



Título del Trabajo Fin de Máster:

***SISTEMAS DE DRENAJE URBANO
SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA
A UN TRAMO DE LA DIAGONAL DE
BARCELONA***

Intensificación:

TRATAMIENTO DE AGUAS

Autor:

ABELLÁN GARCÍA, ANA ISABEL

Director/es:

DR./DRA. FRANCÉS GARCÍA, FÉLIX RAMÓN

Fecha: **JULIO, 2013**



Título del Trabajo Fin de Máster:

SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA DIAGONAL DE BARCELONA

Autor: **ABELLÁN GARCÍA, ANA ISABEL**

Tipo	A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA	Fecha de Lectura	JULIO, 2013
Codirector1			
Codirector2			
Tutor	FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA		

Resumen:

No existe una definición concreta de lo que son los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible, pero podrían denominarse como el conjunto de aquellos elementos participantes en el drenaje de las ciudades y entornos urbanos que, además de atenuar el caudal circulante producido por un evento lluvioso, consiguen también disminuir de forma notable la cantidad de contaminantes contenidos en esa escorrentía. Así que, no sólo entran a formar parte de estos sistemas técnicos que requieren de infraestructuras, como ocurre en el caso del drenaje denominado "convencional", además considera otras técnicas no estructurales (concienciación ciudadana, limpieza viaria,...) que causan un descenso en la contaminación.

Estos sistemas cuentan con una amplia evolución en países como Reino Unido, USA, Dinamarca o Australia, donde incluso cuentan con el apoyo de las administraciones públicas para su desarrollo. En cambio en España, no ocurre así. Aquí no tenemos tanta experiencia ni, salvo el caso de Galicia, se contemplan en la normativa, pero poco a poco se están estableciendo por toda la geografía española.

En la segunda parte de este trabajo, se analiza un caso figurado de implantación de un sistema de drenaje urbano sostenible dentro de una ciudad de la ribera mediterránea como es Barcelona, caracterizada por un régimen pluviométrico propio de esta climatología. Las simulaciones de estudio se han realizado para comprobar los efectos de un SDUS ficticio insertado dentro de unas de las arterias más importantes de la ciudad, la Diagonal, en un tramo principalmente residencial pero con un gran volumen de tráfico. Se ha trabajado con la misma lluvia de diseño que impone CLABSA para el dimensionamiento de nuevas redes de drenaje y se han analizados las variaciones que se producirían en los caudales y concentraciones de contaminantes entre la situación actual y la hipotética situación proyectada.

Palabras clave:

Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible, Calidad de Aguas, Hidrología Urbana, Redes de Saneamiento, Eliminación de contaminantes



Título del Trabajo Fin de Máster:

SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA DIAGONAL DE BARCELONA

Autor: **ABELLÁN GARCÍA, ANA ISABEL**

Tipo	A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA	Fecha de Lectura	JULIO, 2013
Codirector1			
Codirector2			
Tutor	FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA		

Abstract:

There isn't a specific definition of what are sustainable urban drainage systems (SUDS), but they could be called as the set of those elements participating in the drainage of cities and urban environments which, in addition to attenuate the peak flow produced by a rain event, get also significantly decrease the amount of pollutants content in this runoff. So, sustainable urban drainage is not just a part of these systems techniques that need an infrastructure, also know as "traditional drainage", SUDS considers too another non-structural techniques (awareness citizen, street cleaning,...) which can cause a pollution's reduction.

These systems have a wide development in countries such as United Kingdom, USA, Denmark or Australia; where even have the support of the public administrations for their development. In the other hand, in Spain, that doesn't happen. Here, we don't have much experience or, except in the case of Galicia, any mention in the regulations, but step by step SUDS are establishing throughout all the Spanish geography.

The second part of this study is an analysis about a figurative case of a SuDS implementation within a Mediterranean city, Barcelona. These kinds of cities are characterized by a peculiar rain regime of this climatology. The simulations have been performed to check the effects of a fictitious SDUS inserted into one of the most important arteries of the city, Diagonal Avenue. This wide street is mostly residential but with a high traffic density. I have worked with the same rain design imposed by CLABSA for sizing the new drainage networks and I have analyzed the variations that occur in the flows and in the contaminants concentrations between the current situation and the hypothetical projected situation.

Palabras clave:

Sustainable Urban Drainage Systems, Water Quality, Urban Hydrology, Sewage System, Pollutants Removal



Título del Trabajo Fin de Máster:

SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA DIAGONAL DE BARCELONA

Autor: **ABELLÁN GARCÍA, ANA ISABEL**

Tipo	A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA	Fecha de Lectura	JULIO, 2013
Codirector1			
Codirector2			
Tutor	FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA		

Resume:

No existeix una definició concreta del que són els Sistemes de Drenatge Urbà Sostenible, però podrien denominar-se com el conjunt d'aquells elements participants en el drenatge de les ciutats i entorns urbans que, a més d'atenuar el cabal circulat produït per un esdeveniment plujós, aconseguen també disminuir de forma notable la quantitat de contaminants continguts en aquest vessament. Així que, no només entren a formar part d'aquests sistemes tècnics que requereixen d'infraestructures, com ocorre en el cas del drenatge denominat "convencional", a més considera altres tècniques no estructurals (conscienciació ciutadana, neteja viària,...) que causen un descens en la contaminació.

Aquests sistemes compten amb una àmplia evolució en països com Regne Unit, USA, Dinamarca o Austràlia, on fins i tot compten amb el suport de les administracions públiques per al seu desenvolupament. En canvi a Espanya, no ocorre així. Aquí no tenim tanta experiència ni, excepte el cas de Galícia, es contemplen en la normativa, però a poc a poc s'estan establint per tota la geografia espanyola.

En la segona part d'aquest treball, s'analitza un cas figurat d'implantació d'un sistema de drenatge urbà sostenible dins d'una ciutat de la ribera mediterrània com és Barcelona, caracteritzada per un règim pluviomètric propi d'aquesta climatologia. Les simulacions d'estudi s'han realitzat per comprovar els efectes d'un SDUS fictici inserit dins d'unes de les artèries més importants de la ciutat, la Diagonal, en un tram principalment residencial però amb un gran volum de tràfic. S'ha treballat amb la mateixa pluja de disseny que imposa CLABSA per al dimensionament de noves xarxes de drenatge i s'han analitzats les variacions que es produïrien en els cabals i concentracions de contaminants entre la situació actual i la hipotètica situació projectada.

Palabras clave:

Sistemas de Drenatge Urbà Sostenible, Qualitat d'Aigües, Hidrologia Urbana, Xarxes de Sanejament, Eliminació de contaminants

AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este trabajo me ha llevado más tiempo del normalmente previsto por diversas circunstancias personales, pero he tenido la suerte de contar con un tutor que ha estado conmigo desde que empecé hasta que por fin lo he presentado, permitiéndome elaborarlo a mi ritmo y ayudándome a pesar de las distancias, gracias Félix por haber estado ahí tanto tiempo.

También me gustaría mencionar en esta parte, a todas aquellas personas que de manera directa o indirecta me han ayudado en la redacción del presente trabajo. A Manuel Gómez, por dejarme usar su biblioteca y resolverme algunas dudas, a Sara Perales, Pedro Lasa, Daniel Castro junto su grupo de investigación, a los que no conozco personalmente, por poner a disposición de todo el mundo sus investigaciones e innovaciones en el campo de los SDUS, lo cual me ha sido de gran ayuda.

Y como no, quisiera agradecer a mi familia su insistencia para que presentara este trabajo de una vez, ha sido el empujón que necesitaba.

ABREVIATURAS

AB	Área de Biorretención
ASCE	American Society of Civil Engineers
BMP	Best Management Practices
CLABSA	Clavegueram de Barcelona, S.A.
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association
CSO	Combined Sewer Overflow
CV	Cuneta Verde
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DSU	Descargas de sistemas unitarios
EDAR	Estación Depuradora de aguas residuales
EPA	Environmental Protection Agency
IDF	Intensidad-Duración-Frecuencia
LID	Low Impact Development
MPC	Mejores Prácticas de Control
NTK/TKN	Nitrógeno Total Kjeldahl
PP	Pavimento poroso o permeable
PP CONT	Pavimento poroso o permeable Continuo
PP MOD	Pavimento poroso o permeable Modular
SCS	Soil Conservation Service
SS	Sólidos en Suspensión
TP	Fósforo total
Tr	Tiempo de retorno
TSS	Sólidos Totales en Suspensión
SC	Subcuenca
SDUS	Sustainable Urban Drainage Systems
SWMM	Storm Water Management Model
TDUS	Técnicas de drenaje urbano sostenible
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
TCu	Cobre Total
TCr	Cromo Total
TNi	Níquel Total
TPb	Plomo Total
TZn	Zinc Total
SP	Fósforo disuelto

SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA DIAGONAL DE BARCELONA

NOMENCLATURA

La notación aquí enumerada corresponde a los términos más empleados o importantes en el presente trabajo. Otros de tipo menor o de uso específico se han indicado explícitamente en el texto.

A	Área de la cuenca	$[L^2]$	m^2	Ha
L	Longitud	$[L]$	m	Km
B	Anchura de la cuenca	$[L]$	m	Km
ISF	Fracción de la superficie impermeable	-		-
n	Coefficiente n de Manning	$[TL^{-1/3}]$	-	$s/m^{1/3}$
Ψ	Altura de succión	$[L]$	m	mm
K	Conductividad hidráulica saturada	$[LT^{-1}]$		mm/h
ϕ	Porosidad (fracción)	-		-
FC	Capacidad del campo (fracción)	-		-
WP	Punto de marchitamiento (fracción)	-		-
Q	Caudal medio	$[L^3T^{-1}]$	l/s	m^3/s
CR	Ratio de captura del pavimento	-		-
P_a	Cantidad anual de lluvia			mm
Y_{clog}	Años necesarios para saturar completamente un sistema poroso	$[T]$		años
VR	Relación de vacío	-		-
g	Fuerza de la gravedad	$[LT^{-2}]$		m/s^2
R_h	Radio Hidráulico	$[L]$	m	m

SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA DIAGONAL DE BARCELONA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen

Abstract

Resum

ABREVIATURAS..... I

NOMENCLATURA III

ÍNDICE DE CONTENIDOS..... V

ÍNDICE DE TABLAS X

ÍNDICE DE GRÁFICOS XIV

ÍNDICE DE ECUACIONES XVI

ÍNDICE DE FIGURAS XVIII

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. CONTEXTO DE LA TESINA..... 1

1.2. OBJETIVOS..... 3

2. LAS TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE..... 5

2.1. OBJETIVOS DE LAS TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE 7

2.2. TIPOLOGÍAS..... 8

2.2.1. Medidas no estructurales..... 9

2.2.2. Medidas estructurales..... 10

3. PROCESOS DE TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES 33

Adsorción:..... 37

Sedimentación: 37

Filtración/Biofiltración: 37

Biodegradación: 38

Volatilización: 38

Precipitación: 39

Fotólisis:	39
Retención vegetal/Bioacumulación:.....	39
4. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO.....	45
4.1. Objetivos de los criterios de diseño	45
4.2. Factores a considerar en la selección de los SDUS	46
4.2.1. Impactos sobre el entorno	47
4.2.2. Control regional o control local.....	49
4.2.3. Factores relacionados con el medio receptor	49
4.2.4. Factores físicos	50
4.2.5. Factores relacionados con los usos del suelo	52
4.2.6. Factores ambientales y sociales.....	52
4.2.7. Capacidad para gestionar las aguas de escorrentía urbana	53
4.2.8. Normativas y disposiciones legales	54
4.3. Clasificación de los criterios de diseño y matrices de selección	55
4.3.1. Criterios de diseño hidráulicos	55
4.3.2. Criterios de diseño basados en la calidad del agua.....	55
4.3.3. Criterios basados en el servicio público y social proporcionado	56
4.3.4. Criterios de diseño ambientales.....	56
4.3.5. Criterios de operatividad y mantenimiento	56
4.3.6. Matrices propuestas por CIRIA:.....	57
4.4. Criterios relevantes en la evaluación del diseño y funcionamiento de las SDUS propuestos por Daywater	62
4.4.1. Criterios relativos a las características del lugar	63
4.4.2. Criterios científicos y tecnológicos	64
4.4.3. Criterios relativos a la Operación y Mantenimiento.....	65
4.4.4. Criterios Ambientales	66

4.4.5.	Criterios Sociales y Urbanos	67
4.4.6.	Criterios económicos	68
4.4.7.	Criterios legales y urbanísticos.....	69
5.	VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS SDUS	71
5.1.	Ventajas hidrológicas.....	71
5.2.	Ventajas paisajísticas	71
5.3.	Ventajas ambientales	72
5.4.	Ventajas sociales y urbanas.....	72
5.5.	Ventajas económicas.....	72
5.6.	Inconvenientes.....	73
6.	LA ZONA DE ESTUDIO: LA AVENIDA DIAGONAL	75
7.	ESTUDIO HIDROLÓGICO	79
7.1.	METODOLOGÍA DE TRABAJO	80
7.2.	DESCRIPCIÓN DE LAS SUBCUENCAS CONSIDERADAS.....	80
7.3.	DELIMITACIÓN DE LAS SUBCUENCAS DE ESTUDIO	81
7.4.	RÉGIMEN PLUVIOMÉTRICO	86
7.5.	OTROS FACTORES A TENER EN CUENTA	89
7.5.1.	Infiltración.....	89
7.5.2.	Almacenamiento en superficie e interceptación.....	90
7.5.3.	Evaporación.....	92
8.	EL MODELO HIDRÁULICO EN SWMM 5.0.022	93
8.1.	MODELO DE FLUJO UNIFORME (<i>STEADY FLOW ROUTING</i>):.....	94
8.2.	ONDA CINEMÁTICA (<i>KINEMATIC WAVE</i>):.....	95
8.3.	ONDA DINÁMICA (<i>DYNAMIC WAVE</i>):.....	95
8.4.	METODOLOGÍA DE TRABAJO E HIPÓTESIS DE PARTIDA	96
8.5.	MODELO HIDRÁULICO DE TRABAJO: ONDA DINÁMICA.....	97

8.6.	CONDICIONES DE CONTORNO.....	100
8.7.	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA RED EN SITUACIÓN ACTUAL.....	101
8.7.1.	Colectores.....	101
8.7.2.	Pozos.....	103
8.7.3.	Elementos singulares	104
8.7.4.	Variación de dimensiones para el caso de estudio	109
8.8.	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA RED EN SITUACIÓN PREVISTA (SDUS).....	110
9.	SELECCIÓN Y SIMULACIÓN DE LAS TDUS CON SWMM 5.0.022.....	115
9.1.	SELECCIÓN DE LAS SDUS.....	115
9.2.	SIMULACIÓN DE SDUS CON EL PROGRAMA SWMM	120
9.2.1.	Utilización de las técnicas LID dentro del programa SWMM 5.0.022 ..	121
9.2.2.	Ubicación de las técnicas LID.....	122
9.2.3.	Representación de las técnicas LID dentro del programa SWMM 5.0.022 124	
9.2.4.	Edición de las capas que componen las técnicas LID de este estudio	126
9.2.5.	Las herramientas <i>LID Group Editor</i> y <i>LID Usage Editor</i>	133
9.2.6.	Resultados LID.....	136
10.	CALIDAD DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA	139
10.1.	METODOLOGÍA DE TRABAJO	139
10.2.	ELEMENTOS CONTAMINANTES CONSIDERADOS	140
10.3.	USOS DEL SUELO QUE PREDOMINAN EN CADA SUBCUENCA ..	142
10.3.1.	Usos del suelo en la fase actual	143
10.3.2.	Usos del suelo con SDUS	146
11.	SIMULACIONES CON EL PROGRAMA SWMM 5.0.022	149

11.1.	SIMULACIÓN HIDROLÓGICA: ANÁLISIS DE LAS DIFERENCIAS DE CAUDAL Y CALIDAD DEL AGUA DE ESCORRENTÍA.....	150
11.1.1.	Resultados de la escorrentía	150
11.1.2.	Resultados de calidad.....	153
11.2.	SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LOS COLECTORES HIPOTÉTICOS DE 1 METRO DE DIÁMETRO	157
11.3.	SIMULACIÓN DE LA CALIDAD CON COLECTORES HIPOTÉTICOS DE 1 METRO DE DIÁMETRO	166
11.4.	SIMULACIÓN CON LOS NUEVOS COLECTORES DISEÑADOS PARA EL SDUS.	173
12.	CONCLUSIONES	181
	BIBLIOGRAFÍA	187
	WEBS CONSULTADAS	191
	ANEJOS	193
	ANEJO 1. HIDROLOGÍA	
	ANEJO 2. HIDRÁULICA	
	ANEJO 3. DRENAJE URBANO SOSTENIBLE	
	ANEJO 4. CALIDAD	
	ANEJO 5. RESULTADOS SIMULACIONES	
	Simulación hidráulica con los colectores reales	
	ANEJO 6. REPORTAJE FOTOGRÁFICO	

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1. Tipología y principales fuentes de los contaminantes en las aguas urbanas. Fuente: Cámara Argentina de la Construcción (2009).</i>	33
<i>Tabla 3.2. Tasa de deposición atmosférica seca. Fuente: Bannerman (1984).</i>	34
<i>Tabla 3.3. Contaminantes acumulados en las calles provenientes del tráfico. Fuente: Shaheen (1975).</i>	34
<i>Tabla 3.4. Concentraciones medias de los principales contaminantes de aguas de escorrentía urbana. Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (1983). Results of the Nationwide Urban Runoff Program (NURP), Vol. 1, NTIS PB 84-185552, Water Planning Division, Washington, DC.</i>	36
<i>Tabla 3.5. Principales procesos de eliminación de contaminantes en aguas de escorrentía urbana mediante SDUS. Fuente: Middlesex University (2003).</i>	36
<i>Tabla 3.6. Tipos de contaminantes eliminados y sus eficiencias de eliminación según SDUS. Fuente: Daywater (2005).</i>	44
<i>Tabla 4.1. Impactos producidos por las TDUS para el tratamiento de las aguas de escorrentía urbana. Fuente: CEDEX (2008).</i>	48
<i>Tabla 4.2. Adecuación de las TDUS al medio receptor. Fuente: CEDEX (2008).</i>	50
<i>Tabla 4.3. Adecuación de las técnicas de tratamiento de las aguas de escorrentía frente a los condicionantes físicos. Fuente: CEDEX (2008).</i>	51
<i>Tabla 4.4. Adaptación entre distintos tipo de TDUS y diferentes tipos de usos del suelo. Fuente: CEDEX (2008).</i>	52
<i>Tabla 4.5. Relación entre los distintos tipos de SDUS con costes y mantenimiento. Fuente: CEDEX (2008).</i>	53
<i>Tabla 4.6. Capacidades de gestión de aguas de diferentes SDUS. Fuente: CEDEX (2008).</i>	54
<i>Tabla 4.7. Caracterización de la viabilidad de los diferentes SDUS en función de las características del lugar. Fuente: CIRIA (2007).</i>	58
<i>Tabla 4.8. Caracterización de la viabilidad de los diferentes SDUS en función de los usos del suelo del lugar de instalación. Fuente: CIRIA (2007).</i>	59

<i>Tabla 4.9. Caracterización de la viabilidad de los diferentes SDUS en función de los procesos de tratamientos requeridos. Fuente: CIRIA (2007).</i>	60
<i>Tabla 4.10. Caracterización de la viabilidad de los diferentes SDUS en función de los costes, mantenimiento y factores ambientales. Fuente: CIRIA (2007).</i>	61
<i>Tabla 4.11. Elementos que han de considerarse en la elección de la ubicación del sistema de drenaje: Criterios relativos a las características del sitio, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).</i>	63
<i>Tabla 4.12. Elementos que han de considerarse en función de la tecnología y conocimientos actuales: Criterios científicos y tecnológicos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).</i>	64
<i>Tabla 4.13. Elementos que han de considerarse en función a la operatividad y mantenimiento: Criterios científicos y tecnológicos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).</i>	65
<i>Tabla 4.14. Elementos que han de considerarse en función a los requerimientos ambientales: Criterios ambientales, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).</i>	66
<i>Tabla 4.15. Elementos que han de considerarse en función a los requerimientos sociales: Criterios sociales y urbanos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).</i>	67
<i>Tabla 4.16. Elementos que han de considerarse en función a los costes económicos: Criterios económicos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).</i>	68
<i>Tabla 4.17. Elementos que han de considerarse en función a la legislación y urbanismo del lugar de estudio: Criterios legales y urbanísticos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).</i>	69
<i>Tabla 5.1. Principales parámetros de las subcuencas.</i>	86
<i>Tabla 5.2. Intensidades para $Tr=10$. Fuente: curvas IDF de la estación meteorológica de Pompeu-Fabra.</i>	88
<i>Tabla 5.3. Valores ya ordenados del hietograma de bloques alternos usado en la simulación de la precipitación.</i>	88

<i>Tabla 5.4. Valores de los parámetros del método de Green-Ampt.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 5.5. Valores propuestos por Manuel Gómez (2007), Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 5.6. Valores Típicos de Almacenamiento en Depresión. Fuente: ASCE, (1992), Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems, New York.</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 5.7. Valores de asignados a las pérdidas de almacenamiento en superficie para las subcuencas de estudio en el estado actual.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 5.8. Valores de asignados a las pérdidas de almacenamiento en superficie para las subcuencas de estudio en el estado proyectad, con SDUS.</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 5.9. Nombre, nodos de entrada y salida, tipología, longitud y coeficientes de Manning de los colectores de estudio.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 5.10. Nomenclatura establecida para los nodos o pozos y cotas de fondo y profundidad.</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 5.11. Pozos, cotas de fondo y alturas.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 5.12. Dimensiones, pendientes y capacidad de los nuevos colectores.</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 5.13. Nuevos valores relativos a la anchura y permeabilidad de las Subcuencas tras la instalación de las TDUS.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 5.14. Combinación de capas por cada una de las técnicas de drenaje urbano sostenible contempladas en el programa SWMM. Fuente: “Storm Water Management Model User’s Manual. Version 5.0. EPA/600/R-05/040. Revised July 2010.”</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 5.15.LID Group Editor en subcuenca 1.</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 5.16.Principales valores requeridos en LID Usage Editor.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 5.17. Resumen del rendimiento LID</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 5.18. Concentración de los contaminantes en el agua de lluvia (mg/l). *: Seco (2010). **: Valores supuestos por ser desconocidos.....</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 5.19. Porcentaje en peso de los contaminantes acumulados en las calles, en referencia a los sólidos suspendidos totales. Fuente: Shaheen, 1975.*Valor obtenido empíricamente (Manuel Gómez).....</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 5.20. - Datos de limpieza de la calle.....</i>	<i>143</i>

<i>Tabla 5.21. Valores con los datos de acumulación de los sólidos suspendidos totales.</i>	144
<i>Tabla 5.22. Valores con los datos de arrastre de los sólidos suspendidos totales.</i>	146
<i>Tabla 5.23. Valores de la máxima acumulación posible en la función de saturación de acumulación de contaminantes.....</i>	147
<i>Tabla 5.24. Valores con los porcentajes de eliminación de contaminantes debido a la presencia de TDUS.</i>	148
<i>Tabla 5.25. Valores mínimos que pueden alcanzarse en la concentración de algunos contaminantes. Fuente: Schueler 2000.</i>	148
<i>Tabla 5.26. Tabla Cuencas. Valores de infiltración y escorrentía total junto con picos de caudal y coeficiente de escorrentía.....</i>	151
<i>Tabla 5.27. Valores medios de los sistemas tradicional y con SDUS de infiltración y escorrentía total junto con picos de caudal y coeficiente de escorrentía.</i>	152
<i>Tabla 5.28. Valores medios y máximos en los dos Outfalls, con sistema de drenaje convencional y con SDUS.</i>	161
<i>Tabla 5.29. Resumen de los valores resultados de las simulaciones en un sistema sin TDUS en otro con SUDU y comparativa en los colectores más relevantes.</i>	162
<i>Tabla 5.30. Cantidad de contaminantes que alcanzan el final del sistema junto con el porcentaje de disminución por implantación de un SDUS.</i>	167
<i>Tabla 5.31. Valores alcanzados por algunos de los contaminantes al final de las simulaciones, con y sin SDUS y sus concentraciones irreductibles.</i>	171
<i>Tabla 5.32. Resultados hidráulicos en los nodos.</i>	174
<i>Tabla 5.33. Resultados hidráulicos en los colectores.....</i>	175
<i>Tabla 5.34. Kilos de contaminantes acumulados a la salida del sistema.</i>	177

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 7.1. Hietograma de bloques alternos de una precipitación con un periodo de retorno de diez años y dos horas de precipitación para la ciudad de Barcelona.</i>	<i>88</i>
<i>Gráfico 10.1. Evolución de la carga de contaminantes según las diferentes funciones de acumulación. Fuente: Gómez (año2007).</i>	<i>145</i>
<i>Gráfico 11.1. Valores totales en milímetros de escorrentía e infiltración por subcuenca. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>152</i>
<i>Gráfico 11.2. Sólidos suspendidos totales y DBO5 acumulados en los sistemas. Las cifras son los kilos que hay al final de cada simulación.</i>	<i>153</i>
<i>Gráfico 11.3. Contaminación acumulada en cada uno de los sistemas por elemento contaminante minoritario.</i>	<i>153</i>
<i>Gráfico 11.4. Subcuenca 6: Hidrogramas frente a las curvas de concentración de sólidos totales en suspensión.</i>	<i>154</i>
<i>Gráfico 11.5. Curvas de concentración de la demanda biológica de oxígeno a cinco días y de plomo.</i>	<i>154</i>
<i>Gráfico 11.6. Curvas de la evolución de las concentraciones de Cromo, Níquel y Zinc, según situación actual y según situación proyectada.</i>	<i>155</i>
<i>Gráfico 11.7. Curvas de la evolución de las concentraciones de Cobre, Fósforo y Nitrógeno, según situación actual y según situación proyectada.</i>	<i>155</i>
<i>Gráfico 11.8. Comparativa de calados medios y máximos en pozos más representativos de tramo 1.</i>	<i>159</i>
<i>Gráfico 11.9. Comparativa de calados medios y máximos en pozos más representativos de tramo 2.</i>	<i>159</i>
<i>Gráfico 11.10. Evolución temporal de los calados en Outfall 1.</i>	<i>160</i>
<i>Gráfico 11.11Evolución temporal de los calados en Outfall 2.</i>	<i>160</i>
<i>Gráfico 11.12. Comparativa de caudales y velocidades máximos en ambos sistemas.</i>	<i>163</i>
<i>Gráfico 11.13. Comparativa de caudales medios.</i>	<i>163</i>
<i>Gráfico 11.14. Caudales máximos en ambos sistemas.</i>	<i>164</i>

<i>Gráfico 11.15. Caudal en los colectores del tramo 1. Link es el nombre que da el programa al conducto.</i>	165
<i>Gráfico 11.16. Caudal en los colectores del tramo 2</i>	165
<i>Gráfico 11.17. Cantidad de sólidos suspendidos totales y de DBO5 al final de cada tramo y en el sistema total.</i>	167
<i>Gráfico 11.18. Kilos de plomo acumulados.</i>	168
<i>Gráfico 11.19. Fósforo y Zinc totales.</i>	168
<i>Gráfico 11.20. Contaminantes minoritarios.</i>	169
<i>Gráfico 11.21. Polutograma de TSS y DBO5.</i>	169
<i>Gráfico 11.22. Polutograma de plomo y zinc.</i>	170
<i>Gráfico 11.23. Polutograma de fósforo, nitrógeno y cobre.</i>	170
<i>Gráfico 11.24. Polutograma de níquel y cromo.</i>	170
<i>Gráfico 11.25. Hidrogramas de los principales colectores durante las cuatro primeras horas de la simulación.</i>	176
<i>Gráfico 11.26. Evolución temporal del calado en metros.</i>	177
<i>Gráfico 11.27. Caudal que entra a la sección crítica de salida.</i>	178
<i>Gráfico 11.28. Relación entre el caudal entrante y el calado en la salida.</i>	178
<i>Gráfico 11.29. Polutograma de los Sólidos Totales en Suspensión.</i>	179
<i>Gráfico 11.30. Polutograma de la DBO5.</i>	179

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 7.1</i>	87
<i>Ecuación 7.2</i>	87
<i>Ecuación 8.1</i>	93
<i>Ecuación 8.2</i>	93
<i>Ecuación 8.3</i>	96
<i>Ecuación 8.4</i>	98
<i>Ecuación 8.5</i>	98
<i>Ecuación 8.6</i>	98
<i>Ecuación 8.7</i>	98
<i>Ecuación 8.8</i>	99
<i>Ecuación 9.1</i>	129
<i>Ecuación 9.2</i>	132
<i>Ecuación 9.3</i>	132
<i>Ecuación 10.1</i>	143
<i>Ecuación 10.2</i>	145

SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE
LA DIAGONAL DE BARCELONA

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Dos ejemplos de Green roof, el primero corresponde a un edificio público: School of Art, Design and Media at Nanyang Technological University, (Fuente: The International Greenroof & Greenwall Projects Database, 2006) y el segundo a un edificio residencial en Copenhague: The Big 8 Hause. (Fuente: Susdrain. 2012)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.2. A la izquierda, depósito de aguas pluviales sobre el nivel del suelo. Fuente: Wikipedia. A la derecha, Instalación de un depósito bajo tierra. Fuente: Wendy Carradine.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.3. Esquema de pavimento permeable. Fuente: CEDEX (2008).</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.4. Tres tipos de superficies permeables. La primera consiste en adoquines que permiten el paso del agua, la segunda es una mezcla bituminosa permeable y la tercera es de césped y hormigón. Fuente: GITECO (2009).</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.5. A la izquierda, esquema de una franja filtrante. Arriba a la derecha, zanja filtrante en terreno. Abajo a la derecha cortes longitudinal y transversal. Fuente: ITP-Depuración.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.6. Esquema de zanja de infiltración. Fuente: CEDEX (2008).</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.7. Zanja de infiltración. Fuente Dina-mar.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.8. Dren francés. Fuente: Interdrain.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.9: Arriba esquema de cuneta verde. Fuente: CEDEX (2008). Debajo, fotografía de cuneta verde. Fuente: Dina-mar.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.10. A la izquierda montaje de un depósito de infiltración. Fuente: Aquatecnic. A la derecha depósito de infiltración en funcionamiento.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.11. Perfil transversal de un estanque de infiltración. Fuente: CEDEX (2008).</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.12. Planta de un estanque de infiltración. Fuente: CEDEX (2008).</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.13. Depósito superficial de detención localizado en una “zona muerta”. Fuente: Universidad de Abertay, Dundee, Escocia.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.14. Esquema de la planta y el perfil de un estanque de retención. Fuente: CEDEX (2008).</i>	<i>24</i>

<i>Figura 2.15. Estanque de retención. Fuente: Dina-mar.</i>	25
<i>Figura 2.16. Humedal artificial. Fuente: CIRIA (2004).</i>	27
<i>Figura 2.17. Esquema de la planta y el perfil de un humedal. Fuente: CEDEX (2008).</i>	27
<i>Figura 2.18. Esquema de la planta y el perfil de un área de biorretención. Fuente: CEDEX (2008).</i>	29
<i>Figura 2.19. Área de biorretención. Fuente: Charlotte-Mecklenburg BMP Design Manual (2010).</i>	29
<i>Figura 2.20. Esquema de la planta y el perfil de un filtro superficial. (Fuente CEDEX 2008).</i>	30
<i>Figura 2.21. Esquema de la planta y el perfil de un filtro perimetral. Fuente CEDEX (2008).</i>	31
<i>Figura 2.22. Esquema de la planta y el perfil de un filtro enterrado. Fuente CEDEX (2008).</i>	31
<i>Figura 2.23. Esquema de la planta y el perfil de un filtro orgánico. Fuente CEDEX (2008).</i>	32
<i>Figura 4.1. Tren de SDUS para la estrategia de control de las aguas pluviales. Fuente: CIRIA (2007).</i>	49
<i>Figura 6.1. Fotografía de la Diagonal en la sección de boulevard.</i>	77
<i>Figura 6.2. Fotografía de la Diagonal en la sección de rambla.</i>	77
<i>Figura 7.1. Subcuencas de la avenida Diagonal. Los puntos azules especifican la localización de los imbornales.</i>	82
<i>Figura 7.2. Las dos primeras subcuencas, entre el paseo de Sant Joan y la calle Nápoles. Los puntos negros representan los imbornales presentes.</i>	82
<i>Figura 7.3. Subcuencas 3 y 4, entre las calles Nápoles y Cerdeña. Los puntos negros representan los imbornales presentes.</i>	83
<i>Figura 7.4. Subcuencas 5 y 6, entre las calles Cerdeña y Lepanto. Los puntos negros representan los imbornales presentes.</i>	84

<i>Figura 7.5. Subcuencas 7 y 8, entre las calles Cerdeña y Lepanto. Los puntos negros representan los imbornales presentes.</i>	85
<i>Figura 8.1. Aplicación de la ecuación de conservación de la masa en SWMM 5.0, para un pozo de la red. Fuente: Rossman, L.A. (2005). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0. National Risk Management Research Laboratory. U.S. EPA.</i>	99
<i>Figura 8.2. Dos de las secciones tipo más representativas de la zona de estudio. Fuente: CLABSA.</i>	102
<i>Figura 8.3. Secciones tipo de pozos de registro. A la izquierda, para colector visitable con bóveda plana. A la derecha para colector con bóveda curva. Fuente: CLABSA.</i> ..	103
<i>Figura 8.4. Perfil de rápido en colector visitable. Fuente: CLABSA.</i>	105
<i>Figura 8.5. Cruce de los colectores de la Avenida Diagonal con los de la calle Roger de Flor.</i>	106
<i>Figura 8.6. Segundo salto hidráulico.</i>	107
<i>Figura 8.7. Cruce de los colectores de la Avenida Diagonal con los de la calle Lepanto.</i>	107
<i>Figura 8.8. Cruce de Diagonal con la Plaza Les Glòries. Fin del tramo de estudio Rodeadas en rojo las cotas de los últimos pozos.</i>	108
<i>Figura 9.1. Localización de las TDUS en la subcuenca 1.</i>	116
<i>Figura 9.2. Localización de las TDUS en la subcuenca 2.</i>	117
<i>Figura 9.3. Localización de las TDUS en la subcuenca 3.</i>	117
<i>Figura 9.4. Localización de las TDUS en la subcuenca 4.</i>	118
<i>Figura 9.5. Localización de las TDUS en la subcuenca 5.</i>	118
<i>Figura 9.6. Localización de las TDUS en la subcuenca 6.</i>	119
<i>Figura 9.7. Localización de las TDUS en la subcuenca 7.</i>	119
<i>Figura 9.8. Localización de las TDUS en la subcuenca 8.</i>	120
<i>Figura 9.9. Ajuste de los parámetros de cuenca después de la colocación LID según enfoque 1. Fuente: "Storm Water Management Model User's Manual. Version 5.0. EPA/600/R-05/040. Revised July 2010."</i>	123

<i>Figura 9.10. Diagrama conceptual de un área de biorretención LID. Fuente: “Storm Water Management Model User’s Manual. Version 5.0. EPA/600/R-05/040. Revised July 2010.”</i>	125
<i>Figura 11.1. Perfil sin presencia de las TDUS en el tramo1.</i>	158
<i>Figura 11.2. Perfil con presencia de las TDUS en el tramo1</i>	158
<i>Figura 11.3. Colectores dimensionados para evacuar el agua del tramo de estudio con SDUS implantados. Perfil de agua correspondiente a la hora y diez minutos de la simulación.</i>	173

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO DE LA TESINA

Hasta hace poco, los proyectos de drenaje urbano sólo se centraban en la “cantidad” de agua de escorrentía a evacuar, no se tenía en cuenta la “calidad” del agua drenada que se vertía al medio. Esto quiere decir que los sistemas de alcantarillado estaban diseñados con el único objetivo de evitar inundaciones, sin considerar el daño potencial que conlleva el vertido al medio de un agua de escorrentía que arrastra una cantidad considerable de elementos contaminantes. Pero, actualmente, este modelo de drenaje en el que no se tiene en cuenta la calidad de dichas aguas de escorrentía urbana, está cambiando. Esto puede observarse en cómo recientes publicaciones de expertos promueven una modificación en el planeamiento urbanístico en la que se contemple el uso de nuevas técnicas que permitan una gestión de la calidad de las aguas urbanas.

Como ejemplo de una de esas publicaciones cabe destacar la del *Libro Verde del Medio Ambiente Urbano* (Ministerio de Medio Ambiente, 2007), que dentro de su apartado “4. Directrices vinculadas a la estrategia de medio ambiente urbano en el ámbito del urbanismo” tiene un subapartado titulado: “4.3.2 Urbanización de bajo impacto. Reducir el sellado y la impermeabilización del suelo”, en el cual se propone lo siguiente: “... desarrollar patrones de urbanización de bajo impacto tanto en los nuevos desarrollos como en operaciones de reurbanización, evitando el sellado masivo y la impermeabilización de suelos...” Y también encontramos otro subapartado, el “4.4.3 Vincular el desarrollo urbano al ciclo del agua en su expresión local”, en el que se propone un replanteamiento en la gestión municipal y supramunicipal del ciclo del agua, investigando desarrollando nuevos proyectos que supongan un nivel de autosuficiencia hídrica combinando diferentes tipos de medidas.

Otra mención especial la requiere la “Directriz 11: Captación, drenaje y gestión de aguas pluviales del estudio *La sequía en España* (Comité de Expertos en Sequía del MMA, 2007), que plantea la Captación, Drenaje y Gestión de aguas pluviales como una estrategia a desarrollar desde la planificación hidrológica, proponiendo la introducción del drenaje separativo, la permeabilización de superficies urbanas y la captación de agua de lluvia en cisternas y aljibes, por normativa municipal, en todo nuevo desarrollo urbanístico, así como el fomento de estas medidas de forma descentralizadas en zonas ya urbanizadas.

Las técnicas de drenaje sostenible permiten el desarrollo de los planteamientos expuestos anteriormente controlando tanto los caudales pico de las aguas de escorrentía urbana como la calidad de las aguas vertidas al medio. Estas técnicas son de nueva implantación, estando más desarrolladas en países como Reino Unido o los Estados Unidos. Pero poco a poco están siendo incorporadas en nuevos proyectos de desarrollo urbanístico de nuestro país.

Dado el poco desarrollo que aún tienen, su novedad y la capacidad para incorporar el ciclo hidrológico dentro de las áreas urbanas, me pareció interesante ahondar en el conocimiento de dichas técnicas y planear un estudio comparativo entre el drenaje actual de una calle real con un hipotético caso de drenaje urbano sostenible para el mismo tramo viario.

Para cumplir con los objetivos planteados, este estudio se ha dividido en dos partes. La primera consiste en una revisión acerca de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SDUS), su historia, tipología y ventajas. Profundizando así en el conocimiento de dichas técnicas y aprendiendo a seleccionar las más adecuadas en cada caso, cumpliendo de este modo con los primeros objetivos de esta Tesina. En la segunda parte se diseña y analiza un SDUS para un tramo de la calle Diagonal de Barcelona. Para ello se aplicará lo aprendido acerca de estas técnicas en la primera parte, desarrollando las herramientas de cálculo necesarias y cumpliendo con el resto de los objetivos planteados.

El tramo de estudio escogido es una parte de la conocida avenida Diagonal de Barcelona. En el año 2010 se planteó a la ciudadanía una remodelación de esta avenida, en la que se proponían tres alternativas: una en la que la avenida tendría un paseo central y dos calzadas laterales para el tráfico, otra en la que la calle se transformaría en un boulevard y finalmente la alternativa de no hacer nada. Es de este referéndum de donde sale la idea de esta Tesina, ya que se iba a remodelar una de las arterias principales de un espacio altamente urbanizado. ¿Se podría plantear un sistema alternativo de drenaje? ¿Un sistema que procurase de una mejora ambiental en el espacio en el que se inserta? ¿Cómo sería la implantación de un sistema de drenaje urbano sostenible en una ciudad mediterránea? En cualquiera de las dos primeras alternativas se hubiese tenido que levantar la avenida y realizar obras, por lo que en ese caso se hubiese podido realizar una implantación de las nuevas técnicas como parte intrínseca al proyecto. Pero al final, la opción más votada dio como resultado la no

intervención en la avenida. Por ello, las técnicas de drenaje urbano sostenible diseñadas en este trabajo suponen un caso hipotético y se adaptan a la morfología actual del tramo de estudio.

