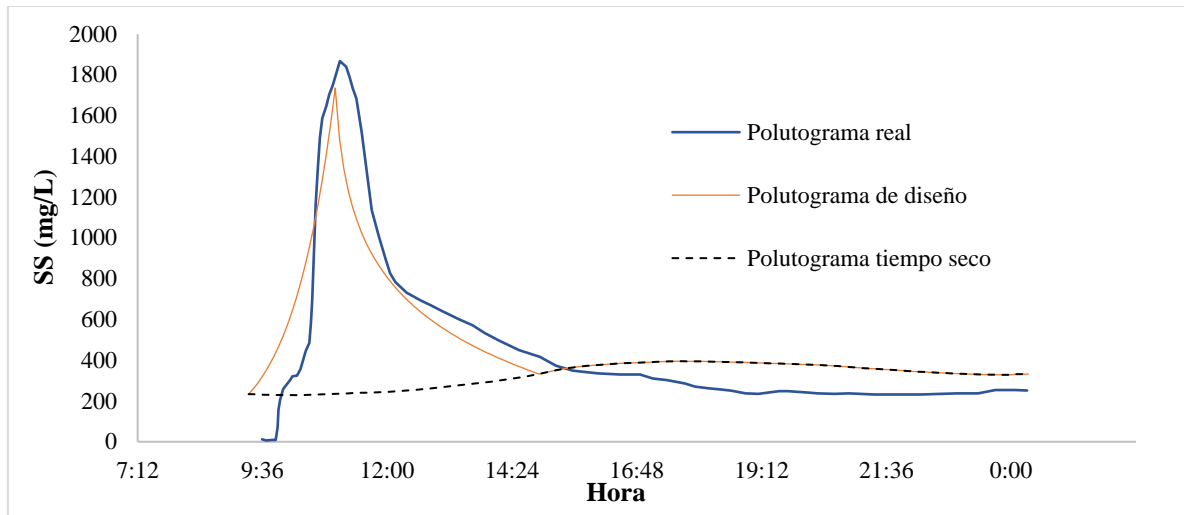


Figura 8-3. Polutograma episodio SI\_5 y polutograma de diseño

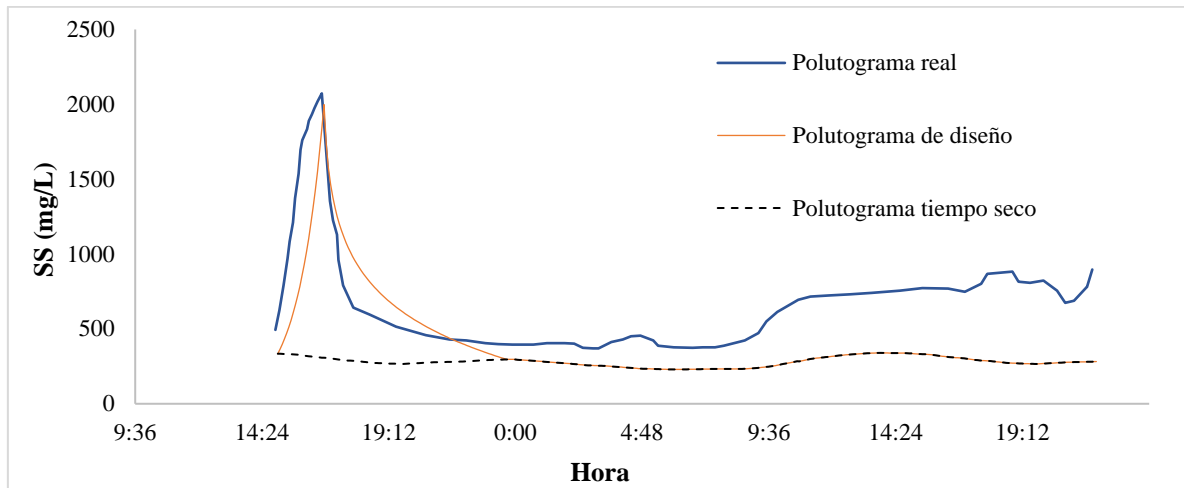


Figura 8-4. Polutograma episodio SF\_2 y polutograma de diseño

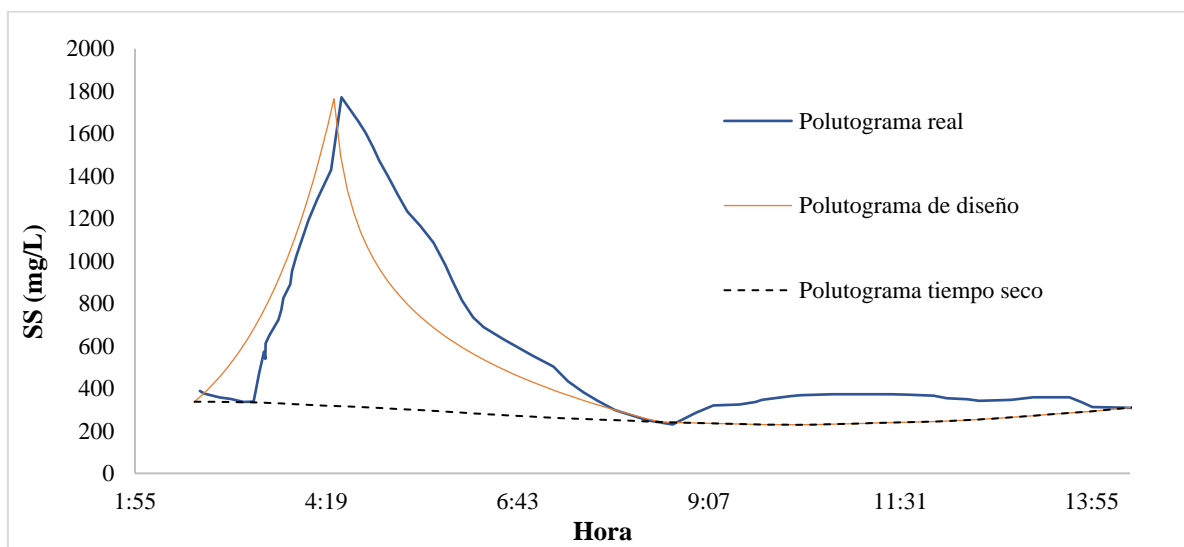


Figura 8-5. Polutograma episodio SI\_8 y polutograma de diseño

• **Línea de descenso del polutograma**

Correspondiente a las concentraciones de contaminante registradas desde el instante de concentración máxima hasta el intervalo de tiempo correspondiente al  $T_{DP}$ . Su construcción se divide en los siguientes pasos:

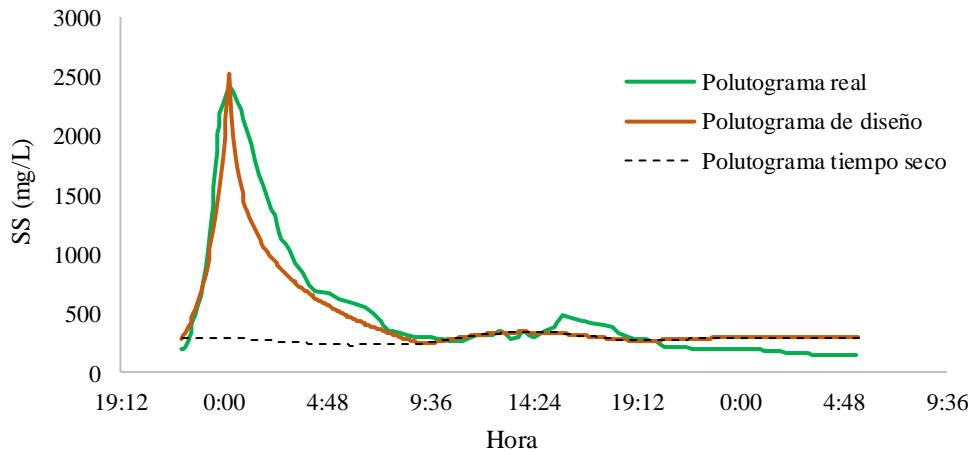
- Se divide el tiempo de descenso en intervalos de tiempo iguales (5 minutos).
- Se ajusta la línea de descenso que une la concentración máxima con la concentración en tiempo seco correspondiente al  $T_{DP}$  (medido desde el instante de  $C_{Max}$ ). Para este ajuste se emplea una ecuación logarítmica:

$$C(mg / l) = a \cdot \ln(x) + b = \left( \frac{C_{TS} - C_{Max}}{\ln(N_d + 1)} \right) \cdot \ln(n + 1) + C_{Max} \quad (8.3)$$

Donde  $C_{TS}$  es la concentración en tiempo seco correspondiente al  $T_{DP}$  (mg/l),  $C_{Max}$  es la concentración máxima del suceso (mg/l),  $N_d$  es el número total de intervalos de descenso y  $n$  el intervalo para el que se está calculando la concentración ( $1 < n < N_d$ ).

Todo este proceso de cálculo se refleja en la figura 8-7. A modo de ejemplo se presentan a continuación uno de los episodios empleados para el ajuste del polutograma de diseño. En el Anejo 2 se muestra el ajuste para el conjunto de eventos estudiados.

**Episodio: SF\_5**



Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	56.5	Índice TPP	1.096	TPP (min)	132.82
P. seco (días)	19	Índice CMAX	2.032	CMAX (mg/l)	2424.94
TPH (min)	95	TPP (min)	135.6	CMS (mg/l)	645.6
		CMAX (mg/l)	2520.07		
		CMS (mg/l)	546.90		

Figura 8-6. Ejemplo ficha resumen ajuste polutogramas (Anejo II)

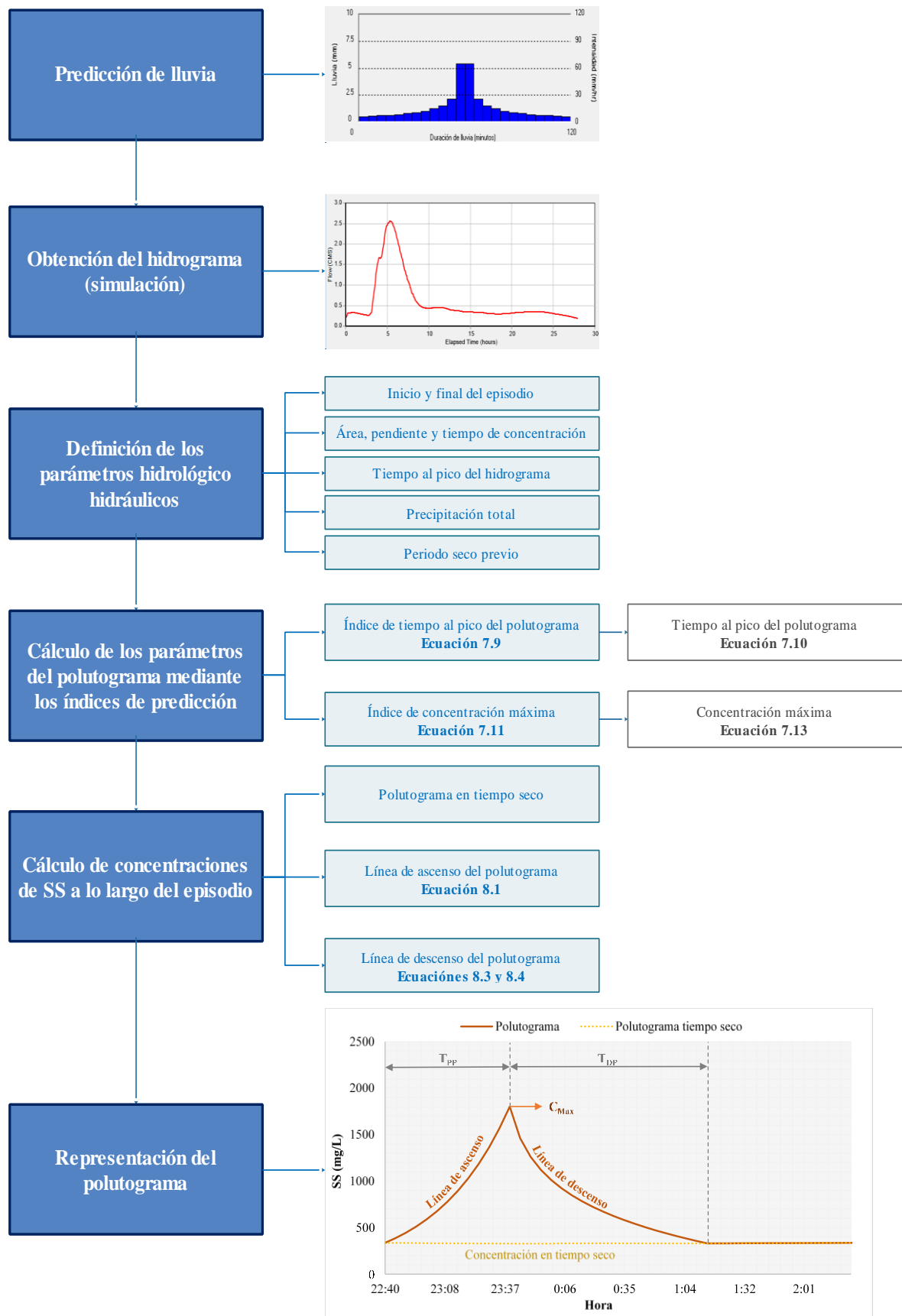


Figura 8-7. Metodología para la elaboración de polutogramas a partir de parámetros hidrológico-hidráulicos

### 8.1.2. Cálculo y análisis de polutogramas de diseño para distintos periodos de retorno

Una vez obtenidas las relaciones de predicción de los principales parámetros que definen un polutograma se puede proceder a su cálculo para cualquier episodio dado mediante sus datos de precipitación, periodo seco precedente y los parámetros hidráulicos medibles gracias a la simulación numérica del suceso.

Con el objetivo de estudiar la movilización de contaminación en diferentes situaciones, se han utilizado los hietogramas de diseño, empleando para su cálculo la formulación mostrada por la Dirección General de Carreteras e implementada en el software *Bloques SWMM*. Dicho programa se encarga de la generación de lluvias de diseño mediante la distribución de bloques alternos, permitiendo la exportación directa de los resultados a SWMM 5.0.

Para el cálculo de las distribuciones de los hietogramas se emplea la formulación expuesta en la *Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial*, resumida en la siguiente expresión:

$$I(mm/h) = \frac{P_{24(T)}}{24} \cdot FR \left( \frac{28^{0.1} - D_{(h)}^{0.1}}{28^{0.1} - 1} \right) \quad (8.4)$$

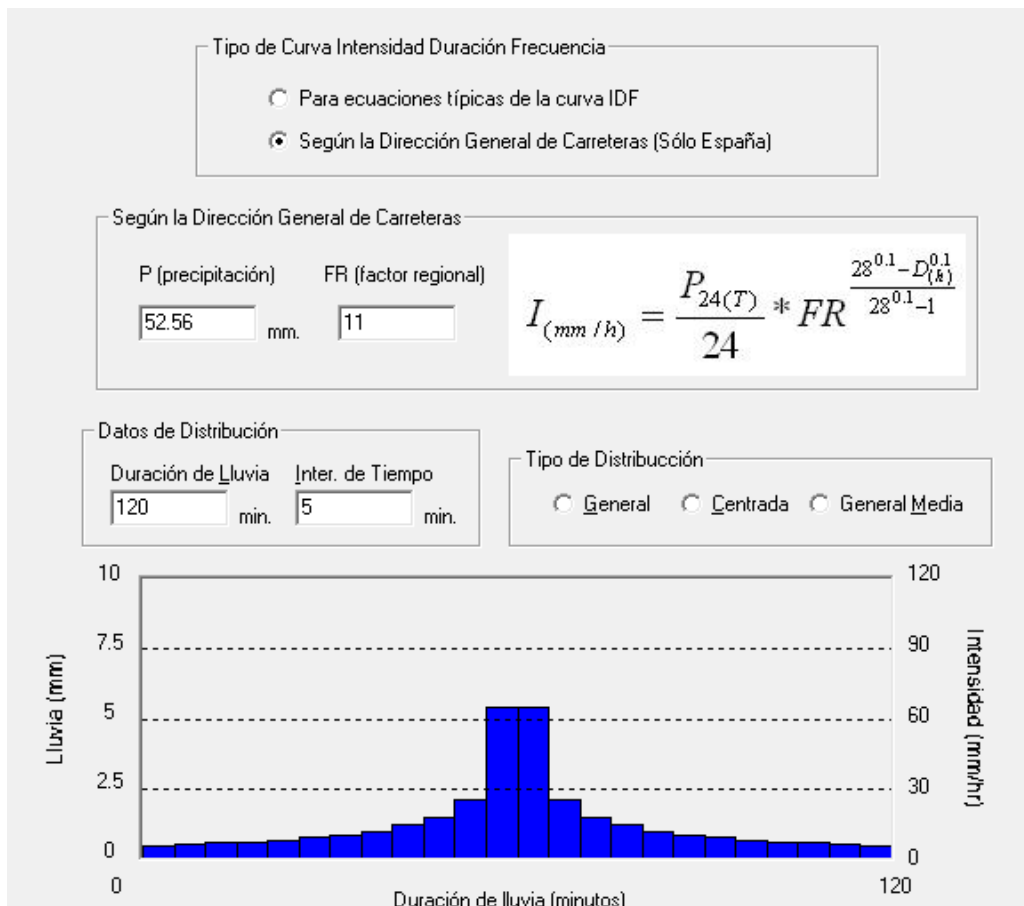


Figura 8-8. Cálculo de una lluvia de diseño mediante el software *Bloques SWMM*

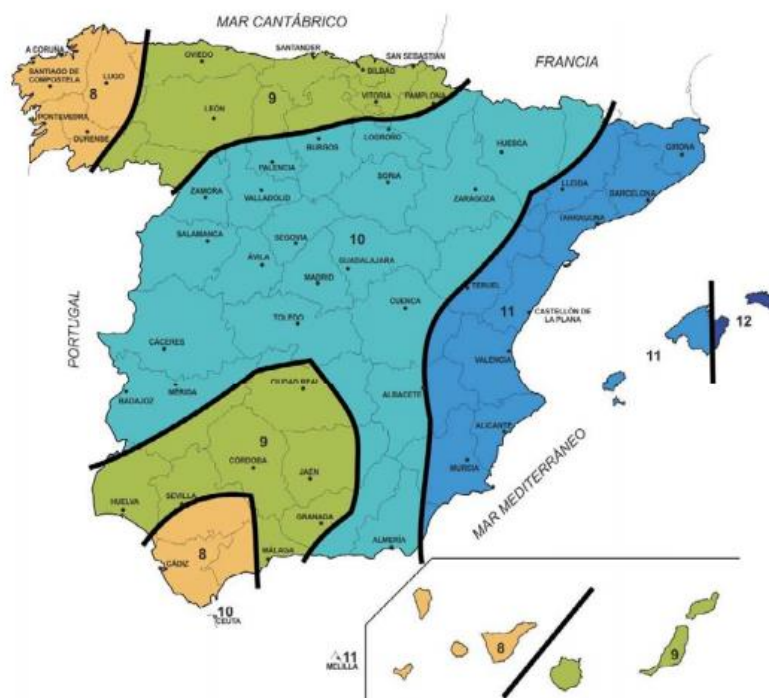
Donde:

- **P<sub>24(T)</sub>**: precipitación diaria para un periodo de retorno dado. A continuación, se muestran los valores adoptados de este parámetro en el caso de estudio obtenidos del análisis de la distribución de probabilidad de una serie histórica de precipitaciones máximas anuales.

*Tabla 8-1. Precipitaciones diarias máximas para distintos periodos de retorno en Murcia*

Periodo de retorno (años)	Precipitación máxima diaria (mm/día)
0.25	12.10
0.33	15.44
0.5	20.50
1	25.77
1.5	43.64
2	54.19
3	66.47
7	88.61
10	94.77

- **FR**: factor regional. Este parámetro es el resultado del cociente entre la intensidad horaria y la intensidad media diaria, y depende de la ubicación geográfica. Se puede obtener gráficamente mediante la localización del punto de estudio en el siguiente mapa peninsular. En el caso de Murcia, sería un FR=11.



*Figura 8-9. Factor regional según localización geográfica*

- **$D_{(h)}$** : duración de la tormenta en horas. En el presente trabajo se han calculado las lluvias de diseño teniendo en cuenta una duración de 2 horas.
- **Tipo de distribución**: se ha optado por hietogramas centrados.

En las siguientes figuras se muestran a modo de ejemplo los resultados del cálculo de los hietogramas de diseño y de las simulaciones de dichas lluvias en el modelo de la red de Murcia.

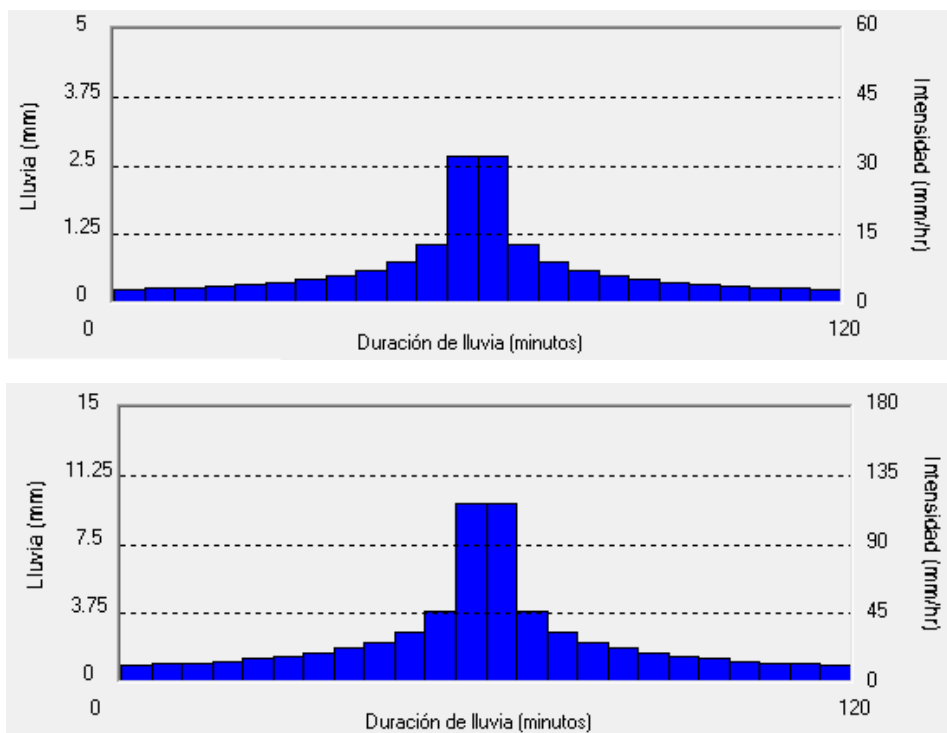


Figura 8-10. Hietogramas de diseño para periodos de retorno de 1 (arriba) y 10 (abajo) años.

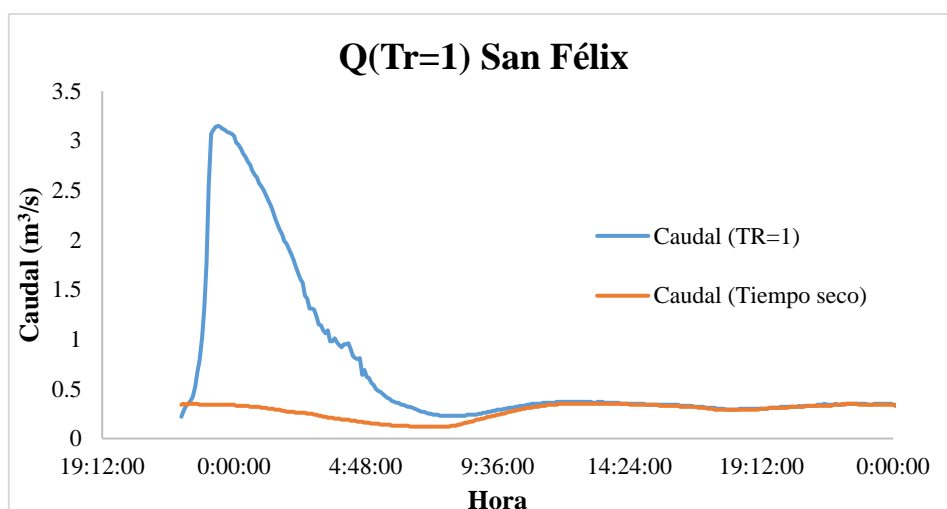


Figura 8-11. Hidrograma para TR=1 en el punto de análisis de la cuenca San Félix

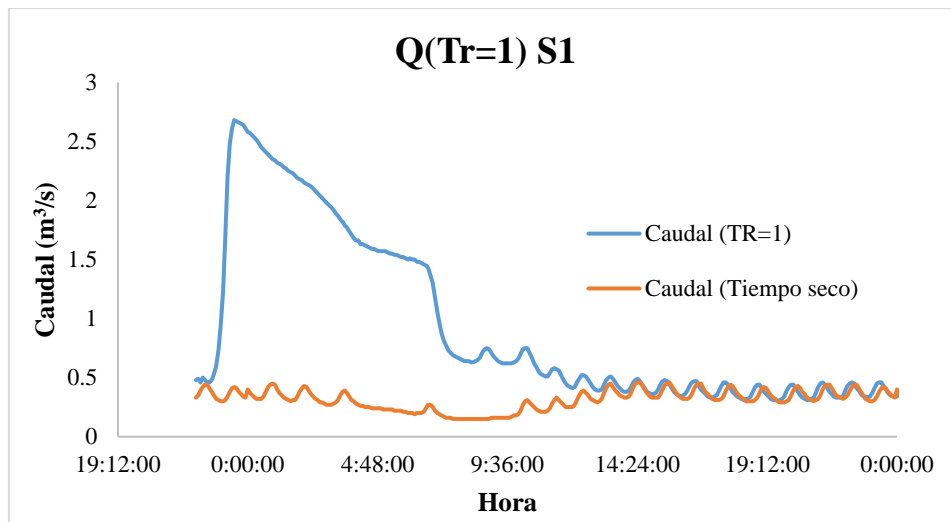
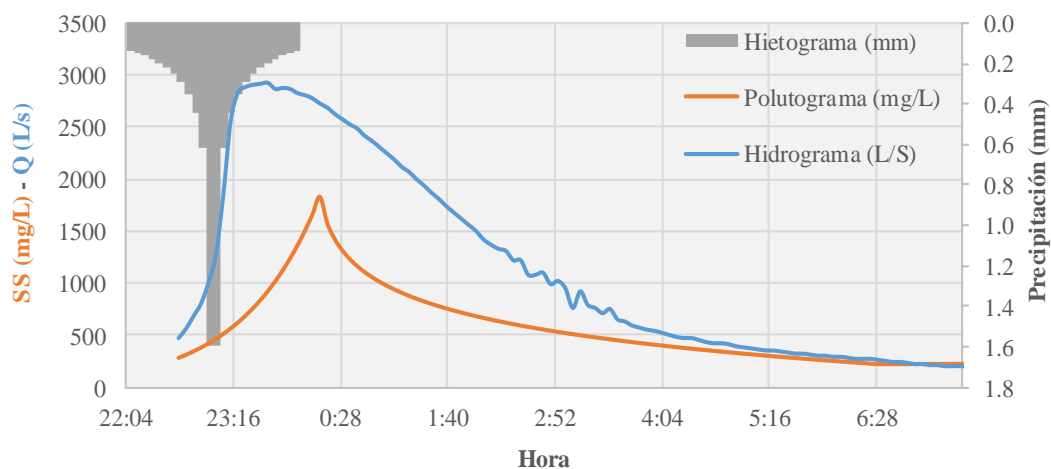


Figura 8-12. Hidrograma para TR=1 en el punto de análisis de la cuenca S1

La información de estos episodios de diseño se muestra más detalladamente en el Anejo 3.

**Cuenca San Félix - Tr=0.33 años**



Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	9.18	Índice TPP	0.996	TPP (min)	98.06
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.196	CMAX (mg/l)	1833.88
TPH (min)	60			CMS (mg/l)	848.9
				Volumen (m <sup>3</sup> )	36957.00
				QMAX (l/s)	2930
				QMED (l/s)	1155.70

Figura 8-13. Ejemplo ficha resumen de polutogramas de diseño (Anejo III)



Con el propósito de analizar el comportamiento de las cuencas de estudio en cuanto a movilización de contaminación para lluvias de diseño con distintos periodos de retorno se muestran a continuación una serie de gráficos resumen. Dichos gráficos recogen los siguientes datos para el conjunto de periodos de retorno analizados:

- **Volumen:** se muestra tanto el volumen total, como el volumen correspondiente al 30% y 60% del total.
- **Masa de sólido en suspensión:** se presenta, al igual que en el caso del volumen, la masa total, el 30% y el 60% de la misma. Asimismo, se presenta el porcentaje de masa correspondiente al 30% y al 60% del volumen.