1.2. OBJETIVOS

Los objetivos que se han pretendido alcanzar con el presente trabajo son los expuestos a continuación:

- Profundizar en el conocimiento de los Sistemas de Drenaje Sostenible Urbano, diferenciando entre las distintas técnicas existentes en la actualidad y comprendiendo las ventajas e inconvenientes que pueden presentar hoy en día a la hora de su ejecución.
- Aprender a diseñar un sistema de drenaje urbano sostenible compuesto por más de dos técnicas de drenaje diferentes dentro de un entorno urbano real, como es el caso de estudio: un tramo de la calle Diagonal de Barcelona.
- Aprender a seleccionar las técnicas de drenaje urbano más apropiadas en función de unos determinados criterios como serían la localización de los mismos, los objetivos a cumplir y la tecnología disponible.
- Desarrollar las herramientas de cálculo necesarias para el dimensionamiento del nuevo sistema de drenaje propuesto: Uso de hojas de cálculo para el predimensionamiento considerando un flujo uniforme y de programas específicos como el SWMM considerando otros métodos de cálculo.
- Discernir entre el modelo de cálculo hidráulico (flujo uniforme, onda cinemática y onda dinámica) más adecuado en cada caso para el estudio del flujo del agua de escorrentía y del dimensionamiento de cada uno de los elementos componentes del sistema de drenaje propuesto.
- Incorporar la evaluación de los contaminantes en los sistemas de drenaje urbano. Estudio de la acumulación, arrastre y retención de los contaminantes presentes en el agua de escorrentía urbana que va a pasar por el sistema de drenaje urbano sostenible diseñado.
- Analizar las ventajas y las desventajas que supondría la implantación de este nuevo sistema de drenaje urbano sostenible en el tramo de la Diagonal seleccionado, comparándolo con el sistema existente de drenaje convencional.

2. LAS TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE

Desde la aparición de los sistemas de alcantarillado tanto de aguas urbanas como residuales domiciliarias, la práctica habitual ha sido transportar el agua rápidamente desde las ciudades hacia un medio receptor que solía ser un cauce cercano al entorno urbano, contaminando de esta manera el río o mar al que se le hacían llegar estas aguas. A principio del siglo diecinueve aparecen en Inglaterra los primeros sistemas de depuración para las aguas residuales urbanas. Y con el tiempo se fue pasando de una red de alcantarillado unitaria, en la que convergían aguas pluviales recogidas en las calles con las aguas residuales domiciliarias de fuerte carga orgánica, a otro tipo de red, denominada separativa, en la que se procuraba no mezclar el agua pluvial con las aguas negras con una elevada concentración de contaminantes biológicos. De esta forma, las aguas residuales iban a parar a las depuradoras y las pluviales se evacuaban rápidamente fuera de la ciudad. La principal y quizá única función de las redes de alcantarillado de aguas pluviales era evitar inundaciones. Pero actualmente, se sabe que estas aguas que antes de llegar a la red de alcantarillado, lavan las calles, transportando también una fuerte carga contaminante (*first-flush*), lo cual supone un grave problema de contaminación al medio. Y paradójicamente, otro de los problemas que aparece con una frecuencia considerable, es el que los sistemas de alcantarillado separativos convencionales en un principio estaban destinados a solventar: las inundaciones. Se producen crecidas dentro de las ciudades, porque la red de alcantarillado está infradimensionada para determinados episodios de lluvias, o porque presenta otros problemas o carencias.

Las técnicas de drenaje sostenible quedan englobadas dentro de lo que sería el Desarrollo Urbano Sostenible o Desarrollo de Bajo Impacto (*Low Impact Development*), y consideran, desde un primer momento, la problemática asociada al drenaje urbano en el planeamiento urbanístico. Dichas técnicas son conocidas de diferentes formas según el país, SDUS (*Sustainable Urban Drainage Systems*) en el Reino Unido, BMPs (*Best Management Practices*) en Estados Unidos o Mejores Prácticas de Control (MPC) en los países de América Latina. En este trabajo van a ser denominadas a partir de ahora con las siglas SDUS (traducción de la denominación inglesa, Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible).

Los SDUS pueden definirse como: “*Elementos integrantes de la infraestructura urbano-hidráulico-paisajística cuya misión es captar, filtrar, retener, transportar,*

almacenar e infiltrar al terreno el agua, de forma que ésta no sufra ningún deterioro e incluso permita la eliminación, de forma natural, de al menos parte de la carga contaminante que haya podido adquirir por procesos de escorrentía urbana previa. Todo ello tratando de reproducir, de la manera más fielmente posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación del hombre.” (Ponencia: *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SDUS)*, Perales Momparler, 2008)

Las técnicas de SDUS surgen de la necesidad de afrontar la gestión de las aguas pluviales desde una perspectiva diferente a la convencional. Lo cual se consigue haciendo frente a la escorrentía desde el momento en que la lluvia llega al suelo. Con este tipo de sistemas, se gestionan las aguas pluviales teniendo en cuenta tres puntos fundamentales:

- La laminación de la cantidad de agua,
- La mejora de su calidad mediante procesos naturales,
- El servicio al ciudadano con la mejora del paisaje urbano y la recuperación de hábitat naturales dentro de las ciudades.

La filosofía de los SDUS es reproducir, de la manera más fiel posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación humana. Lo que con esto se pretende conseguir es minimizar el impacto que conlleva el desarrollo urbanístico, que aumenta las superficies impermeables y hace que la escorrentía se contamine de las deposiciones que tienen lugar en el suelo urbanizado en el período entre lluvias. Su objetivo es minimizar los impactos del desarrollo urbanístico en cuanto a la cantidad y la calidad de la escorrentía (en origen, durante su transporte y en destino), así como maximizar la integración paisajística y el valor social y ambiental de la actuación.

En algunas referencias se recurre también a la reutilización de aguas grises como buena gestión de las aguas, pero es en este estudio no va a haber referencias a las mismas.

2.1. OBJETIVOS DE LAS TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE

Los objetivos las Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (en adelante TDUS) son comunes en toda la bibliografía consultada y pueden resumirse en los siguientes puntos:

Objetivo general: Mejorar la gestión del agua en su globalidad, comenzando con las aguas pluviales.

Objetivo proteccionista: Disminuir el riesgo de inundación en las calles por incapacidad del sistema de drenaje.

Objetivo ambiental: Proteger los sistemas naturales, resguardar y mejorar el ciclo del agua en entornos urbanos. Se refiere tanto a la calidad (reducir la contaminación de las aguas de escorrentía, el *first flush*) como a la cantidad (reducir volúmenes de escorrentía y caudales punta mediante elementos de retención y minimizando áreas impermeables). Se pretende restaurar en las ciudades el ciclo natural del agua salvaguardando la hidrología local (aunque personalmente, esta última afirmación no creo que sea posible, puesto que la presencia de edificios ya modifica la topografía e inclusive la climatología). Para ajustar la hidrología urbana a la natural hay que potenciar la infiltración, lo que provoca una disminución del agua de escorrentía urbana que va a parar al sistema de saneamiento. Así que, en ciudades con un sistema de alcantarillado unitario, el riesgo de que durante una tormenta se supere la capacidad de caudal de tratamiento a la entrada de una EDAR, disminuye. De esta forma se consigue reducir el número de vertidos o descargas del sistema unitario (DSU) que tendría que realizar una depuradora por incapacidad.

Objetivo paisajístico: Incrementar la calidad paisajística del entorno urbano integrando cursos o láminas de agua en el medio urbano y naturalizando buena parte de la infraestructura hídrica.

Objetivo económico: Minimizar el coste de las infraestructuras de drenaje al mismo tiempo que se incrementa el valor del entorno. Reducción de costes al disminuir el volumen de los influentes en depuradoras y al no alterarse de manera frecuente el patrón de contaminantes para el que la depuradora ha sido diseñada. Rebajar la demanda de agua potable, realizando una gestión integral de los recursos hídricos al fomentar la reutilización en origen tanto de aguas pluviales como de aguas grises.

2.2. TIPOLOGÍAS

Este apartado trata sobre las diferentes formas que existen de clasificar a las técnicas de drenaje urbano sostenible. Para su redacción se han consultado principalmente los manuales de CEDEX (2008) y CIRIA (2007).

Un primer tipo de clasificación, y la más simple de todas, común tanto en CIRIA como en CEDEX y en otros autores (véase *Perales, 2008*) es la que distingue las medidas entre estructurales y no estructurales, es decir, las que requieren y las que no de construcción de cualquier tipo de infraestructura. Ésta será la clasificación que se usará en este trabajo para catalogar las TDUS, pero hay otras, como las que se exponen a continuación.

Dentro de la clasificación de técnicas estructurales, la organización CIRIA diferencia entre medidas de infiltración, de retención, de filtración, medidas que usan vegetación y medidas de detención y retardo.

Otro tipo de clasificación, también propuesta por CIRIA (2007) y CEDEX (2008), es la basada en el lugar de implantación o aplicación del sistema de drenaje, en este caso están las de control en origen (medidas de control que se aplican previamente al sistema de drenaje) y las medidas de control en los vertidos o aguas abajo (se aplican a elementos de la red de alcantarillado).

Además CEDEX (2008) recoge otras clasificaciones de diferentes autores como son:

La propuesta por Sthare y Urbonas (1990) que distingue las técnicas según sean de Control y tratamiento local, de control en entradas, de detención o retención en el lugar (estas tres serían técnicas de control en origen), de detención o almacenamiento en línea, de detención fuera de línea y por último instalaciones de detención en la depuradora (y estas tres serían de control aguas abajo).

La recogida en varios manuales estadounidenses (*US-EPA 2004*) que divide las TDUS en dos grandes bloques, uno en el que se encuentran aquellas técnicas empleadas para el control de fuentes de contaminación, es decir, las que reducen los contaminantes en origen. Y un segundo bloque que contiene las técnicas empleadas para el tratamiento de las aguas pluviales de las redes de drenaje separativas.

La clasificación que se muestra a continuación se ha realizado a partir de las expuestas en las publicaciones de CIRIA C-697 y en el libro “Gestión de las aguas pluviales.

Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano.” (CEDEX, 2008). Y es la más básica de todas, basada solamente en una primera división entre medidas que no requieren y medidas que sí requieren de la construcción de una estructura.

2.2.1. Medidas no estructurales

Son aquellas que no precisan ni actuación directa sobre la red, ni la construcción de infraestructura alguna. Entre las medidas no estructurales de mayor difusión cabe citar las siguientes:

- Educación y programas de participación ciudadana para:
 - Concienciar a la población del problema de la gestión del agua y sus soluciones.
 - Identificar los agentes implicados y los esfuerzos realizados hasta la actualidad.
 - Cambiar hacia hábitos que supongan una reducción en la carga contaminante de las aguas.
 - Hacer partícipe del proceso de gestión hidrológica a la población, integrando sus requerimientos en la implementación de los programas
- Limpieza y mantenimiento frecuentes para reducir la acumulación de contaminantes.
 - Limpieza de arquetas y depósitos de captación.
 - Barrido de calles, aparcamientos y demás superficies impermeables.
 - Mantenimiento de carreteras y canales.
- Limitar el riesgo de que la escorrentía entre en contacto con contaminantes:
 - Controlar la aplicación de herbicidas y fungicidas en parques y jardines.
 - Vigilar las zonas en obras para evitar el arrastre de sedimentos.
 - Intervención en las conexiones ilegales al sistema de drenaje.
- Asegurar la existencia de procedimientos de actuación y equipamiento adecuado para tratar episodios de vertidos accidentales rápidamente y con técnicas secas en lugar de limpieza con agua.
- Recogida y reutilización de aguas pluviales por parte del ciudadano.

2.2.2. Medidas estructurales

Se consideran medidas estructurales aquellas que gestionan la escorrentía mediante actuaciones que contengan algún elemento constructivo o supongan la adopción de criterios urbanísticos *ad hoc*. Las más utilizadas son:

Cubiertas vegetadas

(*Green-roofs*) Como ocurre con el resto de SDUS, están concebidas para interceptar y retener las aguas pluviales, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando el caudal pico. Estructuralmente consisten en un sistema multicapa colocado sobre los tejados de los edificios en el que se favorece el crecimiento de vegetación. Esta técnica, además retiene contaminantes, actúa como capa de aislante térmico en el edificio y ayuda a compensar el efecto “isla de calor” que se produce en las ciudades.

Las cubiertas vegetadas incluyen terrazas, tejados y balcones tanto de uso público como privado y pueden tener o no con acceso directo a ellas. Algunas inclusive sirven de espacio lúdico.

Existen varias categorías de cubiertas vegetadas:

- Extensivas: Tienen un suelo delgado y un escaso o ningún requerimiento de riego, el agua de retención es escasa y los nutrientes limitados.
- Intensivas: Son suelos más profundos, con requerimientos de riego, bastante agua de retención y de fértiles condiciones para las plantas.
- Intensiva simple: Se construye usando varios sustratos en profundidad y combinando características de los tipos intensivas y extensivas.

El tipo de diseño de cubierta vegetada determinará las clases de plantas que pueden crecer, la posibilidad de acceso público, las consideraciones estructurales, el mantenimiento requerido y los costes.

Componentes de las cubiertas vegetadas. El desarrollo de las cubiertas vegetadas requiere al menos de cuatro componentes:

1. Barrera de raíces. Previene contra raíces de plantas vigorosas que pueden penetrar a través de la membrana impermeable dañándola. Esta barrera puede también ser un biocida o una espesa capa de polietileno.

2. La capa de drenaje. Controla el agua de retención del tejado y sus propiedades en combinación con el sustrato. Puede estar compuesta de materiales granulares como arenas, gravas, material volcánico,... o elementos modulares/sistemas laminares.
3. El sustrato o medio de crecimiento. Proporciona el espacio físico, de estructura porosa, con nutrientes, composición química y propiedades de drenaje necesarios para el crecimiento de las plantas escogidas. Hay un amplio rango de sustratos.
4. La capa de vegetación. Puede ser plantada artificialmente, mediante semillas, esquejes o por colonización natural.



Figura 2.1. Dos ejemplos de Green roof, el primero corresponde a un edificio público: School of Art, Design and Media at Nanyang Technological University, (Fuente: The International Greenroof & Greenwall Projects Database, 2006) y el segundo a un edificio residencial en Copenhague: The Big 8 Hause. (Fuente: Susdrain. 2012)

Depósitos de lluvia

(Rain barrels) Son tanques o barriles que se emplean para recoger y almacenar el agua de lluvia que cae principalmente en el tejado de un edificio. El agua que precipita sobre el tejado va a parar a unas canaletas que la conducen hacia un bajante que desemboca en el tanque de lluvia. Ahí se conserva para, posteriormente, darle algún uso, como sería agua de riego, para cisternas de baño, agua para lavar e incluso agua para consumo directo si dispone de un sistema especial de tratamiento. Con este aprovechamiento se atenúa el gasto de agua de la red de abastecimiento suponiendo una mejora ambiental.

En zonas donde la lluvia es frecuente, sirven además para retener el pico del hidrograma, pudiendo incorporar con posterioridad el caudal retenido a la red de

alcantarillado. De esta forma se disminuye la presión sobre la red municipal de saneamiento durante los picos de escorrentía, mitigando el riesgo de inundación. Y en zonas donde el clima es más árido, sirven para almacenar el agua durante la época de lluvias para luego usarla en la época seca.



Figura 2.2. A la izquierda, depósito de aguas pluviales sobre el nivel del suelo. Fuente: Wikipedia. A la derecha, Instalación de un depósito bajo tierra. Fuente: Wendy Carradine.

Superficies Permeables

(Porous/Permeable Paving) Son pavimentos que dejan pasar el agua a su través, permitiendo que ésta se infiltre por el terreno o bien sea captada y retenida en capas subsuperficiales para su posterior reutilización o evacuación. Si el firme se compone de varias capas, todas ellas han de tener permeabilidades crecientes desde la superficie hacia el subsuelo. Existen diversas clases de superficies permeables, como son: Pavimentos continuos de cualquier tipo de mezcla porosa (asfalto, hormigón, resinas, etc.), césped, césped reforzado, gravas, bloques impermeables con juntas permeables, bloques y baldosas porosos, pavimento de bloques impermeables con huecos rellenos de césped o grava, pavimento de bloques impermeables con ranuras sin relleno alguno, o pavimento de bloques porosos. Estos últimos, también denominados pavimentos modulares, se componen por una capa superficial formada por módulos de hormigón, ladrillo o plástico reforzado que poseen una serie de huecos que los atraviesan de arriba abajo y que pueden rellenarse con tierra o césped.

Las superficies permeables están constituidas por un volumen de material permeable situado bajo una superficie que permite el paso del agua. El agua atraviesa la superficie

permeable, que actúa a modo de filtro, hasta la capa inferior que sirve de reserva, atenuando de esta forma las puntas del flujo de escorrentía superficial. El agua que permanece en esa reserva puede ser transportada a otro lugar o infiltrada, si el terreno lo permite. Además las distintas capas permeables retienen partículas de diversos tamaños, aceites y grasas (incluso algunos hidrocarburos retenidos pueden llegar a ser biodegradados, aunque eso aún está en fase de estudio).

Este tipo de técnica de drenaje urbano sostenible puede utilizarse para áreas drenantes inferiores a 4 hectáreas con pendientes inferiores a 2-5%. La distancia hasta el nivel freático ha de ser superior a los 1,2 metros y la capacidad de infiltración del suelo de 1,2 mm/hora o mayor.

El exceso de agua se controla mediante un desagüe superior o un drenaje superficial diseñado con dicho objetivo. La misión de los geotextiles en este tipo de pavimentos es primordial puesto que actúan como filtro, separación o como refuerzo estructural.

Estos pavimentos se emplean en zonas con baja intensidad de tráfico, calles residenciales, zonas de aparcamiento, etc...., no estando recomendados en zonas industriales, gasolineras o lugares en los que se acumulan cantidades de metales pesados nada despreciables.

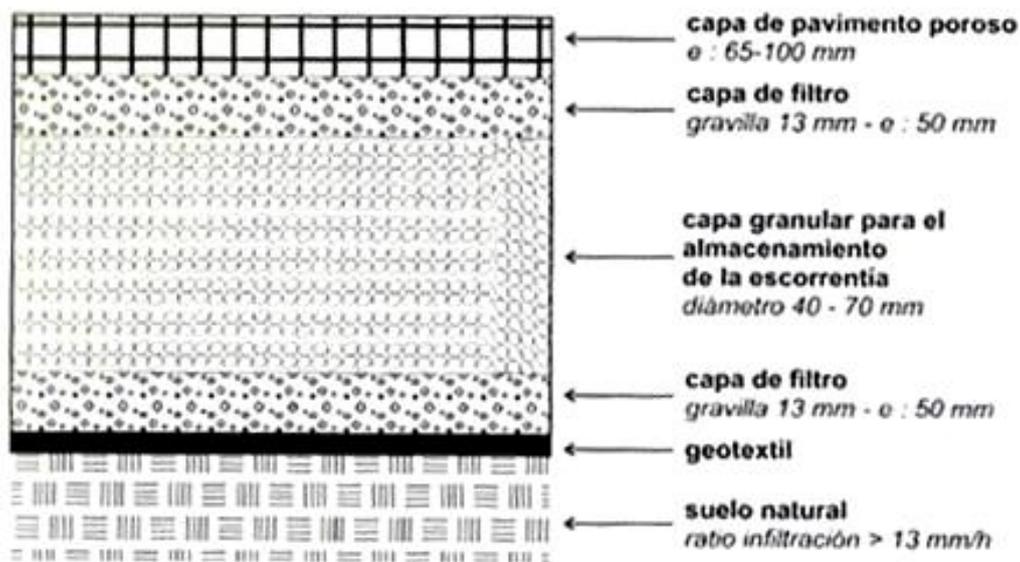


Figura 2.3. Esquema de pavimento permeable. Fuente: CEDEX (2008).



Figura 2.4. Tres tipos de superficies permeables. La primera consiste en adoquines que permiten el paso del agua, la segunda es una mezcla bituminosa permeable y la tercera es de césped y hormigón. Fuente: GITECO (2009).

Franjas Filtrantes

(Filter Strips) Son franjas de suelo vegetadas, anchas y con poca pendiente, situadas entre una superficie impermeable y el medio receptor de la escorrentía, que puede ser bien un curso natural de agua o bien sistemas de captación, tratamiento, y/o evacuación o infiltración. Esta técnica favorece la sedimentación de las partículas y contaminantes arrastrados por el agua, así como la infiltración del agua.

Las pendientes de las franjas deben ser suaves y la anchura a atravesar por el agua lo mayor posible: a mayor anchura de franja y densidad de vegetación se obtiene mayor capacidad filtrante y grado de depuración. Las franjas de filtración pueden acoger cualquier forma de vegetación natural, desde un prado hasta un pequeño bosque.

Estos sistemas se utilizan aguas arriba del final de un sistema de drenaje o en la recepción de la escorrentía de pequeñas cuencas. La escorrentía procedente de las carreteras también se puede tratar con estos métodos teniendo especial cuidado en que no se bloquee el paso de la carretera con la franja filtrante. Además pueden ser utilizadas como pretratamiento para eliminar el exceso de sólidos y contaminantes arrastrados por las aguas de escorrentía antes de pasar a otros sistemas.

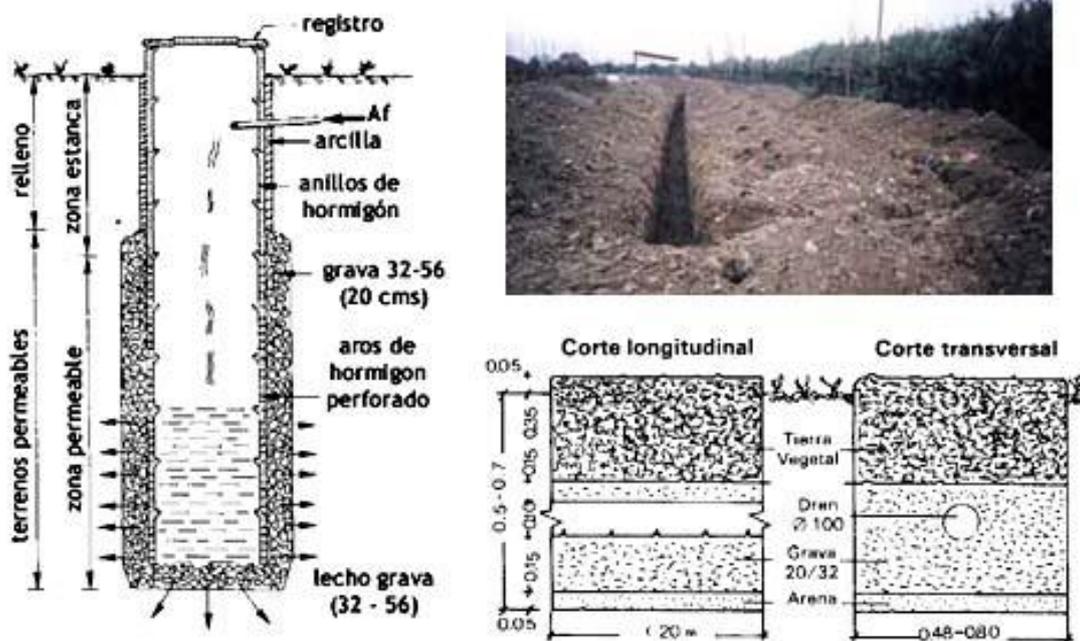


Figura 2.5. A la izquierda, esquema de una franja filtrante. Arriba a la derecha, zanja filtrante en terreno. Abajo a la derecha cortes longitudinal y transversal. Fuente: ITP-Depuración.

Pozos y Zanjas de Infiltración

(*Soakaways & Infiltration Trenches*) Son pozos, zanjas o trincheras de poca profundidad (de 1 a 3 m) rellenos de material granular, a los que vierte la escorrentía de superficies impermeables contiguas y sirven para recoger y almacenar el agua de escorrentía hasta que se produce la infiltración de la misma al terreno natural. Son estructuras de infiltración que pueden absorber totalmente la escorrentía generada por una determinada tormenta de diseño.

Los pozos son sistemas subterráneos de almacenamiento temporal de escorrentía, principalmente la proveniente de tejados y azoteas. Mediante esta técnica se consigue desconectar estas aguas de la red principal, disminuyendo así el caudal a circular por los colectores. No pueden utilizarse en suelos poco permeables y es recomendable que queden algo por encima del nivel freático para permitir exfiltraciones al terreno. Como se puede producir la contaminación del suelo en dichas exfiltraciones, se aconseja la colocación de algún tipo de filtro en el conducto que transporta el agua hasta el pozo.

Las zanjas son más estrechas y menos profundas que los pozos, siendo más eficientes desde el punto de vista constructivo. Se utilizan principalmente para el control de la calidad, pero se pueden emplear también como estrategia de control de la cantidad del

caudal de escorrentía en zonas residenciales de media-alta densidad y en zonas comerciales. Aunque hay que tener cuidado con el terreno donde se van a instalar, evitándose siempre localizaciones cerca de las cimentaciones de edificios o de carreteras. Los principales condicionantes físicos a los que están sometidas estas técnicas son: el suelo, que ha de tener una capacidad de infiltración superior a 12 mm/h y no ha de tener arcillas que provoquen la colmatación, la limitada capacidad drenante (áreas inferiores a 2 hectáreas), la necesidad de un período seco entre tormentas, una pendiente inferior al 6%, la diferencia de cotas entre la entrada y la salida ha de ser de 30 cm y, por último, que la distancia mínima al nivel freático sea de 1,2 m.

En ambos casos, pozos y zanjas, se suelen emplear geotextiles de filtro y separación para envolver el material granular y desagües de emergencia para, en el supuesto de que se supere la capacidad de depósito de diseño, poder enviar el agua sobrante a la red de alcantarillado.

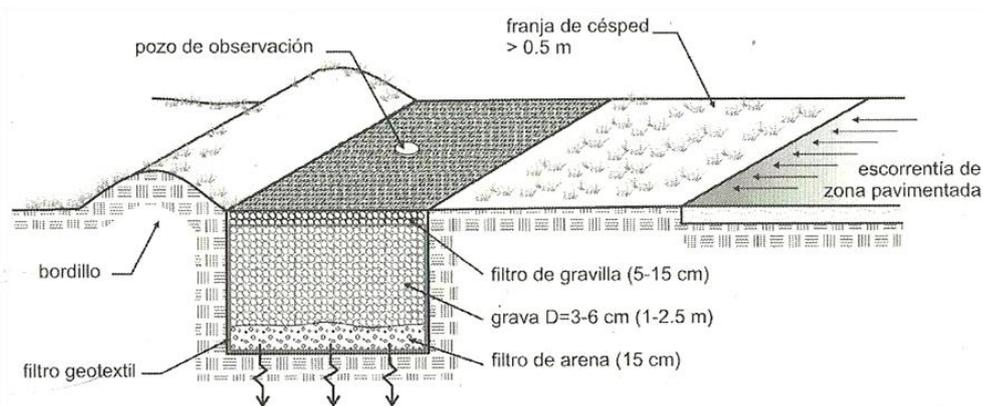


Figura 2.6. Esquema de zanja de infiltración. Fuente: CEDEX (2008).



Figura 2.7. Zanja de infiltración. Fuente Dina-mar.

Drenes Filtrantes o Franceses

(*Filter Drains*) Son zanjas poco profundas recubiertas de geotextil y rellenas de material filtrante, con o sin conducto inferior de transporte, diseñadas para captar y filtrar la escorrentía de superficies impermeables contiguas, transportándola hacia aguas abajo ya que dentro de las cuales circula el agua recogida. Permiten la infiltración y favorecen la laminación de la escorrentía.

El tiempo de estancia del agua en el dren debe ser suficientemente alto y la velocidad del agua suficientemente lenta para que exista infiltración a través del geotextil. De este modo, en algunos drenes no es necesario dirigir el agua hasta el punto de vertido, pues al cabo de una cierta longitud, el agua se ha infiltrado totalmente.

Pueden combinarse con otros sistemas: en carreteras, se pueden colocar junto a la calzada una franja filtrante con un dren filtrante de recogida, o una cuneta verde con un dren filtrante en su base, de forma que aumente su capacidad, ofreciendo una mayor atenuación de la escorrentía.

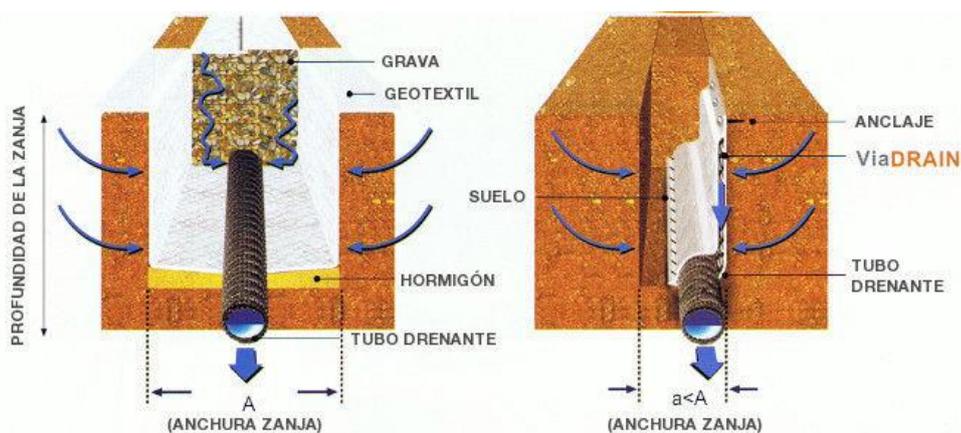


Figura 2.8. Dren francés. Fuente: Interdrain.

Cunetas Verdes

(*Swales*). Son estructuras lineales cubiertas con hierba, de base ancha ($> 0,5$ m) y taludes con poca pendiente ($< 1V:3H$), diseñadas para capturar y tratar el volumen de calidad de agua. Deben generar bajas velocidades en el agua circulante ($< 1-2$ m/s) para que las partículas en suspensión puedan sedimentarse y no aparezcan problemas de erosiones. Adicionalmente pueden permitir la infiltración a capas inferiores. Esta técnica se utiliza a lo largo de carreteras y calles residenciales y para tratar agua de escorrentía de áreas impermeables, como por ejemplo de una zona de aparcamientos.

Se pueden diferenciar tres tipologías diferentes:

- *Cunetas tradicionales*. Son canales recubiertos de césped que se usan para transportar el agua de escorrentía.
- *Cuneta vegetal seca*. Disponen de un filtro formado por un material muy permeable que permite que todo el volumen de calidad se infiltre a través del fondo del canal. Se denominan secas porque la mayoría del tiempo no contienen agua.
- *Cuneta vegetal húmeda*. Retiene el agua de forma permanente, para ello, se ejecuta en lugares con el nivel freático elevado o con suelo impermeable.

Para que las cunetas verdes funcionen correctamente, tienen que ocupar en planta entre un 10% y un 20% de la extensión del área a drenar, que no ha de ser superior a 2 hectáreas. Y para que no se produzca erosión por exceso de velocidad del agua, la pendiente longitudinal no ha de superar el 4%.

En comparación con las cunetas convencionales usadas en el drenaje longitudinal de carreteras, las cunetas verdes son más anchas y, además del transporte de la escorrentía, proporcionan un almacenamiento temporal que permite la filtración, infiltración, evaporación y evapotranspiración del agua.

Funcionan mejor con pendientes pequeñas, tanto las transversales como las longitudinales. Si es necesario fomentar la retención, se pueden construir pequeños azudes que aseguren un tiempo de detención mayor, ayudando a laminar las puntas en el flujo. En zonas de protección de aguas subterráneas incluso se pueden sellar en su zona inferior, de manera que la cuneta vegetada mantenga todas sus ventajas evitando la infiltración.

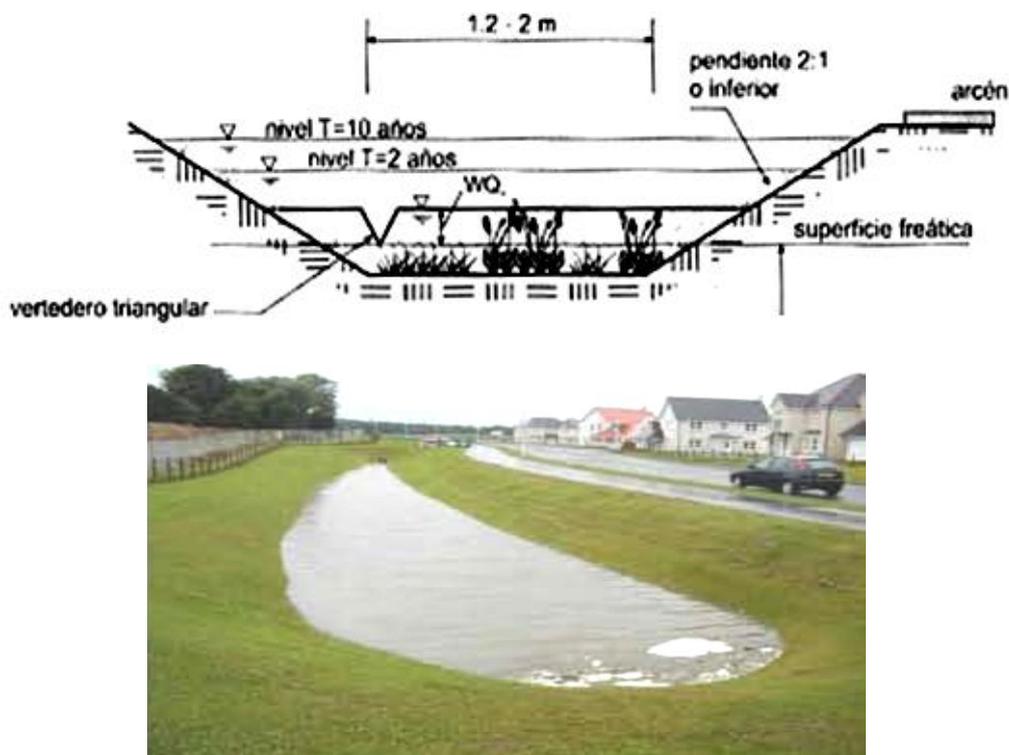


Figura 2.9: Arriba esquema de cuneta verde. Fuente: CEDEX (2008). Debajo, fotografía de cuneta verde. Fuente: Dina-mar.

Depósitos/estanques de Infiltración

(*Infiltration Basins*) Son depresiones en el terreno cubiertas de vegetación o embalses poco profundos que se diseñan para almacenar e infiltrar gradualmente la escorrentía generada en las superficies adyacentes. El objetivo de estos depósitos es la transformación de un flujo superficial en subterráneo, consiguiendo adicionalmente la eliminación de contaminantes mediante filtración, adsorción y transformaciones biológicas. Puesto que la infiltración es el principal proceso que tiene lugar dentro de esta técnica, muchos de los contaminantes disueltos son retenidos en el medio. Además de tener capacidad de tratar la contaminación disuelta, también tienen capacidad para minimizar los efectos de la contaminación térmica sobre los medios receptores

Tienen forma irregular, con bases anchas y taludes laterales suaves cubiertos de vegetación. Los desagües inferiores deben ser capaces de desaguar en todo momento. Los depósitos de infiltración pueden recoger el agua de una cuenca mayor que los pozos y las zanjas de infiltración, dado que también permiten en caso necesario, el

almacenamiento temporal por encima de la superficie del terreno en forma de lámina de agua.

Los estanques de infiltración se pueden dividir en dos clases (CEDEX):

- *Sistemas capaces de almacenar el volumen completo de calidad de agua*, se colocan en línea por lo que proporcionan protección frente al caudal punta que va asociado a dicho volumen.
- *Sistemas que almacenan una parte del aguacero*, se colocan fuera de línea para tratar sólo el agua del primer lavado de cuenca; son los sistemas más usados.

El rendimiento de estos sistemas se puede mejorar colocando un sistema de pretratamiento que disminuya la entrada de sólidos en suspensión, reduciendo así el riesgo de colmatación de la zona de infiltración.

Los principales condicionantes físicos de esta técnica son:

- El área drenante ha de ser inferior a las 10 hectáreas.
- La ocupación en planta ha de ser entre un 2% y un 3% del área de la cuenca drenante.
- No han de instalarse en lugares con pendientes superiores al 15% y el fondo ha de mantenerse de forma horizontal.
- La diferencia de cotas entre la entrada y de la salida ha de estar en torno a los 90 centímetros.
- La distancia con el nivel freático máximo estacional debe superar los 1,2 metros (salvando las zonas costeras, donde esta distancia puede reducirse).
- Los suelos donde se sitúen han de ser muy permeables, con una capacidad de infiltración superior a los 12 mm/hora.
- Para evitar colmataciones, la cantidad de arcillas contenidas en el suelo no ha de superar el 20%, y si es en conjunción con limos, el 40%.



Figura 2.10. A la izquierda montaje de un depósito de infiltración. Fuente: Aquatecnic. A la derecha depósito de infiltración en funcionamiento.

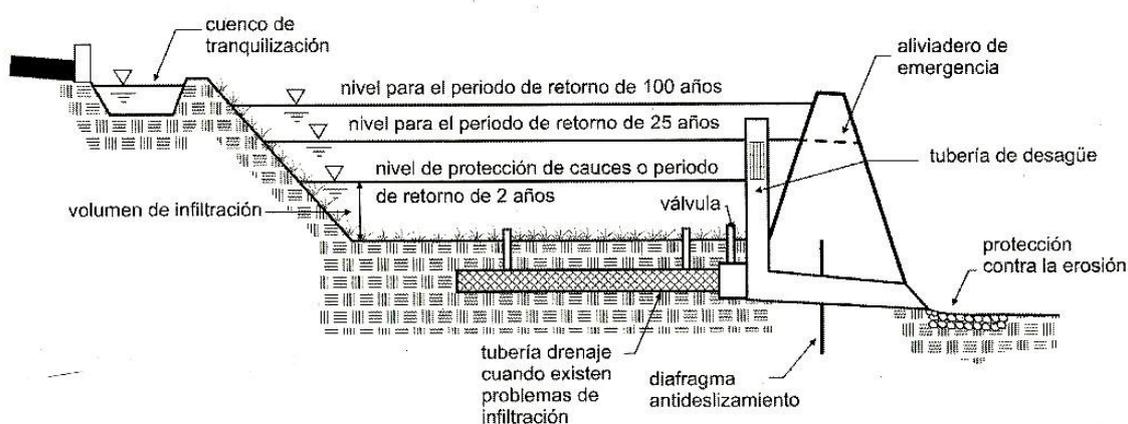


Figura 2.11. Perfil transversal de un estanque de infiltración. Fuente: CEDEX (2008).

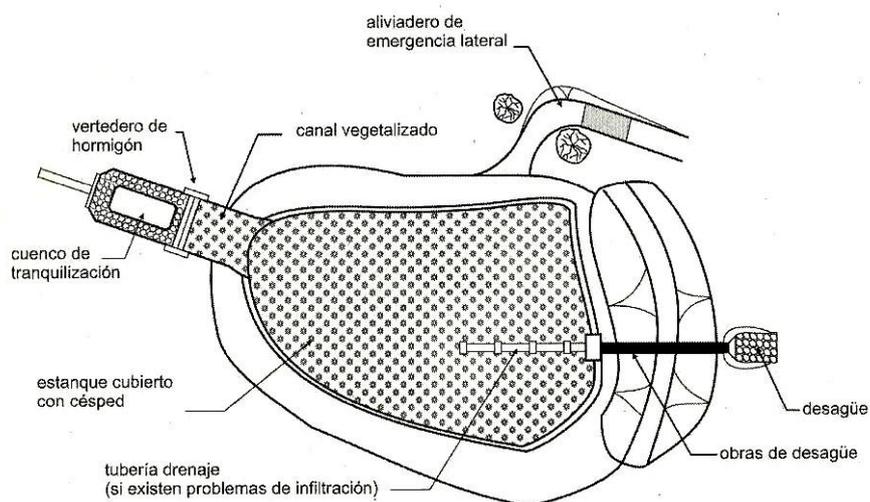


Figura 2.12. Planta de un estanque de infiltración. Fuente: CEDEX (2008).

Depósitos superficiales de detención

(*Detention Basins*) Son depósitos superficiales que almacenan temporalmente la escorrentía generada aguas arriba, laminando los caudales punta y reduciendo los picos

de caudal, disminuyendo así el riesgo de inundación. Como están proyectados para no almacenar un volumen de agua de forma permanente, también se les llama *depósitos secos*.

En el diseño de los depósitos de detención se puede incluir un desvío o by-pass de manera que, una vez recibida la escorrentía del primer lavado, que es la más contaminada, el resto pase al siguiente sistema de la cadena de drenaje. Favorecen la sedimentación y reducen la contaminación. Pueden ser compaginados con otros usos, como los recreacionales, en parques e instalaciones deportivas o localizarse en “zonas muertas”.

Los principales condicionantes físicos a los que están supeditados son: el área drenante, que ha de estar comprendida entre 4 y 30 ha.; la pendiente longitudinal, que ha de ser inferior al 15%, la diferencias de cotas entrada-salida del agua ha de ser de metro y medio y se necesita de una previa impermeabilización del suelo.



Figura 2.13. Depósito superficial de detención localizado en una “zona muerta”. Fuente: Universidad de Abertay, Dundee, Escocia.

Depósitos enterrados de detención

(*Detention Basins*) Son depósitos con la misma finalidad que los del grupo anteriormente expuesto pero que, por escasez del terreno o en los casos en que las condiciones del entorno no recomiendan una infraestructura a cielo abierto, han de construirse bajo el suelo. Pueden estar hechos con materiales diversos, siendo el hormigón armado y los materiales plásticos como el polipropileno, los más habituales. Su principal función es la de laminar el hidrograma mediante el almacenamiento de un volumen de escorrentía y su posterior vertido al medio.