• **Cuenca S1**

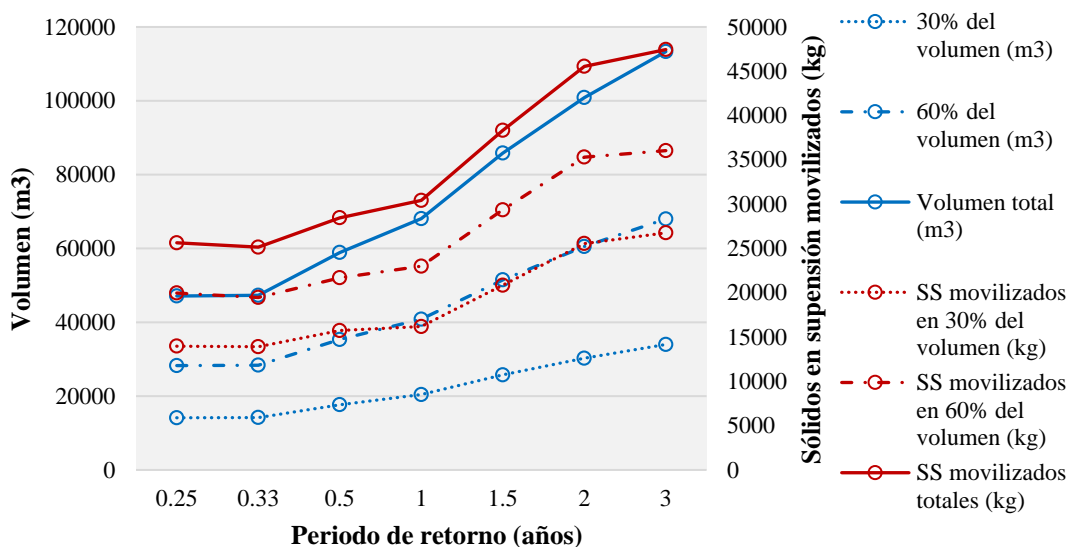
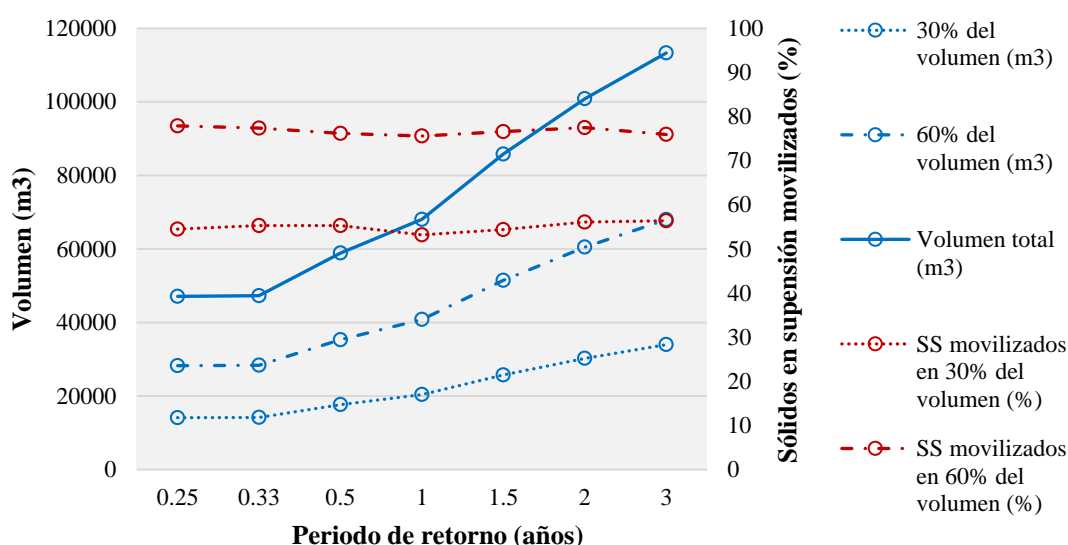


Figura 8-14. Gráficas de análisis de distintos periodos de retorno para la cuenca S1

• Cuenca San Félix

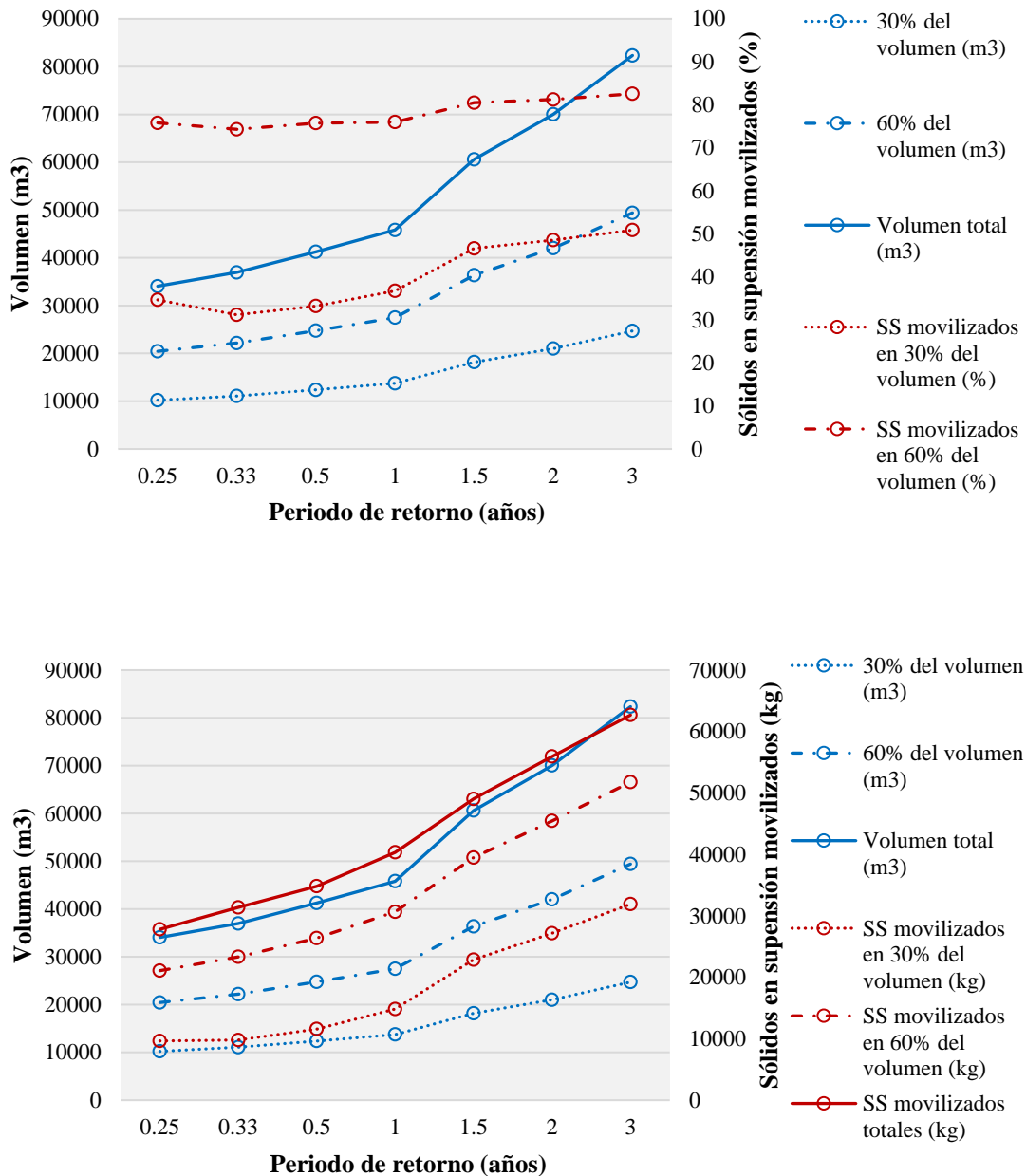


Figura 8-15. Gráficas de análisis de distintos periodos de retorno para la cuenca San Félix

La representación conjunta de las distintas variables características asociadas a los episodios lluviosos de diferente periodo de retorno puede ser una herramienta útil a la hora de caracterizar el comportamiento de la cuenca ante la movilización de contaminación. De este modo existe la posibilidad de analizar de manera gráfica tanto los valores absolutos como las tendencias que siguen los caudales y los sólidos en suspensión asociados a estos.

## 8.2. ÁBACOS DE MOVILIZACIÓN DE MASA

La capacidad de predecir y obtener los polutogramas asociados a una lluvia dada puede convertirse en una herramienta muy útil en las labores de gestión y operación de un sistema de saneamiento.

Mediante la combinación de una predicción de lluvia, su simulación en el modelo numérico de la red y el empleo de los índices de predicción de contaminación pueden obtenerse los flujos de masa de sólidos en suspensión que están recorriendo los puntos de análisis en cada instante del suceso lluvioso, de modo que para un momento dado se puede conocer los kilogramos que han sido evacuados, la masa que queda por pasar o el porcentaje sobre el total de masa que ha sido conducida en dicho punto.

En este apartado se han empleado las lluvias de diseño analizadas en el punto anterior y sus correspondientes polutogramas asociados con el objetivo de crear unos ábacos de movilización de masa que sirvan de ayuda en la gestión de las aguas pluviales durante una tormenta.

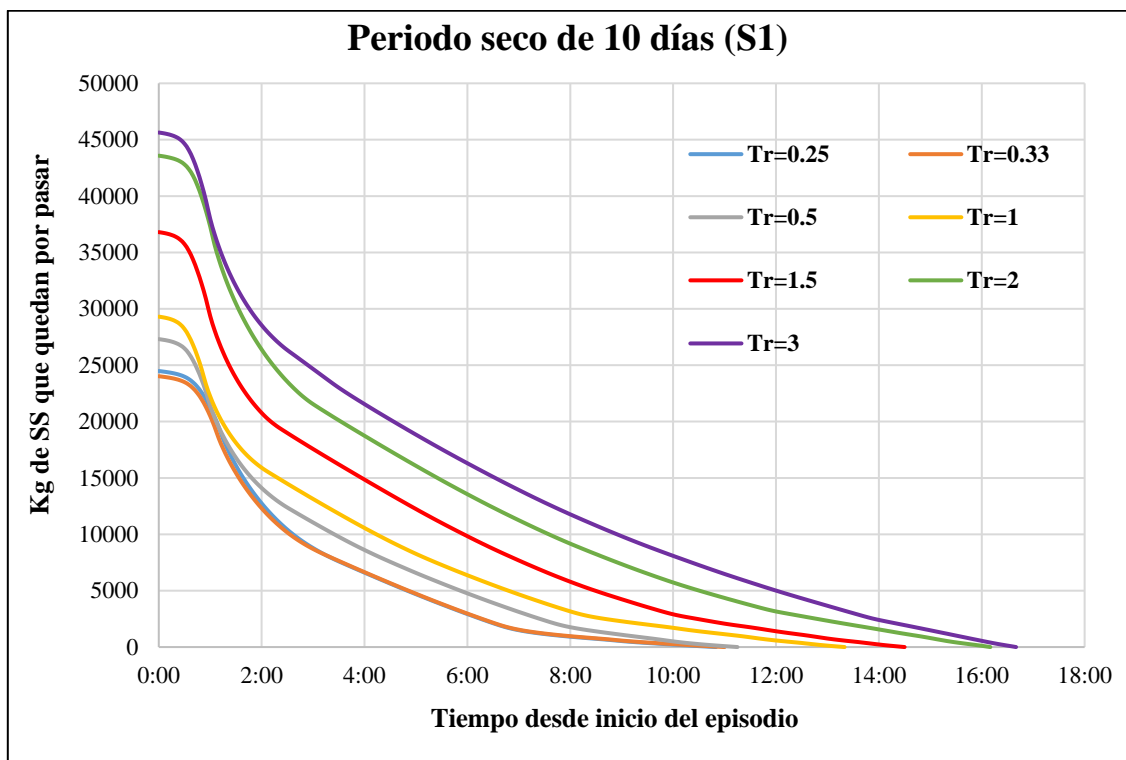


Figura 8-16. Ábaco de movilización de masas para un periodo seco de 10 días en la cuenca S1

En dichos ábacos se representa en el eje de abscisas el tiempo transcurrido desde el inicio del episodio y en el eje de ordenadas los kg de masa de sólidos en suspensión que quedan por pasar por los puntos de análisis. De este modo puede conocerse para cada instante del suceso la masa movilizada y la masa que queda por movilizar.

La lectura de estos ábacos es la siguiente:

- Desde abscisas: los kilogramos que, por ejemplo, quedan por pasar trascurridas 2 horas desde el inicio de una lluvia de 1.5 años de periodo de retorno son 20000 kg.
- Desde ordenadas: se entra con un valor de masa que queda por movilizar, por ejemplo 10000 kg, y se obtiene el instante del episodio para un determinado periodo de retorno (4 horas en el caso de una lluvia de 1 año de periodo de retorno).

Puesto que en el cálculo de un polutograma de diseño están involucradas diferentes variables tanto hidrológicas como hidráulicas, se han definido dos tipos de ábacos:

- **Ábacos de movilización de masas para un determinado periodo seco precedente.** En estos gráficos se representa la movilización de masa para un periodo seco dado y precipitaciones con distinto periodo de retorno.

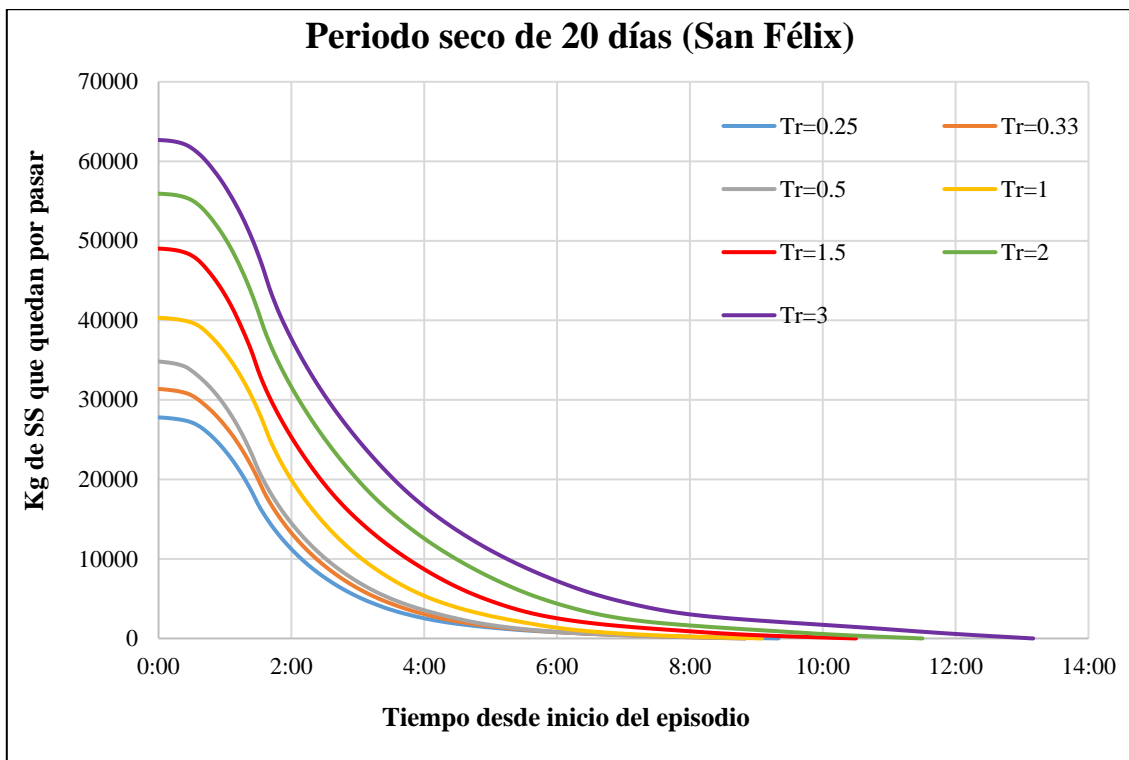
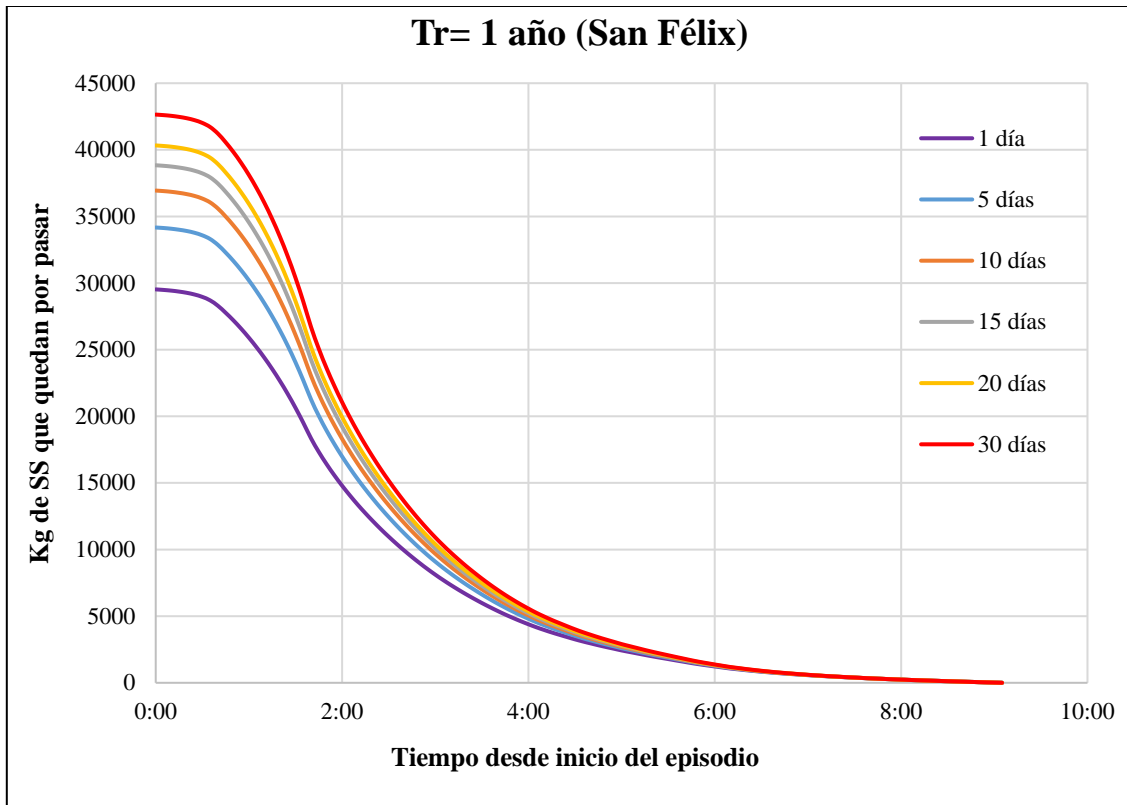


Figura 8-17. Ábaco de movilización de masas para un periodo seco de 20 días en la cuenca San Félix

- **Ábacos de movilización de masas para una determinada lluvia.** En estos gráficos se representa la movilización de masa para un episodio con un determinado periodo de retorno y distintos periodos secos previos a la tormenta.



*Figura 8-18. Ábaco de movilización de masas para una lluvia de periodo de retorno 1 año en la cuenca San Félix*



# CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES

## ÍNDICE CAPÍTULO 9

<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>9-1</b>
9.1.	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO .....	9-1
9.2.	DESARROLLOS FUTUROS .....	9-2





## 9. CONCLUSIONES

### 9.1. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

#### ✓ Sobre la problemática asociada a las DSUs

En la actualidad, uno de los principales objetivos de la gestión y explotación de las redes de saneamiento es la protección ambiental del medio receptor. En este contexto, numerosas investigaciones remarcan el importante impacto que las DSUs generan en las masas de agua. Este hecho puede provocar la pérdida en cierta parte de los logros alcanzados gracias al elevado grado de depuración (especialmente en la zona del sureste español) de las aguas residuales.

#### ✓ Sobre las relaciones entre la turbidez y los parámetros contaminantes

Como se ha comentado, la evaluación de las cargas contaminantes mediante la toma de muestras en campo y su posterior análisis en laboratorio resulta una técnica poco efectiva cuando se quieren adoptar estrategias y herramientas de gestión en tiempo real de los flujos de contaminación.

En este sentido, son numerosos los estudios que han establecido relaciones entre la turbidez, fácil y económicamente medible en un punto de la red, con las concentraciones de diferentes contaminantes.

Como se ha demostrado, el empleo de este tipo de correlaciones muestra un enorme potencial para su empleo en labores de gestión y operación en la red, pues permite monitorizar en tiempo real los contaminantes circulantes.

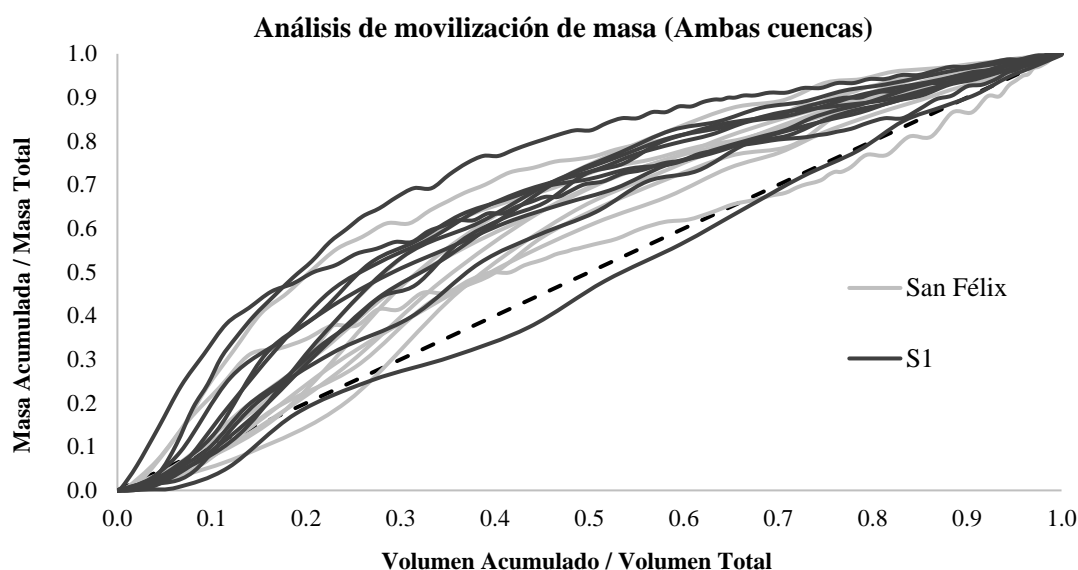
#### ✓ Sobre la caracterización de los flujos

En el caso de las cuencas S1 y San Félix se han obtenido importantes masas de contaminación (sólidos en suspensión) asociadas a las aguas pluviales durante los sucesos de lluvia.

Las concentraciones medias de SS en tiempo de lluvia alcanzan valores de 540 mg/l en la cuenca S1 y 740 mg/l en el caso de la cuenca San Félix. Comparando ambos valores con los obtenidos en tiempo seco, 316 mg/l y 278 mg/l para las cuencas S1 y San Félix respectivamente, puede observarse la enorme influencia que el fenómeno de lavado tiene en la movilización de contaminación.

Debido a este efecto de arrastre de contaminantes, se puede llegar a concentraciones máximas superiores a 2000 mg/l de sólidos en suspensión, lo que supone factores puntas mayores a 6.

En cuanto al análisis del efecto de primer lavador, a excepción del episodio S1\_2 (con un coeficiente  $b=1.1$ ), todos los sucesos estudiados muestran un significativo efecto *first flush* de acuerdo a las definiciones de este fenómeno proporcionadas por la actividad científica, tal y como se puede observar en la siguiente figura.



*Figura 9-1. Distribución de las curvas  $M(V)$  relativas a los sólidos en suspensión para los episodios analizados en ambas cuencas*

✓ **Sobre la elaboración de índices de predicción y polutogramas de diseño**

Una de las principales ventajas de tener información en continuo de las concentraciones de contaminantes que transporta la red es la posibilidad de ajustar el comportamiento de los polutogramas en función de diversas variables de entrada.

Mediante ajuste multiparamétricos alimentados con variables hidrológico-hidráulicas fácilmente adquiribles se han elaborado dos índices de predicción. Gracias a dichos índices se presenta una metodología capaz de predecir el comportamiento de los SS a lo largo de cualquier episodio lluvioso. Estas relaciones pueden llegar a ser una herramienta muy útil en las labores de gestión y operación de la red, pudiendo servir de ayuda en la reducción del impacto de los vertidos a los medios receptores.

En base a este objetivo, se han elaborado un conjunto de ábacos capaces de predecir la masa de sólidos en suspensión que quedan por pasar por cada sección de estudio a lo largo de tormentas obtenidas por medio de lluvias de diseño para distintos periodos de retorno.

**9.2. DESARROLLOS FUTUROS**

- Para este trabajo se han empleado las ecuaciones de relación de parámetros ajustadas para una cuenca de Santiago de Compostela. Un aspecto importante a desarrollar en futuros trabajos es la calibración y validación de estas expresiones para las cuencas de estudio de la ciudad de Murcia, pues la aplicación de las funciones de correlación debe de ser ajustada para cada zona de estudio.
- Este trabajo se ha centrado en dos puntos de la red de saneamiento de la ciudad de Murcia. Dichos puntos recogen las aguas procedentes de cuencas muy extensas. Futuros trabajos deberán centrarse en extender este estudio a distintos puntos de la red con el objetivo de caracterizar el fenómeno en cuencas más reducidas y de tener más información en distintas zonas de vertido.

- Los polutogramas de diseño de este estudio se han calculado por medio de las relaciones establecidas entre la turbidez y los SS. Para mejorar y facilitar en mayor grado las labores de predicción es necesario la calibración mediante el software SWMM 5.0 de las curvas de contaminación. De este modo, no se dispondrá únicamente de un modelo hidráulico de la red, sino que podrá convertirse en una verdadera herramienta de predicción del comportamiento de la red en el sentido hidrológico, hidráulico y de contaminación.
- Los índices de predicción y polutogramas de diseño se han obtenido en base a un total de 19 sucesos lluviosos. En futuros trabajos deberá profundizarse en estas ecuaciones con el objetivo de mejorar y validar el ajuste.



# BIBLIOGRAFÍA



## BIBLIOGRAFÍA

- ABELLÁN, A. (2016). Los impactos de la urbanización en el ciclo del agua. 11/5/2016, de iAgua Sitio web: <http://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/impactos-urbanizacion-ciclo-agua>
- AEAS (2005). Incidencia de la Directiva Marco del Agua en la gestión de los servicios de agua urbana.
- ANTA, J., PUERTAS, J., SUÁREZ, J., DEL RÍO, H., HERNAEZ, D. (2012). Gestión de las aguas pluviales en ámbito urbano: Las técnicas de drenaje urbano sostenible. In *Río Mandeo, cuenca fluvial y desarrollo sostenible*. pp. 381-398.
- ASCE - WEF (1993). Design and construction of urban stormwater management systems. ASCE, Manuals and Reports of Engineering Practice No.77, WEF Manual of Practice FD-20. 723 págs.
- ATV-STANDARD A 128 (1992). Standards for the Dimensioning and Design of Stormwater Structures in Combined Sewers. Alemania; abril 1992.
- BARCO, J., PAPIRI, S., STENSTROM, M. K. (2008). First flush in a combined sewer system. *Chemosphere*, vol 71, no 5, pp. 827-833.
- BARRO, J. R., ORTEGA, L., SALAMERO, M., ESCALER, I. (2002). The Spanish National CSO Measurement Project (Promedsu) as a Base for Real Time Sewer Management Depending on Water Quality—Barcelona's Case. *Global Solutions for Urban Drainage* (pp. 1-12). ASCE.
- BENEYTO, M. (2004). Evaluación de los rendimientos de depósitos de detención-aliviadero en redes de saneamiento unitarias en cuencas de la España húmeda. Tesis Doctoral. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. Universidade da Coruña.
- 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.
- BERTRAND-KRAJEWSKI, J. L. (2004). TSS concentration in sewers estimated from turbidity measurements by means of linear regression accounting for uncertainties in both variables. *Water Science and Technology*, 50(11), 81-88.
- BERTRAND-KRAJEWSKI, J. L., CHEBBO, G., SAGET, A. (1998). Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Research*, 32(8), 2341-2356.
- BLOGPLASTICS (2013). ¿Redes unitarias o redes separativas en el saneamiento? Sitio web: <http://www.blogplastics.com/redes-unitarias-o-redes-separativas-en-el-saneamiento/>

- 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.
- BOE (2014). Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y declaración de vertido. BOE 268 (5 noviembre 2014): 90463-90532.
- BURTON, G. A, PITT, R. E. (2002). Stormwater Effects Handbook: A toolbox for watershed managers, scientists and engineers. Lewis Publishers, CRC Press Co., Florida. 929 págs.
- BUTLER, D., DAVIES, J. W (2004). Urban Drainage. Spon Press. 2ª edición, Londres. 542 págs.
- C.E.N. (1997). UNE EN - 752. Sistemas de desagüe y alcantarillado exteriores a edificios. Parte 2. Requisitos de Comportamiento. Comité Europeo de Normalización.
- CAGIAO, J. (2002). Estudio del funcionamiento hidráulico y de la movilización de la contaminación durante sucesos de lluvia en una cuenca unitaria y una separativa en el noroeste de España. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.
- CARROLL, S., LIU, A., DAWES, L., HARGREAVES, M., GOONETILLEKE, A. (2013). Role of land use and seasonal factors in water quality degradations. Water resources management, 27(9), 3433-3440.
- CRABTREE, R. W. (1989). Sediments in sewers. Journal of the Institution of Water and Environmental Management, No. 3, págs. 569-578.
- DE ASIAIN ALBERICH, M. L., EHRENFRIED, A., DEL REAL, P. P. (2007). El ciclo urbano del agua. Ide@ Sostenible, (16), 3.
- 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.
- DI MODUGNO, M., GIOIA, A., GORGOGNONE, A., IACOBELLIS, V., LA FORGIA, G., PICCINNI, A. F., RANIERI, E. (2015). Build-up/wash-off monitoring and assessment for sustainable management of first flush in an urban area. Sustainability, 7(5), 5050-5070.
- DIARIO OFICIAL DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (DOCE). 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y Del Consejo, de 22 de diciembre de 2000, Por La Que Se Establece Un Marco Comunitario de Actuación En El Ámbito de La Política de Aguas.



- FONDRIEST ENVIRONMENTAL, INC. (2014). Measuring Turbidity, TSS, and Water Clarity. Fundamentals of Environmental Measurements. Web. <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/equipment/measuring-water-quality/turbidity-sensors-meters-and-methods/>
- FONDRIEST ENVIRONMENTAL, INC. (2014). Turbidity, Total Suspended Solids and Water Clarity. Fundamentals of Environmental Measurements. Web. <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>
- GEIGER, W., (1987). Flushing effects in combined sewer systems. Proceedings of the 4th International Conference Urban Drainage, Lausanne, Switzerland, pp. 40–46.
- GISBERT, J. M., MORENO, H., IBANÉZ, S. (2011). Métodos para determinar el tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica. Departamento de Producción Vegeta. E.T.S.I.A. Universidad Politécnica de Valencia.
- GÓMEZ, M., PUERTAS, J., SUÁREZ, J. (2002). Programa PROMEDSU de medidas de vertidos desde redes de alcantarillado unitarias. El caso del río Llobregat en el entorno de Barcelona. Simposio luso-brasileño de ingeniería sanitaria y ambiental. Septiembre 2002.
- GÓMEZ, M., SÁNCHEZ, H., DOLZ, J., LÓPEZ, R., NANIA, L., CABRERA, E., PUERTAS, J. (2008). Curso de Hidrología Urbana. Flumen Research Institute. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- 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 Relationships for the First Flush Loads in Combined Sewer Flows. *Water Research*, Vol. 30, nº 5, págs. 1244-1252. ISBN 0043-1354/96.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, I.S.O (1999), *Water Quality-Determination of Turbidity, Method 7027*. 18 pp.
- JÄRVELÄINEN, J., SILLANPÄÄ, N., KOIVUSALO, H. (2015). Land-use based stormwater pollutant load estimation and monitoring system design. *Urban Water Journal*, 1-14.
- KAFI, M.; GASPERI, J.; MOILLERON, R.; GROMAIRE, M.C. y CHEBBO, G. (2008). Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in Paris. *Water Research* 42, págs. 539 – 549.
- KONRAD, C. P., BOOTH, D. B. (2005). Hydrologic changes in urban streams and their ecological significance. In *American Fisheries Society Symposium* (Vol. 47, pp. 157-177).

- MAGRAMA (2007). Plan Nacional de Calidad de las Aguas: saneamiento y depuración 2007-2015. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España.
- MAGRAMA (2014). Manual de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España.
- MALGRAT, P., SUNYER, D., RUSSO, B (2015). Las nuevas exigencias sobre las explotaciones de saneamiento derivadas de la aplicación del Real Decreto 1290/2012. IV Jornadas de Ingeniería del Agua. Córdoba (España). 21 y 22 de octubre de 2015.
- 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(20), 6836-6856.
- METCALF & EDDY (1995). Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento. Vertido y reutilización. Tercera edición. Volumen I. Madrid. España. ISBN: 9788448116071
- MINISTERIO DE FOMENTO (2016). Norma 5.2-I.C Drenaje Superficial. Boletín Oficial de Estado, 10 de marzo de 2016.
- MOMPARLER, S. P., ANDRÉS-DOMÉNECH, I. (2008). Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia”. *Revista Técnica de Medio Ambiente*. C&M Publicaciones, 124, 92-104.
- NAVIDI, W. (2006). Estadística para ingenieros y científicos. 1ª edición. McGrawHill. ISBN: 970-10-5629-9.
- O.P.U.R (2016). Observatoire des Polluants Urbains. Sitio web: <http://leesu.univ-paris-est.fr/opur/?lang=fr>
- O.T.V. (1994). Depolluer les eaux pluviales. Contribution a lélaboration dune stratégie. Lavoisier TEC & DOC, Francia, 350 págs, ISBN 2-87777-417-1.
- PARK, I., KIM, H., CHAE, S. K., HA, S. (2010). Probability mass first flush evaluation for combined sewer discharges. *Journal of Environmental Sciences*, 22(6), 915-922.
- PENG, H. Q., LIU, Y., WANG, H. W., GAO, X. L., MA, L. M. (2016). Event mean concentration and first flush effect from different drainage systems and functional areas during storms. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(6), 5390-5398.
- PUERTAS, J., SUÁREZ, J., ANTA, J. (2008). Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el Diseño de Sistemas de Saneamiento y Drenaje Urbano. CEDEX. Madrid: Ministerio de Fomento.