Estructuras de detención multifacéticas

Son aquellas técnicas cuya funcionalidad difiere de la de control de la escorrentía urbana, pero que pueden usarse a tal fin. Y aunque carecen de protección frente a inundaciones, pueden emplearse como parte de un tren o cadena de tratamiento de forma efectiva. Dentro de estas estructuras se incluirían las azoteas, tejados, los estadios deportivos o las zonas de aparcamiento, que retienen el agua de la tormenta, laminando el caudal de escorrentía.

Estanques de Retención

(Retention Ponds) Son lagunas artificiales que comprenden un cierto volumen de agua permanentemente, que tienen una profundidad entre 1,2 y 2 m y que contienen flora y fauna acuáticas. Este volumen de agua constante oculta bancos de sedimentos antiestéticos e incrementa el rendimiento en la eliminación de nutrientes, metales pesados, coliformes y materia orgánica.

Se dimensionan para garantizar largos periodos de retención de la escorrentía, de 2 a 3 semanas, además de darle un volumen de almacenamiento adicional para laminar caudales punta. Ya que requieren de un caudal base elevado, este tipo de estanque se utiliza en estrategias de control regional.

Los principales condicionantes físicos a los que está supeditado el establecimiento de esta medida de control de la escorrentía son que necesita de grandes extensiones del área de drenaje (10 ha.) para mantener al volumen de agua permanente; la pendiente longitudinal del perfil no puede superar el 15% y la diferencia de cotas entre la entrada y la salida ha de estar comprendida entre 1,2 y 1,8 metros.

La característica fundamental que tienen los estanques de retención es su capacidad de eliminación de contaminantes, ya sea por sedimentación o por procesos de biodegradación llevados a cabo por las plantas y microorganismos que allí habitan. A la hora de establecer los rendimientos de eliminación de contaminación, el parámetro más relevante a considerar es la relación entre el volumen de agua permanente del estanque y el área de drenaje y/o el volumen de escorrentía. Otro factor importante en el diseño de estos elementos es su localización, deben evitarse zonas próximas a acuíferos y si no puede ser, impermeabilizar el fondo del estanque para evitar que los agentes contaminantes lleguen a las aguas subterráneas.

Los estanques de retención pueden dividirse en cuatro tipos (US-EPA):

- *Estanque de retención* propiamente dicho, es aquel en el que el volumen de agua permanente es igual al volumen de calidad de agua.
- *Estanque de retención extendida*, en él el volumen de agua permanente es un porcentaje mayor del 50% del volumen de calidad de agua (el rendimiento de eliminación de contaminantes es similar, pero el espacio requerido es mucho menor).
- *Microestanque de retención*, el volumen de agua a tratar es inferior a una quinta parte del volumen de calidad, pero el rendimiento de tratamiento es bueno para pequeñas cuencas de unas 4 hectáreas.
- *Sistemas de estanques múltiples*, la suma de del volumen de todos los estanques componentes del sistema es igual al volumen de calidad de agua. Al incrementar los tiempos de retención del agua, la eliminación de sustancias no deseables es más efectiva, pero en contraposición necesitan de más espacio.

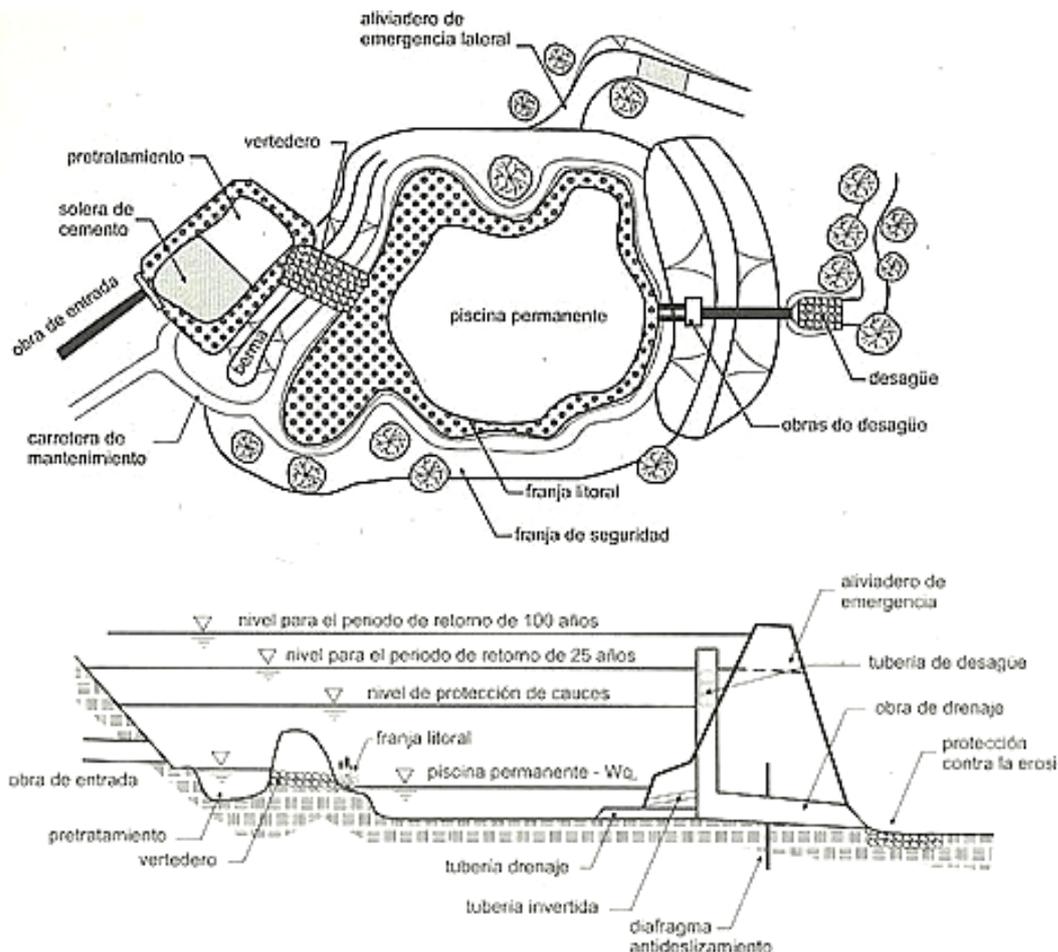


Figura 2.14. Esquema de la planta y el perfil de un estanque de retención. Fuente: CEDEX (2008).



Figura 2.15. Estanque de retención. Fuente: Dina-mar.

Humedales artificiales

(*Artificial wetlands*) Son elementos artificiales, similares a los estanques de retención pero con menos profundidad y con más densidad de vegetación emergente, propia de pantanos y zonas húmedas. Esta mayor cantidad de vegetación hace que los niveles de bioeliminación de contaminantes sean aún mayores que en los depósitos de retención.

Además de la gran efectividad en el control de la calidad del agua, también son de utilidad en el control del volumen de escorrentía. Un punto a tener en cuenta en el diseño de estos elementos es que es importante asegurar siempre un flujo base, especialmente en períodos de sequía, ya que lo necesitan para mantener con vida la flora y la fauna que habitan en el humedal. También aportan un gran potencial ecológico, estético, educacional y recreativo.

Los puntos más representativos de su diseño son que: las áreas de drenaje han de estar en torno a las 10 hectáreas, la pendiente longitudinal no ha de superar el 8%, la diferencia de cotas entrada-salida es de entre 0,9 y 1,5 metros y el suelo ha de impermeabilizarse si hay algún acuífero cercano. Para que los rendimientos de funcionamiento sean adecuados, en el diseño de cualquier humedal hay que dimensionar cuatro zonas interdependientes con varias profundidades. Estas cuatro zonas son:

- *Zona de aguas profundas*, con un calado entre 0,5 y 1,8 metros y donde se desarrolla vegetación sumergida y flotante.
- *Zona baja de vegetación emergente*, con un calado pequeño, entre 6 cm y medio metro.

- *Zona alta de vegetación emergente*, desde los 6 cm hasta el nivel normal del estanque. En esta zona hay que incorporar una gran variedad de especies vegetales y su extensión ha de ser superior a la de la zona baja.
- *Zona inundable*, es la situada por encima del volumen permanente y que se inunda durante los episodios de mayor intensidad.

Atendiendo a la clasificación presentada en la publicación del CEDEX, “*Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano*”, los humedales pueden ser divididos en cuatro tipos, pero otras entidades (CIRIA 2007, “*The SDUS manual*”) distinguen entre más de cinco tipologías diferentes. Las cuatro clases propuestas en publicación del CEDEX son:

- *Humedal poco profundo*, cuyo volumen de agua permanente puede oscilar entre el volumen de calidad y el triple de su valor (diferentes propuestas CIRIA-USEPA), por lo que ocupa una gran extensión, lo cual es un importante inconveniente de este tipo de humedal.
- *Humedal poco profundo detención extendida*, en este caso el volumen permanente es sólo una fracción del volumen de calidad de agua, por lo que los requerimientos de espacio son inferiores. La diferencia entre el volumen permanente y el de calidad de agua es retenida en el humedal hasta pasadas las veinticuatro horas y luego empieza a verse.
- *Sistema de humedales*, compuesto por dos zonas, un estanque de retención donde se retienen los sólidos más gruesos y una zona de marisma somera con vegetación donde se eliminan más contaminantes.
- *Pequeños humedales*, diseñados para cuencas drenantes de entre 2 y 5 ha.

Es fundamental destacar que en ningún caso los humedales naturales deben recibir aportaciones procedentes de escorrentía urbana, sólo los humedales artificiales están preparados para esta tarea.



Figura 2.16. Humedal artificial. Fuente: CIRIA (2004).

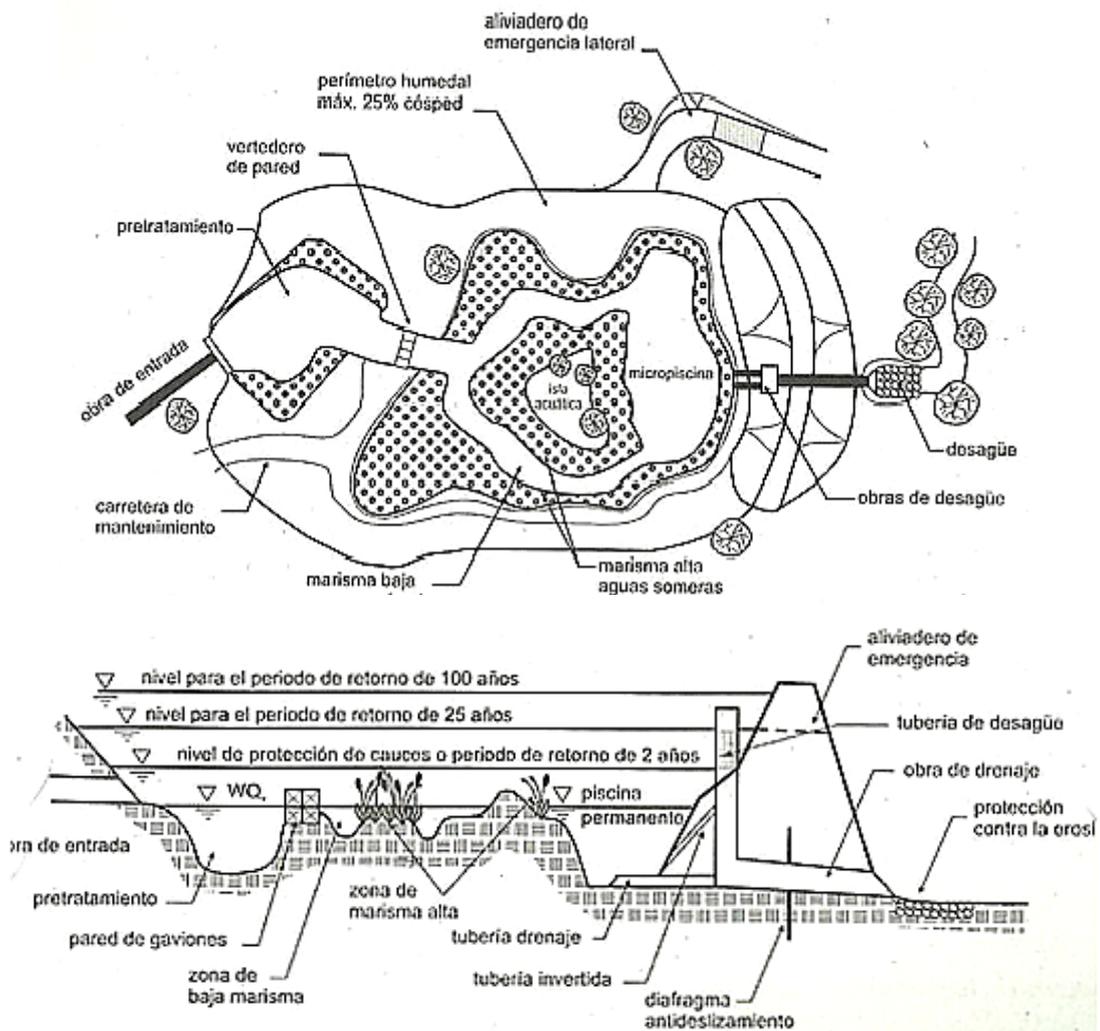


Figura 2.17. Esquema de la planta y el perfil de un humedal. Fuente: CEDEX (2008).

Áreas de biorretención

Las áreas de biorretención están diseñadas principalmente para el control de la calidad del agua antes de su vertido al medio ya que su capacidad para el control de caudales es muy limitada. Estos sistemas pueden construirse para tratar el agua de escorrentía de zonas residenciales.

En estas áreas, que han de ser zonas algo deprimidas, se facilita la infiltración del agua colocando un suelo muy permeable bajo una capa de mulch (filtro orgánico) y un dren colector de arena o gravilla. La eliminación de la contaminación se optimiza mediante la presencia de vegetación. Para un perfecto funcionamiento de estas técnicas se precisa de un sistema de pretratamiento como una zanja vegetal de infiltración y un dren filtrante perimetral de arena. También es aconsejable la colocación de un desagüe de emergencia.

El alto rendimiento de esta técnica en la eliminación de contaminantes se debe a la variedad de mecanismos presentes. La franja filtrante reduce la velocidad de la escorrentía permitiendo la deposición de las sustancias de mayor tamaño. En la zona de detención se facilita la infiltración, evaporación y la sedimentación de partículas. El mulch favorece el crecimiento de microorganismos que eliminan hidrocarburos y materia orgánica. Estos contaminantes también se eliminan en el suelo filtrante, además de hacerlo también los metales pesados y nutrientes. La vegetación favorece la remoción de contaminantes y la estabilización del suelo.

El volumen de calidad de agua es infiltrado a través del preparado edáfico y sale por el sistema de drenes. Los requerimientos necesarios para la disposición de esta técnica son que el área de drenaje debe estar entre las 0,2 y 1 ha., el tamaño mínimo que ha de tener es de uno 18 m², la pendiente del terreno donde se sitúa no ha de superar el 6% y la distancia mínima al nivel freático es de 0,6 m.

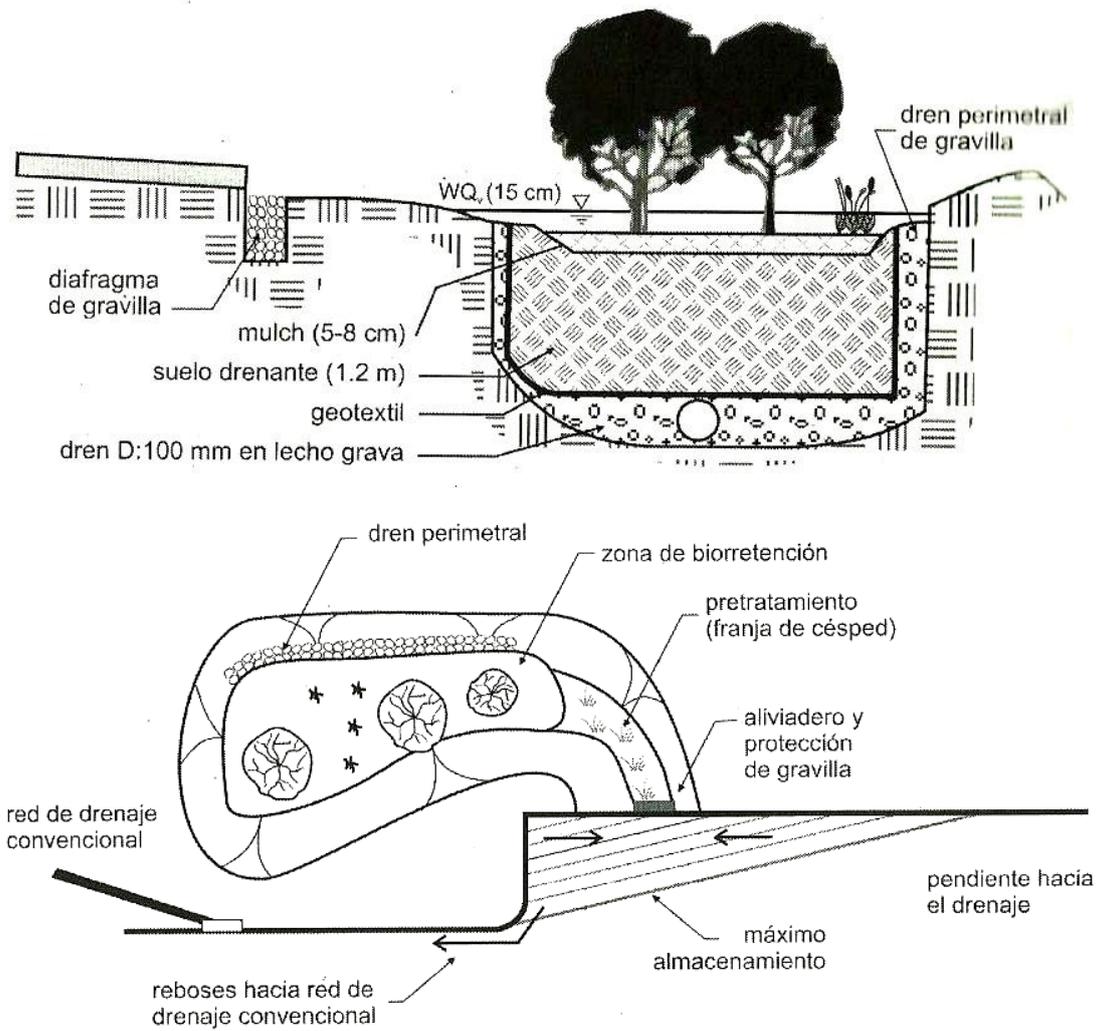


Figura 2.18. Esquema de la planta y el perfil de un área de biorretención. Fuente: CEDEX (2008).



Figura 2.19. Área de biorretención. Fuente: Charlotte-Mecklenburg BMP Design Manual (2010).

Filtros de arena

Son técnicas de control de la escorrentía urbana basadas en la retención, la filtración y sedimentación. Almacenan el agua temporalmente y la hacen atravesar varias capas de arena, mejorando así su calidad en el flujo de salida. Dicho flujo puede dirigirse directamente a la red de alcantarillado o infiltrarse en el suelo. Constan de dos cámaras, en la primera se eliminan flotantes y sedimentos pesados, y en la segunda tiene lugar el proceso de filtración a través de un lecho de arena. A veces se añade una tercera cámara, la de descarga.

Esta técnica es poco viable en el control de caudales punta a menos que se traten pequeñas áreas (inferiores a 4 ha.) o los sucesos de lluvia sean poco intensos (período de retorno de dos años). Además para que funcionen de manera correcta la pendiente ha de ser inferior al 6%, la diferencia de cotas entre la entrada y la salida como mínimo será de 0,6 metros y la carga hidráulica de 1,5 m., no pudiendo haber un flujo permanente de agua, además se deben evitar infiltraciones en caso de cercanía a un acuífero.

La clasificación existente entre los distintos tipos de filtros se basa en su localización, el área de drenaje, la superficie del filtro, los requerimientos espaciales y la cantidad de agua a tratar, pudiendo distinguirse así entre:

- *Filtros superficiales*, son aquellos que se encuentran a nivel del suelo o parcialmente enterrados.

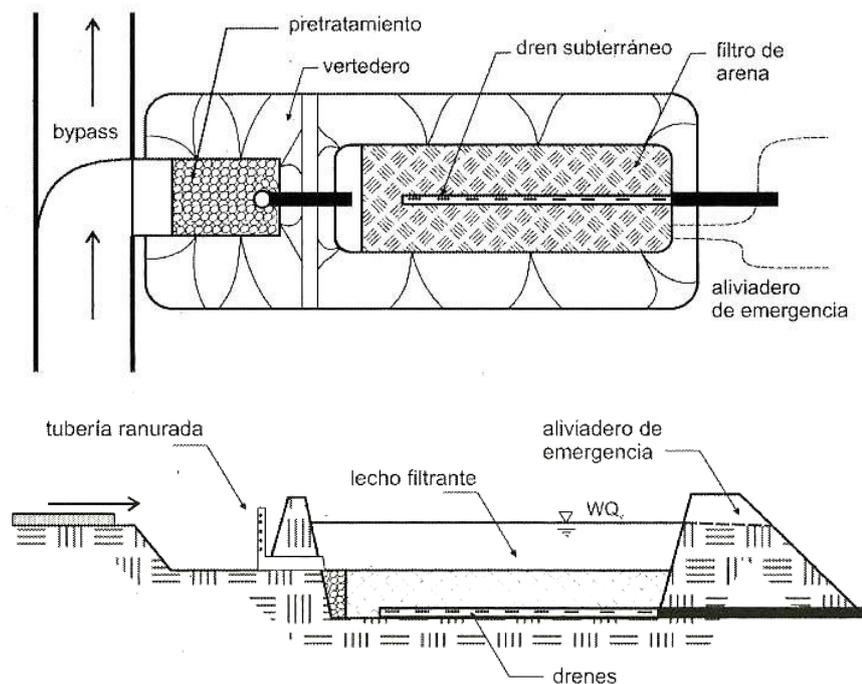


Figura 2.20. Esquema de la planta y el perfil de un filtro superficial. (Fuente CEDEX 2008).

- *Filtros perimetrales*, son estructuras enterradas construidas a lo largo de un lateral de una superficie impermeable.

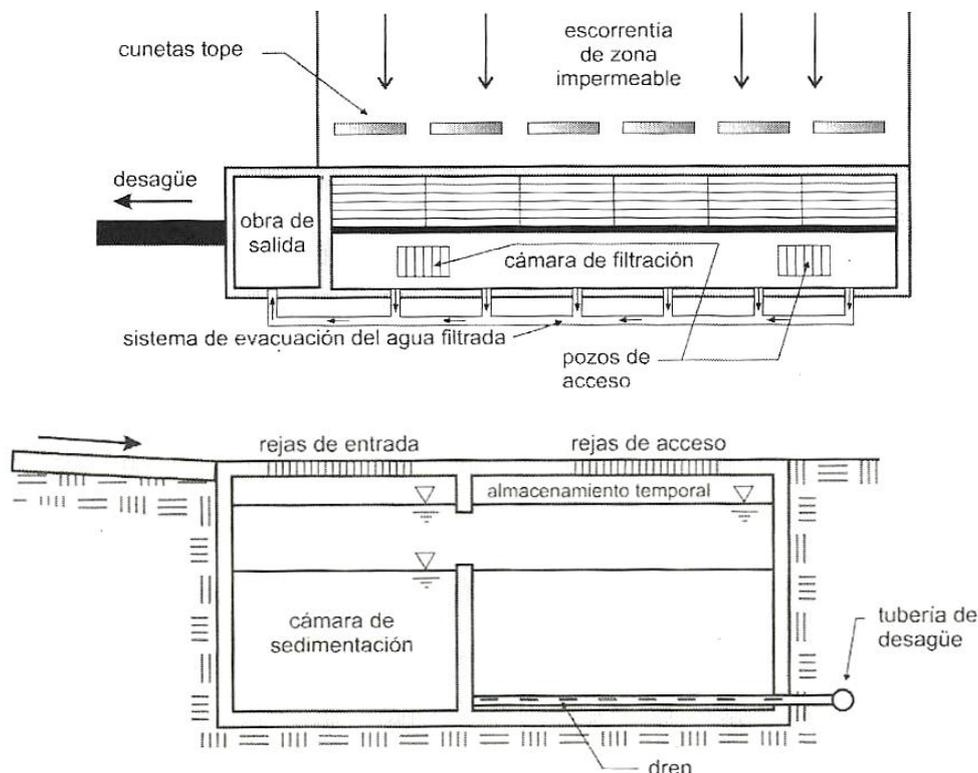


Figura 2.21. Esquema de la planta y el perfil de un filtro perimetral. Fuente CEDEX (2008).

- *Filtros enterrados*, son los situados en cámaras subterráneas que se aplican sobre todo en áreas altamente urbanizadas

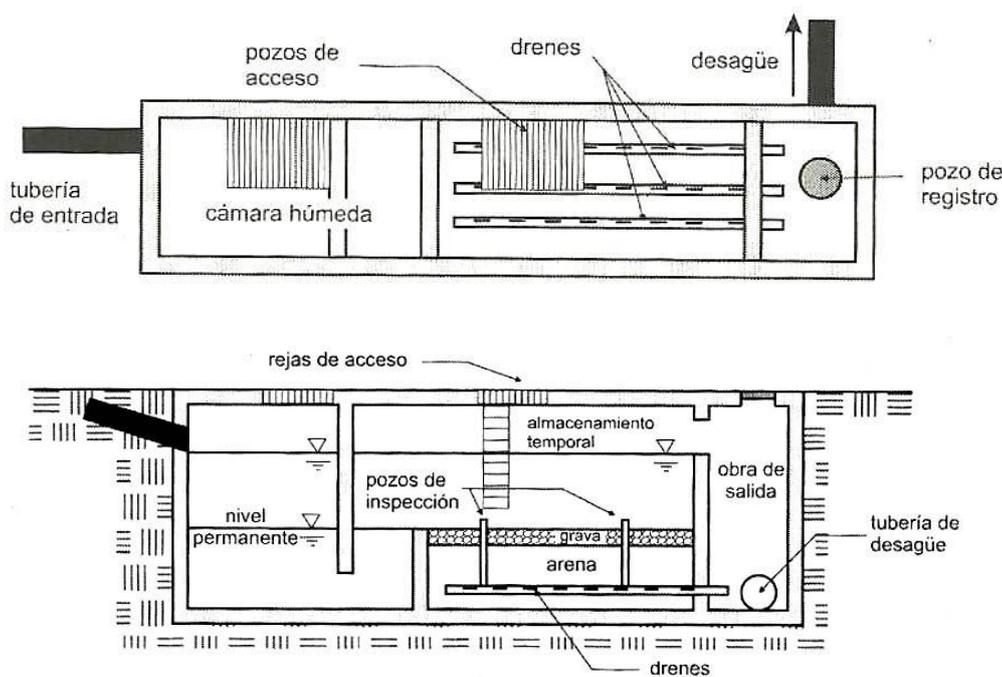


Figura 2.22. Esquema de la planta y el perfil de un filtro enterrado. Fuente CEDEX (2008).

- *Filtros orgánicos*, son estructuras similares a los filtros superficiales en los que la arena de la segunda cámara es sustituida por un medio orgánico como el compost.

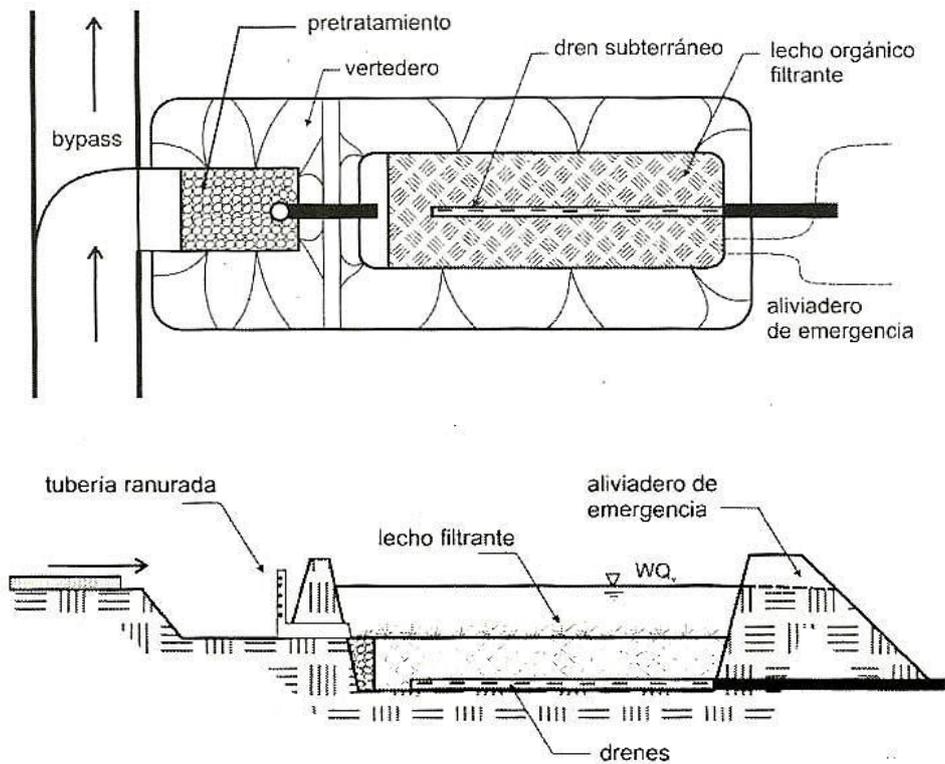


Figura 2.23. Esquema de la planta y el perfil de un filtro orgánico. Fuente CEDEX (2008).

3. PROCESOS DE TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES

Al inicio de un suceso de precipitación se da el proceso comúnmente conocido como “*primer lavado o first-flush*”. En él, una fracción significativa de los contaminantes acumulados en tiempo seco (deposiciones sobre las superficies impermeables de las áreas urbanizadas de polvo, arenas, metales pesados, sustancias tóxicas...) es transportada por la escorrentía superficial generada durante los primeros minutos de una tormenta. En ese escaso tiempo, esta escorrentía aún no ha alcanzado un volumen importante, por lo que la concentración de las partículas sólidas arrastradas es muy alta y contaminante. Este primer lavado, o *first-flush*, se caracteriza entonces por un caudal pequeño, correspondiente al inicio de una tormenta, que contiene la mayor parte de las partículas depositadas en el suelo desde la última limpieza de las calles o, inclusive, desde la anterior tormenta. Las deposiciones atmosféricas y el posterior arrastre de sustancias son la principal fuente de contaminación de las aguas de escorrentía urbana. Sustancias peligrosas o nocivas como el plomo, el dióxido de azufre, los hidrocarburos o los óxidos de nitrógeno, se incorporan a estas aguas a causa del tráfico. Pero aparte de los vehículos, hay otras fuentes de contaminación de estas aguas, como son las basuras depositadas en las vías públicas y los residuos sólidos (hojas caídas, ramas...) procedentes de parques y jardines.

Una de las cualidades más importantes de los SDUS, y esencial diferencia con los sistemas de drenaje urbano convencionales, es su capacidad de retener y/o eliminar elementos contaminantes de las aguas de escorrentía urbana. Estos elementos son de diversa índole, y provienen de distintos focos. En el siguiente cuadro se presentan los principales contaminantes del agua de escorrentía urbana y sus fuentes de procedencia de una manera muy general:

Tipo de contaminante	Principales fuentes
Bacterias	Excrementos de animales, residuos orgánicos
Metales	Vehículos y pequeña industria
Nutrientes	Zonas ajardinadas, residuos orgánicos
Aceites y grasas	Vehículos, residuos de restauración
Pesticidas	Parques y jardines
Sólidos en suspensión	Obras, deposiciones atmosféricas en calles, erosión del suelo,...
Sustancias tóxicas	Vehículos y pequeña industria

Tabla 3.1. Tipología y principales fuentes de los contaminantes en las aguas urbanas. Fuente: Cámara Argentina de la Construcción (2009).

De forma más específica, los valores de acumulación que se producen debido únicamente a las deposiciones secas son:

Contaminante	Tasa (g/ha-día)
Sólidos Totales	515
DQO	195
Fósforo Total	0,51
Plomo Total	0,52
Sulfatos	23

Tabla 3.2. Tasa de deposición atmosférica seca. Fuente: Bannerman (1984).

Y la relación entre las sustancias más nocivas provenientes del tráfico con la masa total de sólidos:

Contaminante	Porcentaje en Peso del Total de Sólidos
Sólidos Volátiles	5,10%
DBO	0,23%
DQO	5,40%
Grasa	0,64%
Fósforo Total	0,06%
Nitrógeno Kjeldahl Total	0,02%
Nitratos	0,008%
Asbestos	$3,6 \cdot 10^6$ fibras/g
Plomo	1,20%
Cromo	0,01%
Cobre	0,01%
Níquel	0,02%
Zinc	0,15%
Tasa Total de Emisión de Sólidos	0,671 g/km

Tabla 3.3. Contaminantes acumulados en las calles provenientes del tráfico. Fuente: Shaheen (1975).

A continuación se ofrece una breve descripción más específica de cada uno de los de los contaminantes más frecuentes en las aguas de escorrentía urbana.

1. **Sólidos en suspensión:** Son partículas sólidas de naturaleza heterogénea que llevan asociados una gran cantidad de diferentes contaminantes (una fracción de los mismos será materia orgánica, otra nitrógeno, otra fósforo,....). Son detectables a simple vista, ya que dan turbidez a las aguas y son los elementos que aparecen con mayor frecuencia. Actúan como centros activos favoreciendo la adsorción de sustancias y microorganismos. Las principales fuentes de estos contaminantes son las aguas domésticas e industriales, los materiales sólidos

erosionables de la cuenca y las deposiciones atmosféricas en tiempo seco. Los efectos de una elevada concentración de sólidos en suspensión el agua de escorrentía vertida sobre el medio receptor se pueden resumir en los siguientes puntos: aumento de la turbidez reduciendo el paso de la luz y alterando el desarrollo de la vegetación (algas); acumulación de fangos en zonas de fondo (alterando la morfología de los cauces); afectaciones a la fauna y alteraciones estéticas del medio.

2. **Materia orgánica biodegradable:** Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, aceites y grasas, que son componentes naturales, pero también por componentes sintéticos como detergentes, pesticidas y disolventes orgánicos. Para medir su cantidad en las aguas se usa la DBO o DQO. Su presencia en las aguas provoca serios problemas al hacer desaparecer el oxígeno en el medio receptor (anoxia) lo que provoca la muerte de la fauna. Asimismo da color, sabor y olor al agua, cuando no debiera tenerlos y provoca la aparición de trihalometanos, sustancias con una alta toxicidad.
3. **Elementos patógenos:** Microorganismos y virus procedentes de los desechos de aves y animales domésticos que se acumulan en zonas impermeables. Los patógenos confieren insalubridad en las aguas que los contienen y aumentan la probabilidad de transmisión de enfermedades a través de las mismas.
4. **Nutrientes:** Se consideran nutrientes al fósforo, al nitrógeno y a sus compuestos derivados. Su problemática proviene principalmente de que producen problemas de eutrofización (proliferación de algas, aumento de la turbidez, grandes variaciones de oxígeno disuelto entre el día y la noche, aparición de compuestos tóxicos...).
5. **Metales pesados:** Su presencia es de gran importancia debido a su elevada toxicidad sobre microorganismos, plantas y animales, incluido el ser humano. Las concentraciones presentes de este tipo de metales en las aguas de escorrentía son muy variables, dependen de los usos del suelo en la cuenca urbana, de la densidad del tráfico y de las emisiones industriales. Los metales pesados considerados problemáticos y potencialmente presentes en las aguas de escorrentía son: As, Hg, Bo, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr y Zn, que además son altamente tóxicos. Igualmente puede haber presentes otros metales como el Fe y Mn, no tan tóxicos pero con efectos también indeseables sobre el medio.

6. **Otros compuestos tóxicos:** Como serían compuestos plásticos, compuestos aromáticos derivados del benceno, herbicidas, cloruros, hidrocarburos (gasolinas y otros derivados del petróleo)....

Características de la calidad del agua de escorrentía urbana

Elemento/sustancia contaminante	Concentración media
TSS (Sólidos suspendidos totales mg/l)	180-548
DBO (Demanda biológica de oxígeno mg/l)	12-19
DQO (Demanda química de oxígeno mg/l)	82-178
TP (Fósforo total, mg/l)	0,42-0,88
SP(Fósforo disuelto, mg/l)	0,15-0,28
TKN (Nitrógeno Kjeldahl total, mg/l)	1,90-4,18
NO _x (Nitrógeno combinado mg/l)	0,86-2,2
TCu (Cobre Total µg/l)	43-118
TPb (Plomo Total µg/l)	182-443
TZn (Zinc Total µg/l)	202-633

Tabla 3.4. Concentraciones medias de los principales contaminantes de aguas de escorrentía urbana. Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. (1983). Results of the Nationwide Urban Runoff Program (NURP), Vol. 1, NTIS PB 84-185552), Water Planning Division, Washington, DC.

La eliminación de los contaminantes por las técnicas de drenaje sostenible resulta de una compleja combinación entre agentes biológicos, químicos y físicos. Los principales mecanismos de eliminación, junto con sus correspondientes medidas con las que pueden cuantificarse pueden venir recogidas en la tabla:

Procesos	Medidas relevantes y unidades
Sedimentación	Velocidad de sedimentación (m/s)
Adsorción	K_d (L/g); asociado a la fracción química
Degradación microbiana	Ratio de biodegradación (vida media en días)
Precipitación	Solubilidad (mg/l)
Filtración	Función de K_d (L/g) y precipitación (mg/l)
Volatilización	K_h (atm·m ³ /mol)
Fotólisis	Ratio de fotodegradación (vida media en días)
Retención vegetal	Bioacumulación (K_{ow} (ratio))

Tabla 3.5. Principales procesos de eliminación de contaminantes en aguas de escorrentía urbana mediante SDUS. Fuente: Middlesex University (2003).

K_d : Coeficiente de adsorción, partición de una sustancia en equilibrio entre la fase sólida y la disuelta.

K_h = Constante de la ley de Henry (relación que a una temperatura constante de la masa de gas disuelto en un líquido en equilibrio es proporcional a la presión parcial del gas).

K_{ow} = Coeficiente de partición agua/octanol, medida del potencial de los compuestos orgánicos que se acumulan en los lípidos = relación de la concentración de un contaminante en octanol y en el agua en el equilibrio.

A continuación se describen algunos de los mecanismos causantes de la eliminación de los contaminantes que tienen lugar en los SDUS:

Adsorción:

Por definición, la adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase adsorbente se llama "adsorbente". El adsorbato en este caso son algunos de los contaminantes contenidos en el agua de escorrentía y el adsorbente será, entre otros, la superficie de los sólidos en suspensión, los microorganismos presentes, la vegetación, un medio poroso por el que circula el agua, etc.... Puede ser un proceso físico, uno químico o, como es el caso más general, una combinación de ambos. Ejemplo de sistemas de drenaje urbano sostenible en los que tiene lugar este proceso serían los pavimentos porosos y cunetas verdes.

Sedimentación:

La sedimentación es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin. Los materiales sólidos en suspensión transportados en la escorrentía sedimentan al disminuir la velocidad del agua cuando entra en los sistemas de drenaje sostenible. En los sistemas de drenaje convencionales existen altas velocidades de circulación del agua, por lo que los contaminantes en suspensión son arrastrados hasta los cauces o costas donde vierten. También puede ocurrir que las aguas de escorrentía urbanas sean dirigidas hacia una estación de tratamiento, en ese caso los sólidos arrastrados aumentan la carga a tratar, acrecentando los costes del proceso.

La sedimentación es uno de los mecanismos de descontaminación fundamentales de los SDUS. Como gran parte de los contaminantes están ligados a fracciones de sedimento, la eliminación de éste repercute en una reducción de los contaminantes asociados. Ejemplos de técnicas donde se produce este proceso son las cunetas verdes y los depósitos de detención.

Filtración/Biofiltración:

La filtración puede referirse tanto a la física de tamizado de aguas pluviales (ya que pasa a través de un medio poroso, como el asfalto poroso), como a la biológica o

biofiltración del agua a su paso por la vegetación. El primer proceso atrapa directamente a las partículas contaminantes, aumentando las posibilidades de sedimentación mediante la reducción de la tasa de flujo. La eficacia del proceso de tamizado depende del tamaño de los poros del material seleccionado o sustrato, puesto que cuanto menor sea el tamaño de los poros, mayor será el grado de retención de partículas, pero también mayor la susceptibilidad a la obstrucción o colapso del medio.

La eficiencia de la biofiltración dependerá de la densidad de la vegetación, la reducción de la velocidad del flujo se incrementa con el aumento en la densidad de la vegetación. Sin embargo, a velocidades de flujo superior a 2 m/s, el potencial de filtración disminuye sustancialmente. Este proceso se da, entre otras técnicas, en los pavimentos permeables y en las zanjas de filtración.

Biodegradación:

Los microorganismos (tanto las aeróbicas anaeróbicas como los hongos), están implicados en muchos procesos de remoción de contaminantes importantes, como son la descomposición de materia orgánica, la nitrificación, la desnitrificación, la precipitación y la sustracción de metales.

La presencia de ambas condiciones, aeróbicas y anaeróbicas, en los SDUS aumenta el potencial para el establecimiento de diversas clases de asociaciones microbianas, que aumentan la eficacia de la eliminación de los contaminantes. La degradación microbiana puede ser cuantificado mediante las tasas de biodegradación (expresada como vida media) o más general, se considera a través de señalar la presencia o ausencia de zonas aerobias y anaerobias en un SDUS. Uno de los sistemas de drenaje sostenible donde aparece este proceso es en los humedales artificiales.

Volatilización:

Todos los sólidos y líquidos producen vapores a través de un proceso conocido como la volatilización. La cantidad de una sustancia que puede ser volatilizada depende de su presión de vapor (a presiones de vapor altas, mayor potencial para ser volatilizada). Esto también se ve influenciado por las condiciones locales de temperatura y viento.

La volatilización tiende a ser un proceso más importante en la eliminación de sustancias orgánicas que de inorgánicas. La volatilidad de una sustancia puede ser cuantificada mediante el uso de la ley de Henry. Y para que se produzca se necesita de un contacto

entre la partícula y aire. Por tanto sólo se producirá en aquellos sistemas en los que la lámina de agua se mantenga en contacto con la atmósfera.

Precipitación:

La formación de precipitados insolubles seguido de su deposición es un importante mecanismo de remoción de contaminantes, tanto directamente a través del proceso de precipitación en sí, como indirectamente a través de una previa adsorción de los componentes solubles y posterior deposición fuera ya de la columna de agua. La precipitación varía con factores tales como el pH, la dureza del agua y la presencia de iones de la competencia. En ocasiones da lugar a la formación de complejos orgánicos y quelatos con metales pesados. Este proceso se da, por ejemplo, en los depósitos de detención.

Fotólisis:

La fotólisis implica una reacción química iniciada por la exposición de una sustancia a la luz y por lo tanto es un proceso más importante en la degradación de los contaminantes atmosféricos que los que se encuentran en el agua. Sin embargo, la fotólisis puede ser significativa en la eliminación de contaminantes localizados en las capas superficiales de una masa de agua, como ocurre en humedales y estanques.

Retención vegetal/Bioacumulación:

La cantidad de una sustancia química que está potencialmente disponible para la interacción biológica es la *fracción biodisponible*. El proceso de la incorporación de esta fracción biodisponible a los seres vivos es el denominado como bioacumulación. Las plantas son capaces de bioacumular una serie de compuestos tales como metales pesados y otros contaminantes, además de requerir otras sustancias, conocidas como nutrientes (responsables de la eutrofización) que contienen nitrógeno y fósforo para su crecimiento. El tiempo de contacto entre la vegetación y el contaminante es un factor importante, cuanto mayor es, más son las sustancias bioacumuladas. Las raíces y los rizomas son las principales áreas de almacenamiento en plantas y en menor cantidad, las hojas. Para que la captación de contaminantes tenga lugar, las plantas deben estar en crecimiento activo. Este proceso se da en todas aquellas técnicas que implican una presencia de plantas, como las áreas de biorretención, las cunetas verdes, los humedales artificiales....

CLASE DE SDUS	Principales procesos de eliminación	Tipos de contaminantes eliminados y sus eficiencias de eliminación					Comentarios sobre la aplicación de este tipo de SDUS
		Parámetros básicos de la calidad del agua	Metales	PAHs	Herbicidas	Misceláneos orgánicos	
Franjas Filtrantes	Adsorción; precipitación; captación en plantas.	DBO/COD; **** TSS; *** Bacterias; ** Nitratos; * Fosfatos; **	Metales totales; **** Metales disueltos; *	Sin datos	Sin datos	Aceites; ***	Se consiguen óptimas tasas de eliminación con longitudes en pendiente de entre 18 a 25 m. La tasa de eliminación de contaminantes está influenciada por la densidad y la altura de la hierba.
Cunetas verdes	Adsorción; precipitación filtración; volatilización; captación en plantas.	COD; *** TSS; *** Bacterias; * Nitratos; *	Metales totales; *** Metales disueltos; *	Sin datos	Sin datos	Aceites; **	Las partículas con tamaño >25 µm son las mayor eliminadas; disminución exponencial de la eliminación de contaminantes observados con el aumento de longitud de cuneta.
Pozos de infiltración	Adsorción; precipitación; degradación microbiana; filtración.	DBO/DQO; *** TSS; *** Nitratos; *	Metales totales; *** Metales disueltos; **	Sin datos	Sin datos	Aceites; ***	Por lo general, las concentraciones máximas de contaminantes se dan en una capa del suelo de 40-50 cm por debajo del pozo de infiltración, pero existe riesgo de contaminación de las aguas subterráneas cuando los contaminantes sean muy solubles y cuando se alcancen condiciones de suelos muy saturados en contaminantes.
Zanjas de infiltración	Adsorción; precipitación; degradación microbiana; filtración.	DQO; *** DBO; **** TSS; **** Nitratos; *	Metales totales; **** Metales disueltos; **	Sin datos	Sin datos	Aceites; ***	Hay pocos datos de eliminación de contaminantes. La obstrucción del sistema por los aceites de escorrentía contenidos puede ser un problema.

PROCESOS DE TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES

CLASE DE SDUS	Principales procesos de eliminación	Tipos de contaminantes eliminados y sus eficiencias de eliminación					Comentarios sobre la aplicación de este tipo de SDUS
		Parámetros básicos de la calidad del agua	Metales	PAHs	Herbicidas	Misceláneos orgánicos	
Estanques de infiltración	Adsorción; sedimentación; precipitación; degradación microbiana; filtración; volatilización.	DBO/DQO; *** TSS; **** Nitratos; * Fosfatos; **	Metales totales; *** Metales disueltos; **	Sin datos	Sin datos	Aceites; ***	Los medios permeables utilizados para la infiltración son gravas, gravilla, arenas, limos arenosos o suelos naturales con alta porosidad. La mayoría de los contaminantes son retenidos a una profundidad de 50 cm por debajo de la superficie del estanque; acumulado lodos tóxicos pueden ser retirados.
Drenes filtrantes	Adsorción; degradación microbiana; filtración.	DQO; ** TSS; ****	Metales totales; **** Metales disueltos; ***	PAH; ***	Sin datos	Aceites; ***	Las eficiencias de este sistema varían en función de las características de las tormentas y los factores estacionales.
Sistemas de lagunaje	Sedimentación.	DQO; *** TSS; ***	Metales totales; **** Metales disueltos; *	PAH; ***	Sin datos	Aceites; ***	Las eficiencias de eliminación de contaminantes conseguidas son relativamente altas.
Estanques de Retención	Sedimentación; degradación microbiana; volatilización.	BOD/COD; *** TSS; *** Bacteria; *** Nitrate; * Phosphate; **	Metales totales; ***	PAH; ***	Herbicidas; ***	Aceites; ***	Estanques en los que los tiempos de retención han de ser de al menos 24 horas. Las eficiencias de eliminación a menudo se refieren a la capacidad de almacenamiento de los contaminantes. La acumulación de los mismos puede producir sedimentos altamente contaminados.

CLASE DE SDUS	Principales procesos de eliminación	Tipos de contaminantes eliminados y sus eficiencias de eliminación					Comentarios sobre la aplicación de este tipo de SDUS
		Parámetros básicos de la calidad del agua	Metales	PAHs	Herbicidas	Misceláneos orgánicos	
Estanques de Detención	Adsorción; sedimentación; volatilización.	BOD/COD; ** TSS; **	Metales totales; **	Sin datos	Sin datos	Aceites; **	Estos sistemas se diseñan para almacenar agua por un tiempo limitado tras el proceso de precipitación. Durante el pico del flujo se puede dar un re-arrastre de sólidos en suspensión. El uso conjunto de sistemas de tratamiento como separadores de hidrocarburos o cámaras de sedimentación mejora la eficiencia de la eliminación de los contaminantes.
Estanques de Detención extendidos	Adsorción; sedimentación; degradación microbiana; volatilización.	BOD; ** TSS; ***	Metales totales; ***	Sin datos	Sin datos	Aceites; **	Las aguas pluviales pueden ser retenidas hasta 48 horas mientras que en los estanques de detención normales sólo pueden hacerlo dos horas.
Humedales artificiales	Adsorción; sedimentación; degradación microbiana; filtración; volatilización; captación en plantas.	BOD/COD; ** TSS; *** Bacteria; **** Nitrate; ** Phosphate; **	Metales totales; ***	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Los sistemas de flujo subsuperficial proporcionan una capacidad de almacenamiento limitada, pero tienen un potencial mayor de eliminación de contaminantes.

PROCESOS DE TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES

CLASE DE SDUS	Principales procesos de eliminación	Tipos de contaminantes eliminados y sus eficiencias de eliminación					Comentarios sobre la aplicación de este tipo de SDUS
		Parámetros básicos de la calidad del agua	Metales	PAHs	Herbicidas	Misceláneos orgánicos	
Pavimento poroso	Adsorción; degradación microbiana; filtración.	TSS; *** Nitrate; **	Metales totales; ***	Sin datos	Sin datos	Aceites; ***	Las instalaciones con estructuras de depósito son normalmente capaces de reducciones del 50% en los volúmenes de escurrimiento (puede ser tan alta como 95%); ofrece potencial para la degradación microbiana cuando hay nutrientes suficientes.
Asfalto poroso	Filtración.	COD/BOD; ** TSS; ***	Metales totales; ***	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Pueden funcionar durante 10 años sin mantenimiento, aunque están sujetos a posibles obstrucciones. La regeneración de la superficie se puede lograr por chorros de aire o agua a alta presión y / o por aspiración.

Tabla 3.6. Tipos de contaminantes eliminados y sus eficiencias de eliminación según SDUS .Fuente: Daywater (2005).

* Bajo potencial de eliminación de contaminantes (inferior al 25%)

** Medio-bajo potencial de eliminación de contaminantes (entre el 25% y el 50%)

*** Medio-alto potencial de eliminación de contaminantes (entre el 50% y el 75%)

**** Alto potencial de eliminación de contaminantes (entre el 75% y el 100%)

4. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

A la hora de realizar el diseño e implantación de un Sistema de Drenaje Urbano Sostenible existen una serie de criterios que ayudan a la correcta elección, dimensionamiento y ubicación de cada una de las técnicas integrantes dentro del medio urbano. La clasificación de estos criterios varía según autores. En el presente epígrafe se han considerado los expuestos en CEDEX (2008), basadas en la normativa ambiental de la Agencia de Medio Ambiente de los Estados Unidos (US-EPA, 2004); los criterios desarrollados por la organización británica sobre calidad en construcción CIRIA (2007) y los detallados por Daywater (2005).

Los SDUS han de ser contemplados dentro de un marco holístico-científico de sostenibilidad. Esto quiere decir que todas las cargas ambientales, junto con factores económicos y sociales, han de ser evaluados en los procesos previos de selección y diseño, cotejando la efectividad de los SDUS con los sistemas convencionales. Ello implica que, en la comparación de ambos sistemas, deben de ser tenidos en cuenta factores tales como: la energía necesaria en su construcción, las pérdidas de hábitat por el desarrollo de impactos de inundaciones sobre valores de propiedad, los materiales usados, la consecución de beneficios ambientales, si implican una mejora en los medios receptores,...

4.1. Objetivos de los criterios de diseño

Como ya se ha señalado, el principal objetivo de los criterios de diseño es el de proporcionar un escenario para trazar un sistema eficaz de drenaje un área determinada que sea capaz de proteger tanto el entorno social como el ambiental. Pero además existen otros objetivos secundarios implícitos en los criterios de diseño de los SDUS:

- El almacenamiento y/o conducción segura de las aguas de escorrentía sin poner en peligro a las personas o sus propiedades.
- La reducción en lo posible del riesgo de inundación.
- Protección de la erosión el cauce aguas abajo.
- Disminución de la carga de contaminantes en el agua de escorrentía, mejorando su calidad antes de ser vertida al medio.
- Contribución en la mejora del medio.

Está claro que es imposible diseñar para todos los eventos pluviométricos, por lo que en ocasiones habrá casos en los que el sistema no funcionará adecuadamente ya que los parámetros de diseños serán subestimados. Por consiguiente, en el proceso de diseño, deberían atenderse los posibles riesgos; evaluando las consecuencias ambientales, físicas, sociales, económicas y sociales provocadas por la aparición de fenómenos mayores de aquellos para los que se ha realizado el diseño.

Cuando se seleccionan los criterios de diseño para un lugar específico, han de contemplarse los siguientes principios: nivel requerido del servicio, la sostenibilidad y el coste de la solución de drenaje.

4.2. Factores a considerar en la selección de los SDUS

Según el US-EPA (2004) y CEDEX (2008), en la planificación y selección de las técnicas de drenaje urbano sostenible se deben tener en cuenta varios elementos de muy distinta naturaleza como son:

- El control de la cantidad y calidad del agua que se espera que proporcione la infraestructura.
- El servicio e integración en la comunidad de las técnicas seleccionadas.
- El entorno arquitectónico.
- Los usos del suelo.
- Los usos urbanos.
- La integración paisajística de la infraestructura.
- La potencialidad de generación de hábitats adecuados para la flora.

Para comenzar con la planificación de una implantación de medidas estructurales se ha de disponer de una serie de datos iniciales que ayudarán en la correcta elección de las infraestructuras necesarias. Entre la información de partida, resulta de particular relevancia el estudio de del sistema de drenaje que actualmente ocupa la zona de estudio, el patrón de los hidrogramas históricos antes del desarrollo urbano de la zona (cuando se trata de una nueva urbanización), la topografía de la cuenca, las áreas de aportación, el régimen de caudales y por supuesto, los parámetros descriptivos: régimen de precipitaciones, intensidades, coeficientes de escorrentía, tasas de infiltración, posición del nivel freático, También es importante conocer la localización de los puntos donde se tienen previstos los reboses y vertidos de la red de saneamiento.

Atendiendo a la publicación “*Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano*” (CEDEX, 2008), para seleccionar aquellas técnicas que mejor se adecúen a la consecución de los objetivos de diseño de cada cuenca urbana particular hay que atender a varios agentes que pueden catalogarse en estas categorías:

- Impactos sobre el entorno
- Control regional/control local
- Factores relacionados con el medio receptor
- Factores físicos
- Factores relacionados con los usos del suelo
- Factores ambientales y sociales
- Capacidad para gestionar las aguas de escorrentía urbana

4.2.1. Impactos sobre el entorno

Las infraestructuras de drenaje urbano sostenible pueden producir diversos tipos de impactos sobre el medio receptor y sobre el entorno en el que se encuentran puesto que las aguas de escorrentía provocan alteraciones físicas, como erosiones en cauces y variaciones térmicas en el medio, alteraciones químicas en función de los materiales disueltos o en suspensión transportados y alteraciones en sobre los hábitats.

TDUS	Categoría del impacto		
	Químico	Físico	Ecológico
Estanques de retención	Reducción de las concentraciones de sólidos en suspensión, fósforo, nitrógeno (incluido los nitratos) y metales.	Poco efectivos para controlar impactos sobre cauces por aumento de la escorrentía. Incluso pueden incrementar los caudales punta. Sin capacidad para recarga acuíferos.	Disminución de la concentración de bacterias. No proporciona protección a macrovertebrados y puede provocar daños a peces de aguas frías por impactos térmicos.
Humedales	Reducción de las concentraciones de sólidos en suspensión, fósforo y nitrógeno (incluido los nitratos).	Poco efectivos para controlar impactos sobre cauces Sin capacidad para recarga acuíferos.	Puede provocar daños a peces de aguas frías por variaciones térmicas.
Estanques de infiltración	No hay apenas información al respecto.	Control de caudales. Reducen el volumen de escorrentía. Efectivos en las recargas de acuíferos.	No hay apenas información al respecto.

TDUS	Categoría del impacto		
	Químico	Físico	Ecológico
Zanjas de infiltración	Reducción de las concentraciones de sólidos suspendidos, fósforo, nitrógeno (incluido los nitratos) y metales.	Efectivos en las recargas de acuíferos.	Disminución de la concentración de bacterias.
Pavimentos porosos y modulares	Reducción de las concentraciones de sólidos suspendidos, fósforo, nitrógeno (incluido los nitratos) y metales.	Efectivos en las recargas de acuíferos (70%-80% de la escorrentía anual).	No hay apenas información al respecto.
Zonas de biorretención	Eliminación del fósforo total, nitrógeno, amonio, DQO, metales y aceites.	Pueden proporcionar control de calidad de aguas, protección frente a erosiones y frente a inundaciones.	Eliminación de concentraciones bacterianas.
Canales de césped	Reducción de las concentraciones de sólidos en suspensión, fósforo, nitrógeno (incluido los nitratos) y metales.	Reducen el caudal punta en pequeños sucesos. Efectivos en las recargas de acuíferos.	Disminución de la concentración de bacterias
Zanjas vegetales filtrantes	Reducción de las concentraciones de sólidos en suspensión, fósforo, nitritos, nitratos y metales.	Reducen el caudal punta en pequeños sucesos. Efectivos en las recargas de acuíferos y aunque no tienen capacidad para laminar sucesos grandes, sí que pueden emplearse como sistemas de detención fuera de línea.	No hay apenas información al respecto.
Filtros de arena	Reducción de las concentraciones de sólidos en suspensión, nitrógeno (incluido los nitratos), metales y bacterias.	En muy limitados casos contribuyen a la recarga de acuíferos. No protegen contra erosión en cauces y llanuras.	No hay mucha información al respecto pero se sabe que no contribuyen en la prevención de la degradación biológica de cauces y llanuras
Filtros compuestos	Reducción de las concentraciones de sólidos en suspensión y nitrógeno (incluido los nitratos).		
Filtros perimetrales	Reducción de las concentraciones de sólidos suspendidos, nitrógeno (incluido los nitratos) y metales.		
Filtros superficiales y verticales	Reducción de las concentraciones de sólidos en suspensión, nitrógeno (incluido los nitratos), metales y bacterias.		

Tabla 4.1. Impactos producidos por las TDUS para el tratamiento de las aguas de escorrentía urbana. Fuente: CEDEX (2008).

Estos impactos habrán de ser tenidos en cuenta en la selección de las técnicas, buscando aquellas cuya huella en el medio sea lo menor posible o la menos negativa.

4.2.2. Control regional o control local

La tipología del método estructural a seleccionar está completamente supeditada a la clase de explotación prevista. En el caso de que se requiera un control a nivel regional de las aguas de escorrentía, las técnicas empleadas serán aquellas capaces de tratar un mayor volumen de agua, como ocurre con humedales o estanques de detención. En cambio si las aguas de escorrentía corresponden a áreas más limitadas en tamaño las técnicas a emplear serán otras, como las cunetas verdes o las zanjas filtrantes.

Las técnicas de control local o lo que es lo mismo, de control in situ, son las más usadas ya que son de más sencilla aplicación. Pero han de planificarse con una visión de conjunto para poder cuantificar el efecto global que tendrán.

Las estrategias de control regional se aplican para cuencas de 25-250 hectáreas, no son tan sencillas de utilizar como las locales, tienden a incrementar la temperatura del agua vertida, son más caras y requieren de una planificación técnica avanzada. A pesar de ello, cuentan con varias ventajas frente a las técnicas de control in situ como son: compatibilidad con zonas de recreo, económicamente son más rentables y se pueden emplear sistemas de desagüe con varias zonas para regular y tratar los sucesos menos energéticos pero más frecuentes.

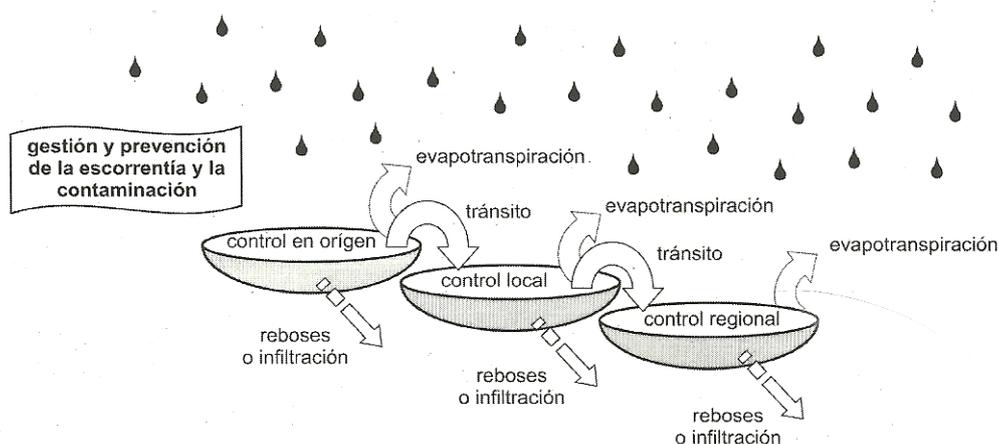


Figura 4.1. Tren de SDUS para la estrategia de control de las aguas pluviales. Fuente: CIRIA (2007).

4.2.3. Factores relacionados con el medio receptor

Otros factores influyentes en el diseño de las TDUS son los relacionados con la naturaleza del medio receptor. En función de dónde esté previsto el vertido de las aguas de escorrentía, las técnicas a emplear serán de un tipo u otro, ya que los usos que se

especificuen para las aguas receptoras, ya sean por definición legal o por hábitos de la población, implican unas determinadas calidades mínimas del agua. En la siguiente tabla se resume la adecuación de las técnicas de tratamiento de las aguas de escorrentía a los condicionantes del medio receptor.

Como nota aclaratoria indicar que las masas de agua fría son aquellas aptas para la vida de salmónidos y los cauces sensibles son los que poseen una elevada biodiversidad, calidad de agua o están en zonas sin urbanizar.

TDUSS	Masas de agua fría	Cauces sensibles	Protección de acuíferos	Protección de embalses y lagos	Playas y zonas de cultivo marinas
Estanques y humedales	Uso restringido por los impactos térmicos, aunque se pueden emplear diseños fuera de línea para minimizar el impacto.	Diseñar con volúmenes y tiempos de vaciado para proporcionar protección frente a la erosión de los mismos.	Empleo de geotextiles y de láminas impermeables. Pretratamiento del 100% del agua de escorrentía contaminada.	Controlar la erosión de cauces y llanura. Proporcionar tiempos de retención elevados para favorecer la eliminación de nutrientes y bacterias.	Emplear sistemas de retención con volumen permanente para incrementar la eliminación de bacterias y nutrientes.
Sistemas de infiltración	Válida	Válida	Requiere perímetros de protección para pozos y zonas sensibles.	Requiere distancias de seguridad para nivel freático y cimentaciones en roca.	Necesita de protección con el nivel freático.
Biofiltros vegetales	Válida	Adecuados. Se debe proporcionar protección frente erosión de cauces.	Válida	Válida	Válida. Poca reducción de bacterias.
Filtros de arena	Válida para pequeños volúmenes.	Válida	No apta para la recarga de acuíferos.	Válida para tratar el volumen de calidad del agua.	Válida. Tasas de eliminación de bacterias intermedia.

Tabla 4.2. Adecuación de las TDUS al medio receptor. Fuente: CEDEX (2008).

4.2.4. Factores físicos

Las TDUS a implantar están supeditadas a factores físicos tales como el tipo suelo, de la extensión del área a drenar, la distancia al nivel freático, la pendiente o la carga hidráulica.

TDUS		Suelo	Nivel freático	Área de drenaje	Pendiente	Carga hidráulica
Estanques	Secos	Los suelos granulares demandan impermeabilización de fondo y laterales.	1,2 metros	-	15% máxima	1,8-2,5 metros
	Húmedos			10 ha. min.		
Humedales		Los suelos granulares demandan impermeabilización de fondo y laterales.	1,2 metros	10 ha. min	8% máxima	1-1,5 metros
Infiltración	Zanja	Permeabilidad mínima de 12 mm/hora.	1,2 metros (0,6 m para zonas planas)	2 ha. min	15% máxima	0,3 metros
	Estanque			5 ha. min		0,6 metros
Biofiltros vegetales	Biorretención	Usan suelos mezclados in situ	-	1 ha. min	6% máxima	
	Canales de césped		0,6 metros	2 ha. min	4% máxima	
	Zanja filtrante		-	-	6% máxima	-
Filtros	Arena	Sin problemas	0,6 metros	5 ha. min	-	1,5 metros
	Perimetrales			1 ha. min		0,7-0,9 metros
	Subterráneos			1 ha. min		1,5-2,2 metros

Tabla 4.3. Adecuación de las técnicas de tratamiento de las aguas de escorrentía frente a los condicionantes físicos. Fuente: CEDEX (2008).

4.2.5. Factores relacionados con los usos del suelo

No todas las técnicas son aptas en todas partes, por ejemplo, en zonas altamente urbanizadas es difícil encontrar espacio para un humedal, por lo que no es recomendable es técnica ahí.

TDUS		Adecuación a los distintos usos del suelo				
		Rural	Residencial abierto	Carreteras y autovías	Comercial/urbano denso	Urbano muy denso
Estanque	Seco	Alta	Alta	Alta	Alta	Media
	Húmedo	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Humedales		Alta	Alta	Media	Media	Baja
Infiltración	Zanja	Media	Media	Alta	Alta	Media
	Pozo de infiltración	Media	Alta	Alta	Media	Media
	Estanque	Media	Media	Media	Media	Media
	Pavimentos porosos y modulares	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Biofiltros vegetales	Biorretención	Media	Media	Alta	Alta	Alta
	Canales vegetales	Alta	Media	Alta	Media	Media
	Zanja filtrante	Media	Media	Media	Baja	Baja
Filtros	Arena	Baja	Media	Alta	Alta	Alta
	Perimetrales	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
	Subterráneos	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
	Orgánicos	Baja	Media	Alta	Alta	Alta

Tabla 4.4. Adaptación entre distintos tipo de TDUS y diferentes tipos de usos del suelo. Fuente: CEDEX (2008).

4.2.6. Factores ambientales y sociales

Dentro de este grupo se incluyen los costes de construcción, los de mantenimiento, el nivel de aceptación del sistema por parte de la comunidad y la capacidad de la infraestructura de proporcionar calidad al hábitat receptor de las cargas de agua y contaminación.

TDUS		Mantenimiento	Aceptación de la comunidad	Coste	Calidad del hábitat	Otros factores
Estanques	Seco	Sencillo	Media	Bajo/medio	Baja/media	Pueden aparecer problemas con basuras y sedimentos.
	Húmedo	Medio	Alta	Alto	Alta	
Humedales		Medio/alto	Media	Medio/alto	Alto	Profundidad limitada
Infiltración	Zanjas	Alto	Alta	Alta	Bajo	Limpiezas frecuentes
	Estanques	Medio	Baja	Medio	Bajo	
Biofiltros vegetales		Bajo/medio	Alto	Medio	Medio	Adecuado para LID
Filtros vegetales		Alto	Media/alta	Alta	Bajo	-

Tabla 4.5. Relación entre los distintos tipos de SDUS con costes y mantenimiento. Fuente: CEDEX (2008).

4.2.7. Capacidad para gestionar las aguas de escorrentía urbana

Las *técnicas válidas o aceptables* (CEDEX, 2008) serían aquellas que son capaces de tratar el *volumen de calidad de agua* (volumen de almacenamiento para gestionar la calidad del agua y eliminar la contaminación, se define a partir de series anuales de precipitación y busca tratar un porcentaje del volumen de escorrentía movilizado anualmente). Por el contrario las *técnicas no aceptables* serían las que por sí solas no logran tratar un determinado volumen de calidad de agua, necesitando de otros sistemas complementarios para alcanzar los rendimientos anuales medios de eliminación de contaminantes. Para que una técnica sea considerada como válida o aceptable ha de reunir los siguientes requisitos:

- Han de tener capacidad para captar y tratar todo el volumen de calidad de agua.
- El rendimiento medio anual de eliminación de sólidos suspendidos totales ha de estar en torno al 80% y el de eliminación de fósforo total alrededor del 40%
- Los sistemas han de durar en el tiempo (tener una vida útil elevada).
- Han de disponer de un pretratamiento.

No solo han de ser capaces de controlar la calidad del agua, también han de ser capaces de controlar los caudales punta de los aguaceros y/o proporcionar un volumen de recarga para los acuíferos.

TDUS		Precipitación				Protección de cauces	Control de caudales punta	Recarga acuíferos	Aceptación de aguas contaminadas
		Volumen de calidad	Nitrógeno	Metales	Bacterias				
Estanques	Detención	NO	-	-	-	SÍ	SÍ	NO	NO
	Retención	SÍ	B	B	B	SÍ	SÍ	NO	SÍ*
Humedales		SÍ	B	R	B	SÍ	SÍ	A veces	SÍ*
Infiltración	Zanjas de infiltración	SÍ	B	B	B	NO	NO	SÍ	NO
	Pozo de infiltración	SÍ	B	B	B	NO	NO	-	NO
	Estanque infiltración	SÍ	B	B	B	NO	NO	SÍ	NO
	Pavimentos porosos	NO	B	R	Sin datos	-	A veces	SÍ	SÍ
	Pavimentos modulares	NO	B	B	Sin datos	-	A veces	SÍ	SÍ
Biofiltros vegetales	Cuneta seca	SÍ	B	B	R	NO	NO	SÍ	SÍ**
	Cuneta húmeda	SÍ	R	B	M	NO	NO	NO	NO
	Zona biorretención	SÍ	B	B	R	A veces	NO	SÍ	SÍ**
	Zanjas vegetales filtrantes	NO	R	R	Sin datos	NO	NO	NO	SÍ**
Filtros	Superficiales	SÍ	B	R	R	A veces	NO	A veces	SÍ**
	Perimetrales	SÍ	B	R	R	A veces	NO	NO	SÍ**
	Subterráneos	SÍ	B	R	R		NO	NO	SÍ**
	Orgánicos	SÍ	B	Sin datos	R	A veces	A veces	A veces	SÍ**

Tabla 4.6. Capacidades de gestión de aguas de diferentes SDUS. Fuente: CEDEX (2008).

*: Requiere de un pretratamiento previo que elimine hidrocarburos y metales pesados.

** : Requiere de una impermeabilización del sistema que impida infiltraciones.

B: Implica la eliminación de más del 30% del Nitrógeno, más del 60% de los metales y el 70% de las bacterias.

R: Implica una eliminación del nitrógeno entre el 15-30%, de los metales entre 30-60% y de las bacterias entre el 35-75%.

M: Implica una mala eliminación de contaminantes, siendo inferior al 15% en el caso de nitrógeno, al 30% en el caso de metales y al 35% en el caso de las bacterias.

4.2.8. Normativas y disposiciones legales

Existen normativas a diferentes niveles (especialmente a nivel local) que determinan la disposición de los elementos de drenaje como son los diámetros de los colectores, las distancias entre arquetas, las dimensiones de las mismas, etc.....

Además, la administración municipal puede intervenir en el medio ambiente urbano fomentando el empleo de los SDUS de diversas maneras, regulando ordenanzas sobre medio ambiente, realizando control preventivo con licencias y otros instrumentos de control, sancionando vertidos y sobre todo con el planeamiento urbanístico. Este último punto sería el más importante, ya que en él es donde pueden desarrollarse la puesta en marcha de sistemas de drenaje sostenible.

4.3. Clasificación de los criterios de diseño y matrices de selección

En Europa cabe mencionar la organización CIRIA (*Construction Industry Research and Information Association*) como una de las principales dedicadas al estudio de las técnicas de drenaje urbano sostenible. Por ello me ha parecido apropiado incluir las matrices propuestas por dicha entidad para la selección de las técnicas de drenaje sostenible más apropiadas

Una primera aproximación a la clasificación de los criterios de diseño podría ser la siguiente:

- Hidráulicos
- Calidad del agua
- Sociales
- Ambientales.

4.3.1. Criterios de diseño hidráulicos

Hay dos principios claves que deberían ser seguidos cuando se planean los criterios de diseño hidráulicos en un sistema de drenaje:

1. Asegurar que no se producen daños a personas ni bienes en la zona protegida de las inundaciones.
2. Asegurar que no producen efectos no deseados aguas arriba ni aguas abajo derivados de su desarrollo.

4.3.2. Criterios de diseño basados en la calidad del agua

El principio general a seguir es el de un apropiado sistema de TDUS en cadena (o “tren” de SDUS), tal que su implementación derive en una efectiva mitigación de los riesgos provocados por la contaminación del agua debida a diferentes actividades. Los métodos usados para conseguir eliminar la mayor parte de la contaminación tanto de escorrentías asociadas a bajos como a altos períodos de retorno, son:

- Tratamiento de las aguas de escorrentía mediante la infiltración
- Tratamiento de las aguas de escorrentía usando filtración.
- Tratamiento de las aguas de escorrentía usando almacenamientos de detención.
- Tratamiento de las aguas de escorrentía usando un volumen de estanque permanente.

4.3.3. Criterios basados en el servicio público y social proporcionado

Estos criterios derivan de la consideración de tres principios:

- La seguridad y salud de las personas.
- El impacto paisajístico.
- Los beneficios sociales.

4.3.4. Criterios de diseño ambientales

Maximizar el valor ecológico de los SDUS puede proporcionar una contribución importante en la mejoría de diversidad biológica ya que puede facilitar el movimiento de la fauna por la creación de pasillos verdes dentro de áreas urbanas. La diversidad ecológica es incrementada gracias a:

- El uso de plantas autóctonas.
- La localización de los SDUS dentro o cerca de paisajes modificados.
- Se conservan y realzan sistemas de drenaje naturales.
- La creación de una sucesión de tipos de hábitat.
- La inclusión de estanques con agua de forma permanente.
- La realización de un mantenimiento apropiado y de un plan de gestión.

La adopción de estos criterios de diseño incluye el uso de más de una técnica de drenaje para lograr los requerimientos hidráulicos, de calidad de agua y sociales en amplias áreas. Una de las mejores técnicas para la consecución de estos requerimientos es el control en fuente.

4.3.5. Criterios de operatividad y mantenimiento

Uno de los puntos a considerar en el diseño de un SDUS son las medidas de mantenimiento y operatividad de la técnica de drenaje urbano escogida. En base a la operatividad y mantenimiento previstos, han de tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Facilidad del mantenimiento y operatividad de la técnica de tratamiento.
- Medida de mantenimiento, garantía de que los requisitos de mantenimiento están dentro de la capacidad operativa de la TDUS.

- Accesibilidad a la zona de tratamiento, hay que contemplar la facilidad de acceso al lugar donde se localiza la TDUS para revisar y realizar las labores de mantenimiento de la misma.
- Frecuencia de mantenimiento, hay garantizar que los recursos están disponibles para realizar tareas de mantenimiento en la frecuencia en la que sea requerida.
- Limpieza de residuos y contaminantes, la limpieza de la TDUS no debe requerir el contacto directo humano con los contaminantes atrapados.
- Requisitos de eliminación, hay que conocer cuáles son los requisitos para la eliminación de los posibles diferentes residuos en la TDUS.

4.3.6. Matrices propuestas por CIRIA:

La organización inglesa propone en la publicación “*The SDUS manual. C697*” (CIRIA, 2007) unas matrices para ayudar al proyectista en la elección de las mejores técnicas de drenaje urbano sostenible a implantar en función de los principales factores afectados:

- Características físicas del lugar de emplazamiento de la TDUS.
- Usos del suelo en el lugar de emplazamiento de la TDUS.
- Rendimiento del control de la calidad de las aguas de la TDUS.
- Factores ambientales y sociales afectados o implicados en la selección de la TDUS.

4.3.6.1. *Matriz de selección en función de las características físicas del lugar*

Grupo de SDUS	Técnica	Suelo		Área de drenaje para cada técnica independiente		Profundidad del nivel freático		Pendiente		Carga hidráulica		Espacio disponible	
		Permeable	Impermeable	0-2 ha	> 2 ha	0-1 m	> 1 m	0-5 %	> 5 %	0-1 m	1-2 m	Poco	Elevado
Retención	Estanque de retención	Sí	Sí*	Sí	NR	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Almacenamiento subsuperficial	Sí	Sí	Sí	NR	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Humedal	Humedal poco profundo	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Estanque de detención extendido	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Estanque/ Humedal	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Humedal pequeño	Sí*	Sí*	Sí*	No	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
	Humedales con gravas sumergidas	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Humedal en canal	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
Infiltración	Zanjas de infiltración	No	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
	Estanques de infiltración	No	Sí	Sí	NR	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí
	Pozos de infiltración	No	Sí	Sí	NR	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Filtración	Filtros de arena superficiales	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	No	Sí	No	Sí
	Filtros de arena subsuperficiales	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí
	Filtros de arena perimetrales	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
	Biorretención	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Zanjas filtrantes	Sí	Sí*	Sí	No	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Detención	Estanques de detención	Sí	Sí*	Sí	NR	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí
Canales abiertos	Cunetas	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No**	Sí	No	No	Sí
	Cunetas secas	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No**	Sí	No	No	Sí
	Cunetas húmedas	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	Sí	No**	Sí	No	No	Sí
Control en fuente	Green roof	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Recolección de agua de precipitación	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	-	-	-
	Pavimento permeable	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí

Tabla 4.7. Caracterización de la viabilidad de los diferentes SDUS en función de las características del lugar. Fuente: CIRIA (2007).

*: Requiere de alguna instalación adicional o condición determinada para su correcto funcionamiento.

** : A menos que siga la pendiente natural del terreno que alcanza ese valor

NR: Posible, pero no recomendable

4.3.6.2. *Matriz de selección en función de los usos del suelo*

Grupo de SDUS	Técnica	Baja densidad	Zona Residencial	Carreteras locales	Zona comercial	Zonas en construcción	Zonas industriales
Retención	Estanque de retención	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Almacenamiento subsuperficial	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Humedal	Humedal poco profundo	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Estanque de detención extendido	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Estanque/Humedal	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Humedal pequeño	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Humedales con gravas sumergidas	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Humedal en canal	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Infiltración	Zanjas de infiltración	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Estanques de infiltración	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Pozos de infiltración	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Filtración	Filtros de arena superficiales	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Filtros de arena subsuperficiales	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Filtros de arena perimetrales	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Biorretención	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Zanjas filtrantes	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Detención	Estanques de detención	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Canales abiertos	Cunetas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Cunetas húmedas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Cunetas secas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Control en fuente	Green roof	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	Recolección de agua de precipitación	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	Pavimento permeable	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí

Tabla 4.8. Caracterización de la viabilidad de los diferentes SDUS en función de los usos del suelo del lugar de instalación. Fuente: CIRIA (2007).

4.3.6.3. *Matriz de selección en función del rendimiento en el control de la cantidad y calidad del agua*

Grupo de SDUS	Técnica	Tratamiento potencial de la calidad del agua					Control hidráulico			
		Eliminación de los sólidos suspendidos totales	Eliminación de metales pesados	Eliminación de nutrientes (fósforo, nitrógeno)	Eliminación de microorganismos	Capacidad para eliminar sólidos disueltos y en suspensión	Reducción del volumen de escorrentía	Idoneidad del control para tormentas de diferente período de retorno		
								0,5 años	10-30 años	100 años
Retención	Estanque de retención	A	M	M	M	A	B	A	A	A
	Almacenamiento subsuperficial	B	B	B	B	B	B	A	A	A
Humedal	Humedal poco profundo	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Estanque de detención extendido	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Estanque/ Humedal	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Humedal pequeño	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Humedales con gravas sumergidas	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Humedal en canal	A	M	A	M	A	B	A	M	B
Infiltración	Zanjas de infiltración	A	A	A	M	A	A	A	A	B
	Estanques de infiltración	A	A	A	M	A	A	A	A	A
	Pozos de infiltración	A	A	A	M	A	A	A	A	B
Filtración	Filtros de arena superficiales	A	A	A	M	A	B	A	M	B
	Filtros de arena subsuperficiales	A	A	A	M	A	B	A	M	B
	Filtros de arena perimetrales	A	A	A	M	A	B	A	M	B
	Biorretención	A	A	A	M	A	B	A	M	B
	Zanjas filtrantes	A	A	A	M	A	B	A	A	B
Detención	Estanques de detención	M	M	B	B	B	B	A	A	A
Canales abiertos	Cunetas	A	A	A	M	A	M	A	A	A
	Cunetas húmedas	A	A	M	A	A	B	A	A	A
	Cunetas secas	A	A	A	M	A	M	A	A	A
Control en fuente	Green roof	S/A	S/A	S/A	S/A	A	A	A	A	B
	Recolección de agua de precipitación	M	B	B	B	S/A	M	M	A	B
	Pavimento permeable	A	A	A	A	A	A	A	A	B

Tabla 4.9. Caracterización de la viabilidad de los diferentes SDUS en función de los procesos de tratamientos requeridos. Fuente: CIRIA (2007).