- QIN, H. P., HE, K. M., FU, G. (2016). Modeling middle and final flush effects of urban runoff pollution in an urbanizing catchment. *Journal of Hydrology*, 534, 638-647.
- QUIMICOTÉCNICA (2012). Unidades de turbidez, una cuestión nublada. Sitio web: <http://quimicotecnica.com/unidades-de-turbidez-o-turbiedad-una-cuestion-nublada/>.
- REITEC. Turbidez. Sitio web: <http://www.reitec.es/Pdf/agua05.pdf>
- RICCARDI, G. A. (1997). La transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos. Los procesos hidrológicos y el modelado. *Cuadernos del CURIHAM*, 4, 69-87.
- ROCA, J. (2015). Fundamentos y modelado de la contaminación movilizada por las redes de saneamiento unitarias en tiempo de lluvia con SWMM. Propuesta de un volumen de retención anti-descarga de un sistema unitario. Trabajo fin de máster. Universidad Politécnica de Cartagena.
- RUSSO, B., MALGRAT, P., SUÑER, D. (2006). Depósitos para retención de primera escorrentía. Criterios de diseño y operación. *Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*.
- SAGET, A., CHEBBO, G., BERTRAND-KRAJEWSKI, J. L. (1996). The first flush in sewer systems. *Water Science and Technology*, 33(9), 101-108.
- SÁNCHEZ, F. J. (2011). Hidrología superficial. Universidad de Salamanca (<http://hidrologia.usal.es>)
- SANSALONE, J. J., BUCHBERGER, S. G. (1997). Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 123, No. 2, págs 134-143.
- SARTOR, J.D., BOYD, G.B. (1972). Water pollution aspects of street surface contaminants. Office of research and monitoring, U.S. Environmental Protection Agency. NTIS. Washington D. C. 236 págs. EPA-R2-72-081.
- SECO, R. 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. Universidad Politécnica de Cataluña.
- STEIN, E. D., TIEFENTHALER, L. L., SCHIFF, K. C. (2008). Comparison of stormwater pollutant loading by land use type. *Southern California Coastal Water Research Project 2008 Annual Report*, 15-27.
- SUÁREZ, J., CAGIAO, J. (2005). Vertidos de sistemas de saneamiento unitario en tiempo de lluvia: control de impactos sobre los ríos. *Ingeniería y territorio*, (71), 44-55.

- SUÁREZ, 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., PUERTAS, J., CAGIAO, J., VÁZQUEZ, F. (2000). Contaminación aportada por medio de la red de pluviales a los medios acuáticos en sistemas de saneamiento separativo. XIII seminario internacional del CIRA y IV Taller internacional sobre gestión y tecnologías de suministro de agua potable y saneamiento ambiental. ISBN: 978-959-261-006-4
- TECNOAQUA (2014). Aqualogy elabora para el Magrama el manual nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta. Sitio web: <http://www.tecnoaqua.es/noticias/20141107/magrama-presentado-manual-diseño-tanques-tormentas#.V9-joyiLTIU>
- TÉMEZ, J. R., (1978). Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras, Madrid. p. 111.
- THOMAS, P.R., GREENER, G.R. (1993). Rainwater Quality from Different Roof Catchment. *Water Science & Technology*, Vol. 28, No. 3-5, págs. 291-299.
- THORNTON, R.C., SAUL, A.J., (1987). Temporal variation of pollutants in two combined sewer systems. In: *Proceedings of the 4th International Conference Urban Drainage*. Lausanne, Switzerland, pp. 51–52.
- TRAPOTE, A. (2014). Infraestructuras Hidráulico-Sanitarias II. Saneamiento y drenaje urbano. Universidad de Alicante.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Turbidity and water quality. Sitio web: <http://water.usgs.gov/edu/turbidity.html>
- U.S.-E.P.A. (1999). Preliminary data summary of urban stormwater best management practices. EPA 821-R-99-012. U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C. 216 págs.
- U.S.-E.P.A. (2005). SWMM, Modelo de gestión de aguas pluviales. Manual de Usuario. Traducido al español por GMMF (Grupo Multidisciplinar de modelización de fluido).
- WANG, S., HE, Q., AI, H., WANG, Z., ZHANG, Q. (2013). Pollutant concentrations and pollution loads in stormwater runoff from different land uses in Chongqing. *Journal of Environmental Sciences*, 25(3), 502-510.

# ANEJOS

## ÍNDICE ANEJOS

<i>ANEJO I. HIETOGRAMAS, HIDROGRAMAS, POLUTOGRAMAS Y CURVAS M(V) PARA LOS EPISODIOS ANALIZADOS.....</i>	<i>1</i>
<i>ANEJO II. EPISODIOS EMPLEADOS EN EL AJUSTE DE POLUTOGRAMAS DE DISEÑO .....</i>	<i>23</i>
<i>ANEJO III. POLUTOGRAMAS DE DISEÑO PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO .....</i>	<i>35</i>
<i>ANEJO IV. ÁBACOS DE MOVILIZACIÓN DE MASA PARA DISTINTAS LLUVIAS DE DISEÑO.....</i>	<i>45</i>



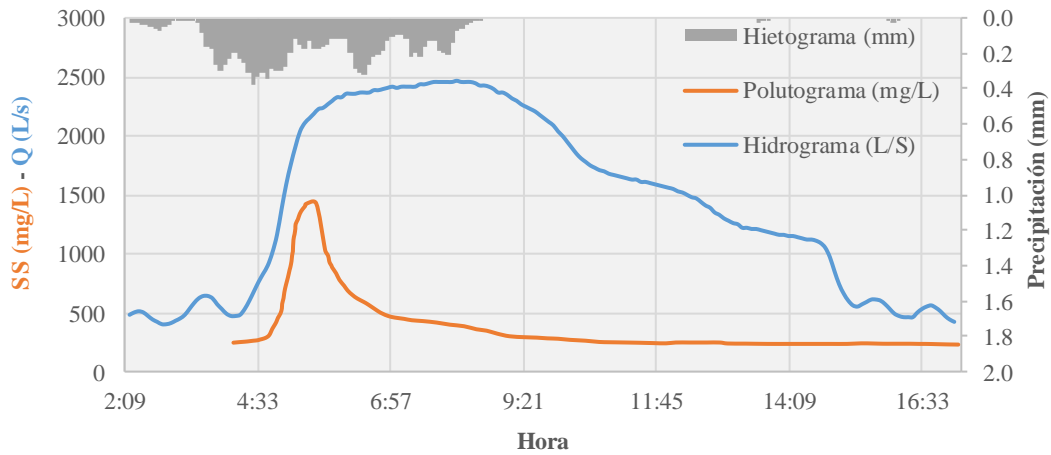
***ANEJO I. HIETOGRAMAS, HIDROGRAMAS,  
POLUTOGRAMAS Y CURVAS M(V) PARA LOS  
EPISODIOS ANALIZADOS***



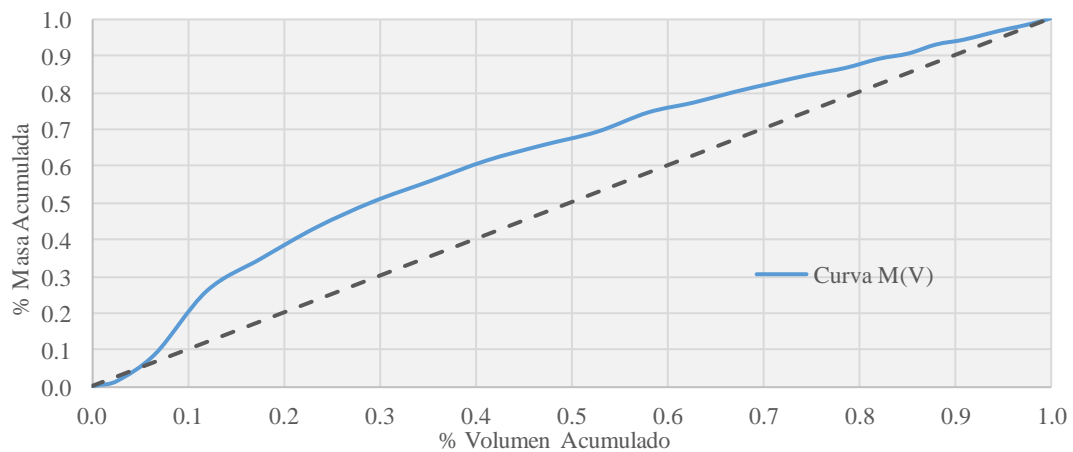


**Episodio: S1\_1**

**Hietograma, hidrograma y polutograma**



**Curva M(V)**

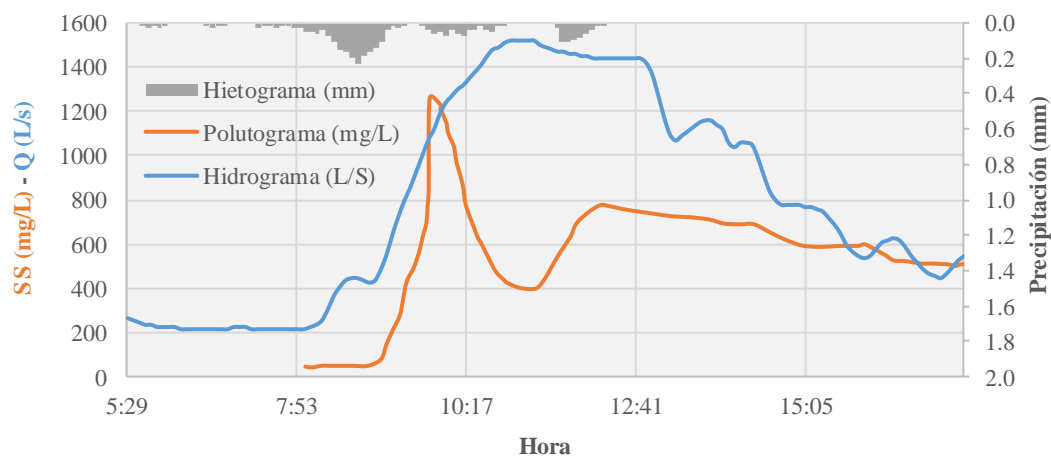


Episodio	S1_1
Cuenca	S1
Fecha Inicio	24-06-14 4:00
Fecha Final	24-06-14 17:10
Duración (h)	13.17
P. seco (días)	7

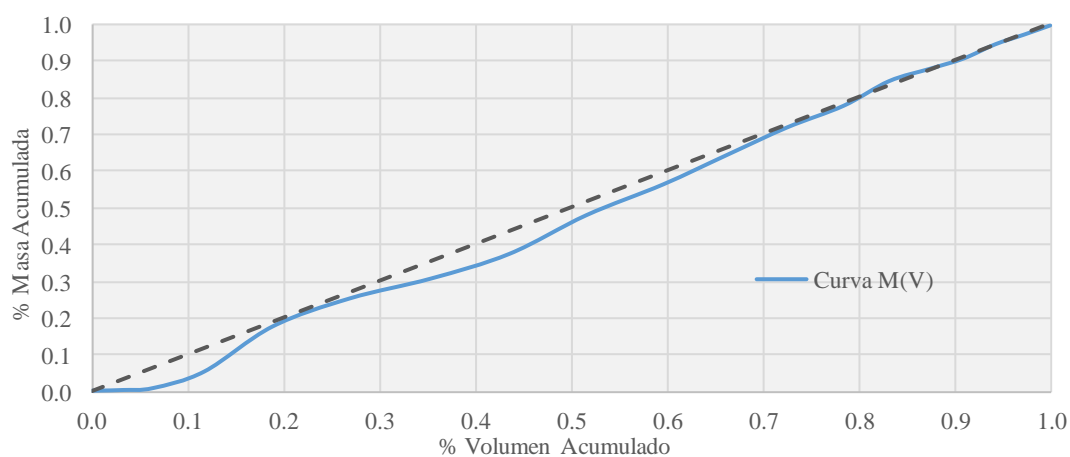
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	12.06	Vol.total (m3)	74292	SS tot.mov (kg)	30390.59
I.media (mm/h)	1.9	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	61317	CMS (mg/l)	409.07
I.10' máx (mm/h)	4.24	Q.medio (l/s)	1567.3	CMAX (mg/l)	1425.5
		Q.máx (l/s)	2360	T <sub>PP</sub> (min)	96.03
		T <sub>PH</sub> (min)	130		

## Episodio: S1\_2

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

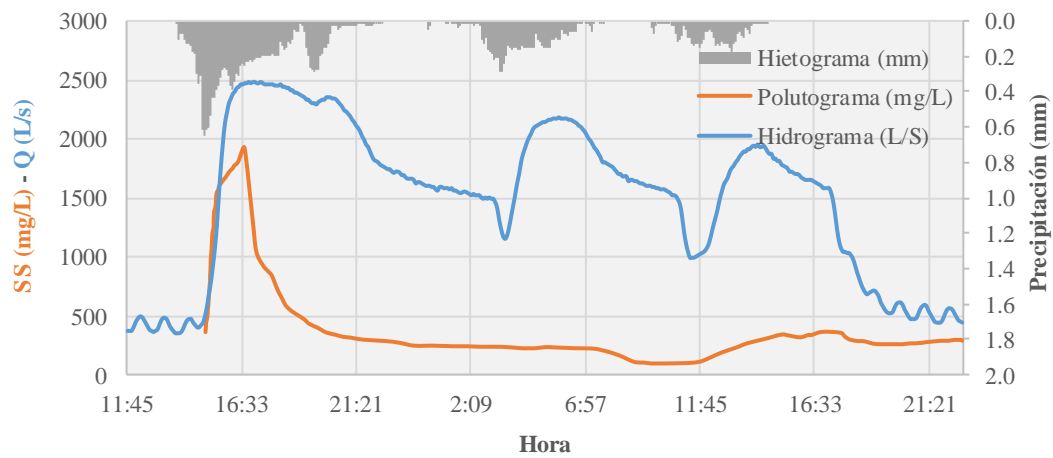


Episodio	S1_2
Cuenca	S1
Fecha Inicio	22-09-14 8:00
Fecha Final	22-09-14 17:20
Duración (h)	9.33
P. seco (días)	5

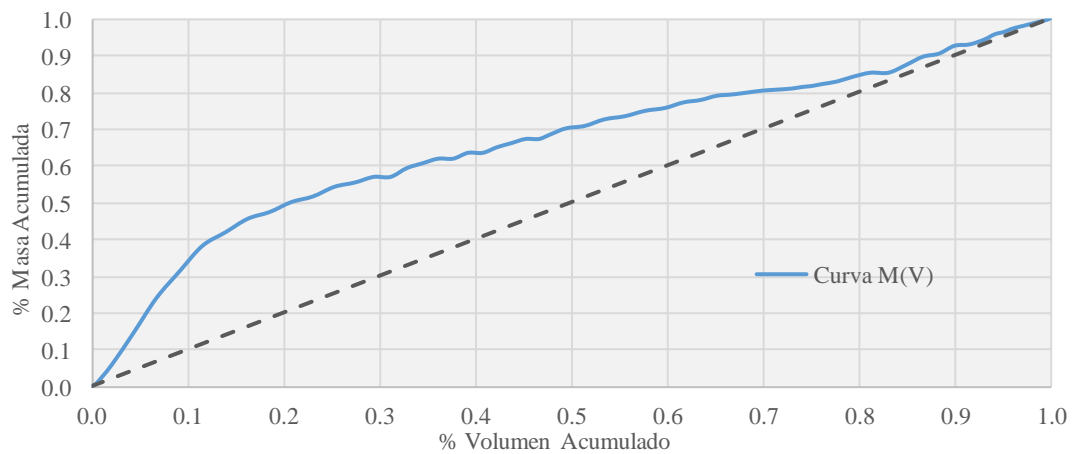
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	3.29	Vol.total (m <sup>3</sup> )	32349	SS tot.mov (kg)	19835.08
I.media (mm/h)	0.67	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	22107	CMS (mg/l)	613.16
I.10' máx (mm/h)	2.55	Q.medio (l/s)	960.00	CMAX (mg/l)	1263.08
		Q.máx (l/s)	1520	T <sub>PP</sub> (min)	107.12
		T <sub>PH</sub> (min)	175.2		

## Episodio: S1\_3

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

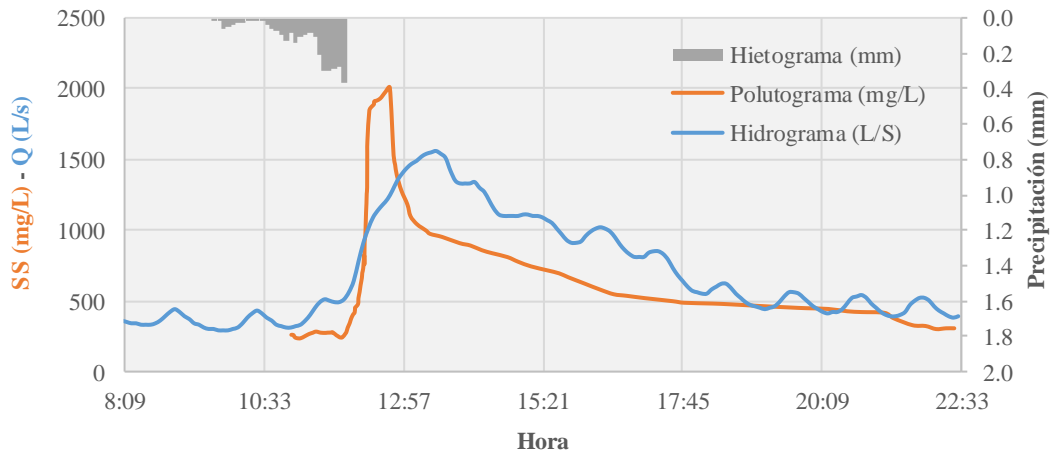


Episodio	S1_3
Cuenca	S1
Fecha Inicio	14-12-14 15:00
Fecha Final	15-12-14 22:45
Duración (h)	31.75
P. seco (días)	10

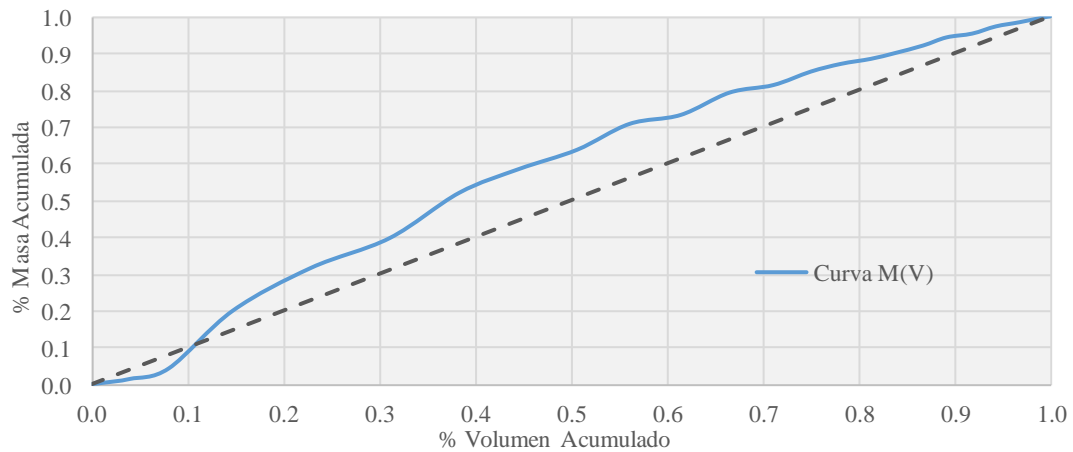
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	30.37	Vol.total (m <sup>3</sup> )	184911	SS tot.mov (kg)	74339.71
I.media (mm/h)	1.22	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	147993	CMS (mg/l)	402.03
I.10' máx (mm/h)	7.62	Q.medio (l/s)	1617.77	CMAX (mg/l)	1917.84
		Q.máx (l/s)	2480	T <sub>PP</sub> (min)	100.37
		T <sub>PH</sub> (min)	110.0		

**Episodio: S1\_4**

**Hietograma, hidrograma y polutograma**



**Curva M(V)**

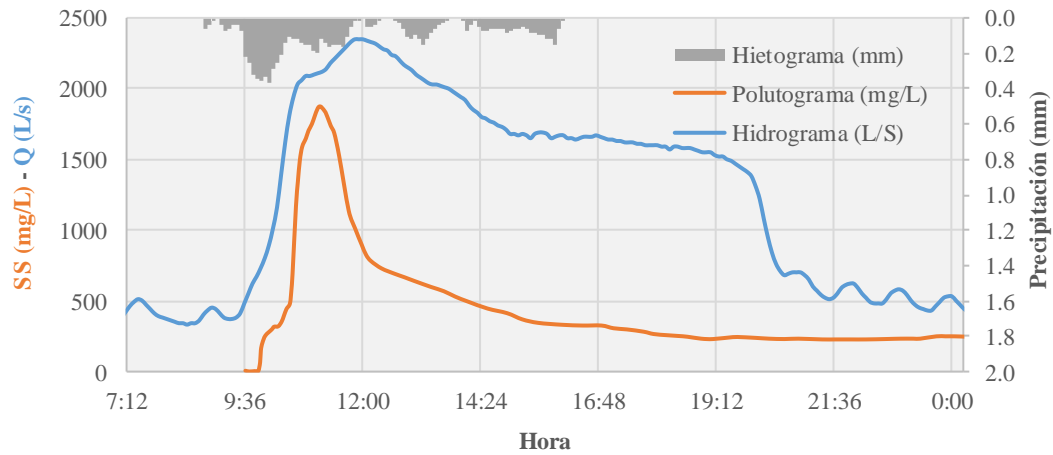


Episodio	S1_4
Cuenca	S1
Fecha Inicio	20-05-15 11:00
Fecha Final	20-05-15 22:30
Duración (h)	11.50
P. seco (días)	24

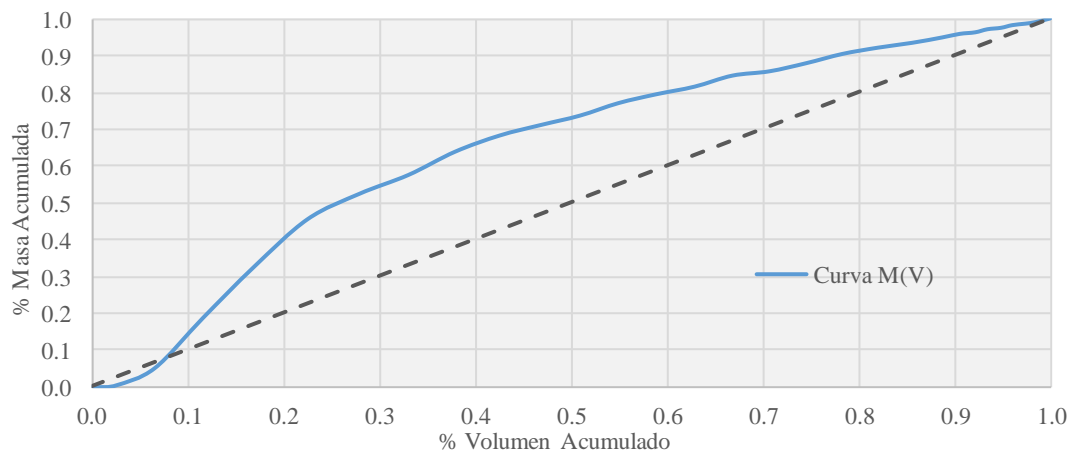
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	3.03	Vol.total (m3)	32628	SS tot.mov (kg)	23343.64
I.media (mm/h)	1.35	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	18036	CMS (mg/l)	715.45
I.10' máx (mm/h)	3.86	Q.medio (l/s)	790.00	CMAX (mg/l)	2001.87
		Q.máx (l/s)	1560	T <sub>PP</sub> (min)	103.06
		T <sub>PH</sub> (min)	150.0		

## Episodio: S1\_5

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

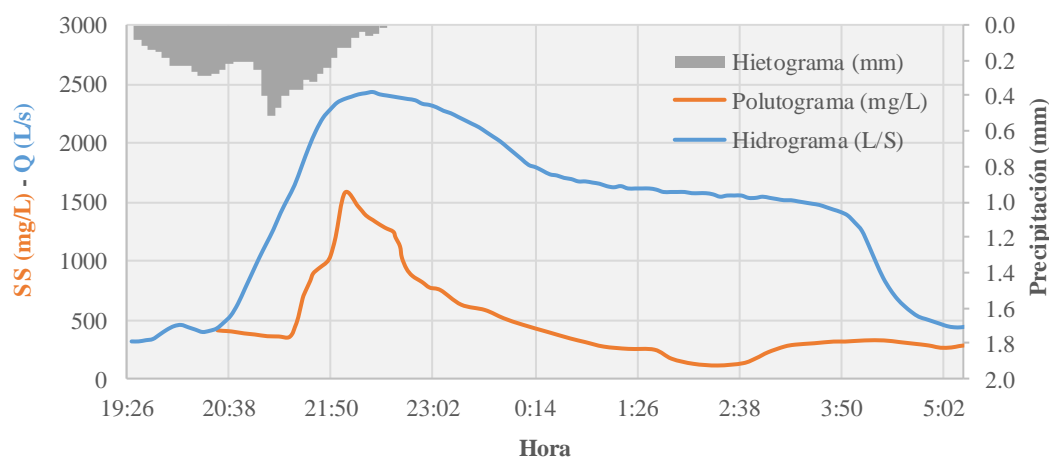


Episodio	S1_5
Cuenca	S1
Fecha Inicio	11-06-15 9:20
Fecha Final	12-06-15 0:20
Duración (h)	15.00
P. seco (días)	22

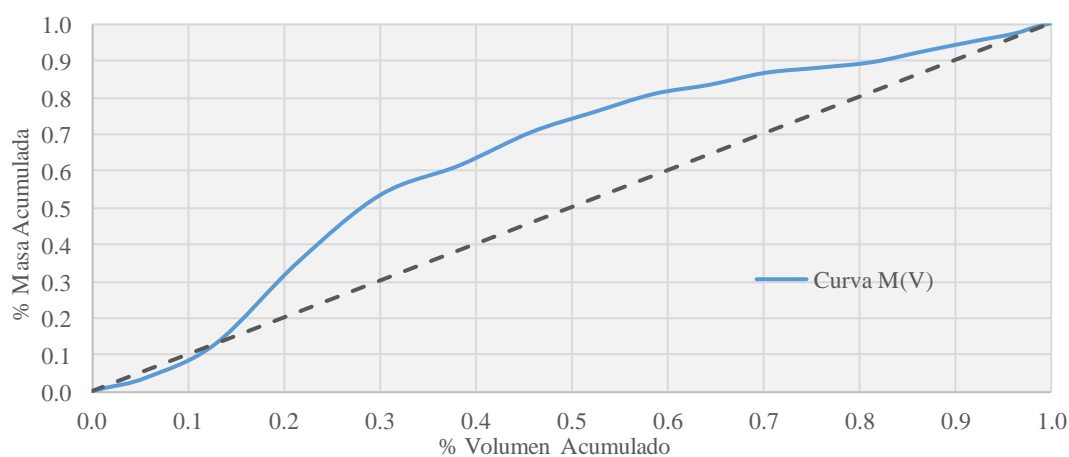
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	8.69	Vol.total (m3)	75246	SS tot.mov (kg)	40488.74
I.media (mm/h)	1.16	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	56751	CMS (mg/l)	538.08
I.10' máx (mm/h)	4.24	Q.medio (l/s)	1393.44	CMAX (mg/l)	1867.47
		Q.máx (l/s)	2350	T <sub>PP</sub> (min)	105.33
		T <sub>PH</sub> (min)	150.0		

## Episodio: S1\_6

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

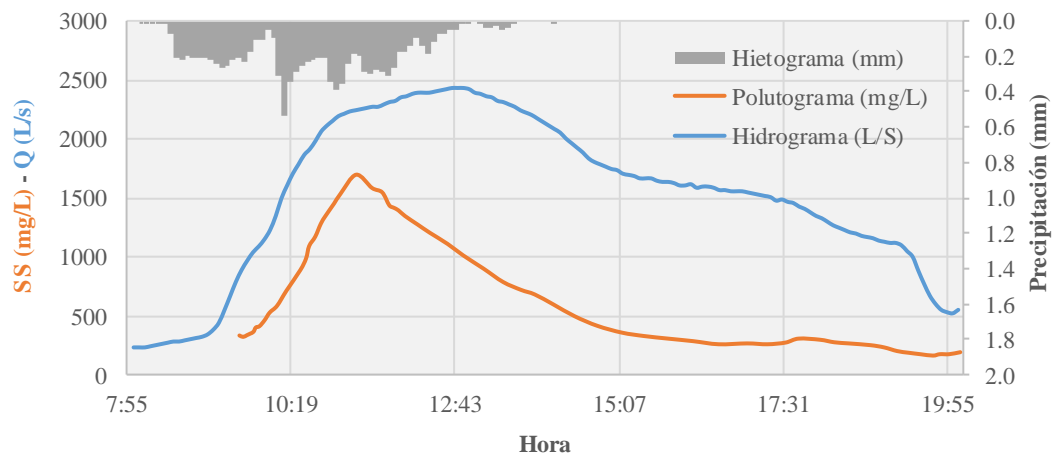


Episodio	S1_6
Cuenca	S1
Fecha Inicio	27-09-15 20:30
Fecha Final	28-09-15 5:20
Duración (h)	8.83
P. seco (días)	17

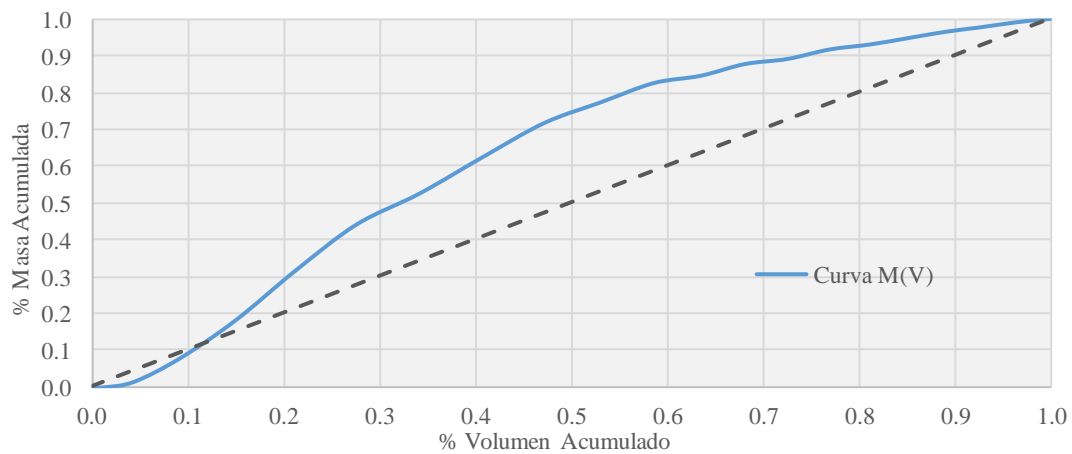
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	8.18	Vol.total (m <sup>3</sup> )	50091	SS tot.mov (kg)	27330.30
I.media (mm/h)	2.8	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	39207	CMS (mg/l)	545.61
I.10' máx (mm/h)	5.87	Q.medio (l/s)	1580.00	CMAX (mg/l)	1584.19
		Q.máx (l/s)	2430	T <sub>PP</sub> (min)	90.19
		T <sub>PH</sub> (min)	109.8		