A: Alto potencial
M: Medio potencial
B: Bajo potencial
S/A: Sin aplicación

4.3.6.4. *Matriz de selección en función de factores ambientales y sociales*

Grupo de SDUS	Técnica	Mantenimiento	Aceptación de la comunidad	Coste	Potencial de creación de hábitats
Retención	Estanque de retención	M	A	M	A
	Almacenamiento subsuperficial	B	A	M	B
Humedal	Humedal poco profundo	A	A	A	A
	Estanque de detención extendido	A	A	A	A
	Estanque/ Humedal	A	A	A	A
	Humedal pequeño	A	M	A	A
	Humedales con gravas sumergidas	M	B	A	M
	Humedal en canal	A	A	A	A
Infiltración	Zanjas de infiltración	B	M	B	B
	Estanques de infiltración	M	A	B	M
	Pozos de infiltración	B	M	M	B
Filtración	Filtros de arena superficiales	M	B	A	M
	Filtros de arena subsuperficiales	M	B	A	M
	Filtros de arena perimetrales	M	B	A	M
	Biorretención	A	A	M	A
	Zanjas filtrantes	M	M	M	B
Detención	Estanques de detención	B	A	B	M
Canales abiertos	Cunetas	B	M	M	M
	Cunetas húmedas	M	M	M	A
	Cunetas secas	B	M	M	M
Control en fuente	Green roof	A	A	A	A
	Recolección de agua de precipitación	A	M	A	B
	Pavimento permeable	M	M	M	B

Tabla 4.10. Caracterización de la viabilidad de los diferentes SDUS en función de los costes, mantenimiento y factores ambientales. Fuente: CIRIA (2007).

A: Alto potencial
M: Medio potencial
B: Bajo potencial

4.4. Criterios relevantes en la evaluación del diseño y funcionamiento de las SDUS propuestos por Daywater

Daywater es el grupo de investigación dedicado a temas del agua incluido dentro del Quinto Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Unión Europea. En su publicación “*Criteria Relevant to the Assessment of BMP Performance*” (Daywater, 2005) se plantea la problemática que representa para los urbanistas, organismos municipales reguladores y las empresas de servicios de agua, la gestión de los sistemas urbanos de drenaje de las aguas esorrentía superficial, dada la cada vez mayor presión para lograr soluciones sostenibles. Es decir, de forma progresiva se va teniendo más en cuenta el control de la calidad en el drenaje, y no solo de la cantidad de las aguas urbanas de esorrentía. Por ello, en actuales y futuros desarrollos urbanos, ha de tenerse muy en cuenta el diseño de técnicas de drenaje urbano sostenible en detrimento de los sistemas de alcantarillado convencionales. Pero la aplicación de estas técnicas sostenibles involucra una variedad de partes interesadas, tanto en el ámbito público y como en el privado y es por ello que su desarrollo diseño pueden estar sujetos a diferentes grados de incertidumbre en lo que refiere a la importancia de influencia en políticas, técnicas y ecología.

Además de ser eficaces en términos de eficiencia a largo plazo, también tienen que ser rentables en comparación con los sistemas convencionales. Los criterios de sostenibilidad son por tanto requeridos frente los parámetros de diseño críticos, que son los que tienen que ver con el control del volumen de agua, la mejora de la calidad y una mejora del impacto ambiental.

Este grupo de trabajo propone una serie de tablas en las que, para cada criterio influyente en el diseño se establecen unos índices primarios, unos índices secundarios, los puntos de referencia correspondientes a los índices y las unidades de dichos puntos de referencia. Los criterios contemplados son tanto de índole técnica y ambiental, como de seguridad y salud, sociales, económicos y jurídicos. A partir de estas tablas que se muestran a continuación se puede realizar un análisis multicriterio en el que el proyectista puede evaluar la importancia relativa de los factores que influyen específicamente sobre el uso de las técnicas de drenaje urbano sostenible dentro de los sistemas de drenaje superficial.

4.4.1. Criterios relativos a las características del lugar

Indicadores primarios	Indicadores secundarios	Índices de referencia	Valores umbral /unidades
Área	Características de drenaje	<ul style="list-style-type: none"> · Porcentaje de área de contribución impermeable · Diseño de volúmenes pluviales · Espacio disponible para dar cabida a una o varias TDUS · Periodos de retorno de la escorrentía · Medio receptor del agua 	<ul style="list-style-type: none"> · % · m³ · m³/ha · m³/ha/hora · Río, mar, lago
	Restricciones físicas	<ul style="list-style-type: none"> · Gradiente del lugar · Nivel freático · Potencial de cargas excesivas de sedimentos en la construcción 	<ul style="list-style-type: none"> · % ratio · m · mg/l
Características del suelo y subsuelo	Capacidad de infiltración/protección de acuíferos	<ul style="list-style-type: none"> · Tipo de suelo · Ratios de infiltración · Volumen de almacenamiento en zonas no-saturadas · Cobertura vegetal 	<ul style="list-style-type: none"> · Conductividad hidráulica (m/s) · mm/hora · m³/ha · ninguna/césped/árboles
	Estabilidad del suelo	<ul style="list-style-type: none"> · Problemas de subsidencia/deslizamiento del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> · hay/ no hay
	Terremotos	<ul style="list-style-type: none"> · Riesgo sísmico 	<ul style="list-style-type: none"> · Escala Richter

Tabla 4.11. Elementos que han de considerarse en la elección de la ubicación del sistema de drenaje: Criterios relativos a las características del sitio, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).

4.4.2. Criterios científicos y tecnológicos

Indicadores primarios	Indicadores secundarios	Puntos de referencia	Valores umbral/unidades
Sistema de rendimiento	Almacenamiento de la escorrentía y control de inundaciones	<ul style="list-style-type: none"> · Diseño de los volúmenes de almacenamiento en función de tormentas a diferentes periodo de retorno · Duración de los períodos secos · Duración de tormentas históricas · Proporción de almacenamiento de contribución del área de drenaje · Número de las inundaciones anuales · Frecuencia y duración de los desbordamientos · Tasa de descarga · Distribución uniforme del flujo 	<ul style="list-style-type: none"> · m³/ha · días · m³/ha/hora · ratio · 1.....n · 1.....n · m³/ha · Alta/media/baja
	Tratamiento de la calidad del agua	<ul style="list-style-type: none"> · Probabilidad de que una determinada concentración de contaminantes exceda de unos valores objetivo fijados · Captura potencial del “<i>first-flush</i>” (10/15 mm es el valor efectivo de tratamiento de todas las tormentas) · % contaminantes recalcitrantes capturados 	<ul style="list-style-type: none"> · % · mm · %
Flexibilidad, adaptabilidad y potencial para la reutilización	Capacidad para cambiar con el tiempo	<ul style="list-style-type: none"> · Diseño preparado para cambios de almacenamiento y de calidad del agua · Facilidad de adaptación y modificación · Costos de la adaptación y de los posibles ajustes externos de las estructuras · Potencial para reciclar componentes del sistema/ aguas contaminadas 	<ul style="list-style-type: none"> · %: m³/tiempo de funcionamiento · - · Coste medio(euros) · Alta/media/baja
Impacto sobre el sistema de drenaje	Integración en el sistema existente	<ul style="list-style-type: none"> · Reducción del flujo de CSO · Reducción de los flujos de aguas pluviales 	<ul style="list-style-type: none"> · %: m³ · %: m³/ha

Tabla 4.12. Elementos que han de considerarse en función de la tecnología y conocimientos actuales: Criterios científicos y tecnológicos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).

4.4.3. Criterios relativos a la Operación y Mantenimiento

Indicadores primarios	Indicadores secundarios	Puntos de referencia	Valores umbral /unidades
Integridad del sistema	Rendimiento de la integridad, salud y seguridad	<ul style="list-style-type: none"> · Tiempo de retención hidráulico · Condiciones de calidad y riesgos para la salud en cuencas · Alarma/procedimiento de intervención. · Nivel de seguridad y de previsión de contaminación accidental. · Número de quejas por contaminación de las aguas receptoras. 	<ul style="list-style-type: none"> · Horas · Microbiología, estado trófico de las aguas,... · Sí/no · Alta/media/baja · Número/año
	Riesgo en la gestión	<ul style="list-style-type: none"> · Probabilidad de fallo del sistema · Consecuencias de que la tormenta exceda de la capacidad de diseño 	<ul style="list-style-type: none"> · % probabilidad · Calado de la lámina de inundación (m)
Durabilidad del sistema	Vida del diseño	<ul style="list-style-type: none"> · Tiempo de vida operacional · Tasa de sedimentación y volumen de almacenamiento · Robustez del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> · Años · m³/año; % reducción en volumen de almacenamiento/año · Alta/media/baja
Mantenimiento y Prestación de servicios	Requerimientos de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> · Necesidad y frecuencia de operación y mantenimiento a nivel: técnico-ambiental de equipamiento y de hábitat · Riesgo en el mantenimiento de la seguridad operativa del sistema · Presencia in situ de herbicidas pesticidas/ productos químicos de deshielo · Eliminación de los sedimentos · Plantas de reemplazo en los humedales construidos · Riesgo de presencia de basuras · Riesgo de que los agentes sociales pierdan el interés que generan problemas de operación y mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> · Alta/media/baja /frecuencia /año · Alto/medio/bajo · Tipo y cantidad (concentración/año) · m³/año · frecuencia del reemplazamiento/año · Alta/media/baja · Alto/medio/bajo

Tabla 4.13. Elementos que han de considerarse en función a la operatividad y mantenimiento: Criterios científicos y tecnológicos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).

4.4.4. Criterios Ambientales

Indicadores primarios	Indicadores secundarios	Puntos de referencia	Valores umbral /unidades
Impacto sobre el volumen de agua	Inundaciones	<ul style="list-style-type: none"> · Periodos de inactividad · Erosión aguas abajo · Recarga de acuíferos · Protección del flujo de aguas abajo 	<ul style="list-style-type: none"> · Horas · - · m³/año · -
Impacto sobre la calidad del agua	Control de la contaminación	<ul style="list-style-type: none"> · Tiempos de retención del tratamiento · Relaciones de dilución · Presencia de basura, sólidos gruesos, materia flotante, aceites en superficie · Clasificación del agua de recepción · Calidad del agua subterránea · Efectos térmicos · % de cumplimiento con los estándares de protección de las aguas receptoras 	<ul style="list-style-type: none"> · Horas/eventos de tormenta · Porcentaje · Alta/media/baja · 1...n · 1...n · - · %/año
Impacto sobre los ecosistemas	Diversidad de hábitats y ecológica	<ul style="list-style-type: none"> · Veces de vertido en el medio hidrobiológico · Número de especies clave introducidas / atraídas · Plagas · Especies invasoras no deseadas · Estado de conservación de la biota 	<ul style="list-style-type: none"> · Alto/medio/bajo · 1...n · Sí/no · Sí/no · Alto/medio/bajo

Tabla 4.14. Elementos que han de considerarse en función a los requerimientos ambientales: Criterios ambientales, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).

4.4.5. Criterios Sociales y Urbanos

Indicadores primarios	Indicadores secundarios	Puntos de referencia	Valores umbral /unidades
Recreo; estética; acceso y beneficios comunitarios	Inclusión social y uso multifuncional	<ul style="list-style-type: none"> · Nivel de la oferta de esparcimiento (pesca, navegación, recreamiento, etc.) · Aumento de los accesos · Participación de la Comunidad (servicio de guardaparques, grupos de voluntariado para la naturaleza, etc.) · Número de visitantes al espacio natural, etc. · Vandalismo · Percepción de los residentes del aumento de los beneficios ambientales 	<ul style="list-style-type: none"> · Alto/medio/bajo · Alto/medio/bajo · Alto/medio/bajo · · 1.....n · sí/no · %encuestas
Información pública y concienciación ciudadana	Concienciación y sensibilización social	<ul style="list-style-type: none"> · Interpretación de tablas, carteles, folletos o literatura, centro de visitantes, etc. · Concienciación local/regional de la comunidad · Uso de la educación y/o técnicas de demostración en el lugar de interés · Reuniones públicas / audiencias 	<ul style="list-style-type: none"> · Alto/medio/bajo · - % encuestas · Número de visitas; sí/no · Número/año; sí/no
Aceptabilidad de las partes interesadas	Aceptabilidad e impactos	<ul style="list-style-type: none"> · Voluntad de la comunidad local a asumir gastos ambientales · Aceptación de tratamientos in situ en lugar de los sistemas de drenaje convencional · Nivel de voluntad de los habitantes a participar en la mejora continua del lugar 	<ul style="list-style-type: none"> · Alta/media/baja · Alto/medio/bajo · Alta/media/baja
Salud y seguridad	Auditorías de Riesgos	<ul style="list-style-type: none"> · Preocupación de la comunidad local (posibles daños, infecciones, ahogamientos, etc.) · Auditoría técnica formal del riesgo de exposición (riesgo de inundación, riesgo para la salud, riesgo para la seguridad) 	<ul style="list-style-type: none"> · Alta/media/baja · %encuestas
Desarrollo sostenible	Vida urbana sostenible	<ul style="list-style-type: none"> · Contribución a las políticas de desarrollo urbano sostenible · Papel en la Agenda 21 · Papel de los Planes de Acción Biológica · Los beneficios adicionales ofrecidos por diferentes SDUS 	<ul style="list-style-type: none"> · Alto/medio/bajo · Alto/medio/bajo · Alto/medio/bajo · % encuestas
	Uso de los recursos	<ul style="list-style-type: none"> · Uso de materiales: Agregado/ hormigón/ uso del suelo y costes · Consumo de energía en la construcción, operación y mantenimiento del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> · Alto/medio/bajo; € · kW; kW/m³

Tabla 4.15. Elementos que han de considerarse en función a los requerimientos sociales: Criterios sociales y urbanos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).

4.4.6. Criterios económicos

Indicadores primarios	Indicadores secundarios	Puntos de referencia	Valores umbral /unidades
Coste del ciclo de vida	Inversión y gastos de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> · Costes de diseño · Capital · Costes operacionales y de mantenimiento · Gastos de eliminación de sedimentos · Costes de desmantelamiento del sitio 	<ul style="list-style-type: none"> · € · € · €/año · €/año · €
	Gastos de la comunidad	<ul style="list-style-type: none"> · Tasas de gestión de aguas pluviales · Tasas de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> · €/año · €/año
Riesgos financieros	Riesgo de exposición	<ul style="list-style-type: none"> · Análisis de coste-beneficio · Inversión riesgo de pérdidas · Recuperación del valor del lugar · Existencia de un seguro de fallo del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> · C:B ratio · Alto/medio/bajo; € · Alto/medio/bajo; € · existe/no existe
Asequibilidad	Asequibilidad a largo plazo	<ul style="list-style-type: none"> · Adopción y cobertura de responsabilidad civil · Costes económicos adicionales · Ingresos del lugar de recreo · Prestación de la gestión a largo plazo 	<ul style="list-style-type: none"> · Alto/medio/bajo; € · €/ha · €/año · Alto/medio/bajo
Coste del suelo	Ocupación de suelo	<ul style="list-style-type: none"> · Coste del m² 	<ul style="list-style-type: none"> · €/ m²

Tabla 4.16. Elementos que han de considerarse en función a los costes económicos: Criterios económicos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).

4.4.7. Criterios legales y urbanísticos

Indicadores primarios	Indicadores secundarios	Puntos de referencia	Valores umbral /unidades
Gestión urbana de las aguas de escorrentía	Regulación del agua de escorrentía	<ul style="list-style-type: none"> · Cumplimiento de la normativa europea. · Cumplimiento de las reglamentaciones nacionales. · Cumplimiento de las normativas locales. 	<ul style="list-style-type: none"> · Sí/no · Sí/no · Sí/no
	Regulación de aguas que no son de escorrentía	<ul style="list-style-type: none"> · Cumplimiento de la legislación relativa a: la conservación de la naturaleza; preservación del agua subterránea; la planificación urbana; los reglamentos de construcción, salud y seguridad y los códigos sanitarios 	<ul style="list-style-type: none"> · Sí/no
Cuestiones de planificación y desarrollo	Conformidad con normas de edificación	<ul style="list-style-type: none"> · Número de estándares · Flexibilidad de diseño · Beneficios del tren de tratamiento 	<ul style="list-style-type: none"> · 1...n · Alta/media/baja · Alto/medio/bajo
Adopción	Status legal	<ul style="list-style-type: none"> · Contratos vinculantes legalmente · Salud y seguridad · Operación y mantenimiento · Legislación para hacer cumplir el uso de SDUS en la propiedad privada 	<ul style="list-style-type: none"> · Sí/no · Sí/no · Sí/no · Sí/no

Tabla 4.17. Elementos que han de considerarse en función a la legislación y urbanismo del lugar de estudio: Criterios legales y urbanísticos, índices primarios y secundarios, y unidades de medida. Fuente: Daywater (2005).

5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS SDUS

En la bibliografía consultada sobre sistemas de drenaje urbano sostenible, se presentan las ventajas de los mismos como múltiples y de heterogénea naturaleza, aunque aplicando la máxima reducción se podrían resumir en dos principalmente:

- El control de la cantidad y calidad de las aguas de escorrentía.
- El servicio social y ambiental que ofrecen, creando entornos naturales y mejorando la calidad estética de una zona urbana.

Desarrollando un poco más los tipos de ventajas, éstas podrían agruparse en:

5.1. Ventajas hidrológicas

- Mayor prevención frente a inundaciones en las calles de la ciudad, ya que al disminuir la cantidad de escorrentía superficial generada dentro de las ciudades, el riesgo de que la red de colectores existentes entren en carga y sean incapaces de transportar toda esa agua se reduce considerablemente.
- Mantenimiento o restauración del flujo natural en las corrientes urbanas.
- Menor interferencia en los regímenes naturales de las masas de aguas receptoras, tanto en calidad como en cantidad.
- Recarga de acuíferos subterráneos, restitución del flujo subterráneo hacia los cursos naturales mediante infiltración.
- Al favorecer la infiltración del agua de escorrentía, hace que ésta pase a ser considerada como un recurso hídrico disponible para ser reutilizado.

5.2. Ventajas paisajísticas

- Creación de entornos naturales (como humedales, por ejemplo) de valor paisajístico.
- Mejora de la calidad estética de una zona urbana, enriqueciendo el valor paisajístico de las zonas residenciales donde se implanta.

5.3. Ventajas ambientales

- Mejora de la calidad de las aguas de escorrentía.
- Reducción de la cantidad de contaminantes que llegan al medio receptor.
- Al crear nuevos humedales para el control de la escorrentía se favorece el enriquecimiento de la biodiversidad de la zona donde son implantados.
- Reducción del efecto “isla de calor” en las ciudades, contrarrestando el aumento de temperatura provocado por superficies asfaltadas y hormigonadas.
- Permiten la recolección del agua de lluvia y su posterior uso, reduciendo el consumo desde la red de abastecimiento y por tanto la captación de agua de ríos y/o acuíferos.
- Protección de las corrientes urbanas de vertidos accidentales y pérdidas de tuberías.
- La recarga de acuíferos mediante estas técnicas puede solucionar problemas ambientales como los de intrusión marina, subsidencia, degradación de humedales y disminución de caudales base de cauces fluviales, entre otros.
- Reduce el número de descargas del sistema unitario de las depuradoras.

5.4. Ventajas sociales y urbanas

- Al ser menor el riesgo de inundación, el peligro potencial que corren personas y propiedades frente a lluvias intensas es menor también.
- Permite el desarrollo urbano en espacios con el sistema de alcantarillado colapsado.
- Soluciona la incapacidad hidráulica de la red de colectores convencional debida al crecimiento urbano, pudiendo evitar la necesidad de desdoblamiento de la red convencional.
- Embellecen la construcción urbana.

5.5. Ventajas económicas

- Los sistemas urbanos de drenaje sostenible son considerados como sistemas de drenaje de aguas grises de bajo coste, al ser menor la inversión necesaria para su construcción comparada con otros métodos convencionales.

- Disminuyen las pérdidas económicas por daños provocados por inundaciones, puesto que, como se ha especificado en el punto 5.1 reducen el riesgo de inundación o en caso de llegar a producirse el caudal inundante estaría reducido, por lo que los daños serían de menor importancia.
- La consideración del agua de precipitación como un recurso disponible y su inclusión en la gestión de recursos hídricos, disminuye el gasto en la captación y otras obras hidráulicas.
- Incremento del valor añadido de las urbanizaciones, debido a la calidad paisajística del entorno y la dotación de zonas recreacionales adicionales.
- Reducen los costes en de funcionamiento de las depuradoras al disminuir la cantidad de agua a tratar que llega a las mismas, la cantidad de energía invertida en el tratamiento y al no alterarse frecuentemente el patrón de contaminantes para el que la depuradora ha sido diseñada.

5.6. Inconvenientes

A pesar del alto número de beneficios expuestos, las técnicas de drenaje urbano sostenible son aun relativamente nuevas, por lo que no existen muchas experiencias prácticas en su implantación. Esto arrastra una serie de inconvenientes, como son:

- Algunas de las mejoras presupuestas necesitan ser probadas a lo largo de períodos largos de tiempo.
- El desconocimiento por parte de los diseñadores limita su aplicación.
- Puede generar desconfianza frente al drenaje convencional por ser algo relativamente nuevo.
- La inexperiencia en el sector de la construcción en su adecuada ejecución.
- La necesidad de un mantenimiento específico diferente del usado en técnicas de drenaje convencional.
- La existencia de malas experiencias debidas a la falta de conocimiento y de prácticas en su desarrollo.
- La falta de manuales específicos para diferentes zonas climáticas con diferentes patrones pluviométricos.
- La escasez de modelos prácticos de desarrollo de estas técnicas.

- Al ser métodos nuevos, necesitan de monitorización y análisis de los mismos a largo plazo, lo que puede aumentar los costes.
- No hay indicadores de rendimiento adecuados a largo plazo.

Como puede observarse, todas las desventajas se deben a que estos sistemas llevan poco tiempo desarrollándose; se puede afirmar que son “nuevas” técnicas, por lo que con el tiempo y futuras investigaciones, es posible que estos inconvenientes pronto dejen de serlo.

6. LA ZONA DE ESTUDIO: LA AVENIDA DIAGONAL

La zona de estudio comprende una parte intermedia de la calle Diagonal de Barcelona. En este estudio sólo se ha considerado la cuenca de la propia calle, no las cuencas vertientes desde calles adyacentes. El motivo de esto es que lo que se pretende estudiar es el funcionamiento de un Sistema de Drenaje Urbano Sostenible implantado en ese espacio que trata única y exclusivamente el agua de escorrentía superficial generada dentro de dicha extensión. Al no tratar las aguas de escorrentía de las cuencas que hay aguas arriba, éstas no se han incluido en el estudio. La calle completa alcanza una longitud de 11 kilómetros con una sección constante en anchura de 50 metros, siendo la calle más ancha y la más larga de la ciudad. Comienza cerca de San Adrián del Besós y cruza la ciudad por completo en sentido noreste- sudoeste hasta Esplugas de Llobregat. La Diagonal es una de las avenidas más importantes y emblemáticas de la ciudad de Barcelona. Fue proyectada en el siglo XIX por el ingeniero y urbanista Ildefonso Cerda junto con el resto del distrito del Eixample y comenzó a construirse en 1884.

El tramo concreto objeto de estudio de esta tesina es el que va desde Passeig de Sant Joan, hasta la Plaza de Les Glòries, que tiene una extensión de 1350 metros. Aproximadamente la primera mitad, la que va desde Passeig de Sant Joan hasta la calle Cerdeña, es un boulevard, teniendo la siguiente distribución: acera, calzada de un carril, paseo peatonal, calzada de cuatro carriles, paseo peatonal calzada de un carril y acera. Un detalle de esta distribución se puede ver en la Figura 6.1, en la fotografía superior. Ahí se observa uno de los paseos peatonales laterales situado entre Paseo de Sant Joan y la calle Roger de Flor en el lado montaña. La segunda parte de la zona de estudio, tiene una distribución de rambla: acera, calzada de tres carriles, paseo central peatonal, calzada de tres carriles y acera. La fotografía de la Figura 6.2 muestra esta distribución. En ese caso es un tramo situado muy cerca de la plaza de Les Glòries. Esta parte discurre íntegramente dentro del barrio del Eixample, en el que las calles son rectas y están ordenadas perpendicularmente entre sí (de forma ortogonal), salvo la avenida de estudio, que debe su nombre a que corta a esas calles en diagonal, aunque desde su creación tuvo varios nombres, es el primero y vigente en la actualidad, el que siempre ha predominado.

Todo el tramo de estudio, salvo el comprendido entre la calle Nápoles y Marina, tiene pendiente descendiente en sentido suroeste-noreste. El tramo especificado anteriormente es el único con pendiente ascendente en ese sentido.

Al trayecto objeto lo cruzan en sentido descendente (montaña-mar) un total de ocho calles sin incluir Passeig de Sant Joan (inicio) y la calle Cartagena (fin), estas calles, en sentido aguas arriba aguas abajo, son: Roger de Flor, Nápoles, Sicilia, Cerdeña, Marina, Lepanto, Padilla y Castillejos. En sentido lateral (Llobregat-Besos) la cruzan las siguientes calles, empezando desde el inicio del tramo que es donde confluyen Diagonal, Sant Joan y Mallorca: Valencia, Aragón, Consejo de Ciento, Diputación, y por último, delimitando el fin, la Gran Vía de las Cortes Catalanas. Los cruces de estas cuatro calles longitudinales coinciden con cuatro calles en sentido descendente, así que en esos puntos confluyen un total de tres calles (longitudinal, transversal y diagonal).

La avenida en la zona de estudio tiene una densidad de tráfico muy alta, pero por las zonas peatonales el tránsito de personas está más distendido al haber varias zonas por las que caminar. Asimismo hay un carril bici en cada uno de los paseos peatonales. Los carriles bici se encuentran delimitados por una línea pintada en el suelo, siendo el mismo pavimento impermeable en todo el paseo peatonal. Además del carril bici también hay unas franjas ajardinadas con árboles, estas franjas están unos 17 centímetros por encima del pavimento y separadas por un bordillo, de manera que allí no va a parar el agua de las zonas colindantes. Estas franjas llevan en su base una capa impermeable que impide la infiltración del agua de lluvia. Estos factores serán tenidos en cuenta a la hora de escoger las TDUS más adecuadas.

Bajo la zona de estudio hay un acuífero que, dada la estructura urbana, está desconectado de la escorrentía superficial.



Figura 6.1. Fotografía de la Diagonal en la sección de boulevard.



Figura 6.2. Fotografía de la Diagonal en la sección de rambla.

7. ESTUDIO HIDROLÓGICO

La principal característica que va a marcar la hidrología de la zona de estudio es el hecho de ser completamente urbana. Esto confiere unas particularidades especiales, como son:

1. Las dimensiones de las cuencas son mucho más pequeñas que en el caso de las cuencas naturales, siendo la unidad de medida la hectárea y no el kilómetro cuadrado.
2. El suelo es casi en su totalidad relativamente impermeable, reduciendo en gran medida la infiltración.
3. La reducción de la escala de tiempo. Los tiempos de concentración se cuentan en minutos y no en horas.

Esto conlleva que la cuenca urbana es muy sensible a efectos de lluvias muy intensas y con una duración de pocos minutos, ya que se produce un aumento del volumen de la escorrentía superficial, del caudal pico y de la velocidad de escorrentía.

Para realizar un cálculo conjunto de la hidrología, la hidráulica y la calidad del agua se ha utilizado el programa SWMM de la US-EPA, en su versión 5.0.022.

Las capacidades de SWMM 5.0 en la modelación hidrológica se pueden resumir en los siguientes aspectos:

1. Permite trabajar con precipitación variable en tiempo y espacio.
2. Realiza la simulación de procesos de evaporación, acumulación y derretimiento de nieve, e interceptación por encharcamiento.
3. Simula la infiltración y la entrada del agua de infiltración en acuíferos.
4. Contabiliza el intercambio de flujo entre los acuíferos y el sistema de transporte.
5. Simula la escorrentía superficial mediante modelo de depósito no lineal.
6. Computa el aporte de escorrentía superficial entre subcuencas.
7. Permite introducir en el estudio las técnicas de drenaje sostenible, denominadas en el programa SWMM como técnicas de desarrollo de bajo impacto o lo que en inglés sería “*Low Impact Development*” (LID’s), y contabilizar la disminución del caudal de escorrentía.

En el módulo hidrológico con SWMM aparecen varios objetos a definir para la realización del análisis. Estos objetos se corresponden con los parámetros hidrológicos considerados en cualquier estudio de caudales. Y entre esos objetos la nueva versión 5.0.022, incluye los denominados LID's, Las técnicas de bajo impacto engloban al drenaje urbano sostenible, es más, los objetos incluidos en el programa como LID's son cinco de las técnicas de drenaje urbano sostenible descritas en la primera parte de este trabajo.

7.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO

En la realización del estudio de caudales se han seguido los siguientes pasos:

1. Se han delimitado las subcuencas, atendiendo a la distribución de las calles y a topografía. Para cada una de ellas se han determinado las áreas, cotas, pendientes, % de suelo permeable, y demás elementos físicos necesarios.
2. Se ha establecido con qué tipo de información pluviométrica se va a trabajar y se ha calculado los valores de la lluvia que serán introducidos en la simulación.
3. Se han especificado qué otros factores se han tenido o no en cuenta a la hora de realizar el cálculo (pérdidas por interceptación, por infiltración o evaporación).
4. Se han escogido las técnicas de drenaje urbano sostenible a implantar mediante el uso de matrices y para cada una de ellas se han redefinido las cuencas y todos los demás parámetros necesarios.
5. Se ha realizado la simulación tanto para las cuencas en el estado actual, como para las cuencas proyectadas con las TDUS.

7.2. DESCRIPCIÓN DE LAS SUBCUENCAS CONSIDERADAS

En la delimitación de las zonas de aporte (subcuencas) se han considerado las siguientes hipótesis:

1. La delimitación viene determinada por las calles que atraviesan a la diagonal.
2. Dada la complejidad de estudiar el movimiento del agua en los cruces (especialmente en este caso, donde la mayoría de cruces se dan entre tres calles), éstos no se han incluido dentro de las subcuencas. Además eso tampoco es objeto de estudio de esta tesina. De todas formas, las pendientes de las calles que cruzan en sentido montaña mar es superior a la de la calle de estudio, por lo que supone que el agua que viene de aguas arriba desciende por dichas calles.

3. Puesto que el estudio es únicamente de las cuencas vertientes incluidas en la misma calle Diagonal, entre Paseo de San Juan y Les Glòries, no se han incluido ni los aportes pluviales provenientes de las azoteas ni los aportes de aguas residuales de los edificios circundantes.
4. Puesto que los niveles freáticos del acuífero presente en la zona se hayan a más de cinco metros de profundidad respecto la superficie no se ha tenido en cuenta en el estudio hidrológico. Las alturas de estos niveles en diferentes puntos cercanos al tramo de estudio están en las tablas recogidas en el Anejo 1 Hidrología.

7.3. DELIMITACIÓN DE LAS SUBCUENCAS DE ESTUDIO

La delimitación de las subcuencas se ha realizado a partir del callejero y cartografía descargados de la página web del ICC escala 1:5000 y, sobre todo, de los planos con la red de drenaje (imbornales incluidos) escala 1:1000 facilitados por el Ayuntamiento de Barcelona. Estos planos se han escaneado y a partir de ahí se han dibujado las cuencas en formato dgn y posteriormente transformados a shp. Las ortofotografías formato sid en escala 1:2500, también se han descargado de la página del ICC. Para la medición de las áreas, longitudes y pendientes se ha usado el programa Arc-GIS.

En la delimitación de las subcuencas no se han considerado los imbornales como punto de desagüe de cada una de ellas por un motivo principal, su irregular distribución a lo largo de la calle. Al principio y al final de la calle están muy concentrados y en la zona intermedia están muy separados entre sí. Además, de haber considerado que cada imbornal definiese cada una de las subcuencas, muchas serían de un tamaño ínfimo y con un solo tipo de suelo, lo que limitaría mucho el estudio de la integración de las TDUS en este trabajo.

La delimitación de las subcuencas propuesta es:



Figura 7.1. Subcuencas de la avenida Diagonal. Los puntos azules especifican la localización de los imbornales.

Una descripción más detallada de las subcuencas es:

Subcuenca 1. Entre Paseo de Sant Joan y calle Roger de Flor.

- Área total: 6018,82 m²
- Área impermeable: 5683,6 m² (94,43% del área total)
- Área permeable: 335,22 m² (5,57% del área total)
- Anchura de la cuenca: 50 metros
- Longitud: 113,40 metros
- Pendiente: 0,73%

Subcuenca 2. Entre calle Roger de Flor y calle Nápoles.

- Área total: 7922,07 m²
- Área impermeable: 7393,46 m² (93,33% del área total)
- Área permeable: 528,60 m² (6,67% del área total)
- Anchura de la cuenca: 50 metros
- Longitud: 141,00 metros
- Pendiente: 0,49%



Figura 7.2. Las dos primeras subcuencas, entre el paseo de Sant Joan y la calle Nápoles. Los puntos negros representan los imbornales presentes.

Subcuenca 3. Entre calle Nápoles y calle Sicilia.

- Área total: 7036,11 m²
- Área impermeable: 6455,89 m² (91,75% del área total)
- Área permeable: 580,21 m² (8,25% del área total)
- Anchura de la cuenca: 50 metros
- Longitud: 130,22 metros
- Pendiente: 1,00%

Subcuenca 4. Entre calle Sicilia y calle Cerdeña.

- Área total: 8009,96 m²
- Área impermeable: 7539,08 m² (94,12% del área total)
- Área permeable: 470,88 m² (5,88% del área total)
- Anchura de la cuenca: 50 metros
- Longitud: 137,93 metros
- Pendiente: 0,42%



Figura 7.3. Subcuencas 3 y 4, entre las calles Nápoles y Cerdeña. Los puntos negros representan los imbornales presentes.

Subcuenca 5. Entre calle Cerdeña y calle Marina.

- Área total: 13831,14 m²
- Área impermeable: 11539,51 m² (83,43% del área total)
- Área permeable: 2291,63 m² (16,57% del área total)
- Anchura de la cuenca: 50 metros
- Longitud: 152,50 metros
- Pendiente: 0,50%

Subcuenca 6. Entre calle Marina y calle Lepanto.

- Área total: 9411,03 m²
- Área impermeable: 8427,55 m² (89,55% del área total)
- Área permeable: 983,46 m² (10,45% del área total)
- Anchura de la cuenca: 50 metros
- Longitud: 132,95 metros
- Pendiente: 4,37%



Figura 7.4. Subcuencas 5 y 6, entre las calles Cerdeña y Lepanto. Los puntos negros representan los imbornales presentes.

Subcuenca 7. Entre calle Lepanto y calle Padilla.

- Área total: 9290,04 m²
- Área impermeable: 6693,90 m² (72,05% del área total)
- Área permeable: 2596,15 m² (27,95% del área total)
- Anchura de la cuenca: 50 metros
- Longitud: 131,45 metros
- Pendiente: 1,53%

Subcuenca 8. Entre calle Padilla y Las Glórias.

- Área total: 25615,65 m²
- Área impermeable: 17940,60 m² (70,04% del área total)
- Área permeable: 7675,04 m² (29,96% del área total)
- Anchura de la cuenca: 50 metros
- Longitud: 315,65 metros
- Pendiente: 0,27%



Figura 7.5. Subcuencas 7 y 8, entre las calles Cerdeña y Lepanto. Los puntos negros representan los imbornales presentes.

Otra de la información asociada a las cuencas y requerida en la hora de simulación del cálculo de caudales, son los coeficientes de escorrentía (n de Manning) para cada una de las zonas, permeable e impermeable de las cuencas. Los valores seleccionados se han obtenido de la tabla de valores típicos del manual de SWMM (US-EPA, 2005).

En resumen:

	SC 1.	SC 2.	SC 3.	SC 4.	SC 5.	SC 6.	SC 7.	SC 8.
Área total (m ²)	6018,82	7922,07	7036,11	8009,96	13831,14	9411,03	9290,04	25615,65
Área impermeable (m ²)	5683,6	7393,46	6455,89	7539,08	11539,51	8427,58	6693,9	17940,6
% Área impermeable respecto del total	94,43	93,33	91,75	94,12	83,43	89,55	72,05	70,04
Área permeable (m ²)	335,22	528,6	580,21	470,88	2291,63	983,46	2596,15	7675,04
% Área permeable respecto del total	5,57	6,67	8,25	5,88	16,57	10,45	27,95	29,96
Anchura de la cuenca (m)	50	50	50	50	50	50	50	50
Longitud (m)	113,40	141,00	130,22	137,93	152,50	132,95	131,45	315,65
Pendiente %	0,73	0,49	1,00	0,42	0,50	4,37	1,53	0,27
Coefficiente de Manning (n) en área impermeable	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
Coefficiente de Manning (n) en área permeable	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Nodo salida subcuenca	A5	A10	A12	A15	A18	A20	A23	A28

Tabla 7.1. Principales parámetros de las subcuencas.

7.4. RÉGIMEN PLUVIOMÉTRICO

En el cálculo hidrológico hay varias formas de introducir los datos pluviométricos en el programa SWMM para comprobar la situación de una cuenca, o de un tramo de cauce concreto, ante sucesos de lluvias aislados. Una de ellas es mediante el hietograma de bloques de la lluvia de diseño. Tras revisar varios estudios y proyectos para la ciudad de Barcelona, se ha comprobado que este método es bastante frecuente, por lo que es el que se ha usado en el presente estudio. CLABSA, la entidad gestora de la red de drenaje urbano de Barcelona, determina que la lluvia de diseño para el estudio/proyectos de nuevas redes de drenaje es de 10 años. Esta entidad publica en su web las curvas IDF y las tablas con los valores intensidades con valores de intensidad para diferentes duraciones y períodos de retorno de la estación de la AEMET Pompeu-Fabra. Esta curva IDF se representa con la siguiente ecuación (CLABSA, 2003):

$$I = a + b \cdot (\ln(T_R + 1))^c$$

$$a = -78,1590 \cdot e^{-0,0396D}$$

$$b = 9889,0068 \cdot (D + 17,3611)^{-1,2395}$$

$$c = 0,0023 \cdot D + 0,3027$$

Ecuación 7.1

También publica el gráfico con el hietograma de bloques con la lluvia de diseño para un período de retorno de 10 años. Estos gráficos y tablas pueden verse en el Anejo 1 Hidrología.

En otros estudios, la determinación dentro del área metropolitana de Barcelona, se usa la curva IDF de $T_r=10$ años propuesta por Vázquez et al. (1987), definida mediante:

$$I = \frac{4477,44}{(19,031 + t)}$$

Ecuación 7.2

Por tanto hay varias formas de obtener el hietograma: mediante las curvas de Pompeu-Fabra (uso más frecuente, ya que incluye una serie de datos que llega hasta el año 1993), mediante la curva propuesta por Vázquez, y, además, por el hietograma de bloques alternos con la lluvia de diseño para la ciudad de Barcelona publicado por CLABSA en su página web.

Pero dado que el hietograma publicado por CLABSA no especifica los valores con los datos numéricos de las intensidades en el gráfico (además, dichos valores se solicitaron a la entidad de saneamiento con ausencia de respuesta), se ha realizado el hietograma a partir de las curvas IDF, ya que son más recientes (comprendiendo así una serie pluviométrica más larga) que la curva propuesta por Vázquez del año 1987.

Los valores de intensidad para una lluvia con periodo de retorno de diez años y una duración de dos horas, discretizados cada cinco minutos son:

Duración (min)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Intensidad (mm/h)	212,4	164,9	135,3	115,4	101,3	90,9	82,8	76,3	70,9	66,4	62,5	59,1

Duración (min)	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
Intensidad (mm/h)	56,0	53,3	50,9	48,6	46,6	44,7	43,0	41,4	39,9	38,5	37,2	36,1

Tabla 7.2. Intensidades para $Tr=10$. Fuente: curvas IDF de la estación meteorológica de Pompeu-Fabra.

Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)
5	8,6	65	117,4
10	9,9	70	55,7
15	12,4	75	38,9
20	14,6	80	30,8
25	17,3	85	25,9
30	18,8	90	21,7
35	23,5	95	18,2
40	27,7	100	14,1
45	34,2	105	12,4
50	44,9	110	11
55	76,1	115	9,1
60	212	120	10,8

Tabla 7.3. Valores ya ordenados del hietograma de bloques alternos usado en la simulación de la precipitación.

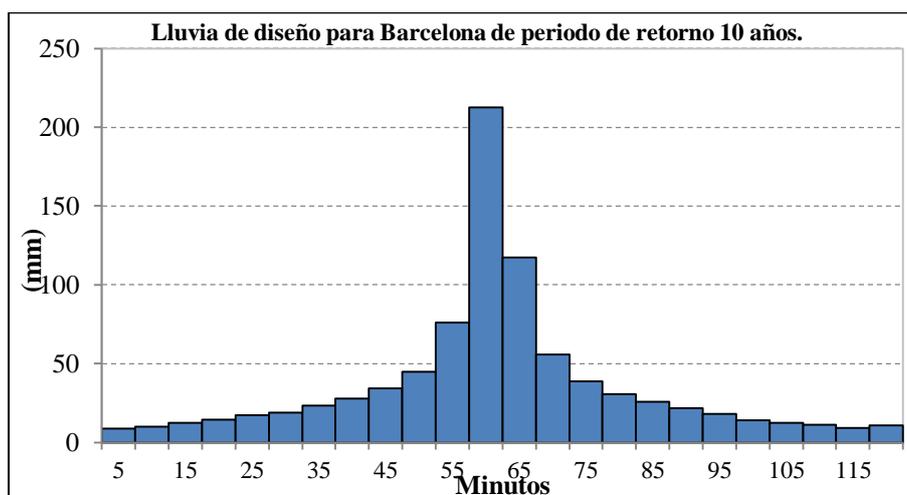


Gráfico 7.1. Hietograma de bloques alternos de una precipitación con un periodo de retorno de diez años y dos horas de precipitación para la ciudad de Barcelona.

7.5. OTROS FACTORES A TENER EN CUENTA

En la estimación de la escorrentía superficial que se produce a partir de la lluvia caída, hay que considerar que no toda el agua precipitada va a transformarse en escorrentía, ya que suelen producirse unas pérdidas. Restándolas a la lluvia total, es como se obtiene la lluvia neta o efectiva.

Los tipos de pérdidas presentes en las cuencas son:

- Pérdidas por almacenamiento en superficie e interceptación.
- Pérdidas por infiltración.
- Pérdidas por evaporación.

En el caso que nos ocupa, la mayor parte del suelo es impermeable en casi todas las cuencas, aunque en otras no tanto, gracias a la presencia de espacios verdes. Por lo que, sobre todo en las áreas ajardinadas, algunas de estas pérdidas serán tenidas en cuenta a la hora de estimar los caudales de escorrentía.

En la fase propuesta con la instalación de los SDUS, además de en las áreas verdes, la permeabilidad aumentará en suelo de las cuencas, así que las pérdidas por infiltración adquirirán mayor protagonismo.

El programa SWMM, permite la introducción de éstos parámetros en el cálculo hidrológico:

7.5.1. Infiltración

La capacidad de infiltración de un terreno depende del tipo de suelo existente, la pendiente, el grado de humedad previo, su índice de porosidad, y otros factores. El programa SWMM 5.0 incluye tres modelos para estimar la infiltración: Horton, Green-Ampt y el Número de Curva del SCS. Pero sólo puede usarse uno de los métodos en cada proyecto, es decir, una vez escogido un modelo de infiltración, éste ha de ser el mismo para todas las subcuencas de ese proyecto.

Los dos últimos modelos son los más sencillos para trabajar, ya que necesitan un menor número de parámetros a definir. Pero el método del Número de Curva del SCS en realidad es un modelo global de pérdidas de precipitación, con el que se trata de reflejar tanto las de interceptación, evapotranspiración y las producidas por el almacenamiento de agua en depresiones del terreno (Gómez, 2007). En la transformación de la zona de estudio proyectada se va a modificar el suelo, dándole más permeabilidad para favorecer

la infiltración, así que para su estudio como un proceso único, se ha escogido el método de Green-Ampt, ya que considera la infiltración independiente de otro tipo de pérdidas.

Los parámetros requeridos en este modelo son:

- *Altura de Succión* (mm), es el valor medio de la capacidad de succión capilar del suelo a lo largo del frente mojado.
- *Conductividad* (mm/h), es la conductividad hidráulica del suelo completamente saturado.
- *Déficit Inicial* (adimensional), es la diferencia entre la porosidad del suelo y la humedad inicial, ambas expresadas como fracción volumétrica. Para un suelo completamente drenado, es la diferencia entre la porosidad del suelo y su capacidad.

Los valores de estos parámetros se han obtenido de las tablas del US-EPA, 2005 “Manual Usuario SWMM5.0 ve. Modelo de Gestión de aguas Pluviales”. Se han supuesto los valores de margas para casi todas las subcuencas salvo dos, que tienen zonas ajardinadas y de albero, en donde se ha tomado el tipo de suelo como margas arenosas:

Green-Ampt	SC 1.	SC 2.	SC 3.	SC 4.	SC 5.	SC 6.	SC 7.	SC 8.
Altura de Succión (mm)	110	110	110	110	61	110	61	110
Conductividad (mm/h)	10,92	10,92	10,92	10,92	29,97	10,92	29,97	10,92
Déficit Inicial (adimensional)	0,263	0,263	0,263	0,263	0,332	0,263	0,332	0,263

Tabla 7.4. Valores de los parámetros del método de Green-Ampt.

7.5.2. Almacenamiento en superficie e interceptación

Las pérdidas producidas por la lluvia retenida por la cubierta vegetal del terreno (interceptación diferenciada) no se contabilizan explícitamente como una pérdida. Sin embargo, sí que lo son las pérdidas de almacenamiento en depresiones. Se puede considerar que esta función de pérdidas engloba ambos mecanismos originados al principio del evento de lluvia, en unas pérdidas que se denominadas “equivalentes”.

Como orden de magnitud indicar que estas pérdidas son de pocos mm de precipitación, entre 2 y 4 mm, y se incrementan para terrenos llanos con poca pendiente. Los resultados experimentales obtenidos en cuencas instrumentadas en España (Sant Boi, Barcelona) sugieren valores de este parámetro en torno a los 4 a 5 mm de precipitación total (Gómez, 2007). Éste es un parámetro de difícil estimación y valoración, por lo que

puede diferir bastante para un mismo tipo de terreno. Ejemplo de su compleja valoración son las tablas 7.5 y 7.6, en las que se advierte cómo varían dichos valores según las fuentes. Los valores de la primera tabla vienen dados por Manuel Gómez (UPC), en función de estudios en la zona de Cataluña y la segunda son valores determinados por una entidad estadounidense recogidos en por la EPA.

Tipo de terreno		Retención total	Valor recomendado
Impermeable:	Viales y Áreas pavimentadas	1,3 a 3,8	2,5
	Tejados planos	2,5 a 7,5	2,5
	Tejados inclinados	1,3 a 2,5	1,2
Permeable:	Césped	5 a 12,5	8-9
	Áreas de arbolado	5 a 15,2	10

Tabla 7.5. Valores propuestos por Manuel Gómez (2007), Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0

Superficie impermeable	1,25 – 2,5 mm
Césped y hierba	2,5 – 5 mm
Pastos y prados	≈5 mm
Lecho forestal	≈7,5 mm

Tabla 7.6. Valores Típicos de Almacenamiento en Depresión. Fuente: ASCE, (1992), Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems, New York.

Dentro del editor de objetos *Subcatchment*, el programa SWMM permite asignar diferentes valores de pérdidas por almacenamiento en superficie a las áreas permeables e impermeables, e incluso dentro de cada una de ellas, deja indicar un porcentaje de área sin pérdidas de este tipo. El porcentaje de suelo impermeable que no presenta almacenamiento en depresión es el valor que viene por defecto en el programa, 25%.

En la caracterización de los valores de estas pérdidas en las cuencas de estudio, se han observado varios factores como, la pendiente de cada una de ellas, el estado de las aceras y el pavimento (presencia de socavones o irregularidades en la superficie) y la forma de las áreas ajardinadas (suelo con depresiones o superficie convexa).

Valores según el tipo de terreno	SC 1.	SC 2.	SC 3.	SC 4.	SC 5.	SC 6.	SC 7.	SC 8.
Superficie impermeable	1,75	1,5	1,75	1,5	1,5	2	2	1,5
Superficies impermeables: Césped y áreas de arbolado	5	5	5	5	9	5	9	7

Tabla 7.7. Valores de asignados a las pérdidas de almacenamiento en superficie para las subcuencas de estudio en el estado actual.

Valores según el tipo de terreno	SC 1.	SC 2.	SC 3.	SC 4.	SC 5.	SC 6.	SC 7.	SC 8.
Superficie impermeable	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Superficies impermeables: Césped y áreas de arbolado	10	10	10	10	12	10	12	10

Tabla 7.8. Valores de asignados a las pérdidas de almacenamiento en superficie para las subcuencas de estudio en el estado proyectado, con SDUS.

Nótese que los valores son diferentes, esto se debe a que, en las nuevas zonas proyectadas se presume que aceras y pavimento impermeables no tienen roturas ni imperfecciones que favorezcan el encharcamiento; y que, por el contrario, las nuevas zonas proyectadas ajardinadas favorecen el encharcamiento y la posterior infiltración del agua encharcada.

7.5.3. Evaporación

Este tipo de pérdidas se simulan en el SWMM a partir de las aguas estancadas en las superficies de las cuencas, para el agua subterránea y para el agua retenida en depósitos. En este caso no hay depósitos, el agua del acuífero subterráneo que hay debajo de la zona de estudio es demasiado profundo como para que se vea afectado (además actualmente el grado de impermeabilización ahí es muy elevado) y como se ha visto en el apartado anterior, el agua almacenada en superficie es de apenas pocos milímetros. Además el programa considera un valor constante para todo el día, que es muy útil para el caso de simulaciones continuadas durante varias semanas o meses, pero que en el caso de análisis de eventos de lluvia de horas, o en fase de diseño, no es de gran interés. (Gómez, 2007). Dadas estas razones, este tipo de pérdidas no han sido contempladas en este trabajo.

8. EL MODELO HIDRÁULICO EN SWMM 5.0.022

Las rutinas de cálculo del programa se basan sobre los principios de Conservación de la Masa y Conservación de la Cantidad de Movimiento desarrollados por Saint Venant, en las ecuaciones:

1º Ecuación de Conservación de la Masa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

Ecuación 8.1

2º Ecuación de *Conservación de la Cantidad de Movimiento*:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} = g \cdot A \cdot (I_0 - I_f)$$

Ecuación 8.2

donde:

Q el caudal circulante (m³/s)

A es la sección transversal del conducto ocupada por el flujo

x es la abscisa a lo largo del conducto

t es el tiempo

q es el caudal específico (m²/s)

g es la aceleración de la gravedad

y es el calado

I₀ es la pendiente de la solera del conducto

I_f es la pendiente de la línea de energía

Estas ecuaciones son un caso concreto de sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales hiperbólico, cuasi-lineal y con término independiente que no tienen solución analítica y deben ser resueltas por métodos numéricos. El programa las resuelve mediante un esquema en diferencias finitas explícitas, más fácil de formular, si bien precisa trabajar con incrementos de tiempo de cálculo reducidos para asegurar la estabilidad de la solución numérica. Para agilizar los cálculos, el programa resuelve solamente en los nodos del sistema (arquetas de conexión o pozos) la altura del agua y en los conductos de la red, el valor del caudal. El pozo de registro es el elemento de

información básico para definir la red, y el conducto el elemento de conexión entre dos pozos.

Las capacidades Hidráulicas de SWMM 5.0 se pueden resumir en los puntos:

1. Manejo de redes de drenaje, sin limitación de tamaño y/o forma.
2. Diversas secciones transversales para los conductos.
3. Modelación de bombeos, reguladores de flujo y depósitos de retención.
4. Uso de reglas de control para controlar bombeos y reguladores.
5. Incorporación de flujos externos a la red definidos por el usuario (escorrentía, flujos de aguas residuales).
6. Modelación de diversos regímenes hidráulicos tales como remansos, entrada en carga e inversión del flujo.
7. Modelación en régimen permanente y no permanente.

EPA SWMM 5.0 permite elegir entre tres diferentes metodologías de cálculo del flujo en la red de drenaje:

8.1. MODELO DE FLUJO UNIFORME (*STEADY FLOW ROUTING*):

Este primer modelo de flujo simula de forma muy sencilla el comportamiento del agua. Asume que en cada uno de los incrementos de tiempo de cálculo considerados el flujo es uniforme; trasladando los hidrogramas de entrada en el nudo aguas arriba de un conducto hacia el nudo final del mismo. La relación entre caudal con el área y el calado dentro del conducto se obtiene empleando la ecuación de Manning.

Dada la simplicidad del modelo, éste no permite contemplar efectos de resalto hidráulico, la propagación, la laminación de caudales, los efectos de remanso, el almacenamiento de agua en los conductos, las pérdidas a la entrada y salida de los pozos de registro, ni los fenómenos de flujo presurizado. Únicamente puede emplearse en sistemas ramificados, donde cada uno de los nudos tiene una única línea de salida. La ventaja que tiene es que permite trabajar con intervalos de tiempo relativamente grandes. Por estos motivos debe usarse, como mucho, para cálculos preliminares y para el predimensionamiento de redes, ya que los resultados que ofrece pueden estar bastante alejados de lo que se presenta en la realidad.

8.2. ONDA CINEMÁTICA (*KINEMATIC WAVE*):

Este segundo modelo sí que ya cuenta con la variabilidad temporal del flujo. Resuelve una aproximación de las ecuaciones de Saint-Venant, considerando la ecuación de equilibrio de fuerzas sólo con las componentes de gravedad y fricción, por lo que requiere que la pendiente de la línea de energía sea igual a la pendiente de fondo del conducto. Admite variaciones temporales y espaciales tanto del caudal como del área en el interior del conducto. Lo cual causa una cierta atenuación y retraso en los conductos de los hidrogramas de salida respecto de los caudales de entrada. El caudal máximo que puede fluir por el interior de un conducto es el caudal a tubo lleno determinado por la ecuación de Manning. Cualquier exceso de caudal sobre este valor en el nudo de entrada del conducto se pierde del sistema o bien puede permanecer estancado en la parte superior del nudo de entrada y entrar posteriormente en el sistema cuando la capacidad del conducto lo permita. Este modelo es adecuado para conductos de gran pendiente.

Numéricamente es un modelo muy sólido, permite trabajar con intervalos de tiempo mayores, del orden de varios minutos (intervalos de 5 a 15 min.) frente a pocos segundos, y es más estable desde el punto de vista de cálculo, sobre todo en caso de flujos rápidos. Es una alternativa suficientemente precisa y eficiente para el modelo de transporte con tiempos de simulación largos.

No obstante, este modelo, al no considerar las condiciones de contorno aguas abajo, no puede calcular efectos como el resalto hidráulico, las pérdidas en las entradas o salidas de los pozos de registro, el flujo inverso o la entrada en carga, tampoco permite atenuar puntas de caudal. No puede aplicarse en caso de haya una presencia representativa de elementos de regulación, tales como orificios o vertederos Y no se puede emplear tampoco en redes malladas, sino tan solo en redes tipo arborescentes.

8.3. ONDA DINÁMICA (*DYNAMIC WAVE*):

Este método es el más adecuado desde el punto de vista físico. Resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant de continuidad y de cantidad de movimiento en las conducciones y la continuidad de los volúmenes en los nudos, generando unos resultados mucho más precisos que los modelos anteriores.

Se computan todas las fuerzas actuantes, gravedad, fricción, presión e inercia, y permite simular los efectos de laminación, el almacenamiento en los conductos, los resaltos hidráulicos, las pérdidas en las entradas y salidas de los pozos de registro, el flujo

inverso y el flujo presurizado, ya que considera las condiciones de contorno aguas abajo. Puesto que resuelve de forma simultánea los valores de los niveles de agua en los nudos y los caudales en las conducciones, es de aplicación en cualquier tipo de configuración de red de saneamiento, tanto si es ramificada como mallada.

Aunque puede presentar dos inconvenientes. El primero es que, en ocasiones se pueden generar inestabilidades de cálculo cuando hay situaciones complicadas de flujo, como por ejemplo, en los cambios de régimen, cerca de puntos de entrada en carga, o con hidrogramas de subida muy rápida. Para solventar estos problemas, el programa SWMM 5.0 permite, en su menú de “opciones de simulación” utilizar varias alternativas. La opción Keep trabaja siempre con términos inerciales, que suelen ser los que generan problemas de inestabilidad numérica en la solución. La siguiente opción, Dampen, permite ponderarlos de manera que se reduzca su importancia en las zonas conflictivas (como por ejemplo las zonas de flujo cercanos a calados críticos). Y por último, da la opción Ignore, que los ignora utilizando una aproximación de onda difusiva (fuerzas de gravedad, fricción y presión hidrostática). Las razones para optar por cualquiera de estas alternativas son simplemente razones de estabilidad de la solución numérica. El segundo de los inconvenientes es el tiempo de cálculo, que ha de usarse en incrementos pequeños, de un minuto o menos.

Mientras que el primero de los modelos trabaja en régimen permanente, los otros dos lo hacen en régimen no permanente. La diferencia entre onda cinemática y dinámica, se basa en el grado de resolución de los términos de la ecuación de Saint Venant, como puede verse en el siguiente esquema simplificado:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g (I_o - I_f) = 0$$

Ecuación 8.3

8.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO E HIPÓTESIS DE PARTIDA

Las consideraciones que se han tenido en cuenta a la hora de la elección del modelo hidráulico más apropiado para la realización de este trabajo son:

1. La modalidad habitual de flujo del agua que se produce en los episodios de precipitación en medio urbano, como casi todos los que se dan en la naturaleza,

es de tipo no permanente o no estacionario, también llamado gradualmente variable. Dado que el primer modelo (*Steady Flow Routing*) no contempla la variabilidad del flujo temporalmente, se descarta para la realización del presente ejercicio.

2. Se asume que el flujo es de tipo unidimensional (se considera únicamente la velocidad del agua en la dirección de la alineación del conducto, no se consideran las componentes en las otras direcciones espaciales). Esto es así dadas las dimensiones típicas de los colectores que componen las redes de alcantarillado. Y la distribución de velocidades se supone uniforme en cada sección, despreciando variaciones transversales.
3. La curvatura de la lámina de agua se considera reducida, por lo que en el seno del fluido la distribución de presiones es hidrostática.
4. Las pérdidas de energía se simulan con las expresiones de régimen permanente.
5. La pendiente de los colectores de estudio se supone que es reducida (lo cual es cierto en la mayoría de los tramos), de manera que si el valor del ángulo de la pendiente es φ , podemos aceptar $\cos\varphi \approx 1$, de la misma manera que $\varphi \approx \sin \varphi \approx \tan \varphi$.
6. Los cambios de secciones de los colectores se consideran realizados en los pozos, aunque en la realidad no es así, se realizan en puntos intermedios, pero como no se tenía información de las cotas a las que tenía lugar., se han localizado en el pozo más cercano.

La estructura de la red es muy simple (tipo lineal), por lo que podría emplearse el modelo de onda cinemática, pero considerando la duración de la tormenta, el tiempo de estudio, y la presencia de elementos singulares como es el caso de compuertas, el modelo escogido es el de **onda dinámica**, ya que, por una parte es el único que trabaja con orificios y vertederos y por otro lado, da resultados más cercanos a la realidad.

8.5. MODELO HIDRÁULICO DE TRABAJO: ONDA DINÁMICA.

Cálculo en conductos, resolución de las ecuaciones de Saint Venant:

SWMM 5.0 presenta una ligera modificación de las mismas ecuaciones de Saint Venant combinando la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y la de conservación de la masa, siendo una sola ecuación a aplicar en el conducto:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA I_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - v^2 \frac{\partial A}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0$$

Ecuación 8.4

Trabajando con un esquema en diferencias finitas sobre las ecuaciones combinadas de Saint Venant, entre un instante t , y otro $t + \Delta t$ queda:

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t - \frac{k\Delta t}{R_h^3} |V| Q_{t+\Delta t} + 2V(\Delta A/\Delta t)_t \Delta t + V^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - gA \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t$$

Ecuación 8.5

Con $k = gn^2$, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, L es la longitud del conducto. Δt es el intervalo de tiempo de cálculo. Despejando ese valor en el instante $t + \Delta t$, queda el siguiente esquema en diferencias finitas:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + \frac{k\Delta t}{R_h^3 V}} Q_t + 2V(\Delta A/\Delta t)_t \Delta t + V^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - gA \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t$$

Ecuación 8.6

Los valores de V , A y R de la ecuación 8.6, están ponderados entre los valores de los nodos aguas arriba y aguas abajo. La variación de área respecto al tiempo, se calcula hacia atrás, en el instante t , por lo que es dato conocido. Simplificando, queda esta expresión final utilizada por el programa SWMM en la que quedan representadas todas las fuerzas actuantes sobre la masa de agua en la red de drenaje:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{Q_t + \Delta Q_{\text{gravedad}} + \Delta Q_{\text{inercia}}}{1 + \Delta Q_{\text{rozamiento}}}$$

Ecuación 8.7

Cálculo en nodos, resolución de la ecuación de continuidad:

En cada nudo (*junction*), la ecuación de conservación de la masa se puede formular como:

$$H_{t+\Delta t} = H_t + Q_t \Delta t / A_{S_t}$$

Ecuación 8.8

A_{S_t} es el área en planta del nudo, que en este caso es la suma del área en planta del pozo de registro, más la mitad del área resultante de cada conducto concurrente en el nudo., tal y como se ve en la figura mostrada a continuación.

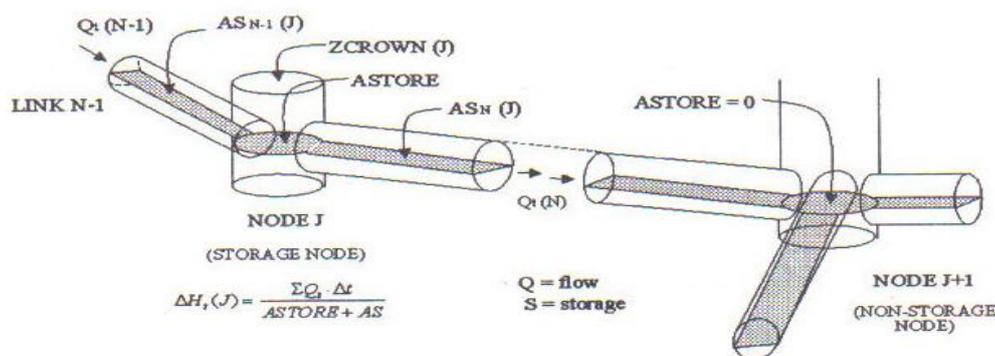


Figura 8.1. Aplicación de la ecuación de conservación de la masa en SWMM 5.0, para un pozo de la red. Fuente: Rossman, L.A. (2005). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0. National Risk Management Research Laboratory. U.S. EPA.

Este modelo de onda dinámica requiere intervalos de tiempo pequeños, comprendidos entre 1 y 60 segundos, y como la red es muy simple, el tiempo de cálculo no será muy alto, así que se ha escogido el valor más bajo, de un segundo.

En relación a los términos inerciales se ha realizado pruebas suavizándolos (*Dampen*) e ignorándolos (*Ignore*), y se ha comprobado que entre ambos no hay diferencia de resultados.

A la hora de determinar el valor supercrítico del flujo, el programa da tres opciones, calcularlo a partir de la pendiente, del número de Froude y obtenerlo teniendo en cuenta las dos opciones anteriores, que es lo que se ha escogido finalmente.

Para el cálculo de velocidades en los conductos en el caso de que entraran en carga se ha escogido la ecuación de Hazen Willimas, aunque, como se verá más adelante, esto es algo que se ha procurado evitar en el dimensionamiento de nuevos colectores para la situación proyectada.

Se ha usado el incremento de tiempo variable y el porcentaje del valor de seguridad escogido es el que viene por defecto, del 75%.

En sección transversal del pozo se deja el valor por defecto y no se alargan conductos.

8.6. CONDICIONES DE CONTORNO.

SWMM 5.0 permite en principio cuatro tipos diferentes de condiciones de contorno. Las salidas de la red se realizan con un elemento tipo denominado *Outfall* al que llega un solo conducto.

Las condiciones de contorno que pueden definirse en cada *Outfall* son:

1. Condición de calado crítico (*FREE*) o normal (*NORMAL*), acorde con las condiciones del último conducto que es el que está conectado al *outfall*. En caso de que tenga una pendiente suave, será tipo *FREE* (calado crítico), y si el flujo es supercrítico, condición de calado normal.
2. Condición de nivel fijo, que se define expresamente para el modelo. Esta condición se da cuando el desagüe es a un lago o mar, y no hay problemas de marea.
3. Condición de nivel de marea, también determinado con un valor y se da en aquellos casos de simulaciones continuadas en lugares con fuertes carreras de marea.
4. Una serie temporal que muestre la variación de nivel de agua con el tiempo.

La red de estudio está dentro de una red mayor, por lo que no desemboca ni al mar ni a ningún lago. Por ello, la condición de contorno escogida ha sido del primer tipo en los todos *outfalls* definidos. Y como los conductos finales tienen poca pendiente, la condición final es de calado crítico (*FREE*).

8.7. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA RED EN SITUACIÓN ACTUAL.

Los elementos descritos en la primera simulación se corresponden con los que actualmente hay en el tramo de estudio. Tamaño, localización de colectores y pozos, cotas y elementos singulares se han obtenido a partir de unos planos facilitados por el Ayuntamiento de Barcelona. Como se observa en los planos del Anejo 2 Hidráulica, bajo el tramo de estudio y de forma paralela a la superficie, circula una línea de colectores con diferentes secciones, unidos por unos pozos situados a distancias no regulares, que van desde los 22 metros hasta los casi 120.

Para la estimación de pendientes se han considerado las cotas más bajas de los pozos de inicio y fin de colector, ya que no se disponía de datos reales. Así mismo, también se producen cambios de sección en puntos intermedios entre-pozos, sin especificar a la cota a la que tienen lugar tramos, por lo que se ha considerado que estos cambios de sección se producen en el pozo más cercano.

8.7.1. Colectores

Las secciones tipo de los colectores que transcurren en la zona de estudio pueden verse en el Anejo Hidráulica. En la actualidad hay unas 5 tipologías diferentes cuyas longitudes totales oscilan entre los 250 y los 350 metros. La sección de mayor tamaño de las existentes bajo la calle Diagonal es la NT1989, esta sección es de gran tamaño ya que a ella van a parar otros colectores que recogen el agua desde otras zonas de la ciudad, aunque en este estudio no se han considerado las cuencas vertientes aguas arriba, se han mantenido, en la primera simulación, los colectores reales. La sección que aparece con mayor frecuencia es la denominada NT366.

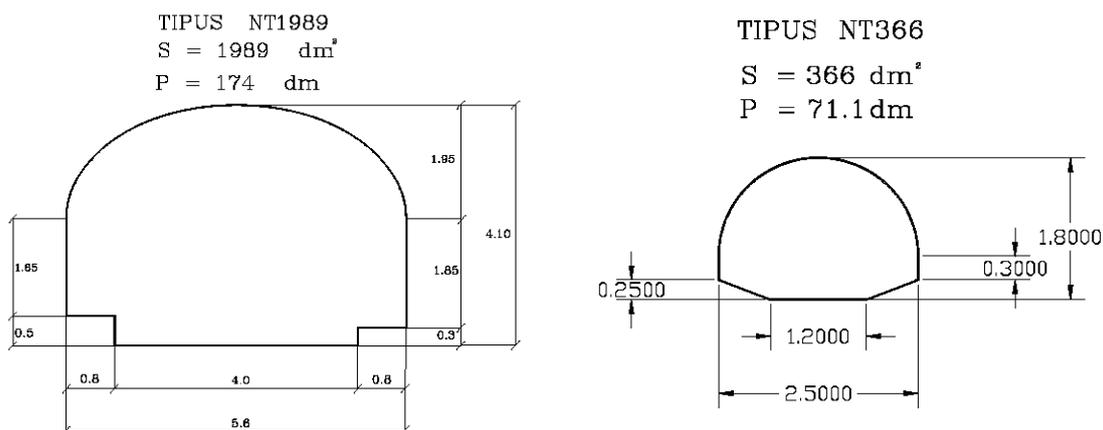


Figura 8.2. Dos de las secciones tipo más representativas de la zona de estudio. Fuente: CLABSA.

A los diferentes tipos de colectores se les supone diferentes coeficientes de Manning, ya que unos son de hormigón y otros tienen paredes de ladrillo. En la tabla expuesta a continuación se presentan los datos de los colectores necesarios para la realización de la simulación.

Colector	Nodo de entrada	Nodo de salida	Tipología del conducto	Longitud	Coef. Manning
C1	A1	A2	NT1745	58,50	0,015
C2	A2	A3	NT1745	22,78	0,015
C3	A3	A4	NT1745	24,63	0,015
C4	A4	A5	NT1745	24,59	0,015
C5	A5	A7	NT1745	24,68	0,015
C7	A7	A8	NT1745	25,53	0,015
C8	A8	A9	NT1745	32,40	0,015
C9	A9	A10	NT1745	41,54	0,015
C10	A10	A11	NT1989	117,29	0,015
C11	A11	A12	NT1989	52,10	0,015
C12	A12	A13	NT1989	45,91	0,015
C13	A13	A14	NT1700	51,28	0,015
C14	A14	A15	NT1700	50,41	0,015
C15	A15	A16	NT1989	37,29	0,015
C16	A16	A17	NT1989	61,91	0,015
C17	A17	A18	NT1745	26,55	0,013
C18	A18	A19	NT148A	69,15	0,013
C19	A19	A20	NT148A	64,03	0,013
C20	A20	A21	NT148A	42,67	0,013
C22	A22	A21	NT366	98,86	0,013
C23	A23	A22	NT366	26,56	0,012
C24	A24	A23	NT366	32,03	0,012
C25	A25	A24	NT366	58,55	0,012

Colector	Nodo de entrada	Nodo de salida	Tipología del conducto	Longitud	Coef. Manning
C26	A26	A25	NT366	88,26	0,012
C27	A27	A26	NT366	49,02	0,012
C28	A28	O2	NT366	77,12	0,012
C-21.1	A-21	A-21.2	NT1389	44,50	0,012
C-21.2	A-21.2	A-21.3	NT1389	62,50	0,012
C-21.3	A-21.3	O1	NT1389	50,00	0,012

Tabla 8.1. Nombre, nodos de entrada y salida, tipología, longitud y coeficientes de Manning de los colectores de estudio.

8.7.2. Pozos

Los pozos de la zona de estudio tienen profundidades muy variables que van desde poco menos de 2,5 metros hasta casi los 9,5 metros. La profundidad va aumentando conforme nos dirigimos aguas abajo, al principio la diferencia de profundidades aumenta paulatinamente, pero conforme nos acercamos al punto considerado de salida (cuando cambia el sentido de la red de colectores), lo hace de forma brusca.

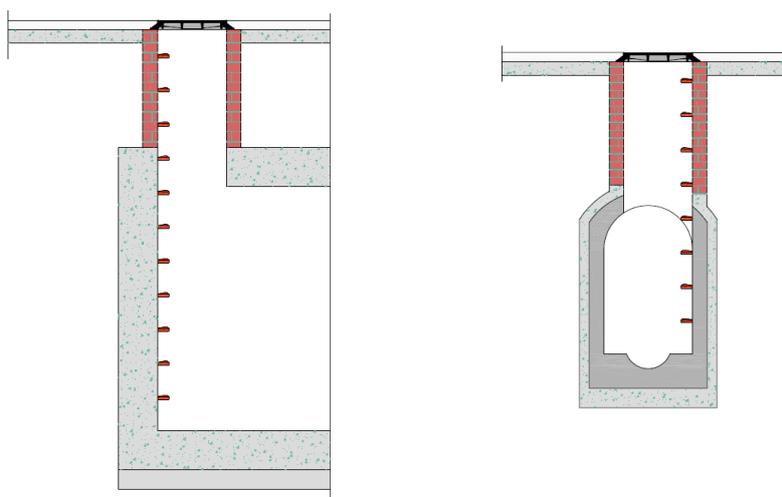


Figura 8.3. Secciones tipo de pozos de registro. A la izquierda, para colector visitable con bóveda plana. A la derecha para colector con bóveda curva. Fuente: CLABSA.

Pozo	Elevación del fondo (m)	Máxima profundidad (m)
A1	25,42	5,01
A2	24,17	6,03
A3	23,78	6,15
A4	23,68	6,10
A5	23,56	6,05
A7	23,46	5,85
A8	22,43	6,70
A9	22,40	6,47
A10	22,08	6,40

Pozo	Elevación del fondo (m)	Máxima profundidad (m)
A11	21,75	5,45
A12	21,55	5,11
A13	21,40	5,20
A14	21,31	5,10
A15	21,30	4,81
A16	16,83	9,29
A17	16,65	9,35
A18	16,25	9,43
A19	15,75	8,00
A20	12,72	7,48
A21	10,57	9,05
A22	13,74	4,82
A23	12,72	4,17
A24	12,71	3,77
A25	12,64	3,32
A26	12,56	2,69
A27	12,45	2,79
A28	23,45	3,33
A-21.2	9,56	8,81
A-21.3	9,55	8,17
O1	9,35	-
O2	4,38	-

Tabla 8.2. Nomenclatura establecida para los nodos o pozos y cotas de fondo y profundidad.

8.7.3. Elementos singulares

En la zona de estudio, además de colectores y pozos, aparecen otra serie de elementos que se describen en este apartado como elementos singulares. Algunos, pero no todos, de estos componentes vienen definidos en la leyenda publicada por CLABSA que puede verse en el Anejo Hidráulica. Éstos son:

Compuertas. Aparece una al comienzo del tramo de estudio. Para poder realizar su simulación con SWMM se ha insertado un orificio en ese punto del conducto 6 y el pozo A6 se ha transformado en una unidad de almacenamiento para poder realizar la simulación, aunque en realidad, según plano, no lo es. Los valores de la función de almacenamiento se han estimado con la curva de almacenamiento tipo *FUNCTIONAL* ($\text{Area} = (\text{Depth})^B + C$) con los valores de $B=0$ (valor que viene por defecto, además se considera que se trata de un prisma de base cuadrada), $C=0$; y el de $A=5$, valor supuesto teniendo en cuenta el tamaño de los colectores de entrada y de que no se trata de un espacio muy grande, como indica en plano (se imagina un área en planta de $5.6\text{m} \times 5.6\text{m}$, que es el ancho del colector entrante y el saliente: $A=5.6\text{m} \times 5.6\text{m} / 5.9\text{m}$ de profundidad).

Salto hidráulicos. Aparecen dos, el primero a pocos metros de la compuerta y el segundo a unos 400 metros del primero. Ambos se producen en colectores visitables.

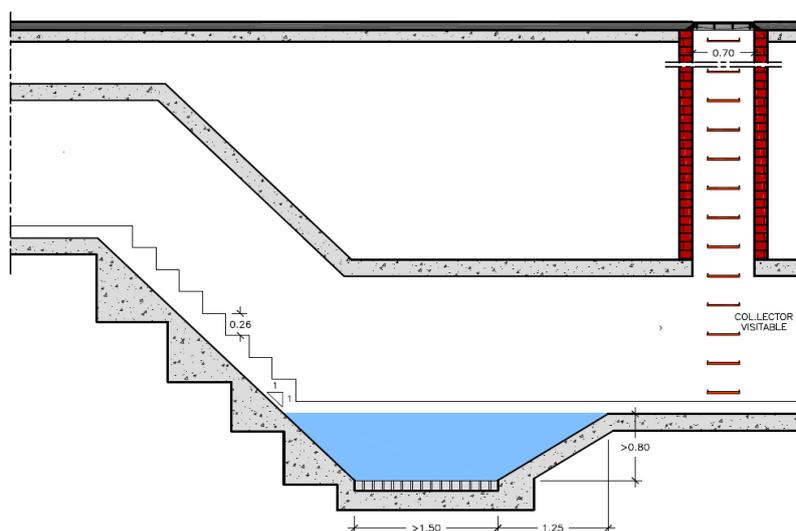


Figura 8.4. Perfil de rápido en colector visitable. Fuente: CLABSA.

La simulación de los rápidos en SWMM se ha realizado fijando un nodo de entrada y uno de salida con las cotas de solera marcadas en los planos, y un colector, de igual tamaño que el precedente y el siguiente, con sólo dos metros de longitud por lo que la pendiente es muy marcada. En ambos casos, como es evidente, se pasa de un régimen supercrítico a uno subcrítico. El programa, al escoger el modelo hidráulico de onda dinámica, ha resuelto las pérdidas de energía del resalto hidráulico, estimando que el punto crítico se alcanza en el canal de caída.

A continuación, bajo el título de *Puntos Singulares*, se muestran las localizaciones de los elementos singulares, tanto de compuertas y saltos hidráulicos, como de aquellos que no vienen definidos o dónde aparecía algún problema a la hora de realizar la simulación con los datos reales.

Puntos Singulares:

1. Diagonal con Roger de Flor, entre SC1 y SC2

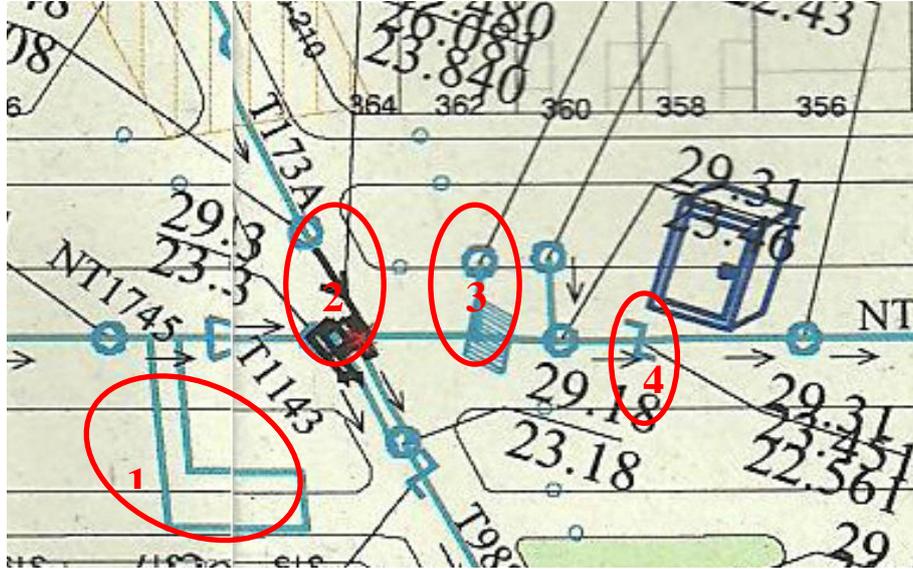


Figura 8.5. Cruce de los colectores de la Avenida Diagonal con los de la calle Roger de Flor.

1: Elemento no especificado en la leyenda.

2: Rebosadero o aliviadero lateral. En el plano no se aprecia claramente si pertenece a la línea de flujo de estudio o a la que corta transversalmente, aunque por el sentido de las flechas parece que se sitúa en la calle Roger de Flor y no en Diagonal. Por ello no se ha considerado elemento de estudio.

3: Compuerta.

4: Salto hidráulico.

2. Diagonal cruce con Sicilia SC5-SC6



Figura 8.6. Segundo salto hidráulico.

3. Diagonal cruce con Lepanto SC6

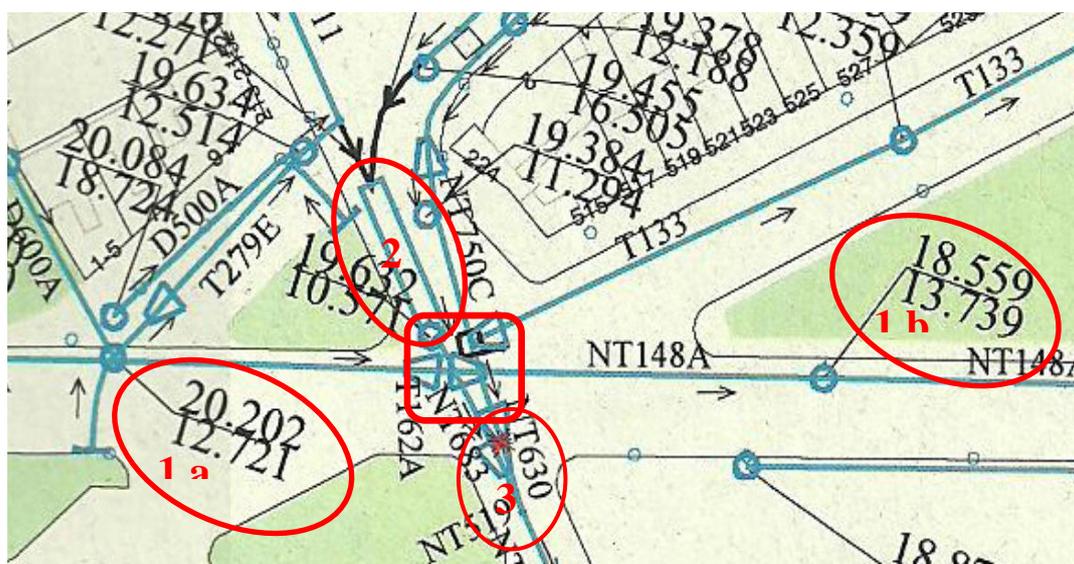


Figura 8.7. Cruce de los colectores de la Avenida Diagonal con los de la calle Lepanto.