## Episodio: S1\_7

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

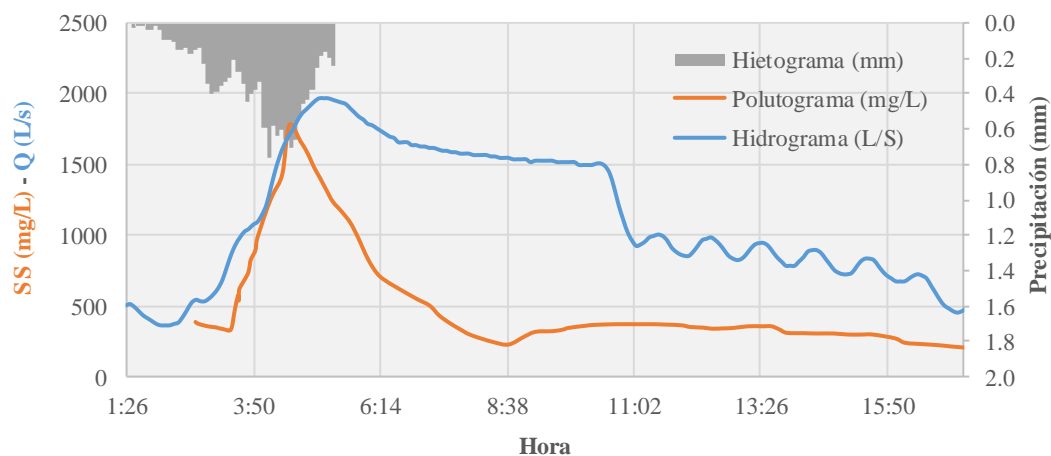


Episodio	S1_7
Cuenca	S1
Fecha Inicio	15-01-16 9:15
Fecha Final	15-01-16 20:05
Duración (h)	10.83
P. seco (días)	17

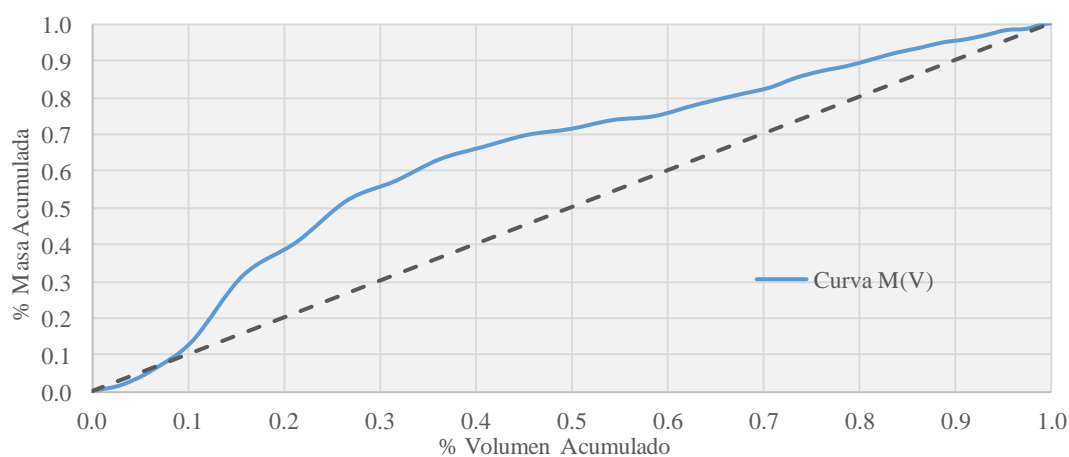
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	11.16	Vol.total (m <sup>3</sup> )	65745	SS tot.mov (kg)	45988.18
I.media (mm/h)	2.09	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	52854	CMS (mg/l)	699.49
I.10' máx (mm/h)	5.33	Q.medio (l/s)	1690.00	CMAX (mg/l)	1696.72
		Q.máx (l/s)	2440	T <sub>PP</sub> (min)	120.65
		T <sub>PH</sub> (min)	205.2		

## Episodio: S1\_8

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)



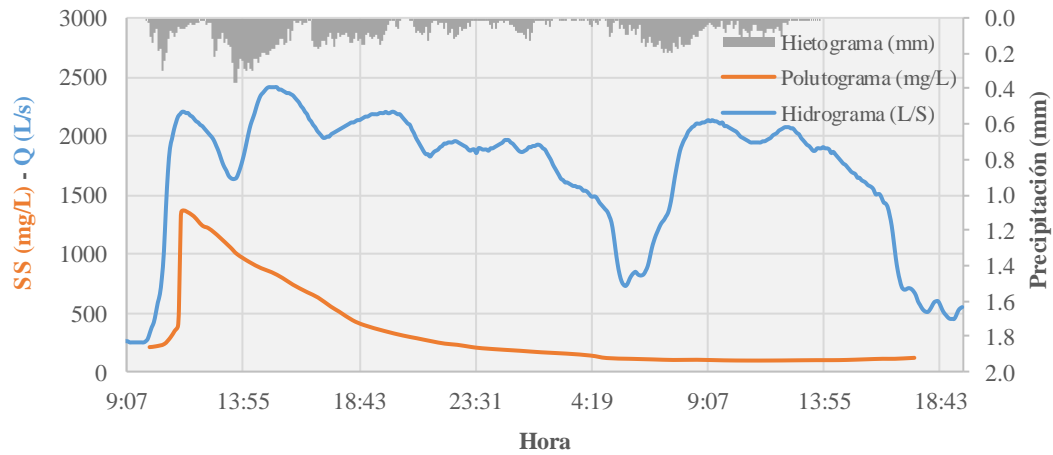
Episodio	S1_8
Cuenca	S1
Fecha Inicio	30-01-16 2:40
Fecha Final	30-01-16 17:20
Duración (h)	14.67
P. seco (días)	15

Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	14.19	Vol.total (m3)	63048	SS tot.mov (kg)	35937.85
I.media (mm/h)	3.7	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	48387	CMS (mg/l)	570.01
I.10' máx (mm/h)	8.25	Q.medio (l/s)	1190.00	CMAX (mg/l)	1771.41
		Q.máx (l/s)	1970	T <sub>PP</sub> (min)	110.65
		T <sub>PH</sub> (min)	145.2		

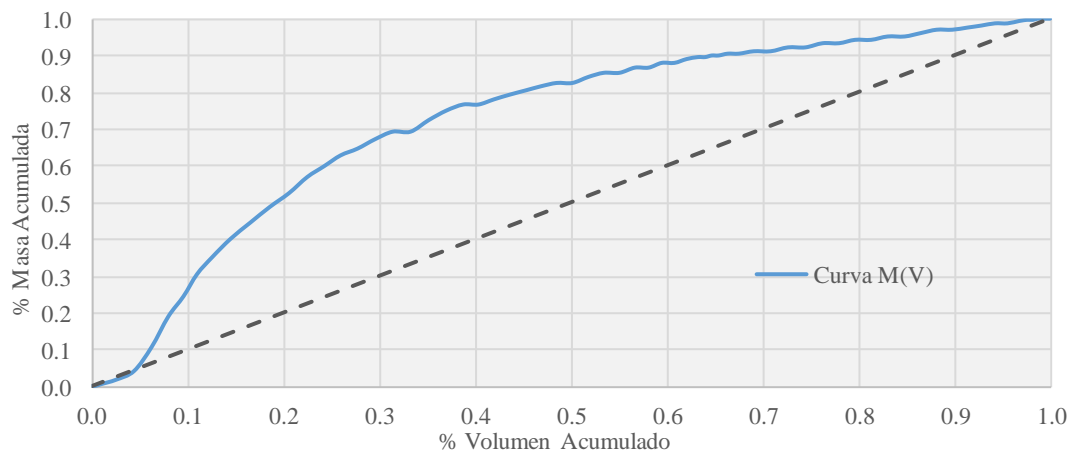


## Episodio: S1\_9

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

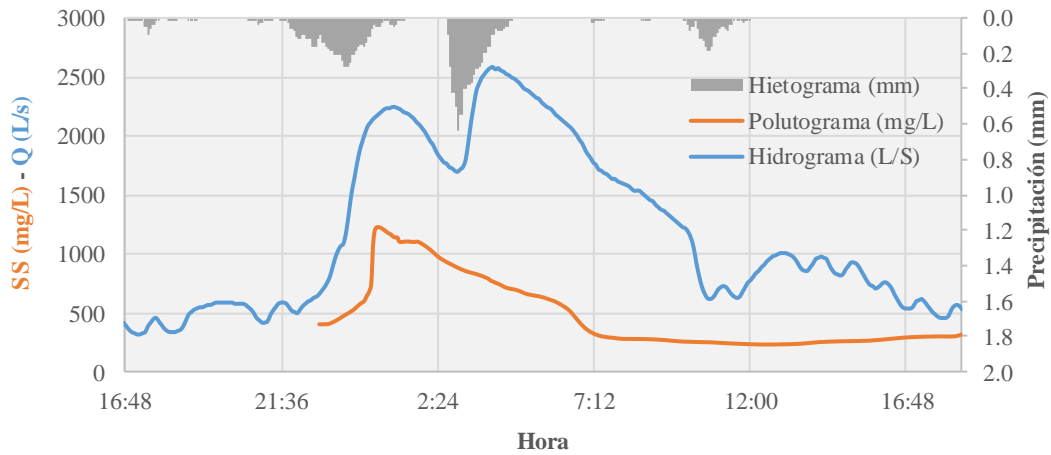


Episodio	S1_9
Cuenca	S1
Fecha Inicio	21-03-16 9:20
Fecha Final	22-03-16 19:40
Duración (h)	34.33
P. seco (días)	13

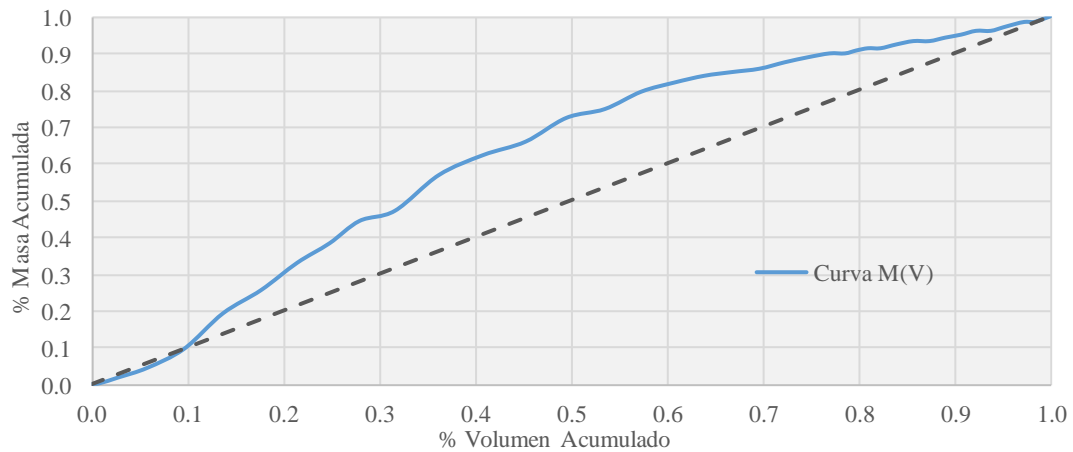
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	27.48	Vol.total (m3)	210663	SS tot.mov (kg)	72339.45
I.media (mm/h)	0.99	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	171501	CMS (mg/l)	343.39
I.10' máx (mm/h)	4.39	Q.medio (l/s)	1700.87	CMAX (mg/l)	1367.99
		Q.máx (l/s)	2150	T <sub>PP</sub> (min)	119.82
		T <sub>PH</sub> (min)	155.0		

**Episodio: S1\_10**

**Hietograma, hidrograma y polutograma**



**Curva M(V)**

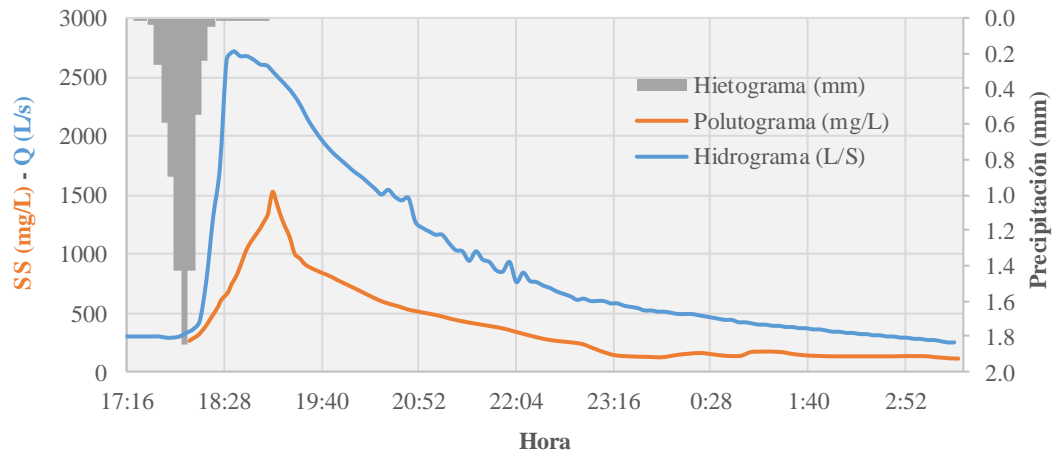


Episodio	S1_10
Cuenca	S1
Fecha Inicio	04-04-16 22:45
Fecha Final	05-04-16 18:30
Duración (h)	19.75
P. seco (días)	12

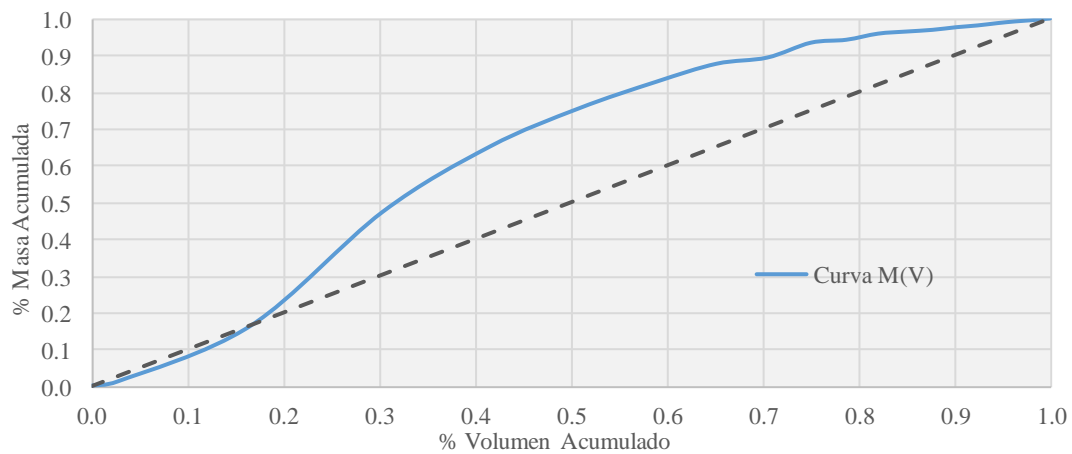
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	13.46	Vol.total (m3)	99084	SS tot.mov (kg)	55976.73
I.media (mm/h)	0.71	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	77787	CMS (mg/l)	564.94
I.10' máx (mm/h)	7.05	Q.medio (l/s)	1390.00	CMAX (mg/l)	1201.16
		Q.máx (l/s)	2240	T <sub>PP</sub> (min)	104.76
		T <sub>PH</sub> (min)	135.0		

## Episodio: SF\_1

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

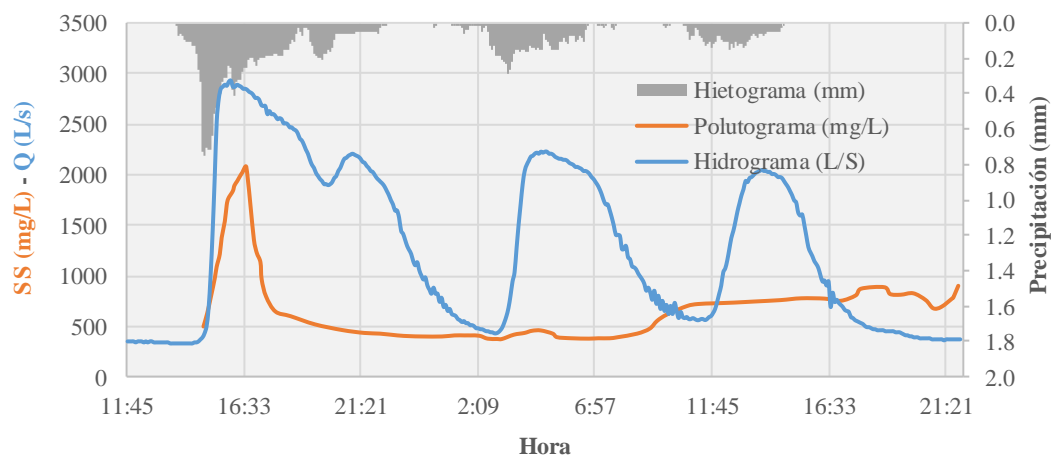


Episodio	SF_1
Cuenca	San Félix
Fecha Inicio	17-06-14 18:00
Fecha Final	18-06-14 3:30
Duración (h)	9.50
P. seco (días)	15

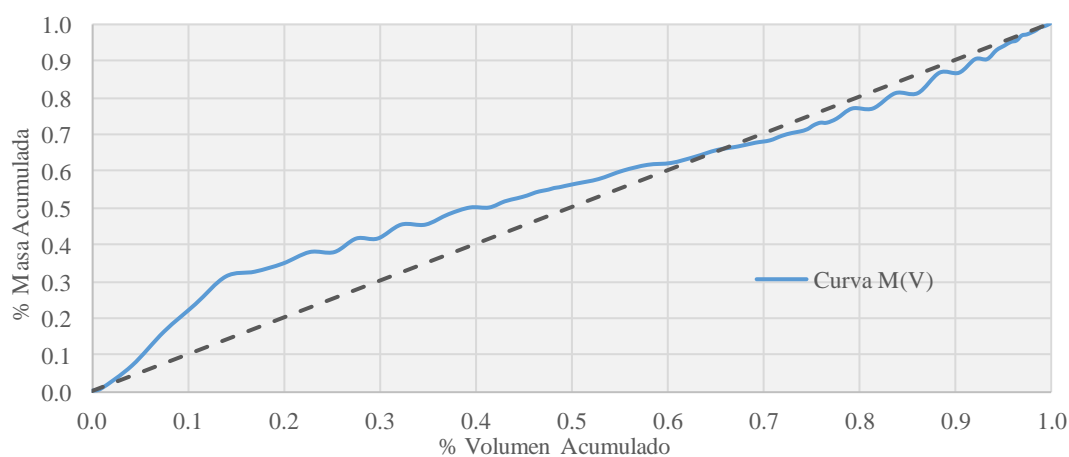
Lluvia	Caudal y Volumen	Contaminación
P. total (mm)	Vol.total (m <sup>3</sup> )	SS tot.mov (kg)
I.media (mm/h)	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	CMS (mg/l)
I.10' máx (mm/h)	Q.medio (l/s)	CMAX (mg/l)
	Q.máx (l/s)	T <sub>PP</sub> (min)
	T <sub>PH</sub> (min)	

## Episodio: SF\_2

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

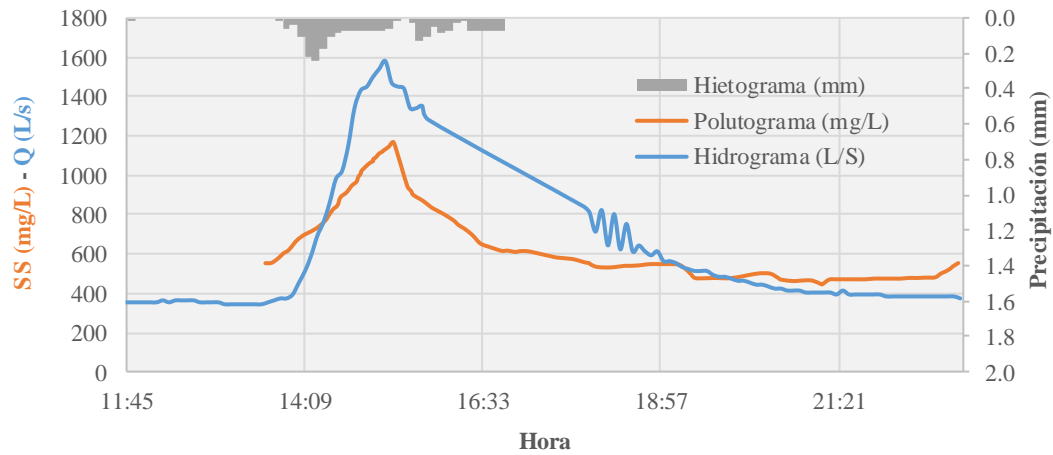


Episodio	SF_2
Cuenca	San Félix
Fecha Inicio	14-12-14 15:00
Fecha Final	15-12-14 22:00
Duración (h)	31.00
P. seco (días)	10

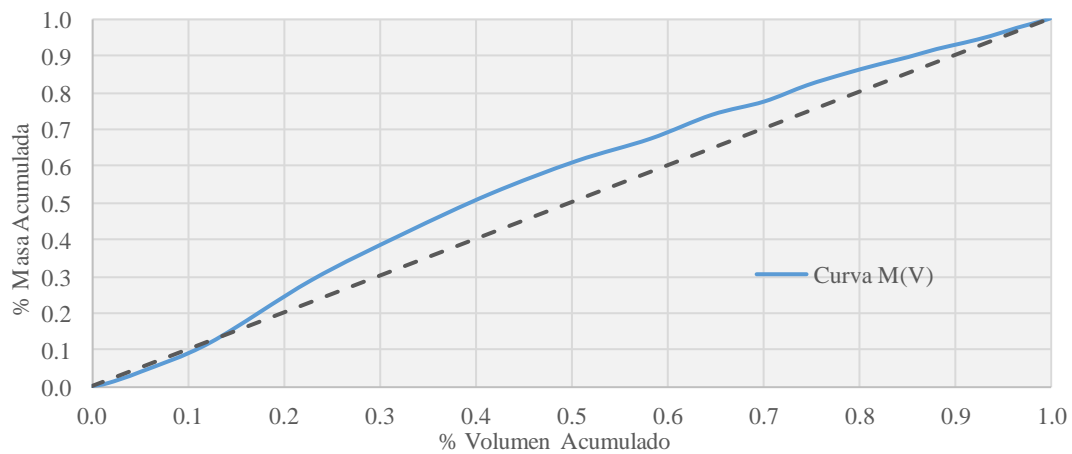
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	30.71	Vol.total (m3)	155853	SS tot.mov (kg)	104150.17
I.media (mm/h)	1.23	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	124215	CMS (mg/l)	668.26
I.10' máx (mm/h)	8.86	Q.medio (l/s)	1396.53	CMAX (mg/l)	2072.87
		Q.máx (l/s)	2930	T <sub>PP</sub> (min)	99.88
		T <sub>PH</sub> (min)	60.0		

## Episodio: SF\_3

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

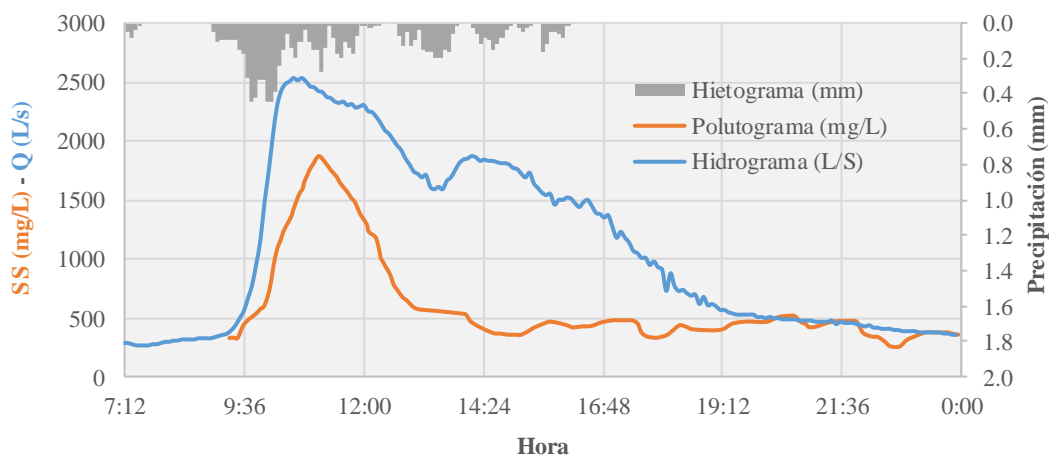


Episodio	SF_3
Cuenca	San Félix
Fecha Inicio	22-03-15 13:30
Fecha Final	22-03-15 23:00
Duración (h)	9.50
P. seco (días)	1

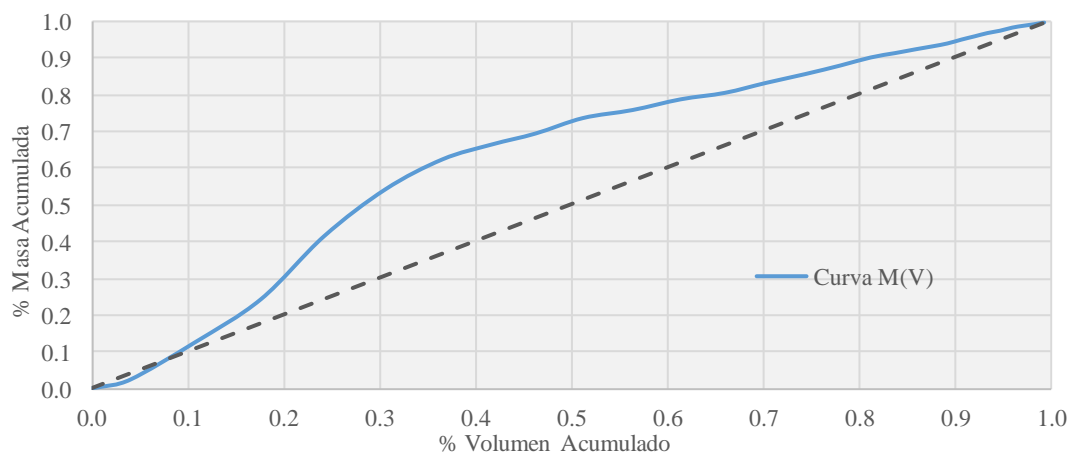
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	2.47	Vol.total (m <sup>3</sup> )	25536	SS tot.mov (kg)	17489.23
I.media (mm/h)	0.99	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	14508	CMS (mg/l)	684.89
I.10' máx (mm/h)	2.76	Q.medio (l/s)	746.67	CMAX (mg/l)	1163.82
		Q.máx (l/s)	1580	T <sub>PP</sub> (min)	111.89
		T <sub>PH</sub> (min)	105.0		

## Episodio: SF\_4

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

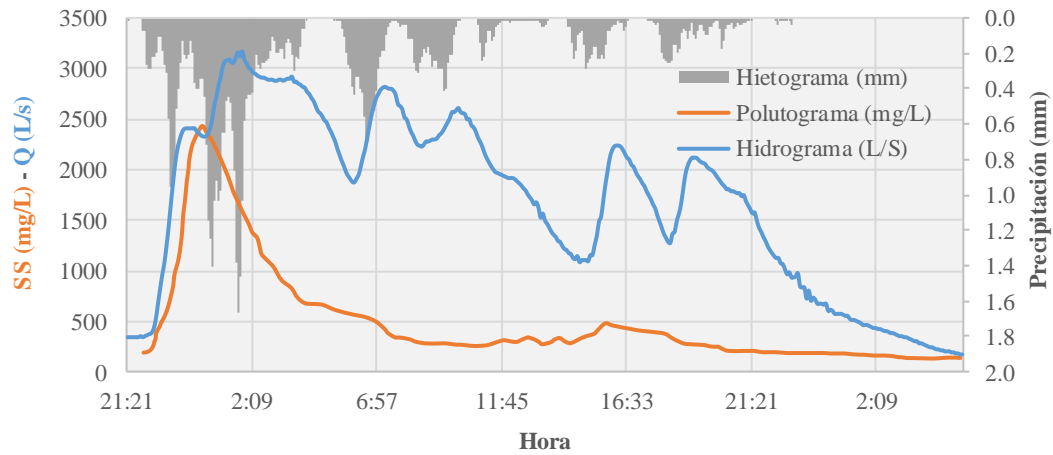


Episodio	SF_4
Cuenca	San Félix
Fecha Inicio	11-06-15 9:15
Fecha Final	11-06-15 23:55
Duración (h)	14.67
P. seco (días)	22

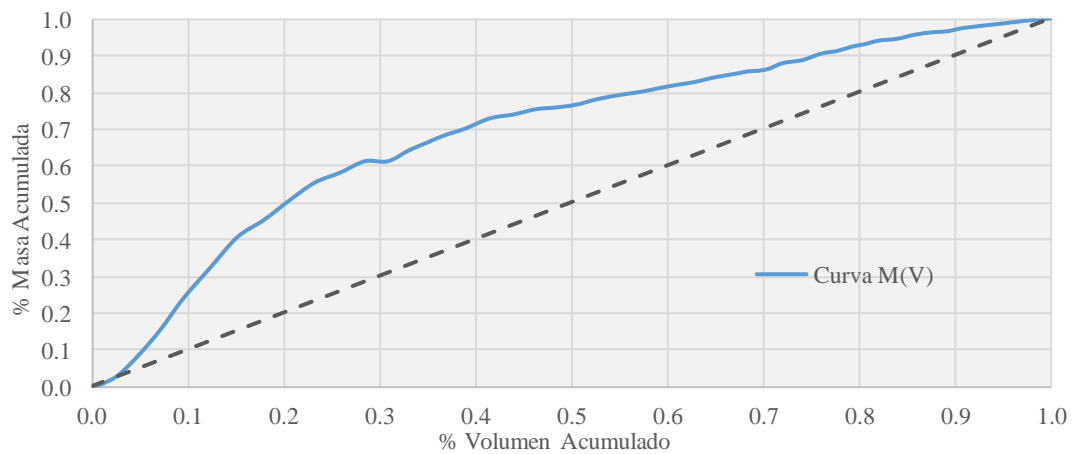
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	10.13	Vol.total (m3)	64308	SS tot.mov (kg)	49269.41
I.media (mm/h)	1.4	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	47262	CMS (mg/l)	766.15
I.10' máx (mm/h)	5.32	Q.medio (l/s)	1217.95	CMAX (mg/l)	1874.35
		Q.máx (l/s)	2530	T <sub>PP</sub> (min)	110.18
		T <sub>PH</sub> (min)	80.0		