1: En un principio se consideró que la línea que une los pozos de la figura 1.a y 1.b (A21 y A22 en la simulación) se correspondía con un único colector. Pero atendiendo a las cotas, se observa que va de menor (a) a mayor (b) cota, con un desnivel de un metro. El programa SWMM no deja simular con estas cotas puesto que van en contrasentido, y tampoco aparece representado ningún sifón. Por ello se ha supuesto que en el entronque central, delimitado en la figura por un cuadrado rojo, se produce un cambio de sentido

de la línea de colectores hacia la calle que cruza. De esta manera no se introduce en la simulación el tramo comprendido entre el entronque y la arqueta a cota 13,739.

En el entronque, a la hora de realizar la simulación, se ha colocado un pozo con unos valores de cotas superior e inferior correspondientes a la arqueta situada justo sobre ellos.

2: Esa figura, atendiendo a la leyenda publicada por CLABSA, representa un tabique parcial, aunque dada su situación y que en su inicio desembocan dos rápidos, parece que no es eso, por ello no se ha considerado en la simulación.

3: Asterisco rojo es una figura que no viene registrada en leyenda, así que tampoco se ha tenido en cuenta en el estudio.

4. Diagonal con Glòries SC8

Al final del tramo de estudio aparece otra vez un tramo en contracorriente, el último de la simulación. El que se consideró en un principio último pozo (*outfall*) tiene una cota más alta que el pozo anterior, así que ése se ha despreciado y en su lugar se ha usado el siguiente pozo consecutivo.

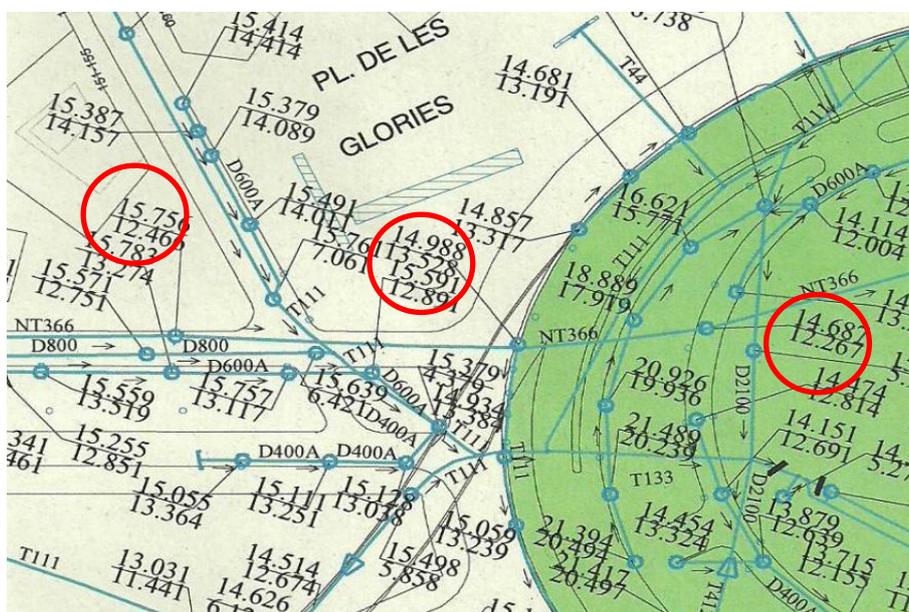


Figura 8.8. Cruce de Diagonal con la Plaza Les Glòries. Fin del tramo de estudio Rodeadas en rojo las cotas de los últimos pozos.

8.7.4. Variación de dimensiones para el caso de estudio

Los colectores presentes actualmente en la zona de estudio tienen varias dimensiones, siendo, en muchos casos, de un gran tamaño. Llegan inclusive a secciones de cerca de 20 metros cuadrados. Esto es debido a que, además de las aguas de escorrentía de la propia Diagonal, reciben de otros colectores que recogen el agua de las calles situadas aguas arriba. En este estudio sólo se ha considerado el agua de escorrentía de un tramo de la avenida, y no la que viene desde las calles adyacentes. Por ello, los colectores reales estarían “sobredimensionados” para el transporte de los caudales de proyecto, que se corresponden con los generados en las ocho subcuencas de la Diagonal.

En las primeras simulaciones usando las dimensiones de los colectores actuales, sin y con un SDUS implantado los valores de errores máximos de escorrentía y flujo son aceptables (-0,04% y -0,03% respectivamente en la situación actual y -0,12% y -0,06% con un SDUS implantado). Pero los errores relativos a la calidad son muy altos, rondando en ambos casos el -23%. Se ha comprobado que este error tan alto en la calidad se debe al sobredimensionamiento de los colectores respecto del caudal proyectado.

Además de este problema, están los asociados a la hora de realizar las comparativas hidráulicas. Al ser tan ancha la sección para la circulación de los caudales de estudio, apenas si trasciende la diferencia de calados medios sin y con SDUS aunque los caudales se reduzcan a la mitad, las diferencias de calados no son tan marcadas.

El reemplazo de los colectores por otros de menor tamaño en la simulación, ha resultado mucho más útil a la hora de realizar las comparativas hidráulicas, ya que son más fáciles de ver las diferencias entre los dos sistemas puesto que el tamaño de los colectores está ajustado a los caudales circulantes. Y con el cambio ha mejorado la simulación de la calidad, puesto que el error de cálculo se reduce a un valor normal.

Estas son las razones por la que, para poder realizar una comparativa, se han sustituido en las simulaciones los colectores reales por otros de hormigón armado con diámetro de un metro, pero manteniendo la localización de los pozos con sus cotas reales, las localizaciones de los saltos y de la compuerta. Para la selección de las nuevas dimensiones propuestas, se ha ido comprobando con el programa SWMM, cuál era el

tamaño mínimo que permitía la circulación de los caudales de proyecto y se ha escogido una sección circular de un metro de diámetro.

Al cambiar los colectores a tubos de 1 metro de diámetro también se han cambiado las condiciones del orificio y de la unidad de almacenamiento adaptándolas a las nuevas dimensiones, aunque se comprobó que la modificación de estos dos elementos apenas si influía en los valores finales de la simulación. Los valores de la función de almacenamiento se han estimado con la curva de almacenamiento tipo FUNCTIONAL ($\text{Area} = A * (\text{Depth})^B + C$) con $A=5$ y el resto 0. Y el orificio ahora tipo circular con anchura y altura de un metro y salida por el fondo.

Con las nuevas dimensiones, los errores máximos en el cálculo de la calidad del agua se encuentran en torno al -1%, valores más aceptables con los que realizar la comparativa entre las concentraciones de contaminantes con y sin SDUS.

8.8. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA RED EN SITUACIÓN PREVISTA (SDUS).

En el caso hipotético de que se instalaran realmente unas técnicas de drenaje urbano sostenible en la zona de estudio, se podrían emplazar unos nuevos colectores destinados únicamente a llevar el agua recogida de la calle, con una menor concentración en contaminantes que las provenientes de aquellas zonas meramente urbanas y, además, sin mezclar con aguas negras.

A la hora de realizar un completamente nuevo dimensionamiento del alcantarillado se han tenido en cuenta las prescripciones especificadas por CLABSA referentes a las dimensiones mínimas, el material de las conducciones y la separación mínima entre arquetas:

- El diámetro mínimo a usar será de 600 mm, permitiéndose que el material sea PVC u otro material plástico de probada resistencia y validez.
- A partir de diámetros iguales o superiores a los 800 mm, el material de construcción habrá de ser hormigón.
- La separación máxima entre arquetas será de 50 metros.

La nueva red diseñada se compone de una sólo línea de colectores unidos por 24 arquetas que transcurren de forma paralela a la superficie de la calle de estudio. Las pendientes de los colectores se han ajustado en la medida de lo posible a la de la superficie e intentando no poner pozos de excesiva profundidad puesto que los nuevos colectores son de pequeñas dimensiones dado el reducido volumen de caudales que van a transportar.

En los primeros 700 metros la pendiente es del 1,2%, la altura de los pozos P1 a P9 es de 2,5 metros y después esa altura va aumentando ligeramente por un desnivel en la calle que afecta a los pozos P10, P11, P12, P13 y P14, que tienen profundidades mayores, de entre 4,2 y 5 metros.

Por variaciones en la pendiente superficial, que se vuelve más pronunciada, se aumenta al 1,75 % la pendiente en el colector 15, y hasta el 2% en los siguientes 6 colectores. Los pozos de ese tramo tienen una profundidad de 2 metros. En los últimos 200 metros no hace falta una pendiente tan alta, por lo que se rebaja al 1,5% y la altura de los pozos va desde 2, 5 metros hasta 4,5.

Pozo	Cota sobre el nivel del mar (m)	Máxima profundidad (m)
P1	27	2,5
P1	27	2,5
P2	26,4	2,5
P3	25,8	2,5
P4	25,2	2,5
P5	24,6	2,5
P6	24	2,5
P7	23,4	2,5
P8	22,8	2,5
P9	22,2	2,5
P10	21,6	4,5
P11	21	5
P12	20,4	4,5
P13	19,8	4,2
P14	19,2	4,5
P15	18,6	2
P16	17,72	2,1
P17	16,72	2
P18	15,47	2
P19	14,47	2
P20	13,47	2
P21	12,47	2,5
P22	11,72	3,45
O	8,5	-

Tabla 8.3. Pozos, cotas de fondo y alturas.

En este nuevo dimensionamiento se ha comenzado instalando 24 colectores de 600 mm de diámetro, ya que en la comparativa de calidad que se realizó igualando colectores a tubos de diámetro 1000, se observó que éstos tenían capacidad de sobra, por lo que se ha empezado probando con los tubos de menores dimensiones permitidos.

Como margen de seguridad, se permite un llenado más o menos de hasta un 75-80% de la capacidad del colector, esto no es una norma impuesta por CLABSA, pero siempre es recomendable dejar un margen de resguardo. Con estas dimensiones se ha probado que todos los colectores cumplen con el requisito de capacidad, salvo los tres penúltimos, que superan en muy poco y por muy poco tiempo ese valor, alcanzándose en el peor de los casos el 80%

Con estas pendientes y dimensiones, se ha observado en la simulación que las velocidades máximas no superan los 6 m/s y las mínimas sólo bajan de los 0,6 m/s durante el periodo de tiempo en el que el caudal se acerca a 0. Estos son valores recomendados por CLABSA para evitar problemas de erosiones y de deposiciones de material en suspensión. Y al no darse números de Froude muy altos (el máximo valor está por debajo de 3,5 en el pico del hidrograma y se da en el último colector, en el resto el valor máximo apenas alcanza los 2,5), no ha sido necesario tener que insertar saltos hidráulicos o cualquier otro dispositivo de control a lo largo de la red.

Colector	Nodo de entrada	Nodo de salida	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Coef. Manning	Pendiente %	Capacidad de llenado para el máximo caudal %
C1	P1	P2	600	50	0,011	1,2	9
C2	P2	P3	600	50	0,011	1,2	9
C3	P3	P4	600	50	0,011	1,2	22
C4	P4	P5	600	50	0,011	1,2	22
C5	P5	P6	600	50	0,011	1,2	22
C6	P6	P7	600	50	0,011	1,2	35
C7	P7	P8	600	50	0,011	1,2	35
C8	P8	P9	600	50	0,011	1,2	35
C9	P9	P10	600	50	0,011	1,2	52
C10	P10	P11	600	50	0,011	1,2	71
C11	P11	P12	600	50	0,011	1,2	71
C12	P12	P13	600	50	0,011	1,2	72
C13	P13	P14	600	50	0,011	1,2	72
C14	P14	P15	600	50	0,011	1,2	72
C15	P15	P16	600	50	0,011	1,2	69
C16	P16	P17	600	50	0,011	1,75	65
C17	P17	P18	600	50	0,011	2	77
C18	P18	P19	600	50	0,011	2	67

Colector	Nodo de entrada	Nodo de salida	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Coef. Manning	Pendiente %	Capacidad de llenado para el máximo caudal %
C19	P19	P20	600	50	0,011	2	67
C20	P20	P21	600	50	0,011	2	67
C21	P21	P22	600	50	0,011	2	78
C22	P22	P23	600	50	0,011	1,5	80
C23	P23	P24	600	50	0,011	1,5	76
C24	P24	O	600	50	0,011	1,5	58

Tabla 8.4. Dimensiones, pendientes y capacidad de los nuevos colectores.

Como apunte, indicar que previo a este nuevo dimensionamiento se hizo una prueba con la red actual, sustituyendo los colectores por otros de menor tamaño pero manteniendo la localización de los pozos y las cotas de entrada y salida. En ese caso hubo que instalar tubos de 600, 800 y 1000mm de diámetro para que el sistema no entrara en carga. Con las nuevas pendientes sólo se requieren tubos de 600mm.

9. SELECCIÓN Y SIMULACIÓN DE LAS TDUS CON SWMM

5.0.022

9.1. SELECCIÓN DE LAS SDUS

Como ya se mostró en la primera parte de este trabajo, los criterios de selección de las técnicas de drenaje urbano sostenible, aunque provengan de fuentes diferentes (en este documento US-EPA, CIRIA y Daywater), tienen en cuenta varios elementos de distinta naturaleza, siendo los más representativos:

- La capacidad de reducir la escorrentía superficial.
- Los usos del suelo.
- La presencia de un medio natural cerca.
- La tipología del suelo, su pendiente,... factores físicos en general.
- Factores ambientales y sociales.
- Normativa y recomendaciones.

La zona de estudio está dentro de la ciudad, por lo que está altamente urbanizada, con las limitaciones que ello supone a la hora de disponer de suelo para la inserción de las TDUS. Además de las restricciones espaciales, el hecho de situarse en una de las principales arterias de tráfico y peatonales, también influye en la selección de la técnica más apropiada.

En el Anejo3 Drenaje Urbano Sostenible se encuentran las matrices de selección de las técnicas propuestas. Los factores más representativos o limitantes considerados en la selección han sido:

1. El tamaño de las cuencas, que ronda la hectárea en la mayoría de los casos, llegando a las dos hectáreas en la subcuenca 8.
2. Las pendientes poco marcadas, inferiores en todos los casos al 5%.
3. Los usos del suelo, comerciales/urbanos densos y muy densos.
4. Suelo altamente impermeabilizado por el asfalto.
5. Nivel freático a más de diez metros de profundidad.

Otros componentes, como sería la reducción de caudales punta y la disminución de la contaminación no se han contemplado a la hora de realizar la selección, puesto que en realidad son consideradas ventajas intrínsecas a las técnicas finalmente escogidas y serán objeto de análisis más adelante.

Las técnicas seleccionadas en este estudio son:

- Pavimentos porosos (PP): Continuos (PP CONT) y Modulares (PP MOD)
- Áreas de biorretención (AB)
- Cunetas verdes (CV)

En un principio se contó con instalar zanjas filtrantes en lugar de las cunetas verdes, pero al tratarse de una zona altamente urbanizada, no se recomienda su utilización porque podrían dañar las estructuras subterráneas de los edificios colindantes.

En el apartado de cuencas, se muestra la sección transversal de asfalto, zona peatonal y jardines, que es muy similar en todas las subcuencas. La distribución de las TDUS dentro de cada una de ellas no implica ninguna variación representativa respecto a la actual en lo que hace referencia a las dimensiones de las zonas peatonales y las dedicadas al tráfico rodado.

Salvo las subcuencas (en adelante SCs) 5 y 7, en las que no hay cunetas verdes, en el resto se localizan las cuatro técnicas LID (*Low Impact Development, o de Desarrollo de bajo impacto*) anteriormente mencionadas. Los parámetros que definen a cada una de ellas son iguales en todas las SCs, salvo las características dimensionales y las pendientes, que se ajustan a las de la calle en cada uno de los tramos de estudio. La distribución de las técnicas LID se puede ver en las figuras:



Figura 9.1. Localización de las TDUS en la subcuena 1.



Figura 9.2. Localización de las TDUS en la subcuenca 2.



Figura 9.3. Localización de las TDUS en la subcuenca 3.



Figura 9.4. Localización de las TDUS en la subcuenca 4.



Figura 9.5. Localización de las TDUS en la subcuenca 5.



Figura 9.6. Localización de las TDUS en la subcuenca 6.



Figura 9.7. Localización de las TDUS en la subcuenca 7.



Figura 9.8. Localización de las TDUS en la subcuenca 8.

MAR y MON simbolizan lado mar y lado montaña respectivamente.

9.2. SIMULACIÓN DE SDUS CON EL PROGRAMA SWMM

La nueva versión de SWMM (SWMM v5.0 022) puede simular de forma explícita cinco tipos de TDUS, denominados en el manual con las siglas LID (*Low Impact Development*):

1. Áreas de biorretención
2. Zanjas de infiltración
3. Pavimentos porosos
4. Barriles de lluvia o cisternas
5. Cunetas verdes

La descripción desarrollada del funcionamiento de estas técnicas se encuentra en el apartado “2.2.2. Medidas estructurales” del presente trabajo.

Y, aunque una de las principales características de las TDUS o LID’s es que aportan importantes beneficios de reducción de contaminantes, en esta versión del SWMM 5.0.022 sólo se incluye el rendimiento hidrológico que proporcionan. Aun así se va a realizar la simulación incluyendo esta nueva herramienta, ya que permitirá hacer una comparativa de los caudales en la red de colectores con y sin la implantación de técnicas

de drenaje urbano sostenible. La reducción de la contaminación producida por la presencia de estas técnicas se analizará en el capítulo “10. *Calidad de las aguas de escorrentía*”, ya que, a pesar de no estar incluida en el nuevo módulo del programa, éste sí que contemplaba desde versiones anteriores la disminución de los elementos contaminantes por el empleo de prácticas sostenibles, denominadas por el programa en la parte de calidad como BMP (*Best Management Practices*).

En este estudio se usarán indistintamente tanto las siglas TDSU como las LID's para hacer referencia a este conjunto de técnicas.

En el epígrafe anterior se ha descrito el proceso usado para escoger las TDUS más adecuadas y sus características físicas. En este apartado se hace una revisión más exhaustiva de las mismas y de los parámetros requeridos para su simulación atendiendo a los módulos del programa.

9.2.1. Utilización de las técnicas LID dentro del programa SWMM 5.0.022

La utilización de técnicas LID's o TDUS dentro de un proyecto de SWMM es un proceso en dos fases que:

1. Crea un conjunto de técnicas LID's o TDUS independientes de la escala que se pueden implementar en todo el área de estudio.
2. Asigna cualquier combinación y tamaño deseados de esas técnicas a las subcuencas seleccionadas.

Cuando se añade una o varias técnicas LID's a una cuenca, el “*Area property*” de la misma es el área total de la cuenca (ambas partes, la que contiene la técnica LID y la que no), mientras que el porcentaje de impermeabilidad y los parámetros de anchura “*Width parameters*” se aplican sólo a la porción de terreno que no tiene la técnica LID implantada.

Seleccionando en el menú la categoría de “*Hydrology / LID's Controls*” desde el “*Data Browser*” se puede agregar, editar o eliminar objetos LID's individuales. En una la segunda fase, para determinar las características de las técnicas LID's de cada cuenca se utilizan los módulos “*Property Editor*” y “*Group Editor*”.

9.2.2. Ubicación de las técnicas LID

Hay dos enfoques diferentes para ubicar las técnicas LID dentro de una cuenca:

1. Localizarlas dentro de una cuenca ya existente que reemplazará a una porción del área de la misma, ocupando un área real dentro de ella.
2. Crear una nueva subcuenca dedicada exclusivamente a la práctica de una única TDUS.

El primer enfoque permite una combinación de técnicas de bajo impacto para ser colocados en una cuenca, cada una de las técnicas con un tratamiento específico de una parte diferente de la escorrentía generada en la porción no-LID (parte de la subcuenca no ocupada por ninguna técnica de desarrollo de bajo impacto). Hay que tener en cuenta que bajo esta opción, el área donde están implantadas las técnicas LID actúa en paralelo (no se las puede poner a trabajar en serie). Además, después de la colocación de las TDUS las propiedades de la cuenca “*Porcentaje de impermeabilidad*” y “*Anchura*” requieren de un ajuste para compensar la cantidad de área de cuenca original que ha sido sustituida por la técnica LID.

El segundo método permite que las diferentes TDUS se encadenen a lo largo en serie y también permite que la escorrentía desde de varias diferentes subcuencas aguas arriba sea transferida a la subcuenca LID. Si estas subcuencas LID individuales surgen de subcuencas existentes, habrá que realizar también ajustes del porcentaje de impermeabilidad, la anchura y del área. Además, cada vez que una técnica LID ocupa toda una subcuenca, los valores asignados a las propiedades estándar de la superficie de la subcuenca (como impermeabilidad, pendiente, rugosidad, etc) son invalidados por aquellos que pertenecen a la unidad LID.

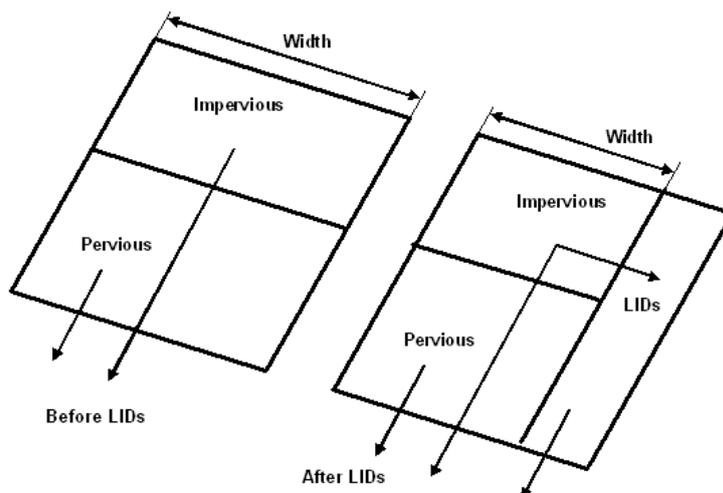


Figura 9.9. Ajuste de los parámetros de cuenca después de la colocación LID según enfoque 1.
Fuente: “Storm Water Management Model User’s Manual. Version 5.0. EPA/600/R-05/040.
Revised July 2010.”

Ya que las subcuencas iniciales de estudio tienen pequeñas dimensiones, y puesto que las técnicas LID ocuparían un área menor aún dentro de cada una de ellas, no se han creado otras nuevas. El enfoque de este trabajo ha sido el primero de los planteados, se han localizado una o más TDUS dentro de cada una de las subcuencas delimitadas previamente para el estudio de la situación que hay actualmente. Este primer enfoque permite la presencia de una mezcla de técnicas LID dentro de cada cuenca y, además que cada una de ellas trate una fracción de la escorrentía generada en las zonas impermeables de la misma. En este caso las TDUS de la subcuenca actúan siempre en paralelo, nunca en serie. Las propiedades del porcentaje de impermeabilidad y de la anchura para compensar la parte del área que ahora es LID se han reajustado, quedando los siguientes valores:

Nuevos parámetros de las Subcuencas	SC 1.	SC 2.	SC 3.	SC 4.	SC 5.	SC 6.	SC 7.	SC 8.
Anchura (m)	25	27	25	35	40	20	20	20
%Impermeabilidad	48,34	57,46	59,89	68,71	53,15	47,22	21,95	43,44

Tabla 9.1. Nuevos valores relativos a la anchura y permeabilidad de las Subcuencas tras la instalación de las TDUS.

9.2.3. Representación de las técnicas LID dentro del programa SWMM

5.0.022

Las técnicas de drenaje urbano sostenible están representadas por una combinación de capas horizontales, situadas una encima de la otra, cuyas propiedades se definen sobre una base por unidad de área. Esto permite que una técnica con un mismo diseño pero diferente extensión se puedan colocar fácilmente dentro de cada una de las diferentes subcuencas del el área de estudio. Durante una simulación, SWMM realiza un balance de la humedad manteniendo un registro de la cantidad de agua que se mueve y/o almacena entre estas diferentes capas, que son:

1. La Capa Superficial (*Surface Layer*), que se corresponde a la superficie de la tierra o al pavimento que recibe directamente la lluvia y la escorrentía de áreas situadas aguas arriba, almacena el exceso de entradas de agua (*inflow*) y genera una salida (*outflow*) que o bien fluye aguas abajo, o bien entra en una red de drenaje.
2. La Capa Pavimento (*Pavement Layer*) es la capa de pavimento poroso así sea el hormigón o asfalto poroso usado en los sistemas continuos o los bloques que componen los sistemas porosos modulares.
3. La Capa Suelo (*Soil Layer*) es la mezcla de suelo que es empleada en las áreas de biorretención para mantener el sustrato vegetal favoreciendo el crecimiento de las plantas.
4. La Capa de Almacenamiento (*Storage Layer*) es un lecho de roca triturada o de grava que facilita el almacenamiento en áreas de biorretención, pavimentos porosos, y sistemas de zanjas de infiltración. Para un depósito de lluvia simboliza simplemente su propio volumen.
5. El Sistema de Desagüe inferior (*Underdrain System*) transporta el agua de la capa de almacenamiento (generalmente la salida de esa capa se hace por con tubos ranurados) hacia una salida común. Para un depósito de pluviales, este sistema es simplemente la válvula de salida que hay en el fondo del propio barril. Las áreas de biorretención, las zanjas filtrantes y los sistemas de pavimento poroso pueden disponer de este sistema bajo el lecho de gravas de almacenamiento para transportar parte de la escorrentía capturada al sistema de alcantarillado en lugar de dejar que todo se infiltre, aunque también

pueden estar sobre un suelo impermeable o con revestimiento que impida la infiltración en el subsuelo, por lo que su uso en esas técnicas es opcional.

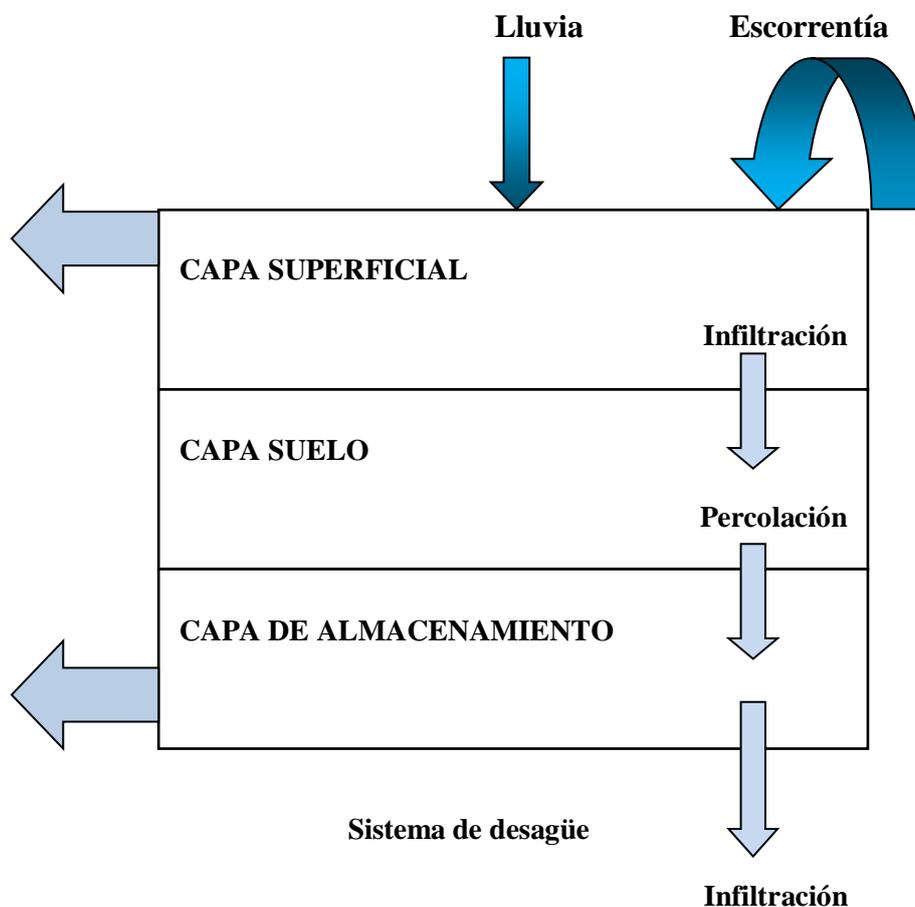


Figura 9.10. Diagrama conceptual de un área de biorretención LID. Fuente: “Storm Water Management Model User’s Manual. Version 5.0. EPA/600/R-05/040. Revised July 2010.”

La siguiente tabla indica cual es la combinación de capas que se ha de aplicar a cada tipo de LID o técnica de drenaje urbano sostenible, en ella X indica que es una capa necesaria, 0 significa que es opcional.

TDSU/Capas	Superficie	Pavimento	Suelo	Almacenamiento	Desagüe inferior
Áreas de biorretención	X		X	X	0
Pavimentos porosos	X	X		X	0
Zanjas de infiltración	X			X	0
Depósitos de lluvia				X	X
Cunetas verdes	X				

Tabla 9.2. Combinación de capas por cada una de las técnicas de drenaje urbano sostenible contempladas en el programa SWMM. Fuente: “Storm Water Management Model User’s Manual. Version 5.0. EPA/600/R-05/040. Revised July 2010.”

Las TDUS que se van a emplear en este estudio son:

1. Áreas de biorretención (AB)
2. Cunetas Verdes (CV)
3. Pavimentos porosos (PP)

Por lo que van a ser necesario definir al menos las capas Superficie, Pavimento, Suelo y Almacenamiento, que serán diferentes para cada una de las técnicas.

9.2.4. Edición de las capas que componen las técnicas LID de este estudio

Esta herramienta sirve para establecer las propiedades de diseño de cada una de las capas correspondientes (tales como el grosor, volumen de huecos vacío, la conductividad hidráulica, las características de desagüe inferior, etc.). El editor contiene los siguientes campos de datos de entrada:

Nombre (*Control Name*): Un nombre que se utiliza para identificar la técnica LID en particular. En este caso se han usado los siguientes nombres:

AB para áreas de biorretención.

CV para cunetas verdes.

PP CONT para pavimentos porosos continuos.

PP MOD para pavimentos porosos modulares.

Tipo (*LID Type*): El tipo genérico de técnica que se está definiendo (áreas de biorretención, pavimentos porosos, zanjas de infiltración, depósitos de lluvia o cunetas verdes).

Procesos en las capas (*Process Layers*): Sirve para introducir, por cada tipo de técnica LID, los datos necesarios para definir las capas verticales (Superficie, Pavimento Suelo, Almacenamiento), y desagüe inferior que componen cada técnica.

9.2.4.1. Superficie:

Profundidad de almacenamiento (*Storage Depth*) (mm): En el caso de que haya presentes muros confinamiento o bermas, es la profundidad máxima a la que el agua puede estancarse por encima de la superficie antes de que se produzca un desbordamiento. Para técnicas LID por las que circule flujo superficial, es la altura de cualquier almacenamiento por depresión superficial. Como en el caso de los pavimentos porosos no se produce este almacenamiento, su valor es nulo. Para las cunetas, es la

altura de su sección transversal trapezoidal, es decir 25 centímetros. Y en el caso de las áreas de biorretención se les ha dado un valor de 30 centímetros.

Fracción de volumen de vegetación (*Vegetation Volume Fraction*): Es La fracción de volumen dentro de la profundidad de almacenamiento rellena con vegetación. Es decir, es el volumen ocupado por los tallos y las hojas, no la superficie de cobertura vegetal. Habitualmente, este volumen se puede ignorar, pero en determinadas ocasiones, cuando el crecimiento vegetativo es muy denso, puede ser tan alto como 0,1 a 0,2. Como se trata de un hipotético espacio nuevo, se le supone limpio de restos de vegetación, así que se adopta el valor de 0.

Rugosidad de la superficie (*Surface Roughness*): Coeficiente de Manning, se emplea en caso de Pavimentos porosos o Cunetas verdes. Dentro de los pavimentos porosos se distinguen los modulares con un $n=0,05$ de los continuos con $n=0,013$. Las cunetas verdes, recubiertas de hierba tienen un $n=0,24$. Para las otras técnicas (áreas de biorretención en este caso) tiene el valor 0.

Pendiente de la superficie (*Surface Slope*) (%): Es la del pavimento poroso o la de las cunetas verdes. En este estudio se corresponde con la pendiente de la superficie de la cuenca en la que estén instaladas estas técnicas. Para las otras técnicas tiene el valor 0. En los casos en los que la rugosidad de la superficie o los valores de superficie de la pendiente tienen el valor de 0, el agua superficial estancada que supera la profundidad de almacenamiento se presume que se desborda completamente dentro de un intervalo de tiempo único.

Los valores de las pendientes en las técnicas CV, PP CONT y PP MOD, se corresponden con las pendientes longitudinales de las cuencas en las que se hayan instaladas.

Pendiente lateral de la cuneta. (*Swale Side Slope*): Es pendiente de las paredes laterales en la sección transversal de una cuneta verde. Es el cociente entre el ancho por el alto. Como la anchura es de dos metros y están en una zona donde puede entrar un peatón por error, sólo se le da una profundidad de 25 centímetros, por lo que el valor de la pendiente lateral es de 4.

9.2.4.2. *Pavimento*

Las propiedades de un pavimento poroso se especifican mediante:

El espesor de la capa de pavimento (*Thickness*): Los valores típicos se encuentran entre los 100 a los 150 mm. En la Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1 IC: “Secciones de firme, de la Instrucción de Carreteras”, se especifican esos mismos valores como los mínimos que ha de tener un pavimento de mezcla bituminosa en función de la capa que tengan debajo. En este estudio se ha empleado el valor medio, 125 mm.

Relación de espacios vacíos (*Void Ratio*): Volumen de espacios vacíos en relación con el volumen de sólidos en el suelo para sistemas continuos o con el material de relleno utilizado en los sistemas modulares. Porosidad = relación de espacios vacíos / (1 + relación de espacios vacíos). Los valores típicos para el pavimento van de 0,12 a 0,21 (*US-EPA, 2005*). Este último valor es el escogido puesto que es el más favorable y es el más cercano a los valores medios experimentales obtenidos en un estudio realizado por la Universidad de Cantabria “(*Rodríguez Hernández J., Rodríguez Bayón J., Castro Fresno D., Calzada Pérez M., Canteras Jordana J.C., Ballester Muñoz F., Marañón Maison E., Muñoz Vegas m., Lasa P. 2006*), que oscilan entre 0,241 y 0,265.

Fracción de la superficie impermeable (*Impervious Surface Fraction*): Relación de material de pavimento impermeable con la superficie total. Para sistemas modulares se ha supuesto un valor del 30% y para sistemas continuos de pavimento poroso del 0% dado que en este caso toda la superficie es permeable.

Permeabilidad (*Permeability*): Es la permeabilidad del hormigón o del asfalto que se utiliza en sistemas continuos o la conductividad hidráulica del material de relleno (grava o arena) que se utiliza en los sistemas modulares (mm/hr). La permeabilidad del hormigón poroso o asfalto nuevos es muy alta, pero puede disminuir con el tiempo debido a la obstrucción por partículas finas transportadas en la escorrentía. Atendiendo al estudio sobre construcción de pavimentos porosos que se mencionó con anterioridad como referencia en la estimación de la relación de espacios vacíos, se toma como valor de permeabilidad, la media de las permeabilidades obtenidas de forma empírica en dicho estudio. Dicho valor, correspondiente a un sistema permeable continuo es de 17625 mm/h. El valor estimado de la conductividad del pavimento modular es una

media aproximada de los valores típicos de las gravas, 500 m/día o 20833 mm/h (*Fetter, 2001*).

Factor de colmatación (*Clogging Factor*): Las zanjas de infiltración y los sistemas de pavimento poroso pueden ser sometidos a una disminución de la conductividad hidráulica con el tiempo debido a problemas de obstrucción. El factor de colmatación es el valor que obstruye completamente el pavimento, es función de la escorrentía tratada y del índice de huecos. La colmatación reduce progresivamente la permeabilidad del pavimento en proporción directa con el volumen acumulado de la escorrentía tratado. Conociendo el número estimado de años que lleva saturar completamente el sistema (Y_{clog}) El factor de colmatación puede calcularse:

$$Y_{\text{clog}} * P_a * CR * (1 + VR) * (1 - ISF) / (T * VR)$$

Ecuación 9.1

con:

P_a es la cantidad anual de lluvia que cae sobre la zona

CR es el ratio de captura del pavimento (área que contribuye a la escorrentía del pavimento dividido por el área propia de la acera)

VR es Relación de vacío (Void Ratio)

ISF es la fracción de la superficie impermeable

T es el espesor de la capa de pavimento

Como el caso de estudio es hipotético, se supone un pavimento poroso (tanto en el caso de pavimento continuo como modular) recién implantado, por lo que la obstrucción se considera nula, dando al factor de colmatación un valor de 0.

9.2.4.3. Suelo

Se usa para las áreas de biorretención. Las propiedades a definir son:

Espesor de la capa de suelo (*Thickness*) (mm): Valores típicos están en el rango de los 450 a 900 mm para áreas localizadas en calles o sobre el suelo directamente y sólo 75 a 150 mm para cubiertas vegetadas o *green roofs* (técnica no incluida en el estudio). Dado que es una calle por la que transcurren mucho cableado subterráneo de instalaciones y hay parkings y sótanos subterráneos, se ha escogido un espesor de sólo 500 mm.

Porosidad (*Porosity*): Fracción de espacios vacío presentes en el suelo. Como las áreas de biorretención son artificiales, el suelo a colocar sobre el que se sustentarán habrá de ser el idóneo para el crecimiento de la vegetación y favorecer la infiltración del agua, por ello el valor supuesto es una porosidad del 50%, la correspondiente a un suelo ideal.

Capacidad de campo (*Field Capacity*): Relación del volumen de agua en los poros con el volumen total después de que el suelo haya sido completamente drenado. Debajo de este nivel, el drenaje vertical de agua a través de la capa de suelo no se produce. Al igual que ocurría con la porosidad, el valor de la capacidad de campo escogido se corresponde con un suelo tipo limoso que favorece la captación de agua por parte de las plantas. Este valor es del 20% (fuente: Alain Huetz de Lempis).

Punto de marchitez (*Wilting Point*): Volumen de agua de los poros en relación al volumen total de un suelo bien seco en el que sólo queda agua tan fuertemente retenida que no puede ser captada por las plantas. El contenido de humedad del suelo no puede caer por debajo de este límite. Como se trata de un caso hipotético, se ha dejado el valor que viene por defecto en el programa del 10%.

Conductividad Hidráulica (*Conductivity*) (mm/h): para el suelo completamente saturado. El valor escogido es el correspondiente a una marga arenosa, 11 mm/h.

Pendiente de Conductividad (*Conductivity Slope*): Pendiente media de la curva que relaciona la conductividad y la humedad del suelo (mm/h). Valores típicos en el rango van desde 5 para arenas a 15 para arcilla limosa. Se ha escogido un valor intermedio, de 10.

Altura de succión (*Suction Head*) (mm): El valor medio de succión capilar del suelo a lo largo del frente húmedo. Es el mismo parámetro que se usa en el modelo de infiltración Green-Ampt. En el suelo permeable de la fase actual tiene un valor que difiere del escogido para la técnica LID, ya que se trata de diferentes tipos de suelo. Como lo que se está buscando es un suelo “ideal” que favorezca el crecimiento vegetal, la altura de succión en este caso corresponderá a la de una marga-arenosa, 110 mm.

Porosidad, capacidad de campo, la conductividad y la pendiente de conductividad son las propiedades del suelo mismo que se utilizan para los objetos en el modelado de acuíferos de agua subterránea, mientras que altura de aspiración es el mismo parámetro

utilizado para la infiltración de Green-Ampt. Solo que aquí se aplican a la mezcla de tierra especial que se utiliza en una unidad de LID en lugar de la sitio natural del suelo.

9.2.4.4. Almacenamiento

La aplicación de la capa “almacenamiento” sirve para describir las propiedades de la grava utilizada en las áreas de bio-retención y en los pavimentos porosos y zanjas de infiltración como un fondo de almacenamiento y/o capa de drenaje; y también se utiliza para especificar la altura de un barril de lluvia (o cisterna). Los campos de datos a rellenar que requiere la aplicación son:

Altura (*Height*) (mm): Esto es la altura de un depósito pluvial o el grosor de una capa de grava (pulgadas o mm). La piedra triturada y las capas de grava tienen típicamente un espesor de 150 a 450 mm, mientras que los depósitos de lluvia de una casa unifamiliar varían en altura desde los 600 a los 900 mm. Como el exceso de profundidad es un limitante, ya que bajo el suelo de la zona de estudio también discurren cables de instalaciones, el grosor de la capa de grava será el mínimo de los posibles, 150 mm.

Relación de huecos (*Void Ratio*): Volumen de espacios vacíos en relación con el volumen de sólidos en la capa. Valores típicos para lechos de gravas oscilan desde 0,5 a 0,75. Puesto que lo que se pretende es conseguir el máximo de almacenamiento, y ya que hay otros parámetros limitantes que no dejan margen a la elección, como son los relacionados con la profundidad de la técnica LID, en este caso se coge el valor máximo, 0,75, que es el más favorable a la capacidad de almacenamiento.