## Episodio: SF\_5

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

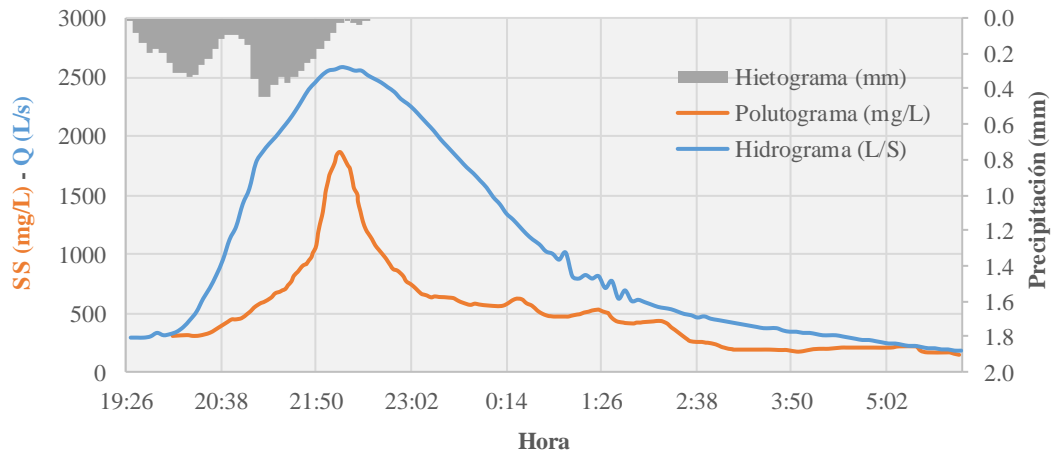


Episodio	SF_5
Cuenca	San Félix
Fecha Inicio	05-09-15 22:00
Fecha Final	07-09-15 5:30
Duración (h)	31.50
P. seco (días)	19

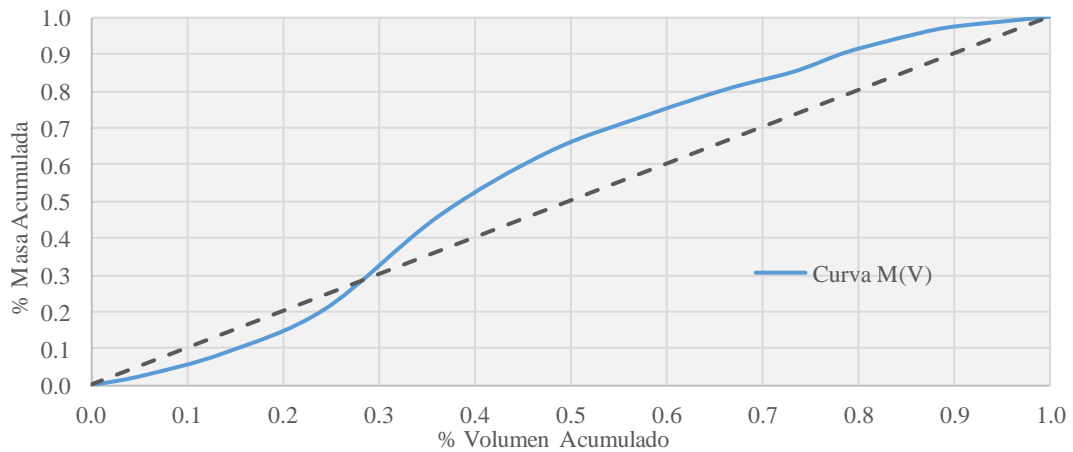
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	56.47	Vol.total (m <sup>3</sup> )	195837	SS tot.mov (kg)	126425.09
I.media (mm/h)	2.26	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	164844	CMS (mg/l)	645.56
I.10' máx (mm/h)	18.76	Q.medio (l/s)	1726.96	CMAX (mg/l)	2424.94
		Q.máx (l/s)	3170	T <sub>PP</sub> (min)	132.82
		T <sub>PH</sub> (min)	95.0		

## Episodio: SF\_6

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)



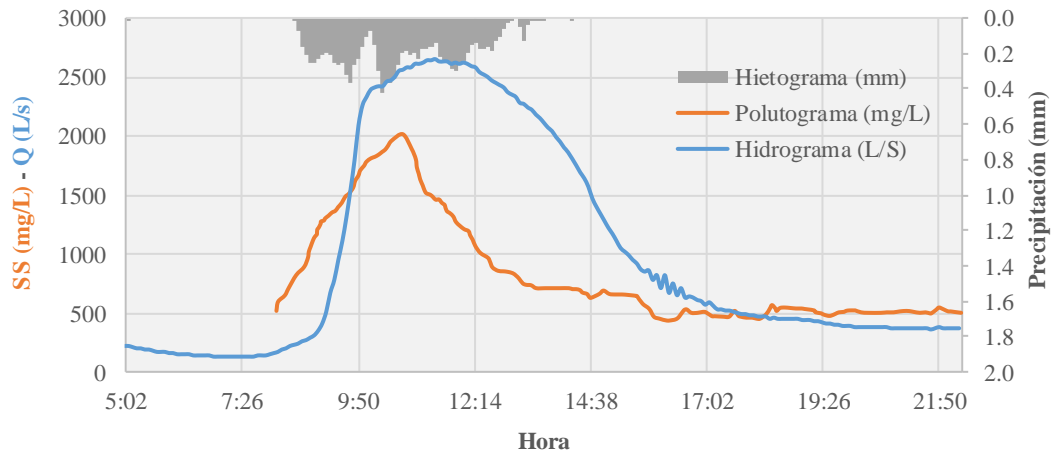
Episodio	SF_6
Cuenca	San Félix
Fecha Inicio	27-09-15 20:00
Fecha Final	28-09-15 6:00
Duración (h)	10.00
P. seco (días)	17

Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	7.53	Vol.total (m3)	38637	SS tot.mov (kg)	28502.49
I.media (mm/h)	2.44	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	28791	CMS (mg/l)	737.70
I.10' máx (mm/h)	5.28	Q.medio (l/s)	1073.25	CMAX (mg/l)	1860.35
		Q.máx (l/s)	2590	T <sub>PP</sub> (min)	128.67
		T <sub>PH</sub> (min)	130.0		

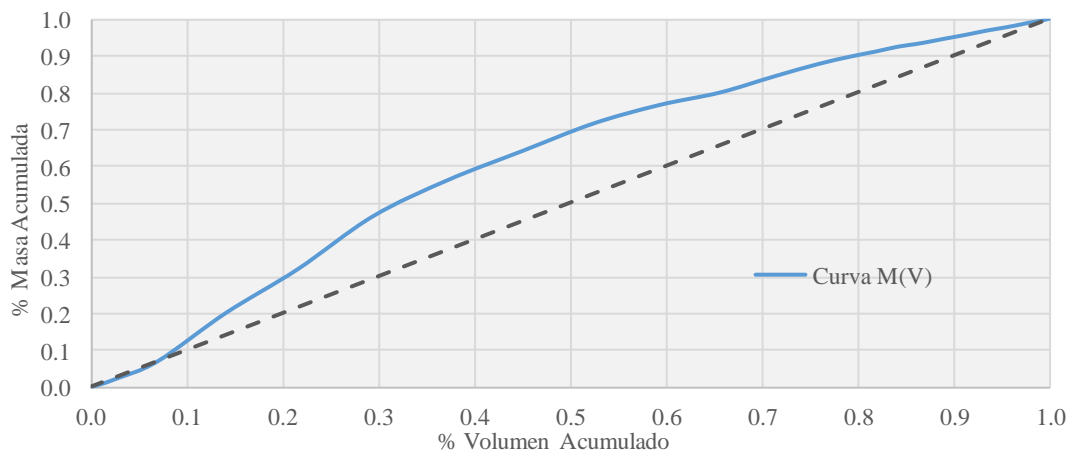


## Episodio: SF\_7

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

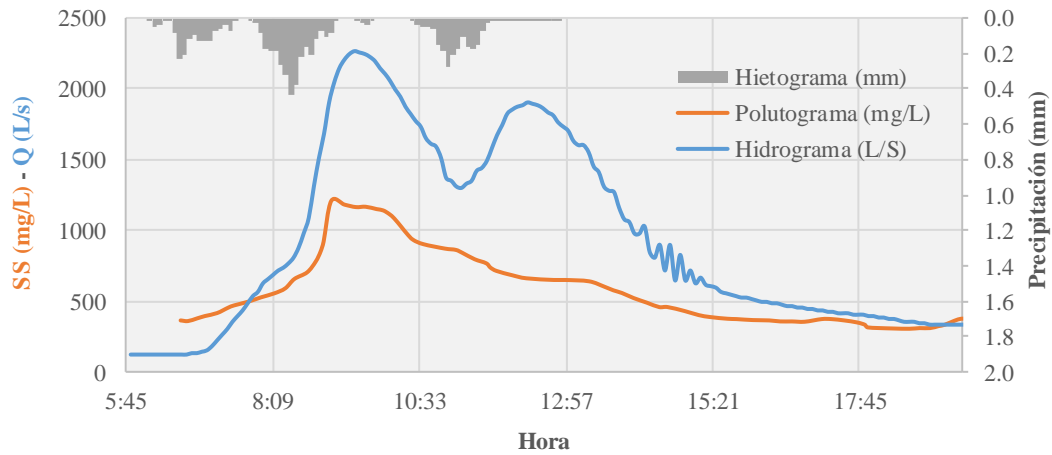


Episodio	SF_7
Cuenca	San Félix
Fecha Inicio	15-01-16 8:00
Fecha Final	15-01-16 22:15
Duración (h)	14.25
P. seco (días)	17

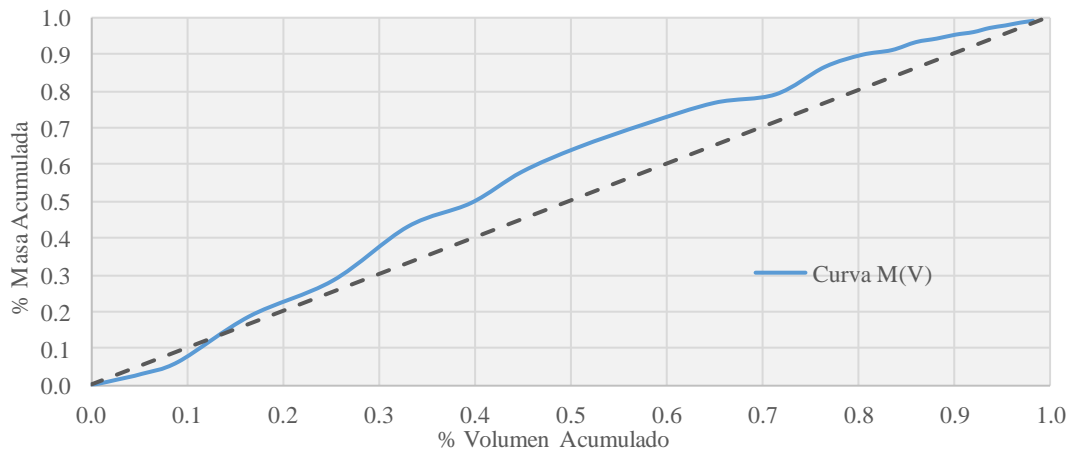
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	11.57	Vol.total (m <sup>3</sup> )	60222	SS tot.mov (kg)	64012.35
I.media (mm/h)	2.28	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	44493	CMS (mg/l)	1062.94
I.10' máx (mm/h)	4.71	Q.medio (l/s)	1173.92	CMAX (mg/l)	2020.29
		Q.máx (l/s)	2650	T <sub>PP</sub> (min)	165.61
		T <sub>PH</sub> (min)	205.0		

## Episodio: SF\_8

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)

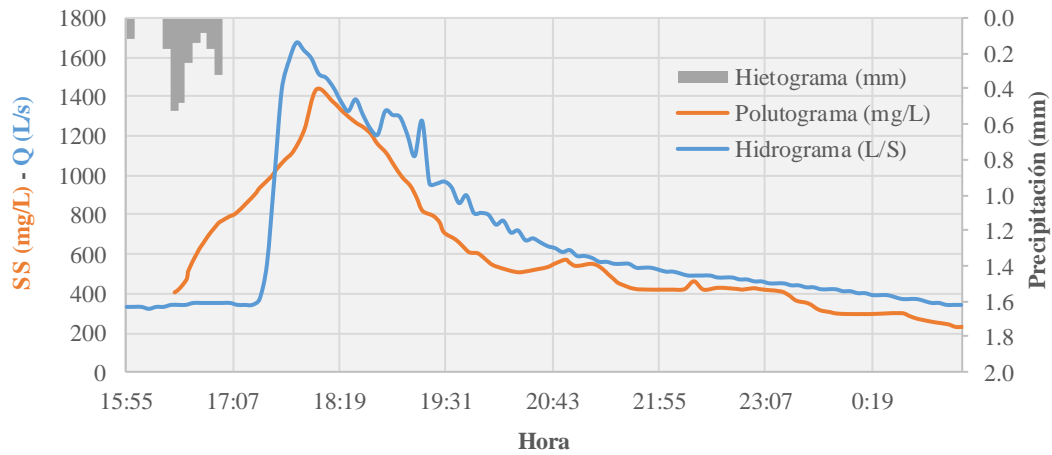


Episodio	SF_8
Cuenca	San Félix
Fecha Inicio	09-05-16 6:30
Fecha Final	09-05-16 19:30
Duración (h)	13.00
P. seco (días)	18

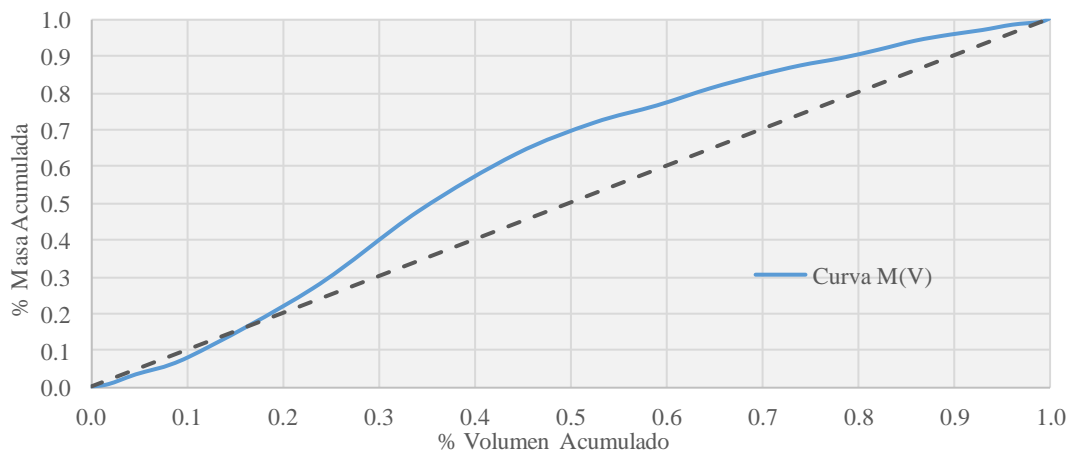
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	6.8	Vol.total (m3)	46305	SS tot.mov (kg)	33451.14
I.media (mm/h)	1.01	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	33156	CMS (mg/l)	722.41
I.10' máx (mm/h)	4.84	Q.medio (l/s)	989.42	CMAX (mg/l)	1204.60
		Q.máx (l/s)	2260	T <sub>PP</sub> (min)	156.51
		T <sub>PH</sub> (min)	180.0		

## Episodio: SF\_9

### Hietograma, hidrograma y polutograma



### Curva M(V)



Episodio	SF_9
Cuenca	San Félix
Fecha Inicio	04-06-16 16:20
Fecha Final	05-06-16 1:20
Duración (h)	9.00
P. seco (días)	22

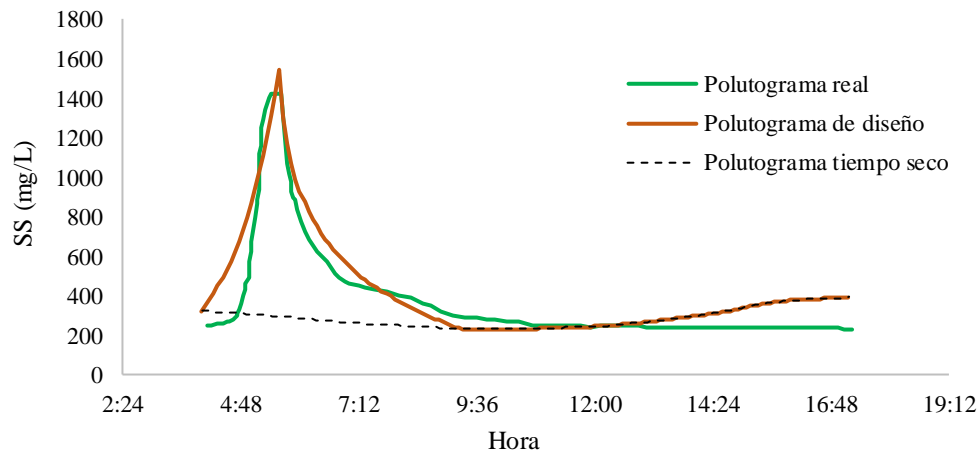
Lluvia		Caudal y Volumen		Contaminación	
P. total (mm)	2.27	Vol.total (m <sup>3</sup> )	22038	SS tot.mov (kg)	16820.35
I.media (mm/h)	2.27	Vol.escor (m <sup>3</sup> )	11703	CMS (mg/l)	763.24
I.10' máx (mm/h)	6.04	Q.medio (l/s)	680.19	CMAX (mg/l)	1439.24
		Q.máx (l/s)	1680	T <sub>PP</sub> (min)	103.30
		T <sub>PH</sub> (min)	90.0		



***ANEJO II. EPISODIOS EMPLEADOS EN EL  
AJUSTE DE POLUTOGRAMAS DE DISEÑO***

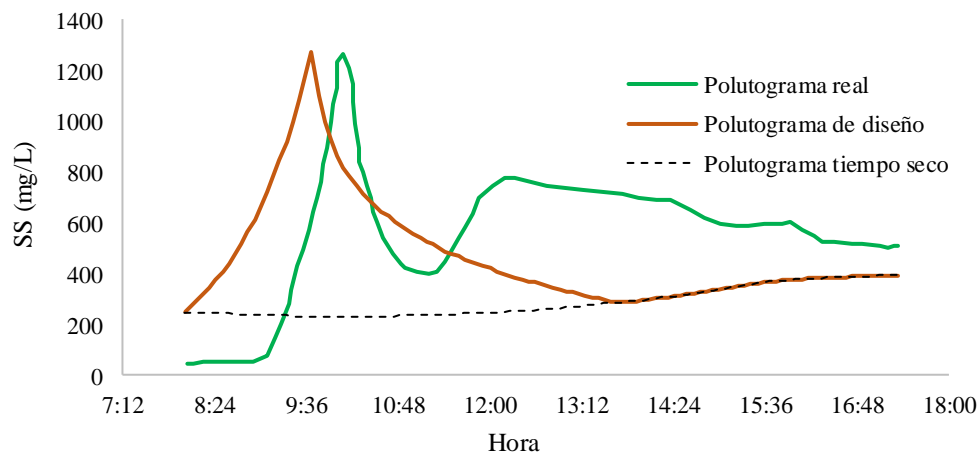


## Episodio: S1\_1



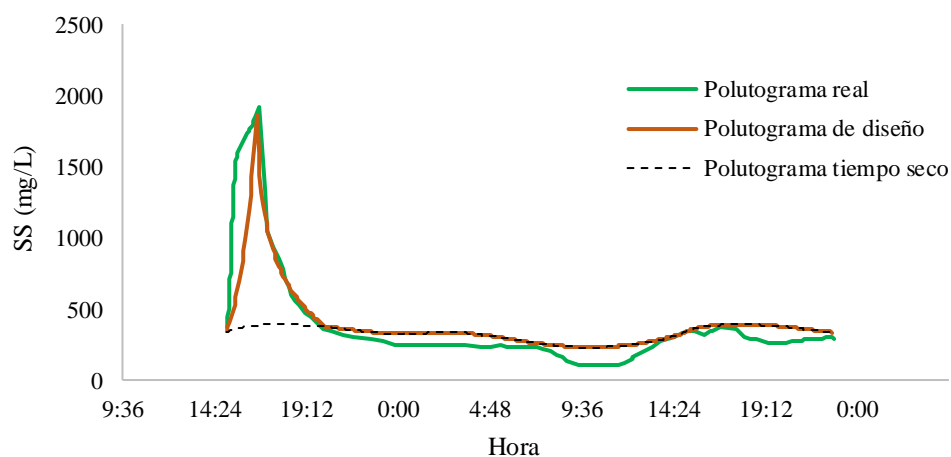
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	12.06	Índice TPP	0.998	TPP (min)	96.03
P. seco (días)	7	Índice CMAX	0.842	CMAX (mg/l)	1425.48
TPH (min)	130	TPP (min)	98.8	CMS (mg/l)	409.1
		CMAX (mg/l)	1543.16		
		CMS (mg/l)	446.99		

## Episodio: S1\_2



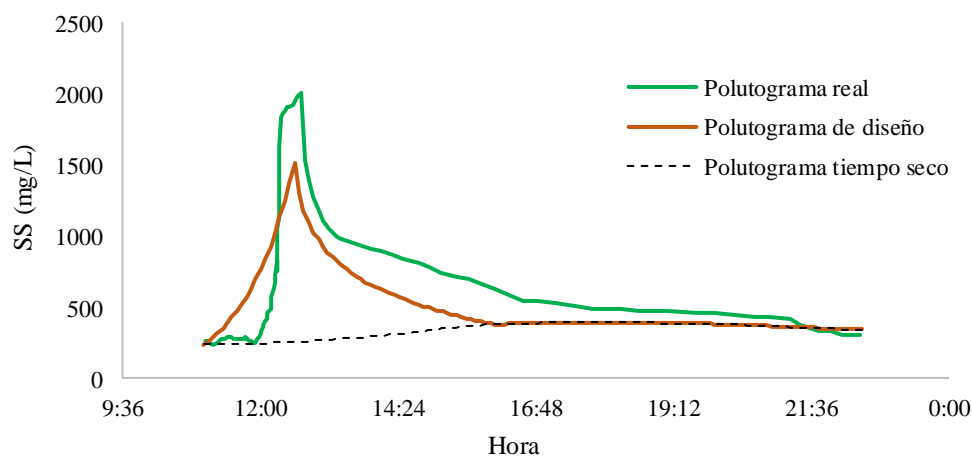
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	3.29	Índice TPP	1.011	TPP (min)	107.12
P. seco (días)	5	Índice CMAX	0.516	CMAX (mg/l)	1263.08
TPH (min)	175.2	TPP (min)	103.6	CMS (mg/l)	613.2
		CMAX (mg/l)	1274.82		
		CMS (mg/l)	484.65		

## Episodio: S1\_3



Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	30.4	Índice TPP	0.995	TPP (min)	100.37
P. seco (días)	10	Índice CMAX	1.237	CMAX (mg/l)	1917.84
TPH (min)	110	TPP (min)	97.6	CMS (mg/l)	402.0
		CMAX (mg/l)	1867.18		
		CMS (mg/l)	426.39		

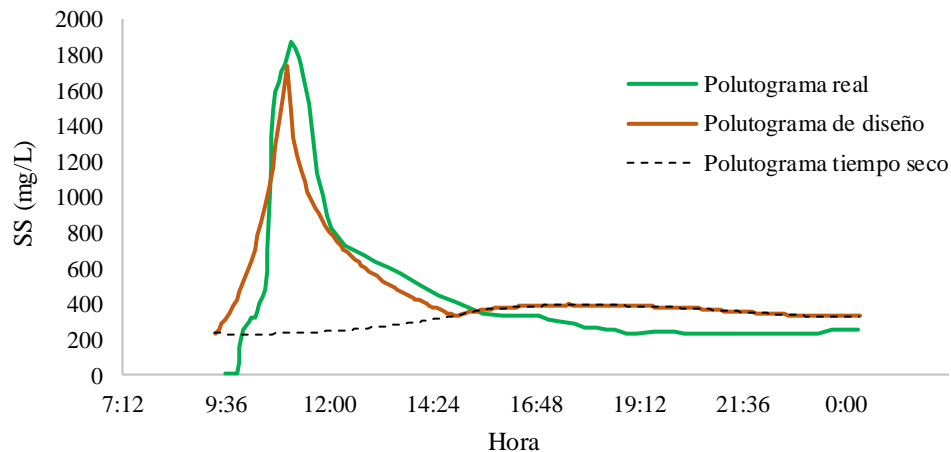
## Episodio: S1\_4



Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	3.03	Índice TPP	0.989	TPP (min)	103.06
P. seco (días)	24	Índice CMAX	0.806	CMAX (mg/l)	2001.87
TPH (min)	150	TPP (min)	95.5	CMS (mg/l)	715.4
		CMAX (mg/l)	1512.86		
		CMS (mg/l)	571.46		

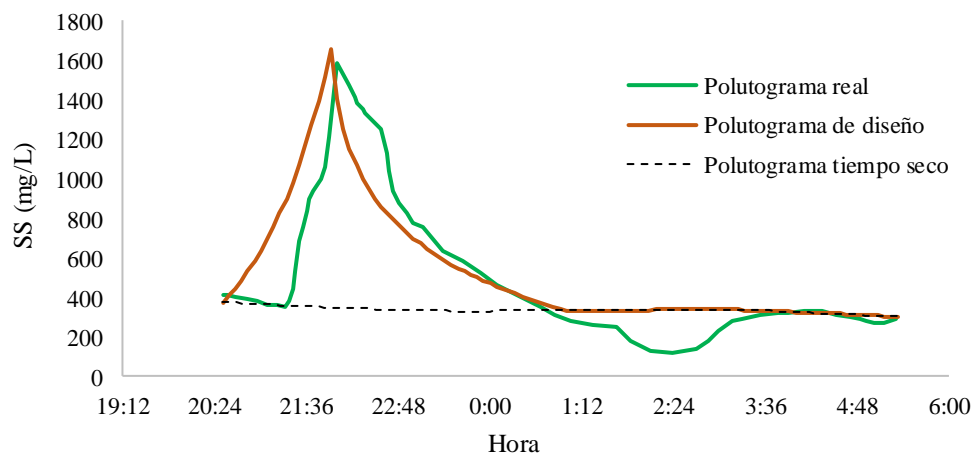


## Episodio: S1\_5



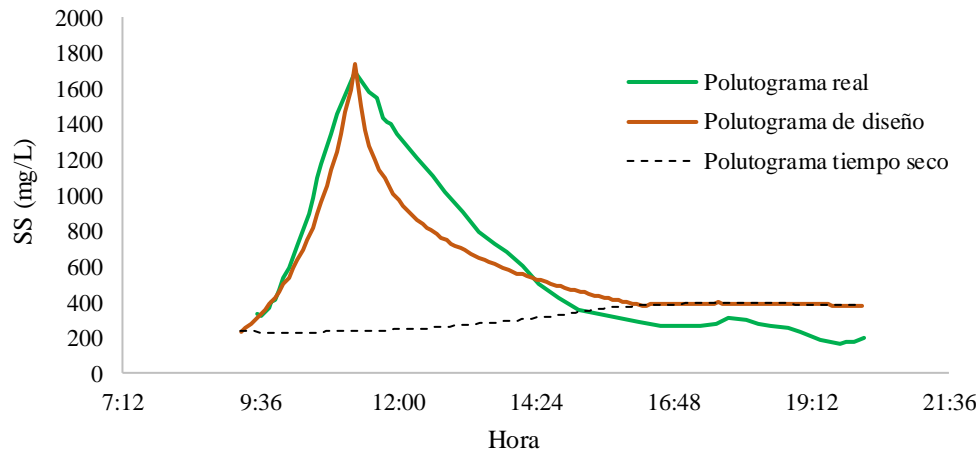
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	8.7	Índice TPP	1.010	TPP (min)	105.33
P. seco (días)	22	Índice CMAX	1.076	CMAX (mg/l)	1867.47
TPH (min)	150	TPP (min)	103.4	CMS (mg/l)	538.1
		CMAX (mg/l)	1735.40		
		CMS (mg/l)	551.51		

## Episodio: S1\_6



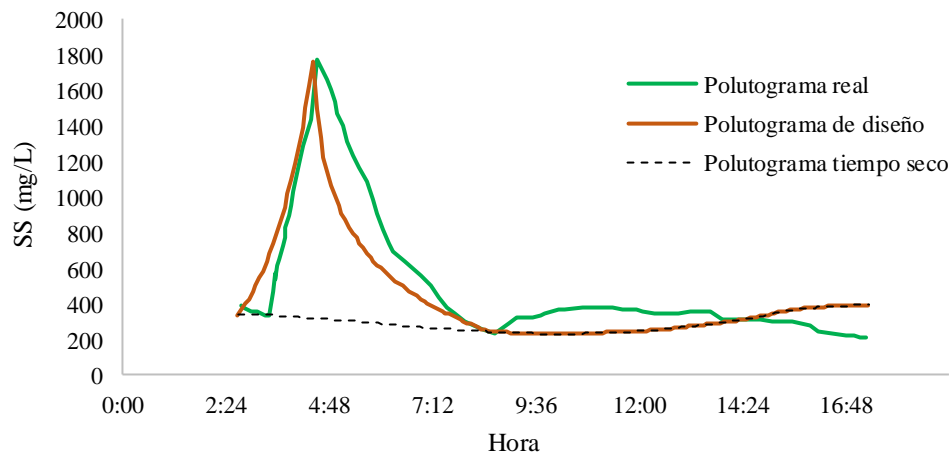
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	8.18	Índice TPP	0.969	TPP (min)	90.19
P. seco (días)	17	Índice CMAX	0.978	CMAX (mg/l)	1584.19
TPH (min)	109.8	TPP (min)	87.9	CMS (mg/l)	545.6
		CMAX (mg/l)	1654.87		
		CMS (mg/l)	593.78		

### Episodio: S1\_7



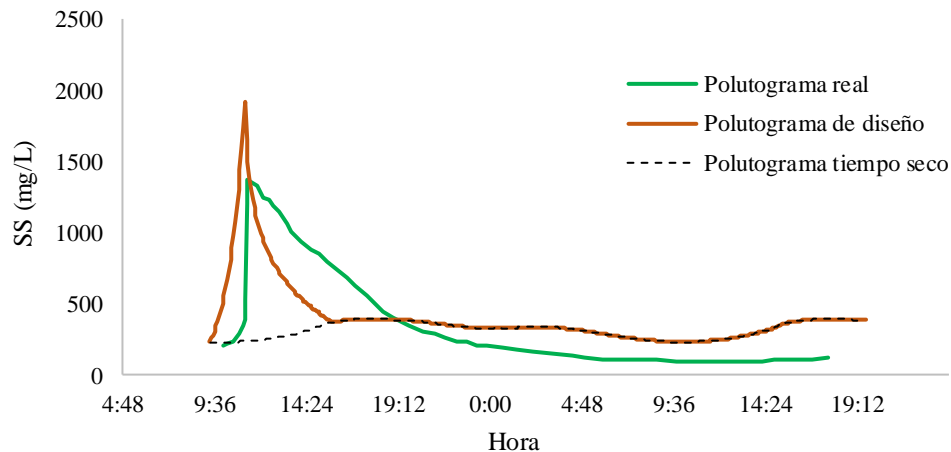
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	11.2	Índice TPP	1.057	TPP (min)	120.65
P. seco (días)	17	Índice CMAX	1.074	CMAX (mg/l)	1696.72
TPH (min)	205.2	TPP (min)	121.0	CMS (mg/l)	699.5
		CMAX (mg/l)	1733.43		
		CMS (mg/l)	659.71		

### Episodio: S1\_8



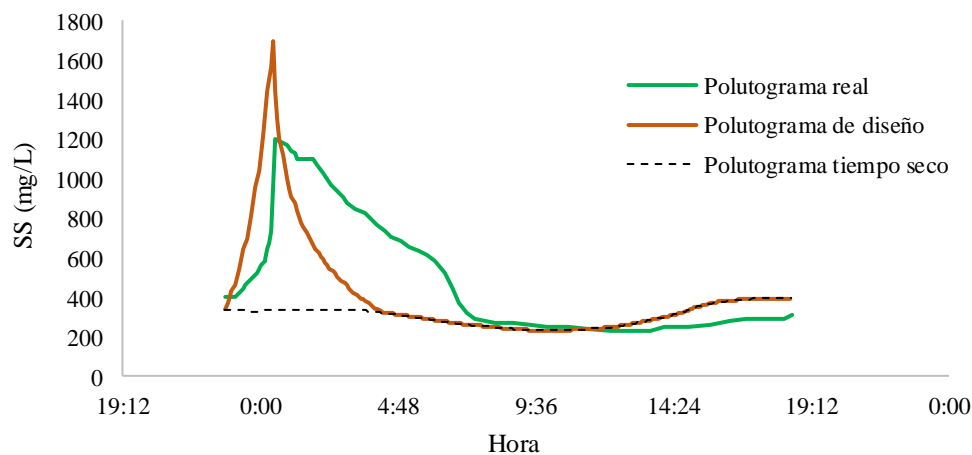
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	14.19	Índice TPP	1.016	TPP (min)	110.65
P. seco (días)	15	Índice CMAX	1.112	CMAX (mg/l)	1771.41
TPH (min)	145.2	TPP (min)	105.5	CMS (mg/l)	570.0
		CMAX (mg/l)	1764.41		
		CMS (mg/l)	480.79		

### Episodio: S1\_9



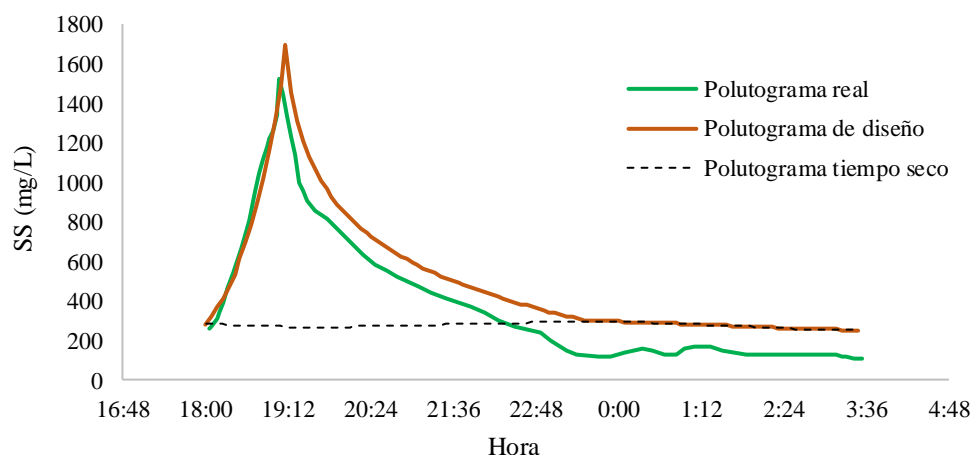
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	27.5	Índice TPP	1.038	TPP (min)	119.82
P. seco (días)	13	Índice CMAX	1.299	CMAX (mg/l)	1367.99
TPH (min)	155	TPP (min)	113.8	CMS (mg/l)	343.4
		CMAX (mg/l)	1917.89		
		CMS (mg/l)	409.84		

### Episodio: S1\_10



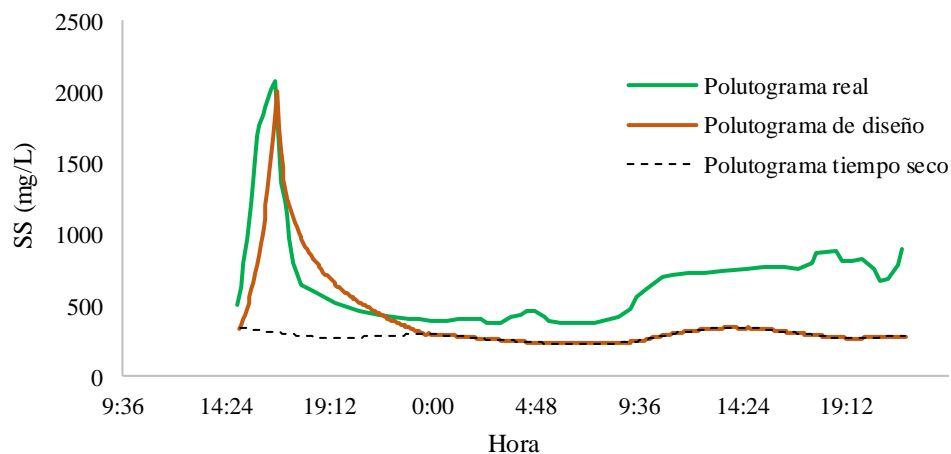
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	13.46	Índice TPP	1.005	TPP (min)	104.76
P. seco (días)	12	Índice CMAX	1.023	CMAX (mg/l)	1201.16
TPH (min)	135	TPP (min)	101.5	CMS (mg/l)	564.9
		CMAX (mg/l)	1691.85		
		CMS (mg/l)	448.77		

## Episodio: SF\_1



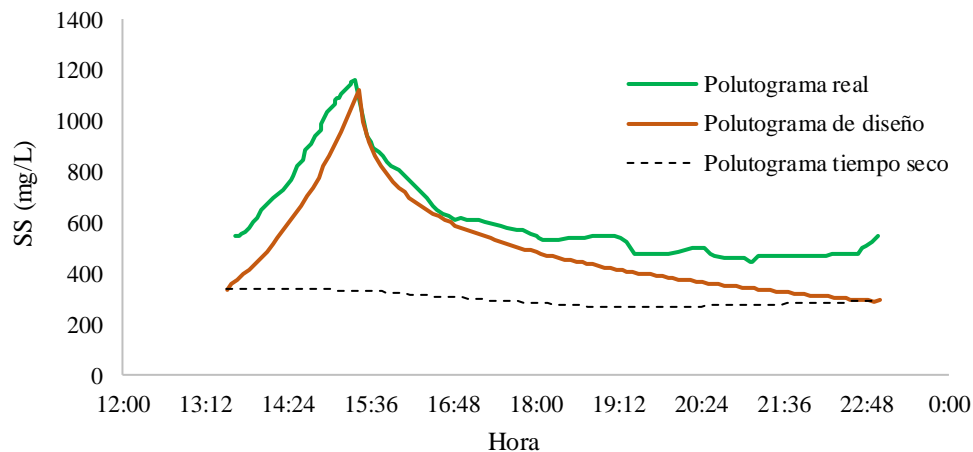
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	7.3	Índice TPP	0.924	TPP (min)	64.81
P. seco (días)	15	Índice CMAX	1.026	CMAX (mg/l)	1520.81
TPH (min)	35	TPP (min)	71.3	CMS (mg/l)	599.3
		CMAX (mg/l)	1694.11		
		CMS (mg/l)	717.25		

## Episodio: SF\_2



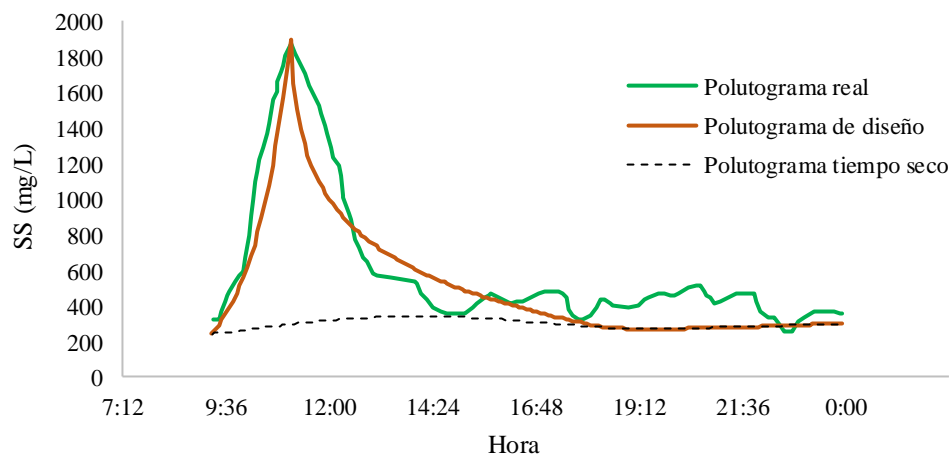
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	30.71	Índice TPP	1.020	TPP (min)	99.88
P. seco (días)	10	Índice CMAX	1.396	CMAX (mg/l)	2072.87
TPH (min)	60	TPP (min)	107.1	CMS (mg/l)	668.3
		CMAX (mg/l)	1997.86		
		CMS (mg/l)	499.15		

### Episodio: SF\_3



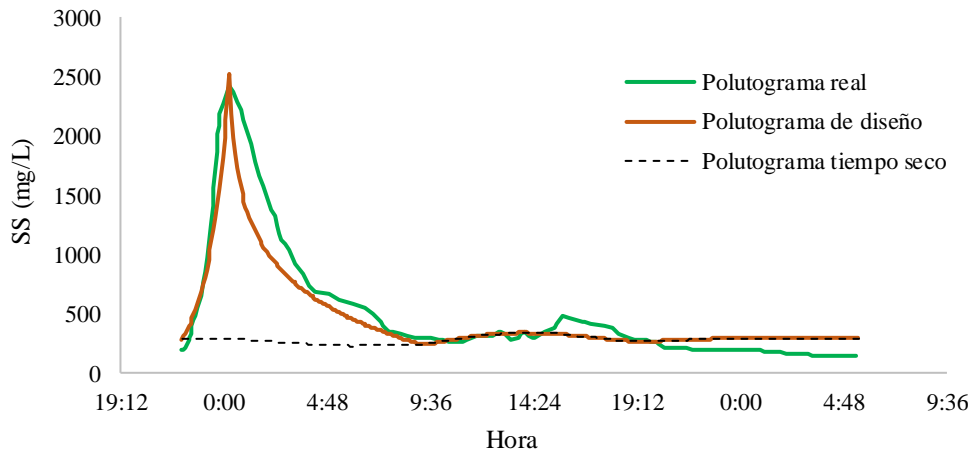
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	2.5	Índice TPP	1.043	TPP (min)	111.89
P. seco (días)	1	Índice CMAX	0.328	CMAX (mg/l)	1163.82
TPH (min)	105	TPP (min)	115.7	CMS (mg/l)	684.9
		CMAX (mg/l)	1120.89		
		CMS (mg/l)	594.63		

### Episodio: SF\_4



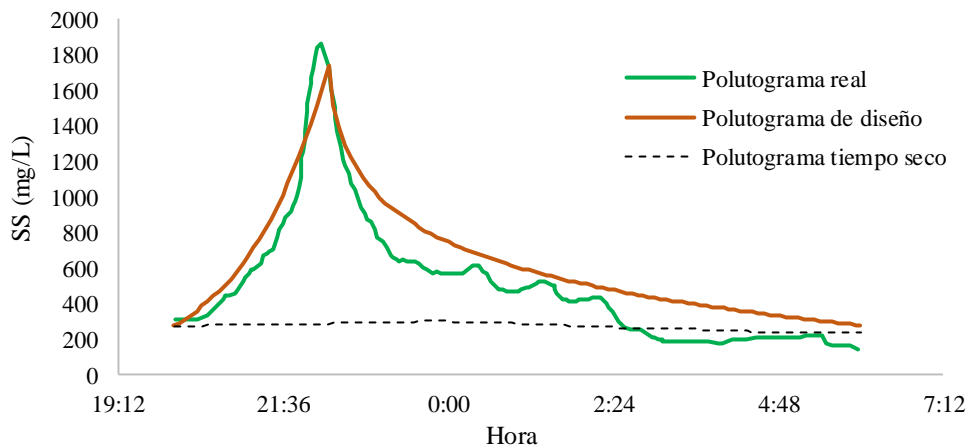
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	10.13	Índice TPP	1.036	TPP (min)	110.18
P. seco (días)	22	Índice CMAX	1.268	CMAX (mg/l)	1874.35
TPH (min)	80	TPP (min)	113.0	CMS (mg/l)	766.1
		CMAX (mg/l)	1892.68		
		CMS (mg/l)	682.45		

### Episodio: SF\_5



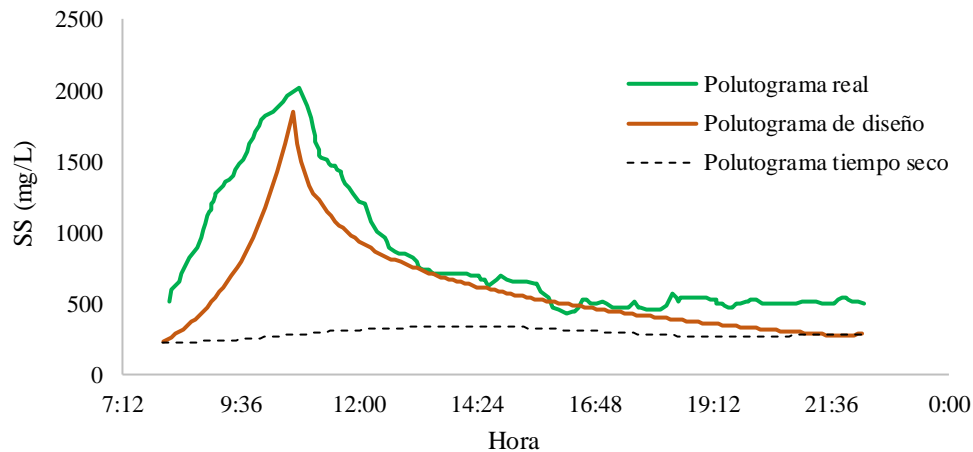
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	56.5	Índice TPP	1.096	TPP (min)	132.82
P. seco (días)	19	Índice CMAX	2.032	CMAX (mg/l)	2424.94
TPH (min)	95	TPP (min)	135.6	CMS (mg/l)	645.6
		CMAX (mg/l)	2520.07		
		CMS (mg/l)	546.90		

### Episodio: SF\_6



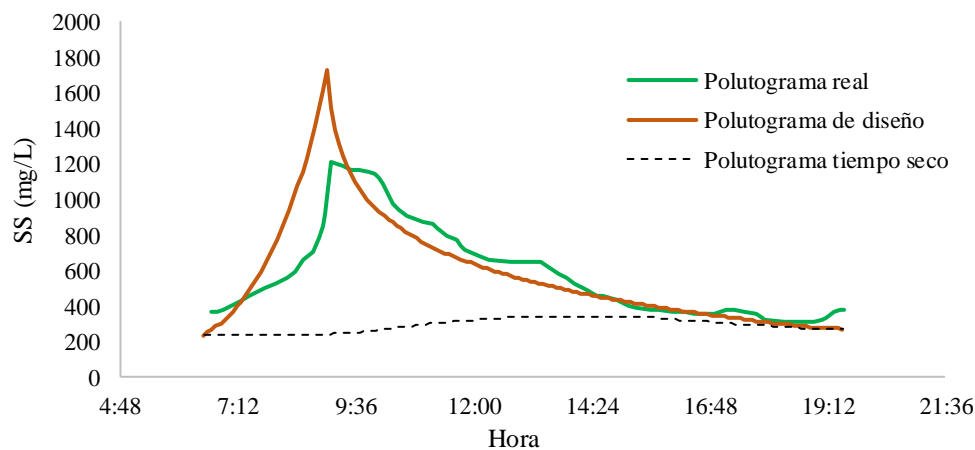
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	7.53	Índice TPP	1.097	TPP (min)	128.67
P. seco (días)	17	Índice CMAX	1.074	CMAX (mg/l)	1860.35
TPH (min)	130	TPP (min)	135.7	CMS (mg/l)	737.7
		CMAX (mg/l)	1733.08		
		CMS (mg/l)	860.08		

## Episodio: SF\_7



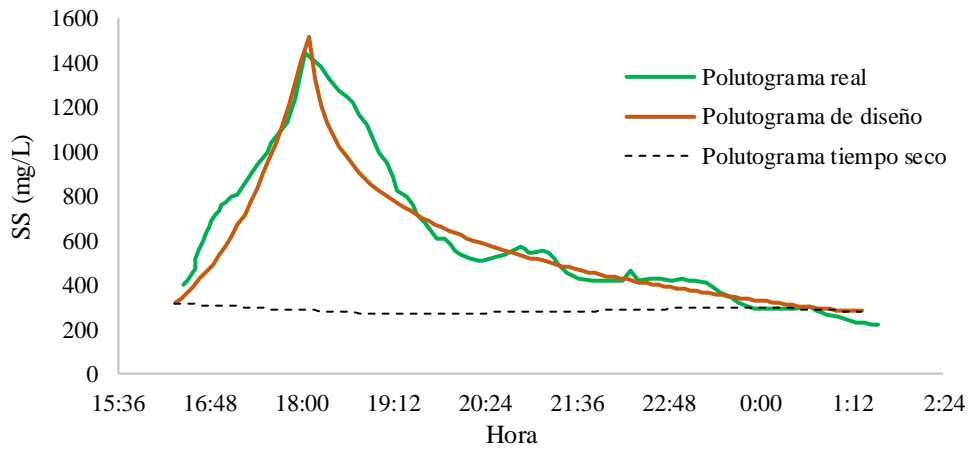
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	11.6	Índice TPP	1.174	TPP (min)	165.61
P. seco (días)	17	Índice CMAX	1.221	CMAX (mg/l)	2020.29
TPH (min)	205	TPP (min)	164.5	CMS (mg/l)	1062.9
		CMAX (mg/l)	1854.48		
		CMS (mg/l)	837.23		

## Episodio: SF\_8



Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	6.80	Índice TPP	1.142	TPP (min)	156.51
P. seco (días)	18	Índice CMAX	1.059	CMAX (mg/l)	1204.60
TPH (min)	180	TPP (min)	152.6	CMS (mg/l)	722.4
		CMAX (mg/l)	1721.43		
		CMS (mg/l)	723.62		

**Episodio: SF\_9**



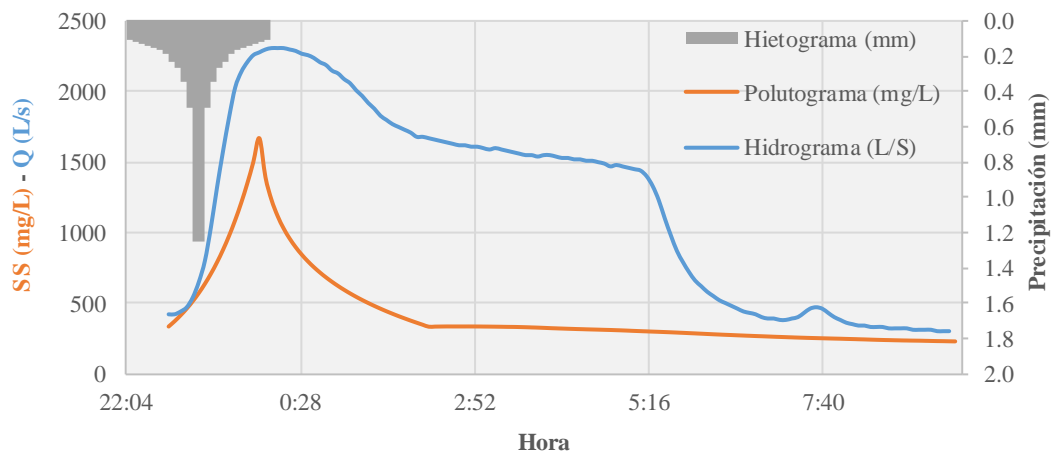
Datos para predicción		Índices de predicción y cálculo de variables		Variables en el polutograma real	
P. total (mm)	2.27	Índice TPP	1.021	TPP (min)	103.30
P. seco (días)	22	Índice CMAX	0.810	CMAX (mg/l)	1439.24
TPH (min)	90	TPP (min)	107.4	CMS (mg/l)	763.2
		CMAX (mg/l)	1516.54		
		CMS (mg/l)	720.43		



***ANEJO III. POLUTOGRAMAS DE DISEÑO PARA  
DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO***

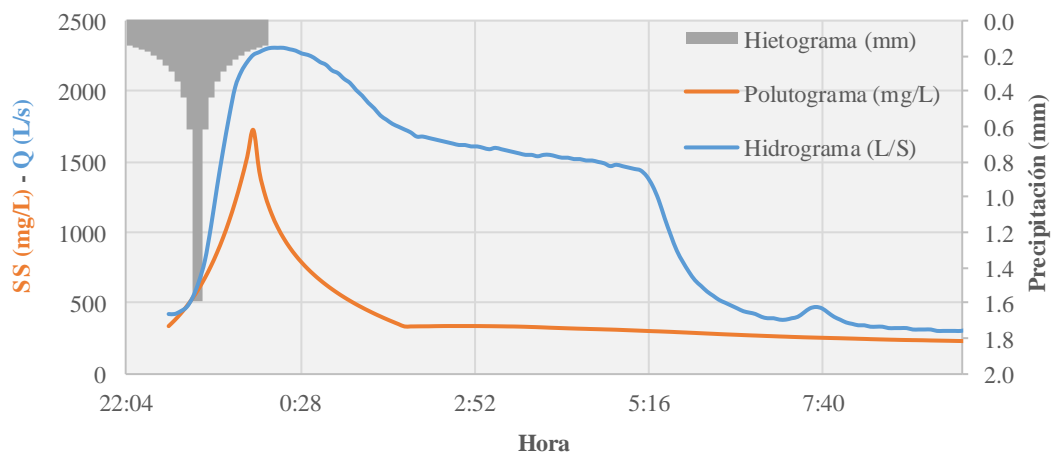


### Cuenca S1 - Tr=0.25 años



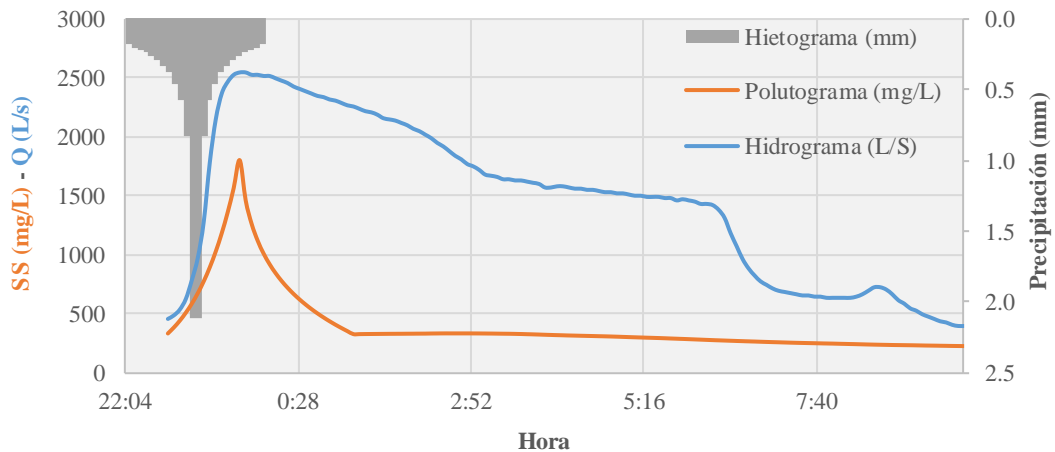
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	7.18	Índice TPP	0.935	TPP (min)	75.18
P. seco (días)	20	Índice CMAX	0.988	CMAX (mg/l)	1662.71
TPH (min)	85			CMS (mg/l)	544.0
				Volumen (m <sup>3</sup> )	47115.00
				QMAX (l/s)	2310
				QMED (l/s)	1209.0

### Cuenca S1 - Tr=0.33 años



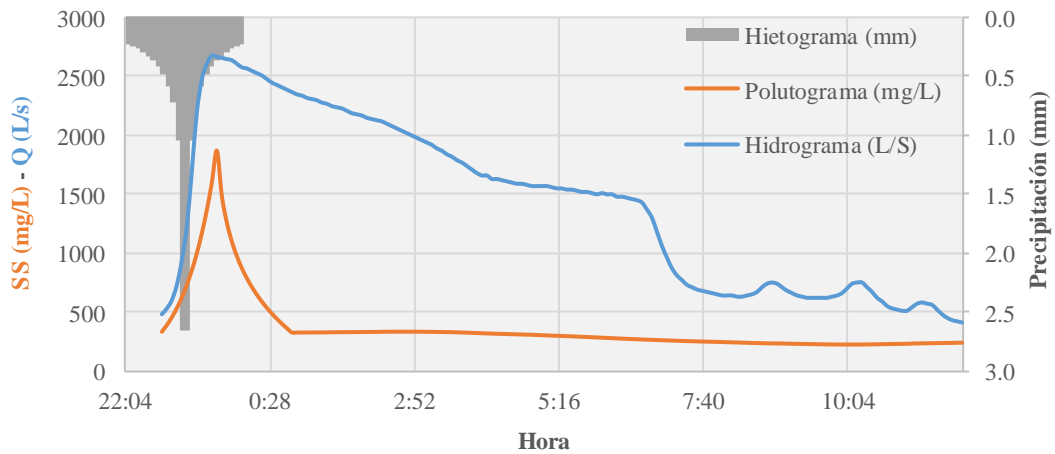
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	9.18	Índice TPP	0.924	TPP (min)	71.23
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.064	CMAX (mg/l)	1724.79
TPH (min)	75			CMS (mg/l)	531.7
				Volumen (m <sup>3</sup> )	47298.00
				QMAX (l/s)	2310
				QMED (l/s)	1121.13

### Cuenca S1 - Tr=0.5 años



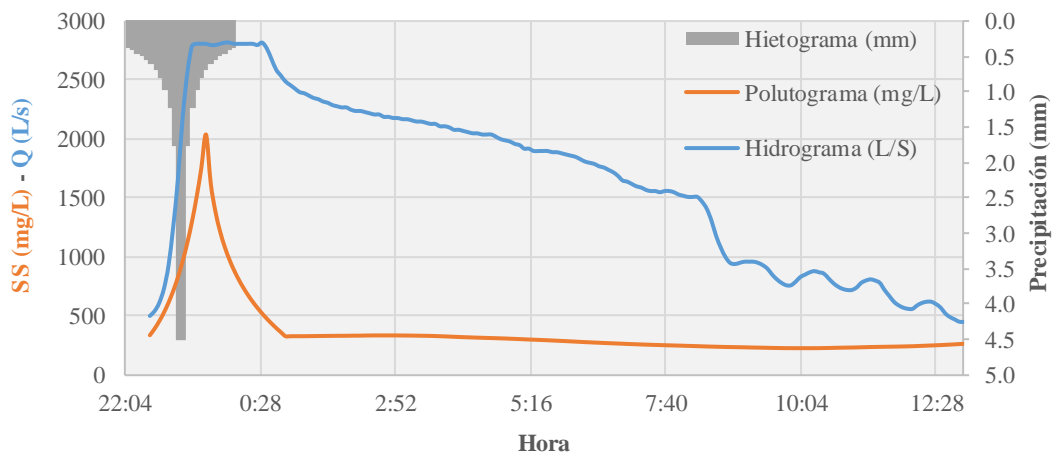
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	12.18	Índice TPP	0.903	TPP (min)	63.27
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.158	CMAX (mg/l)	1802.14
TPH (min)	60			CMS (mg/l)	483.2
				Volumen (m <sup>3</sup> )	58899.00
				QMAX (l/s)	2550
				QMED (l/s)	1446.91

### Cuenca S1 - Tr=1 año



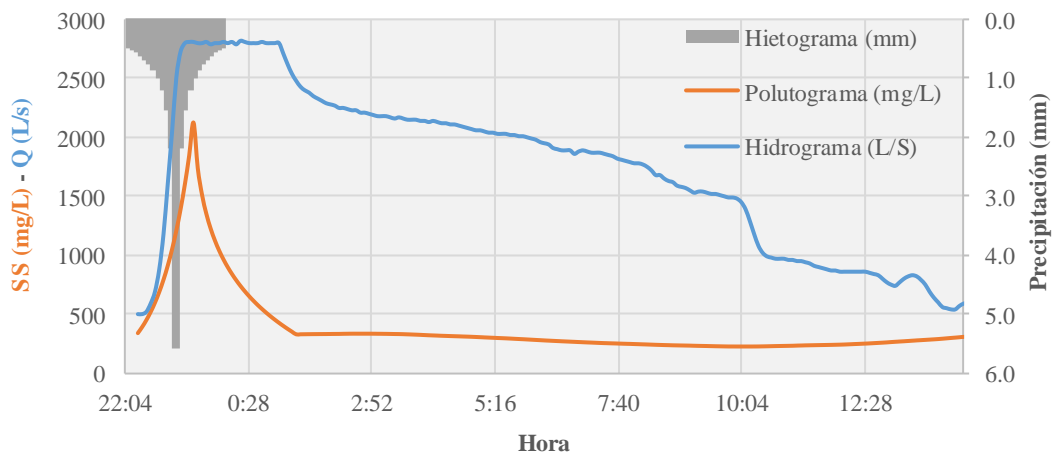
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	15.28	Índice TPP	0.886	TPP (min)	56.87
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.239	CMAX (mg/l)	1869.08
TPH (min)	50			CMS (mg/l)	446.9
				Volumen (m <sup>3</sup> )	68058.00
				QMAX (l/s)	2680
				QMED (l/s)	1412.05

### Cuenca S1 - Tr=1.5 años



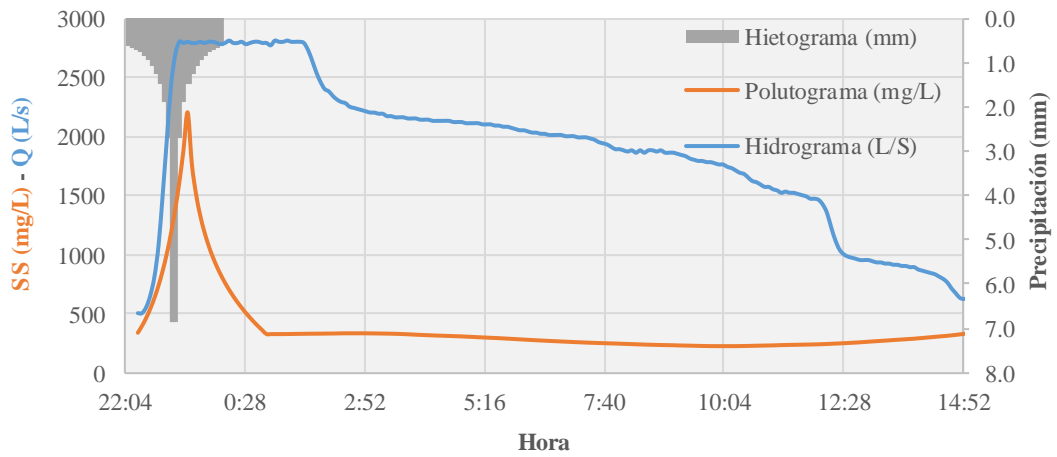
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	25.90	Índice TPP	0.895	TPP (min)	60.38
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.452	CMAX (mg/l)	2043.68
TPH (min)	50			CMS (mg/l)	446.6
				Volumen (m <sup>3</sup> )	85812.00
				QMAX (l/s)	2810
				QMED (l/s)	1637.31

### Cuenca S1 - Tr=2 años



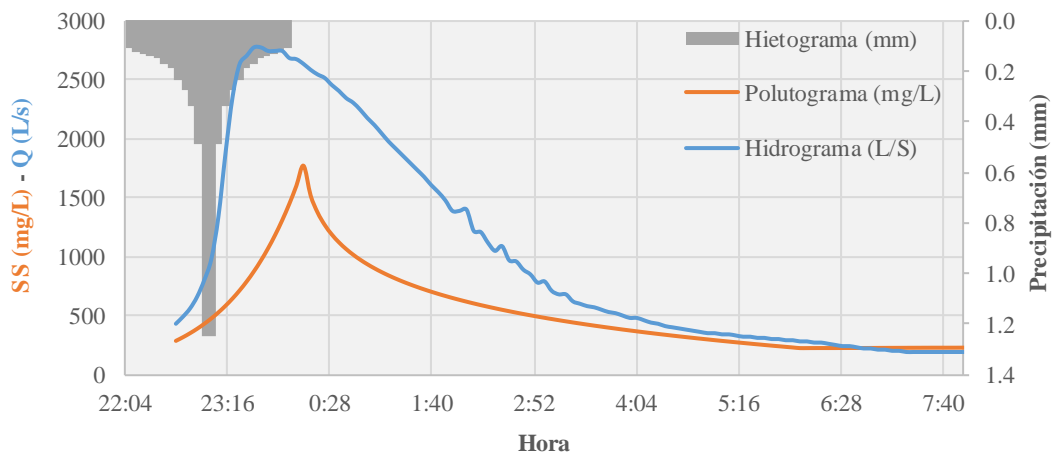
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	32.16	Índice TPP	0.920	TPP (min)	69.88
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.549	CMAX (mg/l)	2123.70
TPH (min)	60			CMS (mg/l)	451.7
				Volumen (m <sup>3</sup> )	100863.00
				QMAX (l/s)	2820
				QMED (l/s)	1726.72

**Cuenca S1 - Tr=3 años**



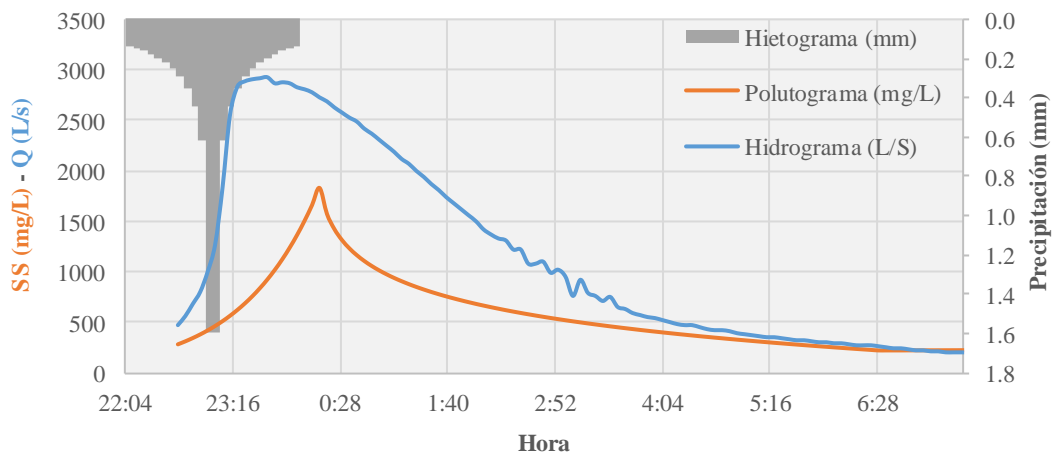
<b>Datos para predicción</b>		<b>Índices de predicción</b>		<b>Cálculo de variables</b>	
P. total (mm)	39.42	Índice TPP	0.902	TPP (min)	63.20
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.647	CMAX (mg/l)	2203.83
TPH (min)	50			CMS (mg/l)	418.7
				Volumen (m <sup>3</sup> )	113313.00
				QMAX (l/s)	2820
				QMED (l/s)	1881.69

### Cuenca San Félix - Tr=0.25 años



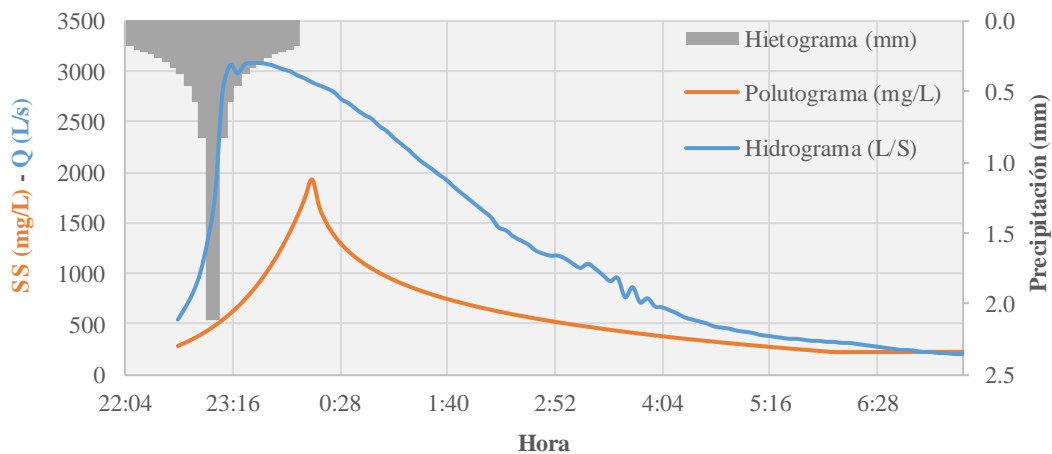
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	7.18	Índice TPP	0.980	TPP (min)	92.07
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.111	CMAX (mg/l)	1764.04
TPH (min)	55			CMS (mg/l)	816.3
				Volumen (m <sup>3</sup> )	34059.00
				QMAX (l/s)	2780
				QMED (l/s)	1008.50

### Cuenca San Félix - Tr=0.33 años



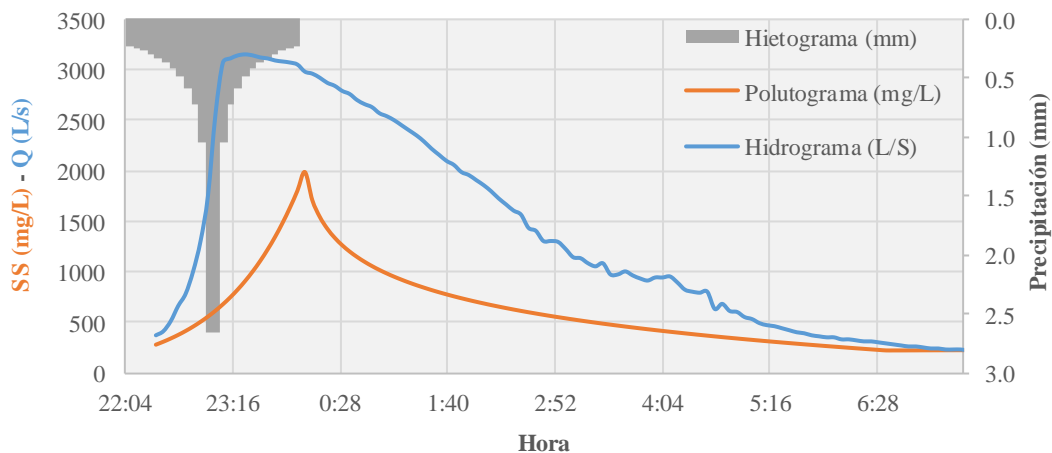
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	9.18	Índice TPP	0.996	TPP (min)	98.06
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.196	CMAX (mg/l)	1833.88
TPH (min)	60			CMS (mg/l)	848.9
				Volumen (m <sup>3</sup> )	36957.00
				QMAX (l/s)	2930
				QMED (l/s)	1155.70

### Cuenca San Félix - Tr=0.5 años



Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	12.18	Índice TPP	0.978	TPP (min)	91.41
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.302	CMAX (mg/l)	1920.88
TPH (min)	50			CMS (mg/l)	844.2
				Volumen (m <sup>3</sup> )	41253.00
				QMAX (l/s)	3080
				QMED (l/s)	1290.28

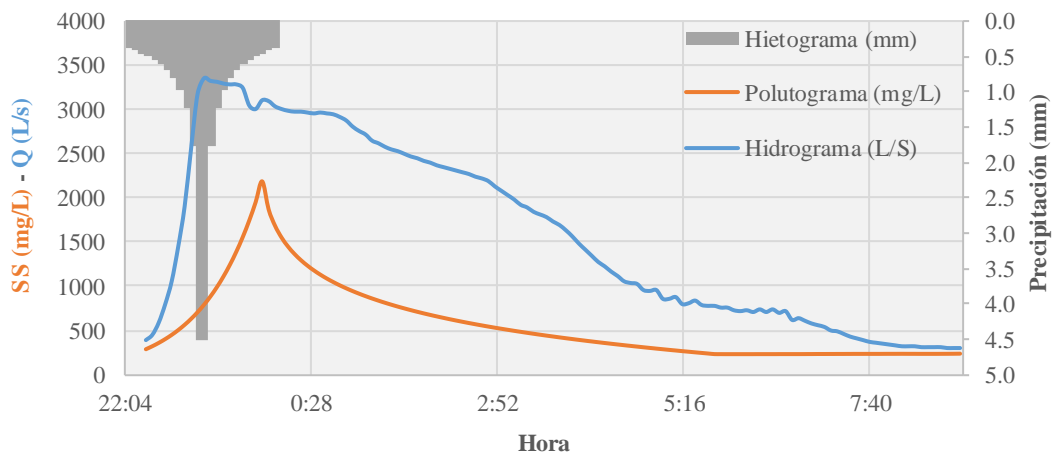
### Cuenca San Félix - Tr=1 año



Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	15.28	Índice TPP	1.006	TPP (min)	101.87
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.394	CMAX (mg/l)	1996.18
TPH (min)	60			CMS (mg/l)	880.3
				Volumen (m <sup>3</sup> )	45813.00
				QMAX (l/s)	3150
				QMED (l/s)	1391.73

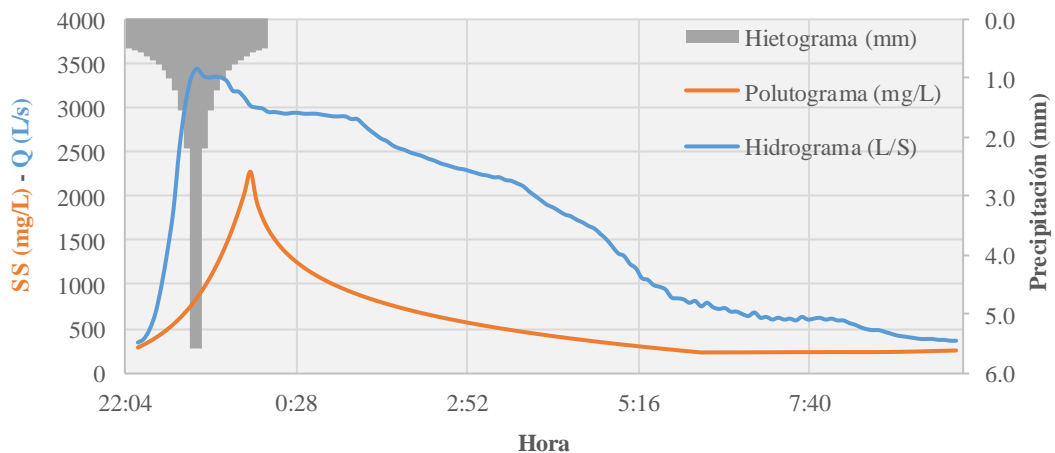


### Cuenca San Félix - Tr=1.5 años



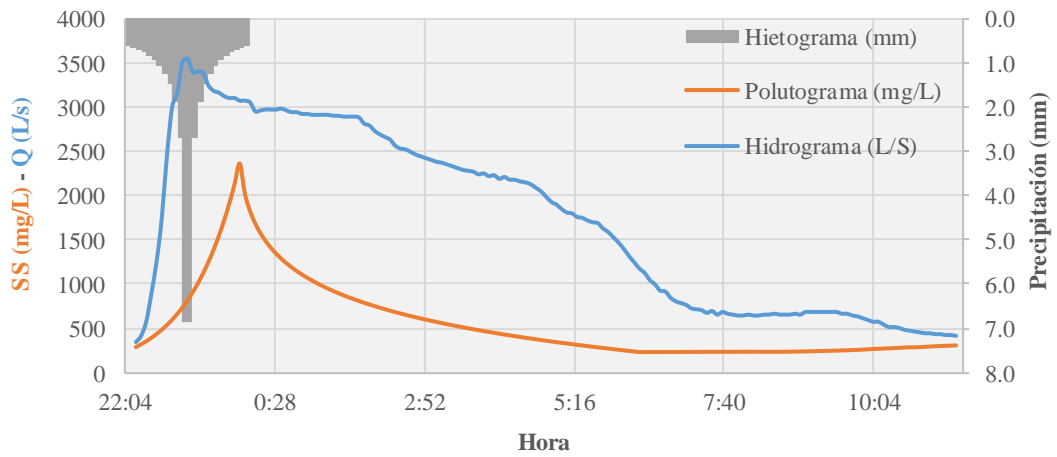
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	25.90	Índice TPP	0.979	TPP (min)	91.92
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.633	CMAX (mg/l)	2192.58
TPH (min)	45			CMS (mg/l)	809.0
				Volumen (m <sup>3</sup> )	60606.00
				QMAX (l/s)	3360
				QMED (l/s)	1593.70

### Cuenca San Félix - Tr=2 años



Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	32.16	Índice TPP	0.997	TPP (min)	98.57
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.743	CMAX (mg/l)	2282.59
TPH (min)	50			CMS (mg/l)	798.6
				Volumen (m <sup>3</sup> )	70035.00
				QMAX (l/s)	3450
				QMED (l/s)	1682.01

### Cuenca San Félix - Tr=3 años



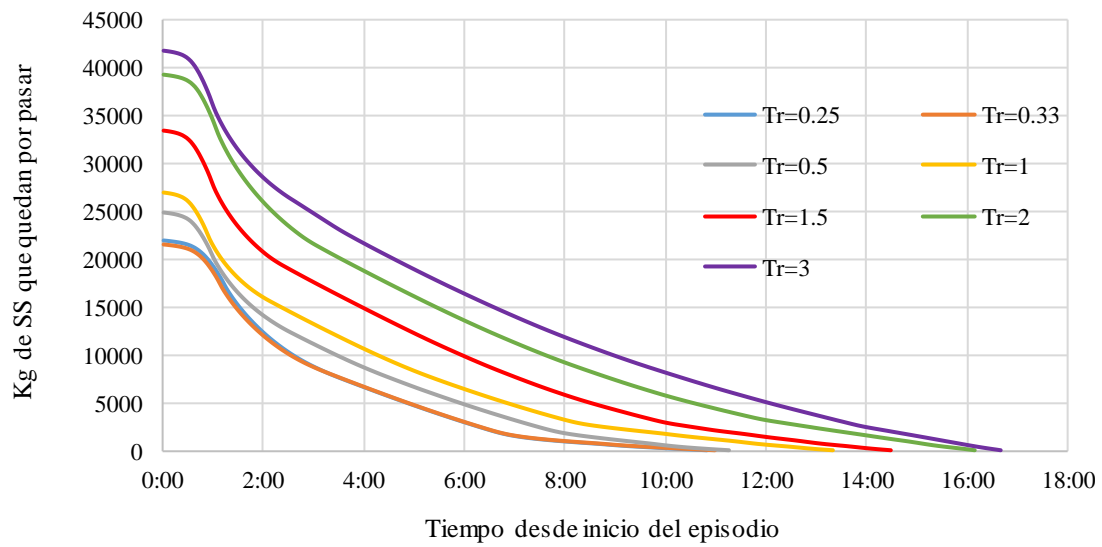
Datos para predicción		Índices de predicción		Cálculo de variables	
P. total (mm)	39.42	Índice TPP	1.001	TPP (min)	100.09
P. seco (días)	20	Índice CMAX	1.852	CMAX (mg/l)	2372.73
TPH (min)	50			CMS (mg/l)	761.2
				Volumen (m <sup>3</sup> )	82350.00
				QMAX (l/s)	3540
				QMED (l/s)	1728.62

***ANEJO IV. ÁBACOS DE MOVILIZACIÓN DE  
MASA PARA DISTINTAS LLUVIAS DE DISEÑO***

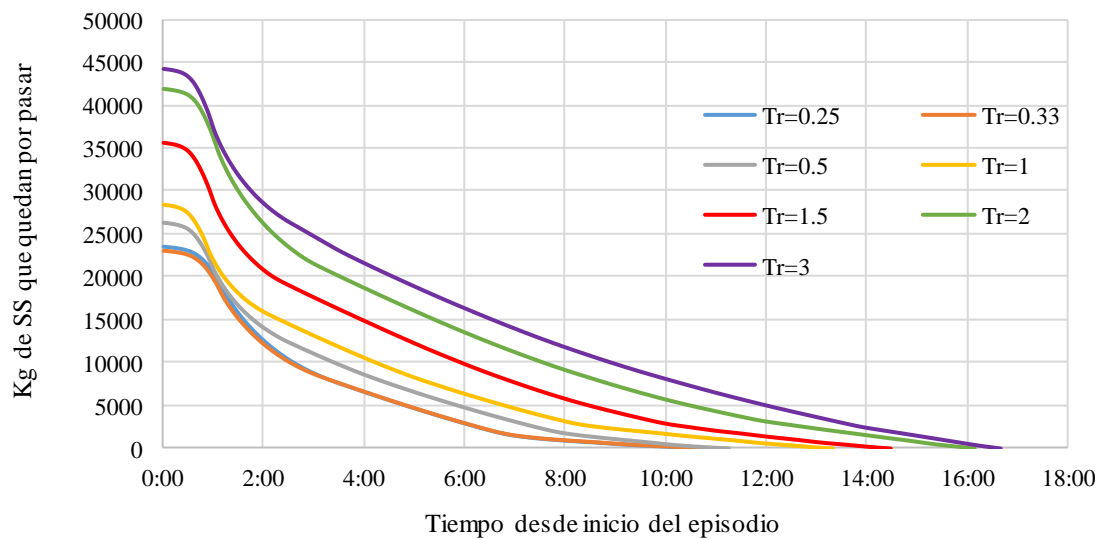


## Ábacos de movilización de masa para la cuenca S1 En función del periodo seco previo

Periodo seco = 1 día

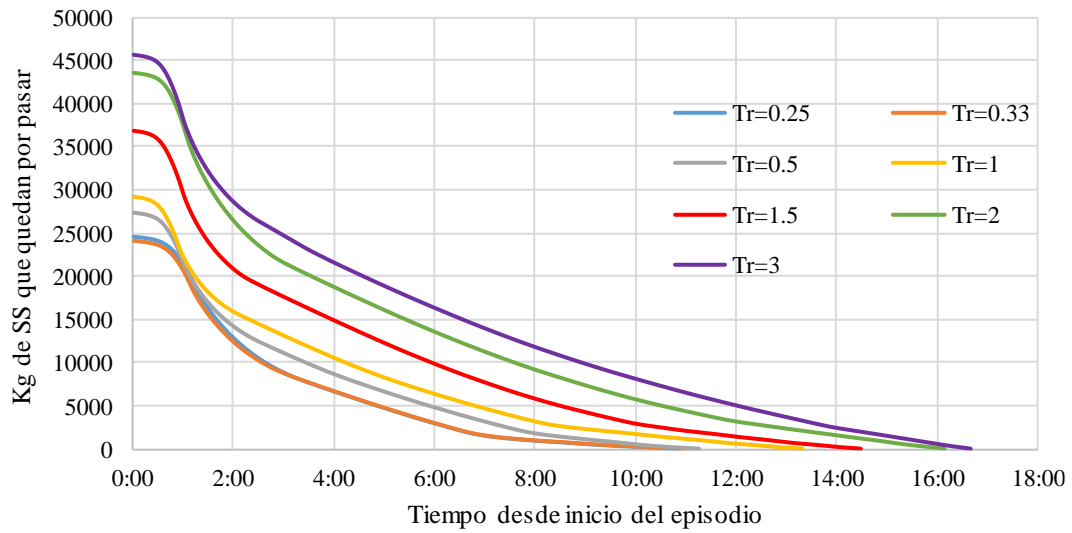


Periodo seco = 5 días

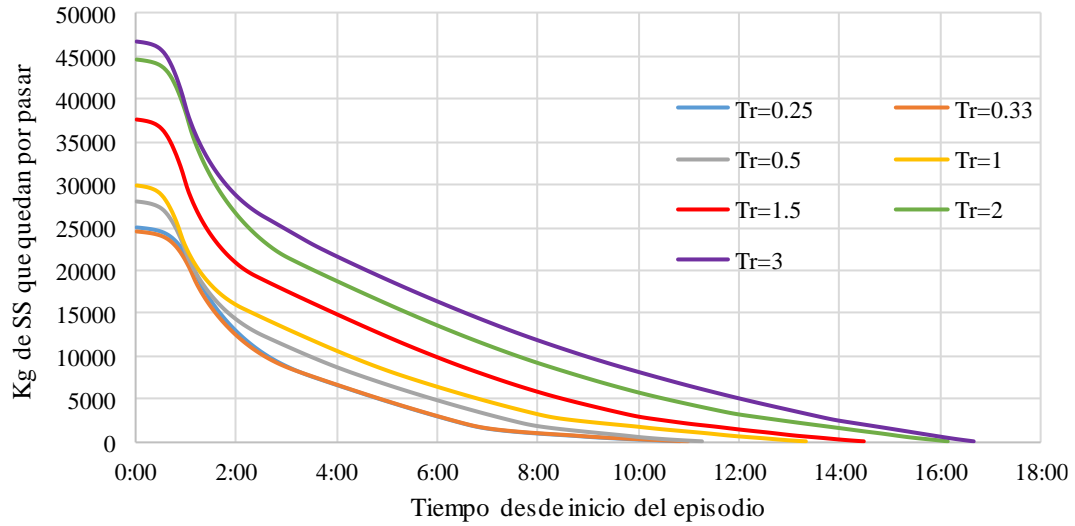


## Ábacos de movilización de masa para la cuenca S1 En función del periodo seco previo

**Periodo seco = 10 días**

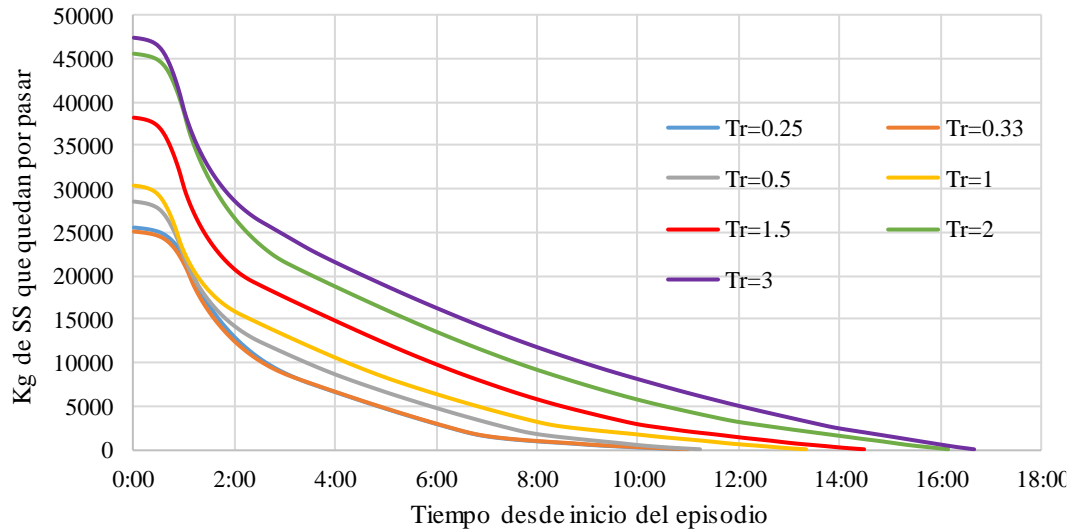


**Periodo seco = 15 días**

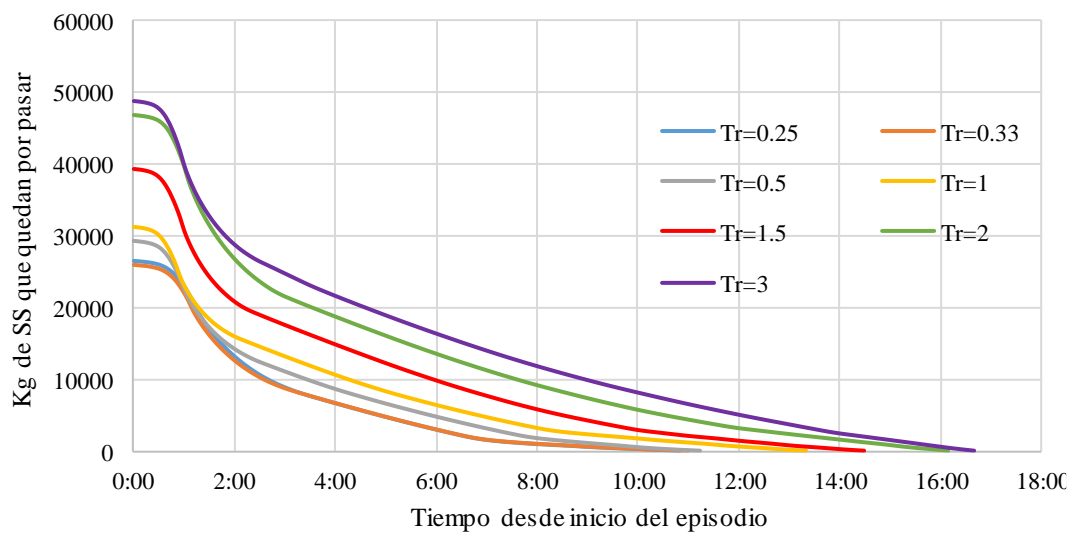


## Ábacos de movilización de masa para la cuenca S1 En función del periodo seco previo

Periodo seco = 20 días

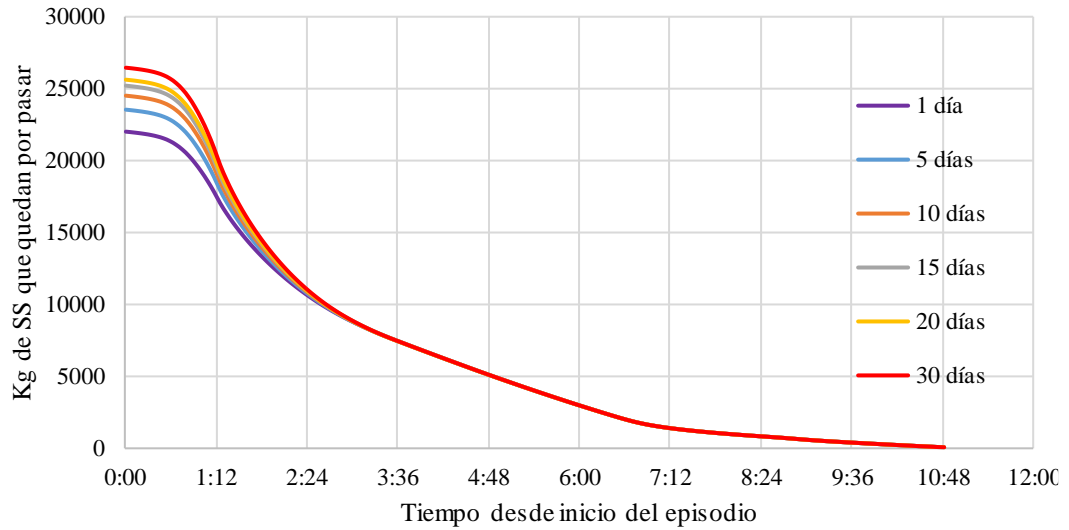


Periodo seco = 30 días

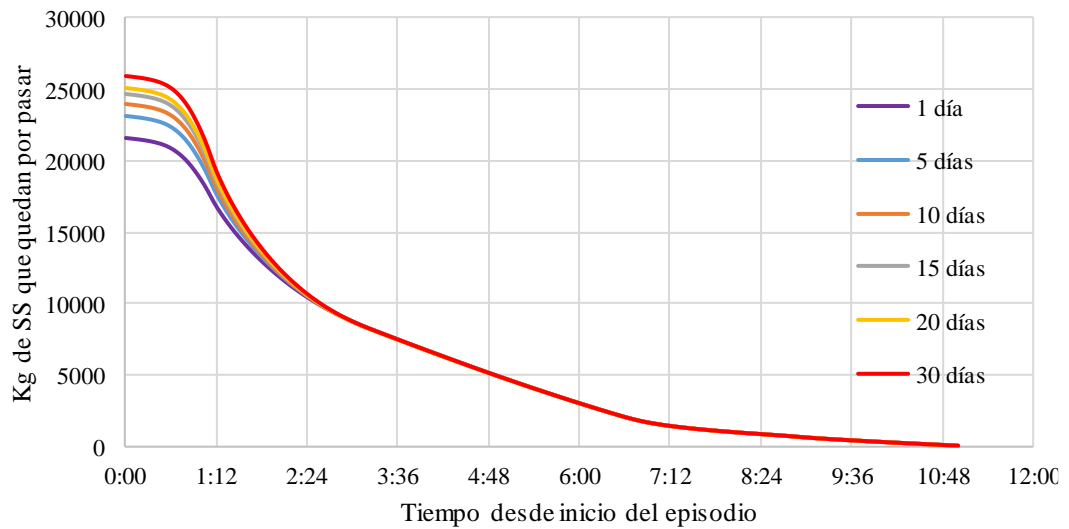


**Ábacos de movilización de masa para la cuenca S1**  
**En función del periodo de retorno de la lluvia**

**Tr= 0.25 años**



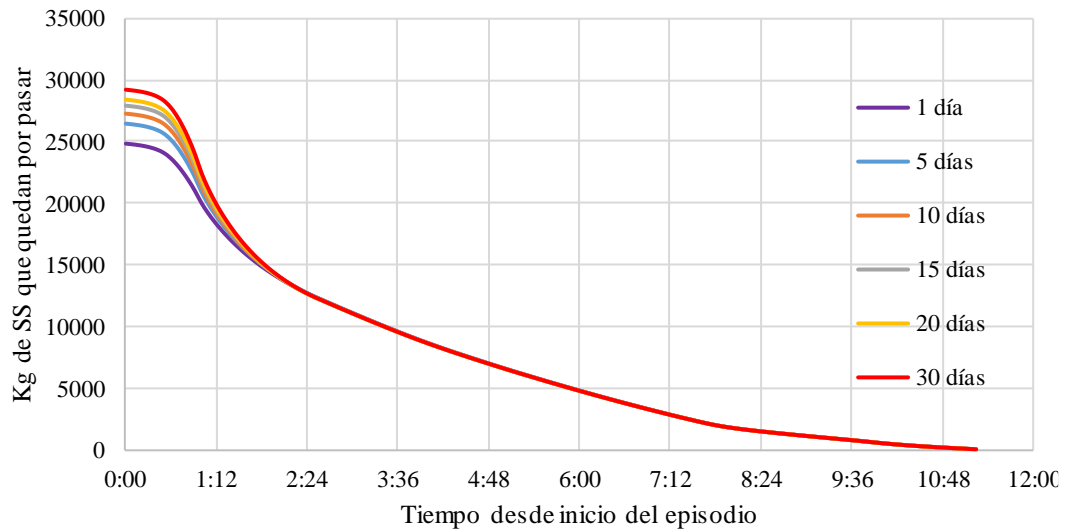
**Tr= 0.33 años**



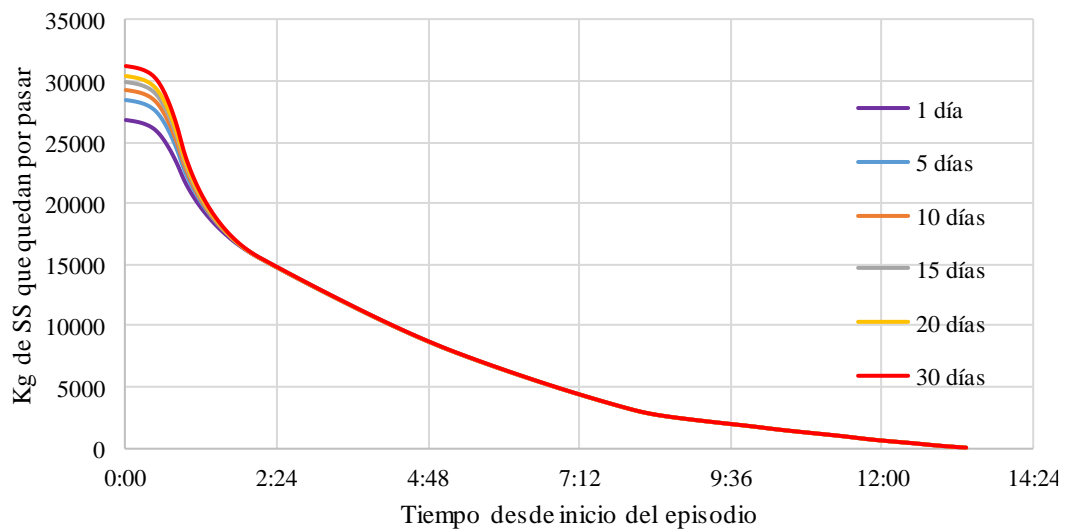


## Ábacos de movilización de masa para la cuenca S1 En función del periodo de retorno de la lluvia

Tr= 0.5 años

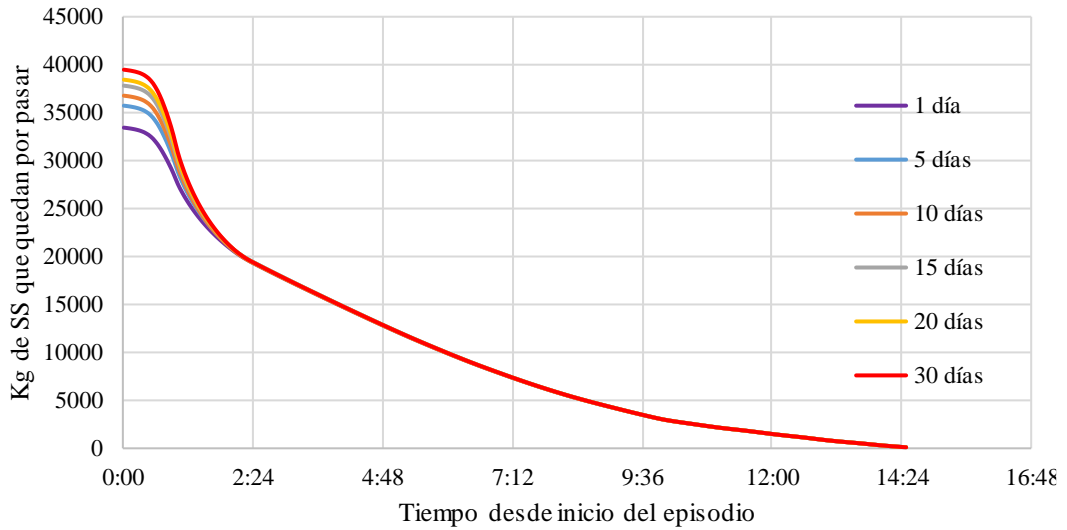


Tr= 1 año

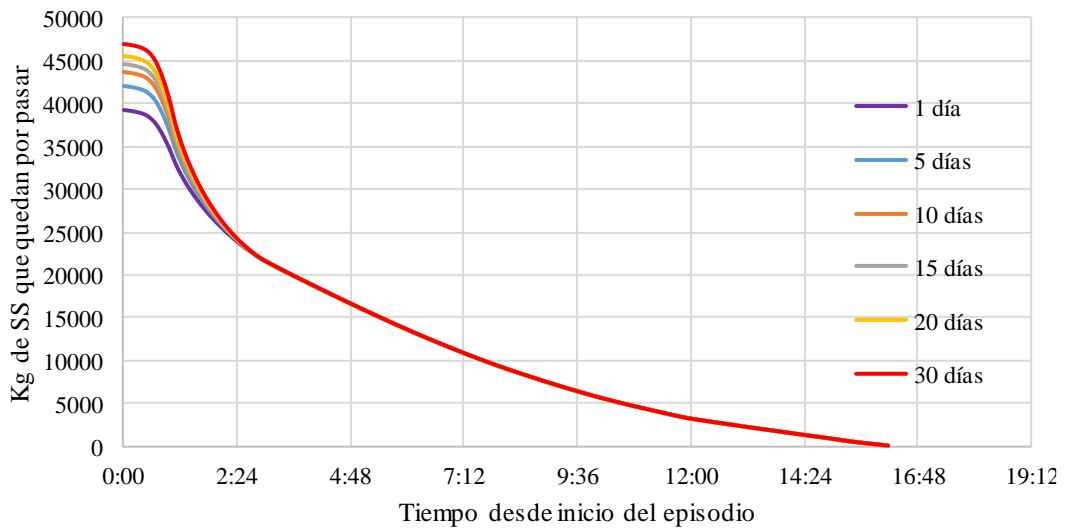


**Ábacos de movilización de masa para la cuenca S1**  
**En función del periodo de retorno de la lluvia**

**Tr= 1.5 años**

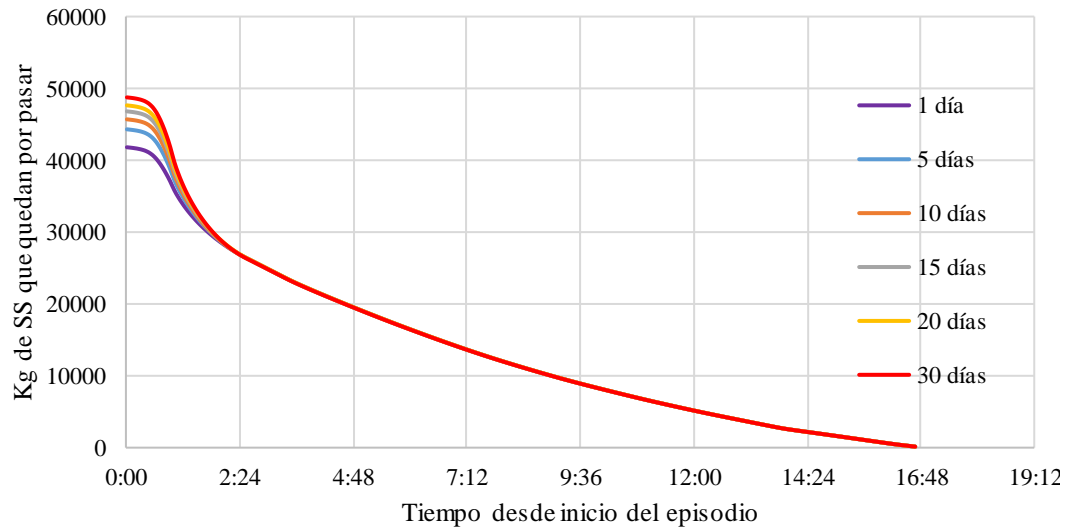


**Tr= 2 años**



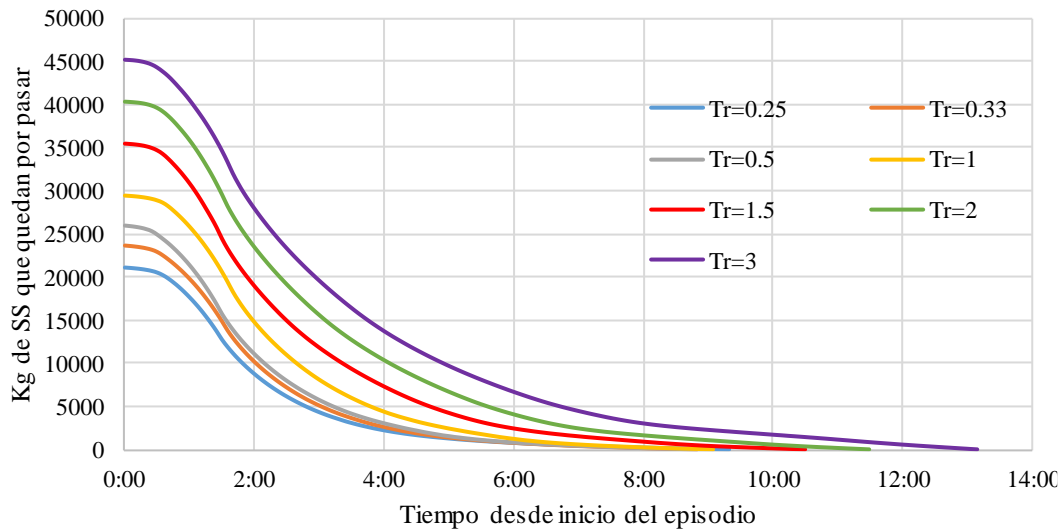
## Ábacos de movilización de masa para la cuenca S1 En función del periodo de retorno de la lluvia

Tr= 3 años

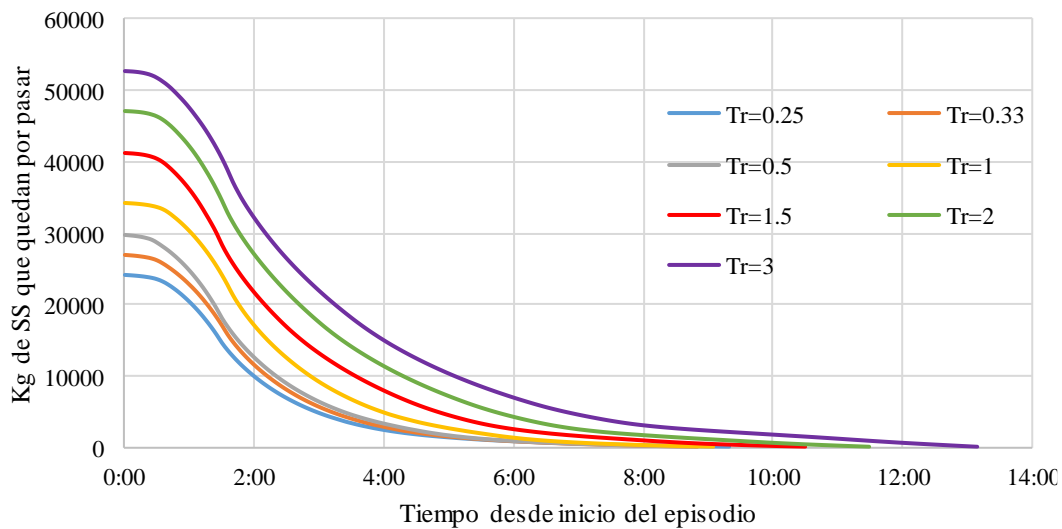


## Ábacos de movilización de masa para la cuenca San Félix En función del periodo seco previo

**Periodo seco = 1 día**

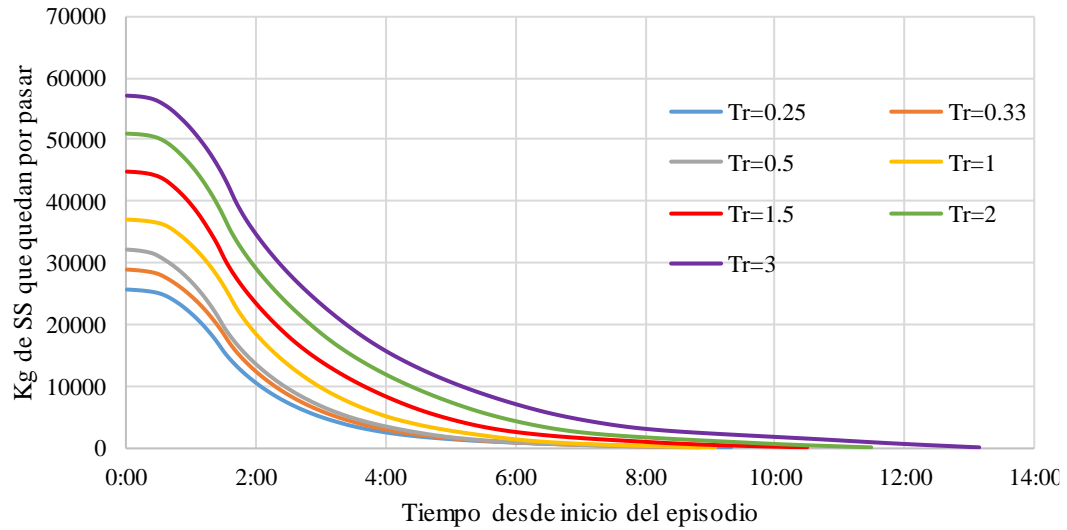


**Periodo seco = 5 días**

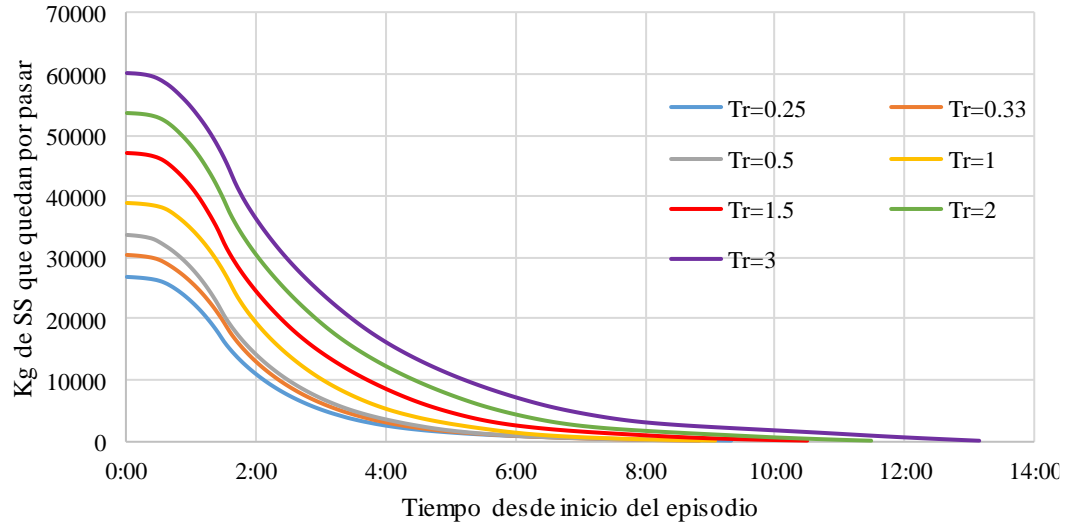


## Ábacos de movilización de masa para la cuenca San Félix En función del periodo seco previo

Periodo seco = 10 días

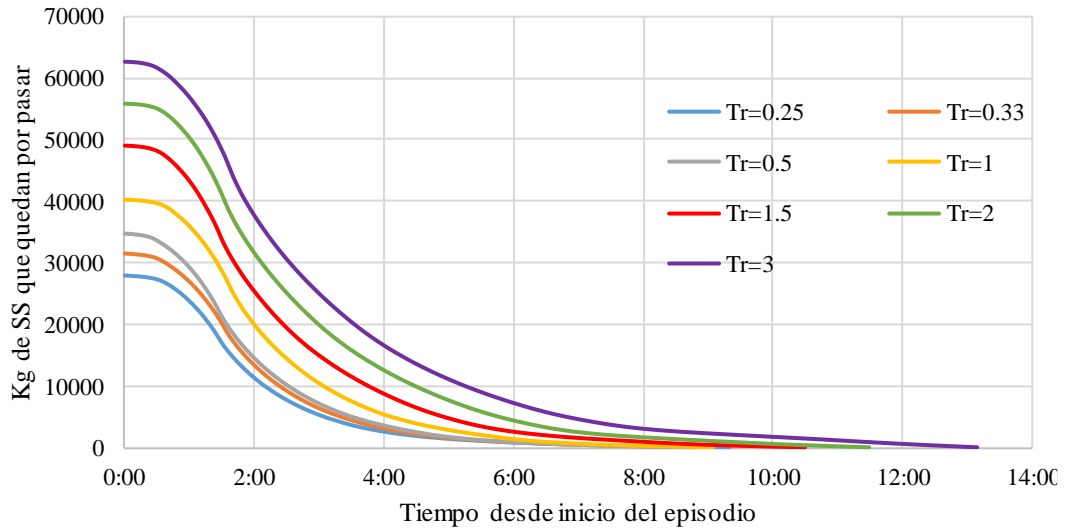


Periodo seco = 15 días

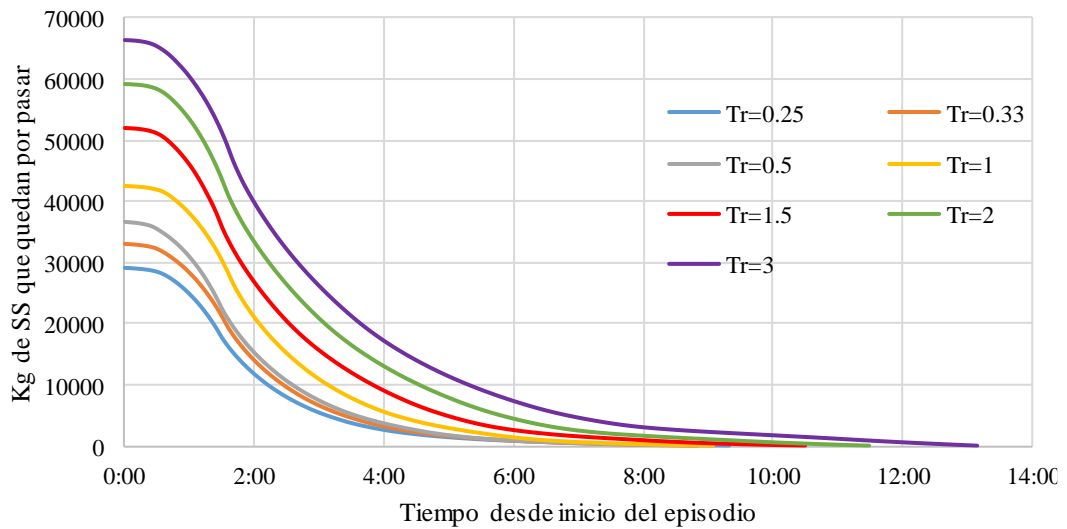


**Ábacos de movilización de masa para la cuenca San Félix**  
**En función del periodo seco previo**

**Periodo seco = 20 días**

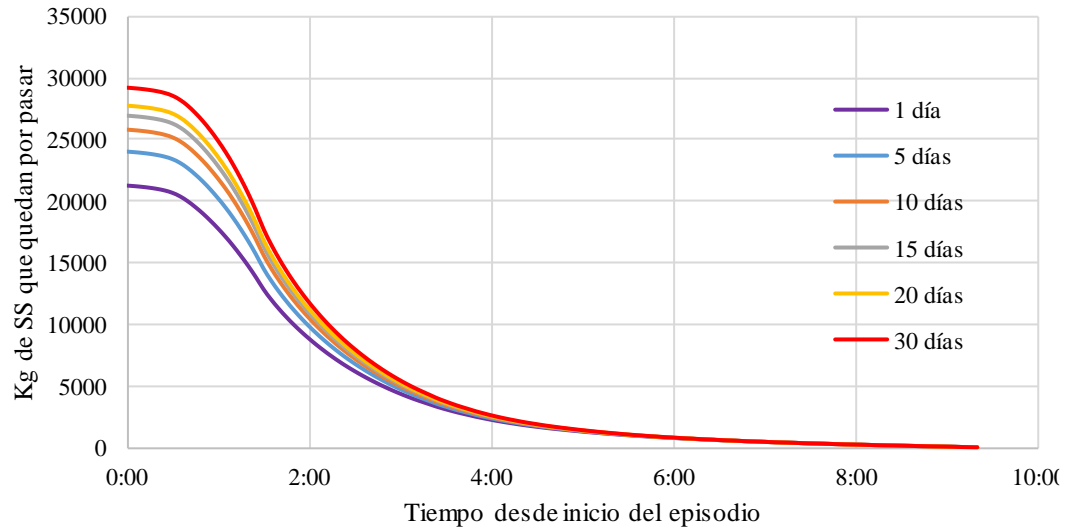


**Periodo seco = 30 días**

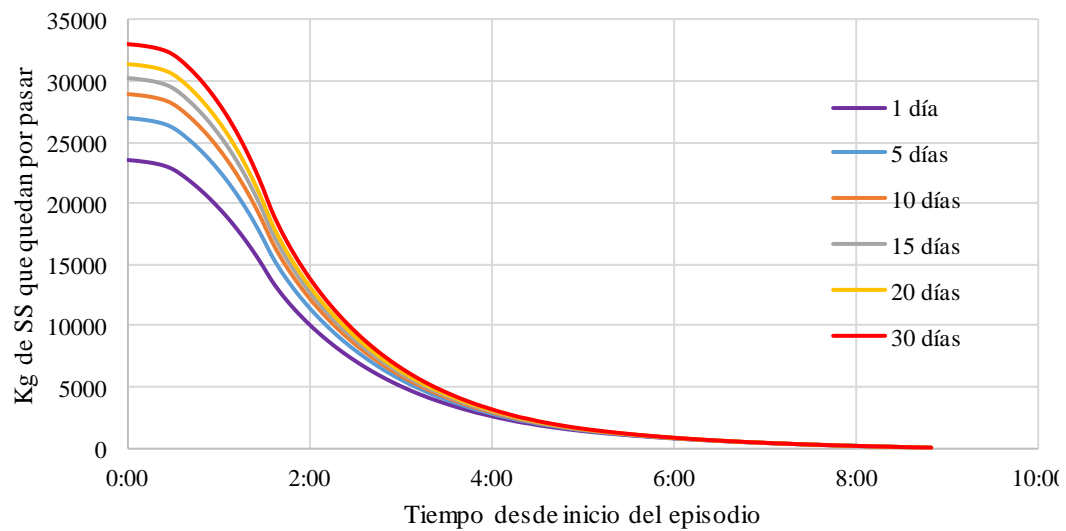


## Ábacos de movilización de masa para la cuenca San Felix En función del periodo de retorno de la lluvia

**Tr= 0.25 años**

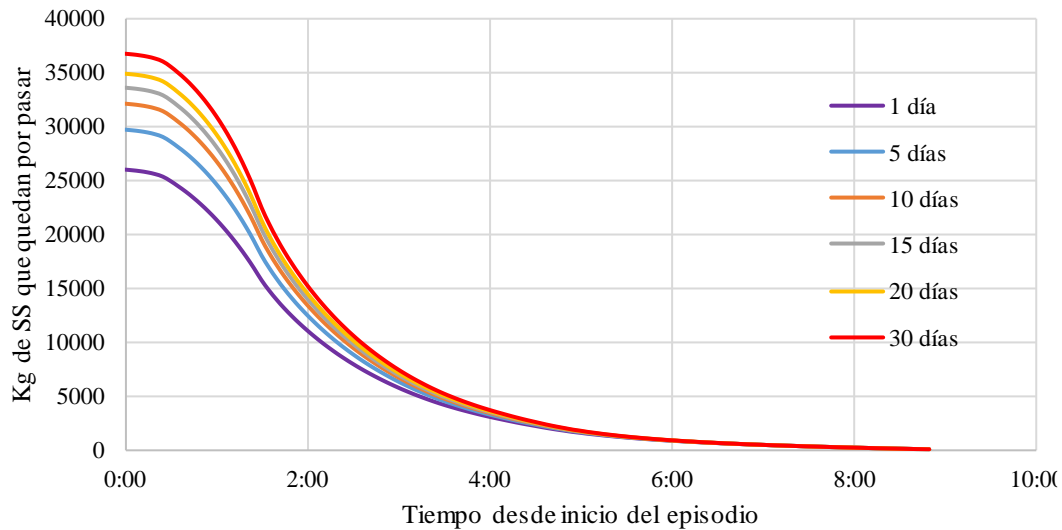


**Tr= 0.33 años**

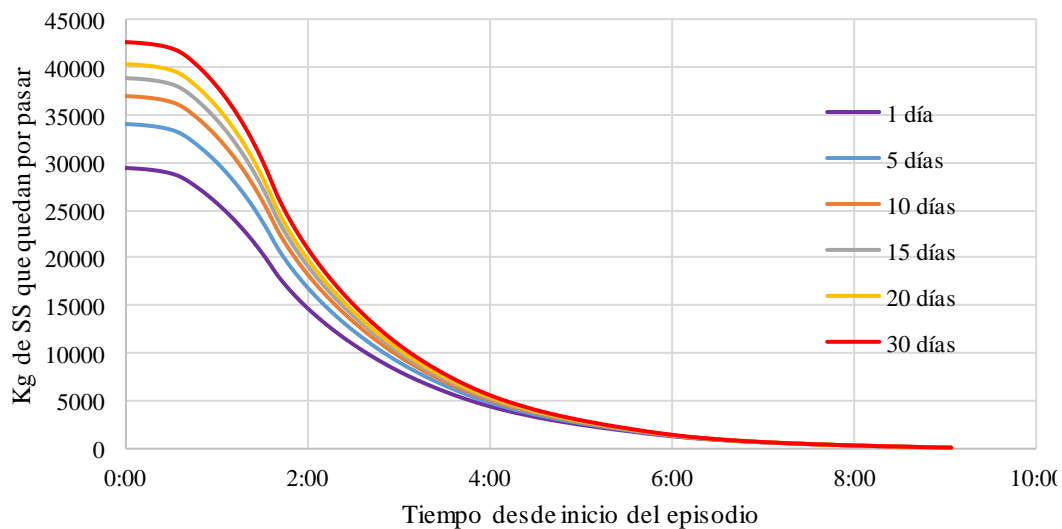


**Ábacos de movilización de masa para la cuenca San Felix**  
**En función del periodo de retorno de la lluvia**

**Tr= 0.5 años**



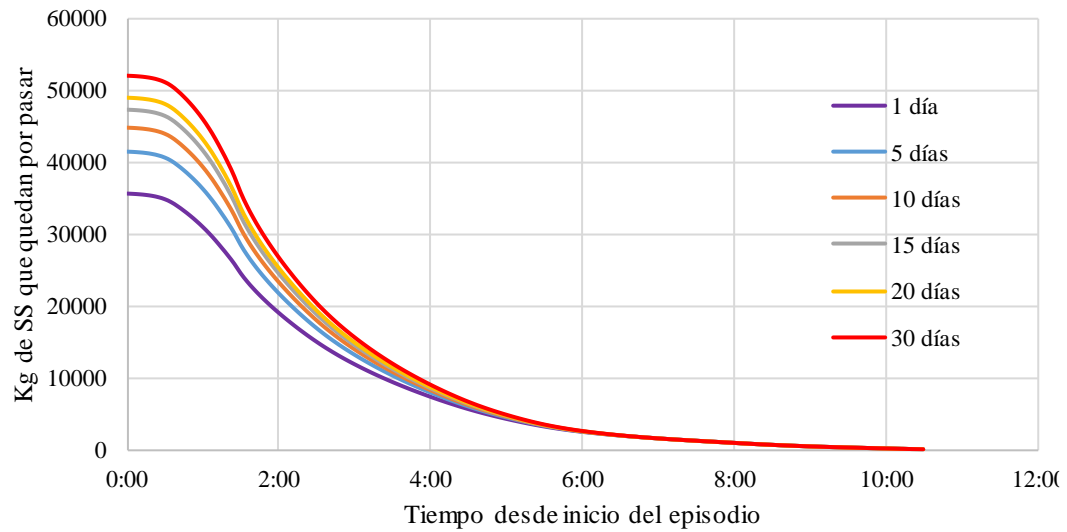
**Tr= 1 año**



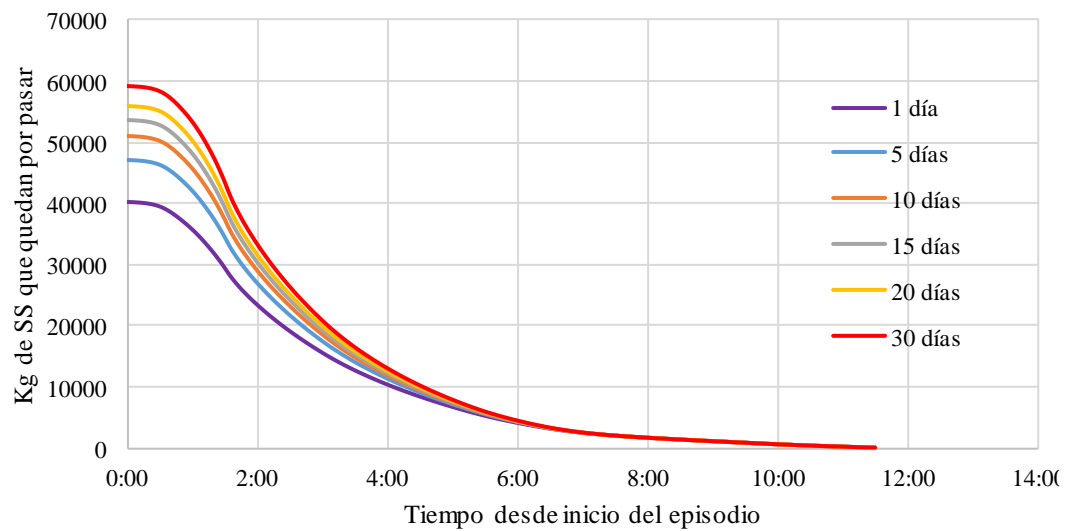


## Ábacos de movilización de masa para la cuenca San Felix En función del periodo de retorno de la lluvia

Tr= 1.5 años



Tr= 2 años



**Ábacos de movilización de masa para la cuenca San Felix**  
**En función del periodo de retorno de la lluvia**

**Tr= 3 años**