Tasa de infiltración (*Filtration Rate*) (mm/hora): Es la velocidad a la que el agua se infiltra en el suelo original por debajo de la capa de almacenamiento. Normalmente, esto equivale a la conductividad hidráulica saturada de la cuenca circundante si se está utilizando el método de infiltración Green-Ampt o a la tasa de infiltración mínima para el caso de la infiltración de Horton. En el caso de que hubiera un suelo impermeable o un revestimiento debajo de la capa se utilizaría un valor nulo. Aunque se está utilizando el modelo de Green-Ampt, el manual también propone valores comprendidos entre 250 y 750 mm/h, más altos que los que se estaban usando en dicho método y puesto que se trata de un caso hipotético, se toma un valor óptimo de 500 mm/h y se supone que no existe ninguna capa impermeable debajo, lo cual es cierto en las condiciones actuales.

Factor de colmatación (Clogging Factor): Volumen total de escorrentía tratada que se precisa para colmatar completamente el fondo de la capa de almacenamiento dividido por el volumen de huecos de dicha capa. La colmatación reduce progresivamente la tasa de infiltración en proporción directa con el volumen acumulado de escorrentía de tratada y sólo será de interés en las zanjas de infiltración con fondo permeable. Para ignorar la obstrucción, puesto que se trataría de unas TDUS recién implantadas, se ha usado un valor de 0.

9.2.4.5. Desagüe inferior

Las capas de almacenamiento pueden contener un sistema opcional de desagüe inferior que recoge el agua almacenada en la parte inferior de la capa y lo transporta a un sistema convencional drenaje. Las propiedades de este sistema demandadas por el programa para su simulación son:

Coefficiente de drenaje y exponente de drenaje (Drain Coefficient and Drain Exponent): Coeficiente C y exponente n que determinan la tasa de flujo a través del desagüe en función de la altura del agua almacenada por encima de la cota del desagüe. La siguiente ecuación se utiliza para calcular el caudal de salida (por unidad de superficie de la TDUS):

$$q = C(h - H_d)^n$$

Ecuación 9.2

donde:

q es el flujo de salida (mm / hr),

h la altura de agua almacenada (mm),

H_d es la altura del desagüe.

En los casos en los que no exista una un desagüe inferior, C es nulo. El valor típico para n sería de 0,5, es decir haciendo actuar al desagüe como un orificio. Con ese valor, se puede estimar un valor aproximado de C basado en el tiempo T necesario para drenar a una profundidad D , como se ve en la estimación del caudal de salida:

$$C = 2D^{1/2}/T$$

Ecuación 9.3

En principio no se establece una salida por desagüe, por lo que el valor de C es 0.

Altura de compensación de drenaje (*Drain Offset Height*) (mm): La altura de cualquier tubería de desagüe inferior sobre el fondo de una capa de almacenamiento o de un depósito de lluvia. Como no se disponen de tuberías de desagüe ni de depósitos de lluvia, el valor de este parámetro es nulo.

Mediante esta herramienta se han diseñado las técnicas LIDs de este estudio: Un área de biorretención igual para todas las Subcuencas y unos pavimentos permeables y cunetas verdes específicos para cada una de ellas, que tienen todos los parámetros definitorios de las capas de diseño iguales salvo el de la pendiente, que se ajusta a cada tramo de la calle en el que se hayan situados.

9.2.5. Las herramientas *LID Group Editor* y *LID Usage Editor*

9.2.5.1. *LID Group Editor*

Esta herramienta se utiliza para identificar un grupo de técnicas LID previamente definidas que serán colocados dentro de la cuenca, el tamaño de cada una de ellas, y qué porcentaje de escorrentía de la parte de la cuenca donde no hay implantada una técnica LID debe tratar cada una.

A partir de las características de las cuencas se pueden añadir, editar o eliminar las técnicas presentes en cada una de las cuencas la misma.

En todas las subcuencas hay más de una técnica diferente, en las número 5 y 7 se presentan áreas de biorretención, pavimentos porosos modulares y continuos, mientras que en el resto, además de las técnicas descritas aparecen también cunetas verdes.

Como ejemplo de presentación de esta herramienta del SWMM5.022, se muestra la siguiente tabla en la que aparecen las técnicas por subcuenca.

SC	Nombre de la técnica LID	Tipo técnica LID	% Área que ocupa en la SC	% Área impermeable que trata	Archivo de informe detallado
SC 1	AB	Área de Biorretención	5,57	13,6	-
	PP_CONT_SC1	Pavimento poroso continuo	20,9	0	-
	PP_MOD_SC1	Pavimento poroso modular	18,6	0	-
	CV_SC1	Cuneta Verde	6,58	7,86	-

Tabla 9.3.LID Group Editor en subcuenca 1.

En la simulación con las TDUS, se ha definido una tipología de área de biorretención común para todas las SCs, sólo varía en el número que se presenta y la extensión que ocupa, parámetros que se definen dentro del “*Group Editor*”. Y aunque podría haber ocurrido lo mismo con el resto de las técnicas, había un factor que las hacía diferentes en su primera caracterización dentro del “*LID Control Editor*”. Ese factor es la pendiente, distinta en cada una de las subcuencas, por ello los pavimentos permeables y las cunetas verdes se han definido uno por uno, de forma específica, para cada una de ellas.

9.2.5.2. *LID Usage Editor*

El “*LID Usage Editor*” se abre desde el “*Editor de grupo LID*” en la pestaña de las cuencas para especificar cómo una técnica LID particular será desarrollada, es decir, cómo funcionará dentro de la cuenca. Contiene los siguientes campos de datos de entrada:

Nombre (*Control Name*):

Es el nombre de una técnica LID previamente definido para ser utilizado en la cuenca.

Número de unidades iguales (*Number of Replicate Units*): Número de unidades del mismo tamaño de LID (por ejemplo, el número de depósitos de lluvia o de áreas de biorretención) desplegados en la subcuenca. En realidad, no existen dos unidades de ninguna de las técnicas que tengan las mismas dimensiones, aunque sí similares, por lo que, para no acumular varias técnicas diferentes en cada SC, se ha hecho una media entre el número de técnicas del mismo tipo.

Área de cada unidad (*Area of Each Unit*): La superficie dedicada a cada unidad igual de LID en metros cuadrados. Si la ventana “*LID Occupies Full Subcatchment*” está activada, entonces este campo queda incapacitado y dividirá el total del área de la subcuenca entre el número de LID iguales. La etiqueta debajo de este campo indica la cantidad de área total de cuenca se dedica a un LID concreto y se actualiza cuando se realizan cambios en el número de unidades y el área de cada unidad.

Anchura máxima de la superficie del flujo de salida superficial (*Top Width of Overland Flow Surface*): Anchura del flujo a la salida de cada unidad LID idéntica (metros). Este parámetro sólo se aplica a pavimentos porosos y cunetas verdes, ya que utilizan el flujo para transmitir el escurrimiento superficial de la unidad. Los otros procesos LID, tales como las áreas de biorretención y las zanjas de infiltración

simplemente desbordan el exceso de escorrentía captada a lo largo de sus bermas. Como no en todos los casos tienen igual valor se ha escogido un valor medio por cada técnica dentro de cada subcuenca.

% Saturado Inicialmente (*% Initially Saturated*): Para las áreas de biorretención, éste es el grado de llenado inicial de agua (0% de saturación corresponde a la humedad del punto de marchitez, la saturación del 100% es la que tiene el contenido de humedad igual a la porosidad). La zona de almacenamiento debajo de la zona del suelo del área de biorretención se supone que es completamente seca. Para otros tipos de LID se corresponde con el grado de llenado de agua en el que está su zona de almacenamiento inicialmente. Aquí se ha dejado el valor que viene por defecto en el programa.

% Área impermeable tratada (*% of Impervious Area Treated*): Porcentaje de la superficie impermeable del área de la subcuenca que no contiene técnicas LID, cuya escorrentía se trata con las técnicas de drenaje urbano sostenible. Si la unidad LID trata sólo la lluvia directa, como ocurre con las cubiertas vegetadas, este valor es 0. Y si la técnica LID ocupa la cuenca entera, este campo ha de ser ignorado. Para calcular esta área se ha tendido en cuenta la pendiente longitudinal dentro de cada cuenca, el bombeo de la calzada y el tipo de LID. Como los pavimentos porosos o permeables son zonas de tránsito de peatones, no recibirán agua de las zonas impermeables colindantes, ya que podrían llegar a tener una lámina de agua superficial creando problemas a los viandantes. Donde sí que se prevé que irá a parar parte de la escorrentía de las zonas impermeables serán a las AB (áreas de biorretención) y CV (cunetas verdes).

Flujo de salida que va al área permeable (*Send Outflow to Pervious Area*): Se selecciona esta opción si el flujo de salida de la LID se devuelve a la zona permeable de la cuenca, en lugar de ir al punto de vertido de la cuenca. Un ejemplo de donde se podría aplicar esto sería un barril de lluvia cuyo contenido se utiliza para el riego de una zona de césped. Este campo se ignora si la unidad LID ocupa la cuenca entera. En este caso de estudio, el flujo de salida va al punto de vertido de la cuenca, es decir no se consideran aprovechadas las salidas de la escorrentía tras pasar por las TDUS, sino que pasan directamente a la red de alcantarillado.

Archivo de informe detallado (*Detailed Report File*): Nombre de un archivo opcional donde aparecen los resultados detallados con una serie temporal. Éste es un

archivo de texto que puede abrirse fuera del programa con cualquier programa edito de texto u hoja de cálculo. No se ha utilizado en este estudio.

SC	Nombre de la técnica LID	% Área que ocupa en la SC	%Área impermeable que trata	Nº de unidades	Área de cada unidad	Anchura del flujo a la salida de cada unidad (m)
1	AB	5,57	13,60	2	167,61	-
	PP_CONT_SC1	20,90	0	2	629,52	6
	PP_MOD_SC1	18,60	0	2	559,55	5
	CV_SC1	6,58	7,86	2	197,95	2
2	AB	6,61	24,70	4	132,15	-
	PP_CONT_SC2	17,90	0	4	357,95	6
	PP_MOD_SC2	12,10	0	2	484,60	4
	CV_SC2	5,93	7,31	3	158,29	2
3	AB	8,24	19,39	2	290,11	-
	PP_CONT_SC3	9,90	0	1	696,74	6
	PP_MOD_SC3	16,10	0	2	565,30	5
	CV_SC3	5,87	16,70	2	206,74	2
4	AB	5,89	20,9	2	235,44	-
	PP_CONT_SC4	8,18	0	1	654,31	6
	PP_MOD_SC4	15,4	0	2	616,61	5
	CV_SC4	1,84	2,5	2	146,88	2
5	AB	16,4	15,73	2	1145,82	-
	PP_CONT_SC5	30,30	0	3	1412,9	10
	PP_MOD_SC5	0,15	0	1	21,54	3
6	AB	10,50	14,64	5	196,69	-
	PP_CONT_SC6	14,20	0	2	666,28	13
	PP_MOD_SC6	26,30	0	2	1238,18	6
	CV_SC6	1,83	10,54	1	171,78	2
7	AB	28,20	18,39	3	865,38	-
	PP_CONT_SC7	14,80	0	1	1361,56	10
	PP_MOD_SC7	35,3	0	2	1624,61	5
8	AB	30,00	12,75	3	2558,35	-
	PP_CONT_SC8	13,10	0	1	3361,74	10
	PP_MOD_SC8	13,50	0	1	3456,74	10

Tabla 9.4.Principales valores requeridos en LID Usage Editor.

9.2.6. Resultados LID

El Informe de Estado resultante de la simulación con SWMM contiene una sección titulada *Resumen del rendimiento LID* en la que se ofrece un balance total de agua para cada técnica LID ubicada en cada cuenca. Los componentes de este balance de agua incluyen el total de entradas, la infiltración, evaporación, la escorrentía superficial, el flujo de desagüe inferior y volúmenes almacenados inicial y final, expresado en mm sobre el área ocupada por la unidad LID. En este trabajo no se han contemplado ni la

evaporación ni un almacenamiento inicial, por lo que su valor es 0 en todas las TDUS y el valor drenado también.

SC	LID Control	Caudal entrante total (mm)	Pérdidas por infiltración (mm)	Caudal superficial de salida total (mm)	Almacenamiento final (mm)	%Error
1	CV_SC1	92,11	24,72	67,49	0,00	-0,12
	PP_MOD_SC1	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	PP_CONT_SC1	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	AB	112,85	11,65	0,00	101,36	-0,15
2	CV_SC2	101,15	25,64	75,60	0,00	-0,09
	PP_MOD_SC2	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	PP_CONT_SC2	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	AB	160,05	19,96	0,00	140,28	-0,13
3	CV_SC3	144,91	28,96	115,95	0,00	-0,01
	PP_MOD_SC3	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	PP_CONT_SC3	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	AB	132,36	14,93	0,00	117,60	-0,13
4	CV_SC4	117,97	27,60	90,43	0,00	-0,05
	PP_MOD_SC4	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	PP_CONT_SC4	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	AB	191,49	24,99	0,00	166,75	-0,13
5	PP_MOD_SC5	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	PP_CONT_SC5	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	AB	91,55	8,53	0,00	83,18	-0,18
6	CV_SC6	163,79	21,29	142,49	0,00	0,01
	PP_MOD_SC6	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	PP_CONT_SC6	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	AB	94,42	8,94	0,00	85,65	-0,17
7	PP_MOD_SC7	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	PP_CONT_SC7	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	AB	74,41	6,46	0,00	68,12	-0,22
8	PP_MOD_SC8	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	PP_CONT_SC8	72,20	72,35	0,00	0,00	-0,21
	AB	77,90	6,84	0,00	71,22	-0,21

Tabla 9.5. Resumen del rendimiento LID

10. CALIDAD DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA

Para simular la evolución de los contaminantes en las situaciones a comparar, se va a usar también el programa de la USEPA SWMM. Este software simula la calidad del agua de escorrentía a partir de la siguiente información de entrada: Contaminantes, Usos del Suelo y Tratamiento.

En este programa, el modelo de calidad del agua (*Water Quality Routing*) dentro de los conductos se analiza asumiendo que éste se comporta como un tanque de mezcla completa (*Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR*) y no como un reactor de flujo en pistón (*US-EPA, 2005*), lo que en un principio parecería una suposición más realista. Pero las diferencias entre ambas conceptualizaciones son pequeñas, los tiempos de reacción de los contaminantes son mucho mayores que los tiempos de viaje, por lo que esta metodología es válida. Las concentraciones de los contaminantes considerados se calculan en el extremo final de cada conducto, para un determinado instante de tiempo, mediante la integración de la ecuación de conservación de la masa, utilizando valores medios para las magnitudes que varían a lo largo del tiempo, tales como el caudal y el volumen de agua.

Las capacidades de SWMM 5.0 en la modelación de la Calidad de las aguas se pueden resumir en los puntos:

1. Acumulación de contaminantes sobre la superficie de las subcuencas (*Buildup*).
2. Remoción de contaminantes durante episodios de lluvia (*Washoff*).
3. Reducción en la acumulación de contaminantes debido a limpieza de calles.
4. Reducción de contaminantes en la escorrentía debido a BMP's.
5. Propagación de los contaminantes a través de la red de drenaje.
6. Funciones de tratamiento (que son definidas por el usuario).

Pero hay que considerar que SWMM 5.0 no contempla en su módulo de calidad la influencia los procesos de sedimentación, re-suspensión y transporte de sólidos y contaminantes asociados, dentro de los conductos del alcantarillado.

10.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO

En la realización de la simulación de la calidad se han seguido los siguientes pasos:

1. Se han identificado los elementos contaminantes a analizar junto con sus concentraciones.

2. Se han definido los usos del suelo en cada una de las subcuencas.
3. Se han seleccionado los parámetros de las funciones de acumulación y arrastre que determinan la calidad derivada de la escorrentía de cada tipo de uso del terreno.
4. Se han determinado los porcentajes de reducción en la fase prevista debido a la presencia de BMP o técnicas LID.
5. Se ha realizado la simulación para la fase actual y la fase prevista comparando los resultados finales de acumulación y arrastre de los contaminantes.

En este estudio se va a realizar una comparativa de la evolución de la contaminación en un sistema sin y con TDUS, para ello se han escogido unos valores de reducción asociados a las BMP que vienen explicados más adelante. Pero no se han determinado funciones de tratamiento en ningún nodo, ya que la única variación en las concentraciones de contaminantes se va a deber a la presencia de BMP.

10.2. ELEMENTOS CONTAMINANTES CONSIDERADOS

Los elementos contaminantes más frecuentes presentes en las aguas de escorrentía urbana son los expuestos en el capítulo “3. *Procesos de tratamiento y eliminación de contaminantes*”. Como ahí se señala, todas las sustancias susceptibles de ser contaminantes pueden encontrarse en un rango amplio de concentraciones. Esto es debido a varios factores, como serían los usos del suelo, la frecuencia de limpieza de las calles o el número de días secos entre tormentas.

Para su estudio, el programa dispone del objeto *Pollutant*, que simula la generación, la entrada en la red, y la propagación de los contaminantes especificados. En este trabajo se va a considerar que el agua de lluvia arrastra una pequeña cantidad de contaminantes (*Seco, 2010*). Y dado que no es posible la conexión con el acuífero subterráneo de la zona, el valor procedente de la interrelación con las aguas subterráneas se va a considerar nulo. Así que se parte de la base de que los agentes contaminantes se encuentran sobre la superficie del suelo por deposición previa y por arrastre en la precipitación.

Contaminante	Concentración estimada en el agua de precipitación (mg/l)
TSS	8*
DBO ₅	7*
TP	0,001**
TKN	0,02*
TCu	0,001**
TCr	0,001**
TNi	0,001**
TPb	0,001**
TZn	0,001**

Tabla 10.1. Concentración de los contaminantes en el agua de lluvia (mg/l). *: Seco (2010). **: Valores supuestos por ser desconocidos.

Para realizar la simulación es necesario definir una acumulación inicial de los contaminantes que serán arrastrados durante el período de lluvia. El programa da dos opciones para ello, se puede especificar el número de días sin lluvia que concurren justo antes de la simulación o concretar la masa acumulada en cada una de las cuencas. Como la concentración inicial al inicio del episodio de lluvia es desconocida, se ha optado por determinar el número previo de días sin lluvia. En este caso, se han asumido cinco días, puesto que, según la AEMET, el número medio de días de lluvia al mes para la ciudad de Barcelona es de 6 días. Así que se han supuesto esos días repartidos uniformemente a lo largo del mes lo que equivaldría a cinco días secos entre días con lluvia.

La modelación de la presencia de contaminantes asociados a los sólidos se puede realizar fijando una relación de proporcionalidad entre las cantidades totales de sólidos suspendidos y las cantidades de un determinado contaminante. Esta relación se muestra en la siguiente tabla:

Contaminante	Porcentaje en Peso del Total de Sólidos (TSS)
TSS	100%
DBO ₅	14,5%*
TP	0,06%
TKN	0,02%
TCu	0,01%
TCr	0,01%
TNi	0,02%
TPb	1,20%
TZn	0,15%

Tabla 10.2. Porcentaje en peso de los contaminantes acumulados en las calles, en referencia a los sólidos suspendidos totales. Fuente: Shaheen, 1975.*Valor obtenido empíricamente (Manuel Gómez).

Ya que el estudio es de la evolución de los contaminantes en el agua de escorrentía superficial urbana, no se han incluido los aportes de los edificios de la avenida, por lo tanto no se incorpora al estudio el aporte de aguas negras, aunque se trate de una red unitaria.

Para simular la calidad en la situación actual, la entrada de datos de contaminantes ha sido muy sencilla, simplemente se ha establecido el valor de los TSS, sólidos totales en suspensión, y el resto de elementos se han asociado como parte porcentual del mismo (*co-Pollutant*).

Pero en el caso del sistema con TDUS, se han tenido que introducir las concentraciones iniciales de los contaminantes de forma independiente ya que si no después no se podía calcular su disminución de forma independiente, ya que cada técnica tiene una eficacia de remoción diferente para cada contaminante.

10.3. USOS DEL SUELO QUE PREDOMINAN EN CADA SUBCUENCA

El tramo de estudio se encuentra en una parte de la ciudad residencial y comercial, pero con unas densidades de tráfico mucho mayores a las que corresponderían a ese tipo de usos, puesto que la calle es una de las arterias más importante de la ciudad y su principal función es facilitar y descongestionar la circulación del Eixample.

En cada una de las subcuencas se pueden distinguir diferentes tipos de subáreas diferentes:

- Zonas impermeables: Aceras de baldosas, calzada asfaltada, pavimento peatonal de hormigón.
- Zonas permeables: Franjas arboladas o ajardinadas.

En la propuesta hecha, se invierte esto, las partes permeables pasan a ser tres (aceras y pavimento hormigonado pasan a ser pavimentos porosos), quedando una impermeable (la calzada asfaltada).

El programa SWMM permite crear para cada subcuenca una combinación de distintos tipos de usos del suelo, asignando a cada uso el porcentaje de ocupación que tiene dentro de la subcuenca. El enfoque que se va a hacer de esta herramienta es diferente para la parte actual y para la prevista, ya que en la primera no hay TDUS o BMP y en la

segunda hay varias propuestas con % de eliminación diferentes cada una de ellas. Así que en la fase actual sólo se establecerá un uso del suelo común y en la fase prevista se establecerán varios.

10.3.1. Usos del suelo en la fase actual

Dada la homogeneidad de la superficie de toda el área de estudio, sólo se considera un tipo de uso del suelo, el urbano, caracterizado por una alta impermeabilización en calzada y aceras. Los valores con los que se va a simular la calidad del agua en el programa SWMM, vienen recogidos en las siguientes tablas.

Datos generales

USO DEL SUELO URBANO- Datos generales relacionados con la limpieza de la calle*	
Intervalo de limpieza de Calle (días)	7
Disponibilidad para la limpieza (%)	0,2
Última limpieza (días)	5

Tabla 10.3. - Datos de limpieza de la calle.

**Común a todos los tipos de usos del suelo en las dos fases antes/y después con SDUS.*

Datos de acumulación

Constituyen las propiedades asociadas a la acumulación de contaminantes sobre el terreno durante periodos de tiempo seco.

Para la simulación del fenómeno de acumulación hemos utilizado la expresión denominada Función Saturación en el SWMM. Esta función de acumulación tiene una tendencia lineal al inicio del periodo de acumulación, que luego va disminuyendo paulatinamente en el tiempo, hasta alcanzar un determinado valor de saturación. Esta función es bastante frecuente en Calidad de Aguas (ecuación de Michaelis – Menton) y se expresa mediante una ecuación de saturación de la contaminación sobre superficie:

$$B = \frac{C_1 \cdot t}{C_2 + t}$$

Ecuación 10.1

donde

C₁ es la acumulación máxima posible (masa por unidad de área)

C_2 es la constante semi-saturación (número de días necesario para alcanzar la mitad de la máxima acumulación posible).

Aunque la ciudad de Barcelona participara en el programa PROMEDSU, y registrase valores instantáneos de concentración de contaminantes, no se han encontrado los datos de acumulación de contaminantes necesarios para usarse en este trabajo, como por ejemplo la acumulación máxima posible por unidad de área. Además, en el resumen de los trabajos del programa (MMA, 2002) se especifica que los valores obtenidos para uno de los principales parámetros, DBO_5 , son erróneos y que la modelización de caudales requería de otra calibración que había sido imposible de realizar. Por ello es quizás que no aparecen ni resultados ni análisis para la ciudad de Barcelona, y en cambio sí que aparecen de las otras cuencas del estudio (Madrid, Sevilla, Valencia y Vitoria).

Así que, ante la falta de información de carga de contaminantes en el agua de escorrentía de la cuenca urbana de estudio, se han adoptado los valores de los coeficientes que fueran determinados mediante calibración y validación del modelo completo de Granollers (Riera, 2008). Se han cogido estos valores porque, al no encontrarse los de la ciudad de Barcelona, ésta era la localidad más cercana de la que se han podido obtener dichos valores calibrados y contrastados.

USO DEL SUELO URBANO- Datos de acumulación del contaminante TSS**	
Función de acumulación	SAT
Máxima acumulación posible (kg/ha)	150
Constante de saturación (días)	2,5
Variable de normalización	AREA

Tabla 10.4. Valores con los datos de acumulación de los sólidos suspendidos totales.

***El resto de los contaminantes se han contabilizado como una fracción de los TSS, así que no hay que definir nuevas funciones de acumulación. En el programa se asigna de qué elemento forman parte (es decir, cuál es su co-pollutant), y en qué porcentaje lo hacen.*

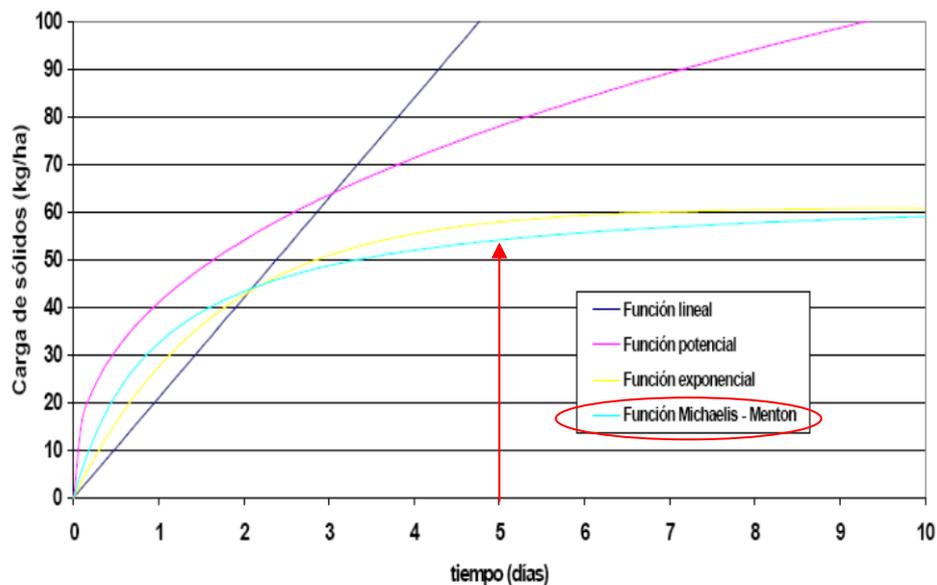


Gráfico 10.1. Evolución de la carga de contaminantes según las diferentes funciones de acumulación. Fuente: Gómez (año2007).

Datos de arrastre

Sirven para describir las propiedades asociadas a la limpieza y arrastre de contaminantes sobre el terreno durante eventos de tormenta.

En la modelización de este proceso de lavado de la superficie de la cuenca por efecto del escurrimiento de agua pluvial, se ha recurrido a una expresión de arrastre de los contaminantes de tipo exponencial:

$$W = c_1 \cdot q^{c_2} \cdot B$$

Ecuación 10.2

donde:

W es la carga de lavado,

q la escorrentía en mm/(h·ha),

B representa la cantidad de contaminante acumulado,

c_1 y c_2 son los coeficientes de lavado.

Igual que ocurría con la función de acumulación, al no haber datos de la carga contaminante a la salida de la cuenca urbana, se han adoptado los parámetros del modelo completo de Granollers (Riera, S. 2008).

USO DEL SUELO URBANO-Datos de arrastre del contaminante TSS	
Función de arrastre	EXP
Coefficiente	0,072
Exponente	2,5
Eficiencia de la limpieza (%)	20
Eficiencia BMP (%)	0

Tabla 10.5. Valores con los datos de arrastre de los sólidos suspendidos totales.

En el arrastre se produce como en el caso anterior, sólo se define la función para los TSS, el resto de los contaminantes son considerados como una fracción de los mismos.

10.3.2. Usos del suelo con SDUS

Como ya se mencionó anteriormente, el programa SWMM 5.0.022 sólo contabiliza la repercusión de los LID en la cantidad de caudal de escorrentía formado, no en su calidad. Pero, dentro del módulo *Usos del Suelo*, da la opción (la daba ya en anteriores versiones) de incluir el porcentaje de reducción en la concentración de los contaminantes presentes en el agua de escorrentía que se produce por la presencia de técnicas de drenaje urbano sostenible.

Por ello, en esta fase se han definido varios usos diferentes del suelo. El motivo es que cada una de las diferentes técnicas proyectadas tiene una eficacia de reducción diferente para cada uno de los contaminantes presentes en el agua de escorrentía. Para simplificar, a cada uso del suelo, se le ha dado el mismo nombre de la TDSU que contiene, con lo que en la fase prevista aparecen los siguientes usos del suelo:

- **Urbano**, para la parte del suelo no modificada, igual que en la fase actual.
- **PP**, para la franja de suelo ocupado por los pavimentos permeables continuos y modulares.
- **AB**, para las zonas ocupadas por áreas de biorretención.
- **CV**, para las superficies en las que se localizan las cunetas verdes.

Además los porcentajes de eliminación son específicos para cada uno de los contaminantes, así que en esta ocasión no se han podido contabilizar como parte de los TSS, sino que ha sido necesario redefinir las funciones de acumulación de arrastre de forma independiente para cada uno de ellos en cada nuevo uso del suelo. De no hacerlo así, el porcentaje de reducción sería el mismo para todos los contaminantes, el de los TSS.

En las nuevas ecuaciones de acumulación definidas para cada contaminante concreto, el único parámetro que varía en la función es la máxima acumulación posible. Ésta es la porción correspondiente según el porcentaje en peso del Total de Sólidos Suspendedos de cada elemento:

Contaminante	Máxima acumulación posible (kg/ha)
TSS	150
DBO ₅	21,75
TP	8,1
TKN	0,09
TCu	0,024
TCr	0,018
TNi	0,012
TPb	0,0285
TZn	1,80

Tabla 10.6. Valores de la máxima acumulación posible en la función de saturación de acumulación de contaminantes.

Los que sí se mantiene igual en todos los usos del suelo son los valores de limpieza viaria y la función exponencial de arrastre de los contaminantes, que conserva los mismos valores para el coeficiente, el exponente y la eficiencia de limpieza, variando, como se viene mencionando el % de eficiencia BMP.

En diferentes bibliografías aparecen distintos valores de estos porcentajes. La razón de que aparezcan porcentajes de reducción diferentes en una misma técnica y para un mismo contaminante, es que dependen de varios factores y circunstancias, como son las concentraciones de entrada, el número de tormentas que concurren, la localización de cada técnica, la forma en el que se calcula la eficiencia de la remoción de contaminantes, el tamaño y el uso del suelo de la cuenca contribuyente, la técnica o de seguimiento empleada, etc.

Los valores que se han escogido para el presente trabajo provienen de dos fuentes diferentes. La primera fuente es la publicación “*The National Pollutant Removal Performance Database, version 3*” (Center for Watershed Protection, 2006), que propone unos valores en base a unos estudios empíricos en varios sistemas de drenaje urbano sostenible. Las gráficas y las tablas de los resultados obtenidos en dicho estudio pueden verse en el Anejo 4 Calidad. La otra fuente es el libro “*Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano.*” (CEDEX, 2008), que propone unos valores generales de eliminación, y se ha empleado para aquellos elementos contaminantes de los que no había datos registrados

en la primera fuente. Finalmente indicar, que no se han encontrado valores de reducción para la DBO₅, por lo que se ha supuesto una hipotética eliminación del 70% de este tipo de contaminación común a todas las técnicas.

	TSS	DBO ₅	TP	TKN	TCu	TCr	TNi	TPb	TZn
AB	59*	70***	5*	46*	81*	80**	80**	80**	79*
PP	86*	70***	59*	32*	37*	60**	60**	60**	87*
CV	81*	70***	24*	56*	65*	40**	40**	40**	71*

Tabla 10.7. Valores con los porcentajes de eliminación de contaminantes debido a la presencia de TDUS.

*Fuente: Center for Watershed Protection. ** Fuente: CEDEX. *** Valor supuesto dada la carencia de información

Pero por muy alta que sea la efectividad en la reducción de contaminantes de una técnica, la concentración del mismo nunca llega a ser nula. El término "concentración irreductible" (Schueler 2000) representa a la menor concentración de efluentes para un determinado parámetro que se puede conseguir usando técnicas LID's. Y estos valores de máxima reducción que se pueden obtener son:

Contaminante	Concentración irreductible
TSS	20-40 mg/l
TP	0,15-0,2 mg/l
Nitrógeno total	1,9 mg/l
Nitratos	0,7 mg/l
TKN	1,2 mg/l

Tabla 10.8. Valores mínimos que pueden alcanzarse en la concentración de algunos contaminantes. Fuente: Schueler 2000.

En el subcapítulo "11.3. Simulación con colectores hipotéticos de 1m de diámetro", se analiza la evolución de los contaminantes y los valores que se alcanzan tanto en el caso de la no presencia de TDUS como en la situación hipotética de que sí estuviesen instaladas.

11.SIMULACIONES CON EL PROGRAMA SWMM 5.0.022

En este último capítulo antes de las conclusiones se comparan los resultados tanto hidráulicos como de calidad entre un medio ordinario en el que, aunque hay presencia de zonas verdes, éstas no se integran formando parte de ningún SDUS, y otro en el que se han implantado tres técnicas diferentes de drenaje urbano sostenible.

En las simulaciones sólo se ha trabajado con los caudales del agua recogida, única y exclusivamente en la calle, no se ha incluido el agua procedente de los edificios colindantes, por lo que no hay aportes de aguas negras. Tampoco de las calles que cruzan esa zona de la Diagonal. El caudal de estudio procede únicamente de la precipitación sobre los tramos de estudio.

Aunque todas las simulaciones tienen una duración de 10 horas, en la presentación gráfica de resultados se han cortado las colas porque, después de aproximadamente hora y media, los resultados volvían a estabilizarse tras darse los picos del polutograma y del hidrograma. Acercándose al valor nulo en el caso del caudal, y disminuyendo considerablemente los valores de la contaminación, que en algunos casos llega a cero y en otros (Tramo 2 con SDUS) acaban en valores muy reducidos.

Este capítulo se divide en cuatro subtítulos con objeto de analizar por separado:

- La Simulación Hidrológica, diferencias en la esorrentía y calidad del agua en las cuencas.
- La Simulación Hidráulica, comparativa de caudales dentro de la red de drenaje, que se ha realizado simulando con la red de colectores que hay presentes en la actualidad.
- La Simulación de la Calidad del agua, comparativa de valores que se ha realizado sustituyendo en la simulación los colectores reales por tubos de 1 metro de diámetro, ya que, usando los colectores reales, el error de cálculo era muy alto.
- Una Simulación con la nueva situación en la que hubiese un sistema de colectores específico asociado a los SDUS implantados.

11.1. SIMULACIÓN HIDROLÓGICA: ANÁLISIS DE LAS DIFERENCIAS DE CAUDAL Y CALIDAD DEL AGUA DE ESCORRENTÍA

11.1.1. Resultados de la escorrentía

La precipitación total caída es de 72,2 mm en todas las subcuencas ya que se ha considerado una única lluvia de diseño para todas ellas, dada la escasa extensión y cercanía espacial de las mismas. Pero de esa cantidad de agua, la que se transforma en escorrentía es diferente en cada subcuenca ya que las superficies y las propiedades del suelo y por consiguiente, la cantidad de agua que se infiltra también son distintas (hay que recordar que no se ha considerado el fenómeno de evaporación y que la interceptación no es igual en todos los casos).

Así que, partiendo de una misma cantidad de lluvia precipitada en ambos sistemas, con y sin SDUS, se puede valorar la disminución en los caudales de escorrentía que supone la implantación de las TDUS. En la siguiente tabla se muestran los resultados finales de la simulación hidrológica por subcuenca, en la situación real, la situación proyectada y el tanto por ciento de diferencia de los valores finales. La infiltración aumenta de forma notable, mientras que como consecuencia directa de este aumento, caudal y escorrentía sufren un fuerte descenso.

Subcuencas		Infiltración total (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal pico (l/s)	Coefficiente de escorrentía
1	Sin SDUS	2,53	68,44	300,45	0,95
	Con SDUS	44,920	21,500	75,770	0,298
Variación		94,37%	68,59%	74,78%	68,57%
2	Sin SDUS	0,97	70,14	361,65	0,97
	Con SDUS	38,760	23,920	105,310	0,331
Variación		97,50%	65,90%	70,88%	65,91%
3	Sin SDUS	3,80	67,21	347,09	0,93
	Con SDUS	35,200	27,020	106,670	0,374
Variación		89,20%	59,80%	69,27%	59,83%
4	Sin SDUS	2,73	68,39	345,35	0,95
	Con SDUS	31,220	30,760	149,830	0,426
Variación		91,26%	55,02%	56,62%	55,02%
5	Sin SDUS	10,86	60,35	468,86	0,84
	Con SDUS	40,890	17,490	169,200	0,242
Variación		73,44%	71,02%	63,91%	71,05%

Subcuencas		Infiltración total (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal pico (l/s)	Coefficiente de escorrentía
6	Sin SDUS	4,51	66,36	492,45	0,92
	Con SDUS	44,430	18,690	113,840	0,259
Variación		89,85%	71,84%	76,88%	71,82%
7	Sin SDUS	18,80	52,34	355,20	0,73
	Con SDUS	49,730	3,330	22,800	0,046
Variación		62,20%	93,64%	93,58%	93,66%
8	Sin SDUS	18,44	52,81	568,95	0,73
	Con SDUS	37,720	13,010	149,240	0,180
Variación		51,11%	75,36%	73,77%	75,38%

Tabla 11.1. Tabla Cuencas. Valores de infiltración y escorrentía total junto con picos de caudal y coeficiente de escorrentía.

Como conclusión de los resultados representados en la *Tabla 11.1* hay que señalar que la cantidad total de agua que escurre por la cuenca, el coeficiente de escorrentía y el pico del caudal disminuyen a más de la mitad, y esto es debido al importante aumento de la permeabilidad en el suelo en la situación prevista por la presencia de las TDUS. La subcuenca donde se produce una menor disminución de la escorrentía, de su coeficiente y del caudal pico es la número 4 y en la que más, la 7. Aunque la variación de la escorrentía está directamente relacionada con el aumento de la infiltración, no es en las cuencas donde más ha aumentado la infiltración donde más se ha reducido el caudal y la escorrentía total. La SC 2, que ha pasado de ser altamente impermeable a permeable, es la que más ha acrecentado el porcentaje de agua que se infiltra, en cambio la que menos, con sólo un incremento de poco más del 50%, es la SC 8, puesto que ya en su fase inicial poseía buena parte de su suelo permeable y el cambio en la tipología del suelo no ha sido tan sustancial.

En el esquema contiguo se puede apreciar de una forma más visual las disminuciones en escorrentía y los aumentos en infiltración que suponen los LID's. Ahí se ve claramente cómo la SC7 es, con diferencia, la que más se ve afectada, como también puede observarse el significativo incremento de la infiltración. Esta subcuenca, en ambos sistemas es la que menor cantidad de escorrentía produce en ambos sistemas. La SC 2 es, en la situación actual, la que mayor volumen de agua acumulada produce, pero instalando las TDUS sería la que mayor pérdidas por infiltración tendría, por lo que en la situación prevista ya no sería la subcuenca con más escorrentía, sino que ocuparía el tercer puesto.

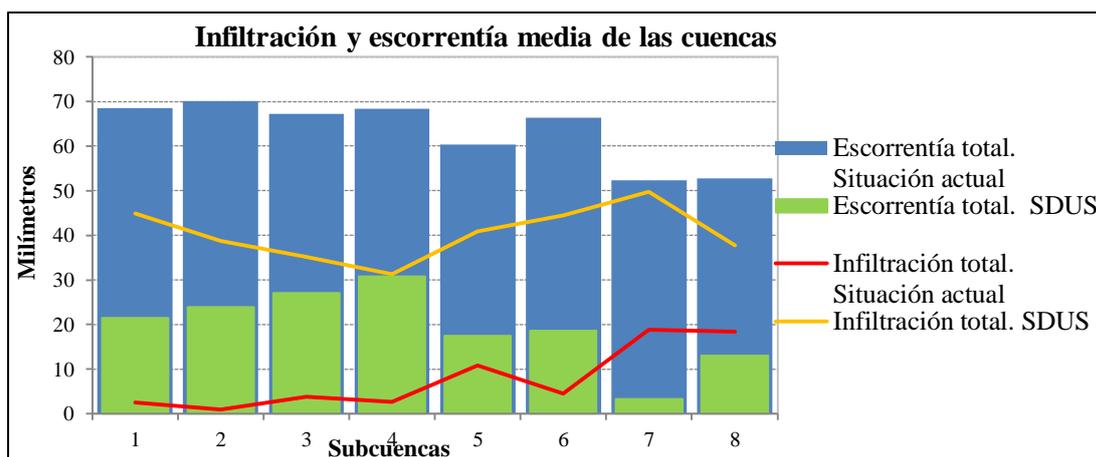


Gráfico 11.1. Valores totales en milímetros de escorrentía e infiltración por subcuenca. Fuente: Elaboración propia.

Como resumen de los resultados hidrológicos globales obtenidos, se presenta la tabla con los valores medios de los dos sistemas:

Sistema	Infiltración total (mm)	Escorrentía total (mm)	Caudal pico (LPS)	Coefficiente de escorrentía
Sistema de drenaje tradicional	7,83	63,255	405	0,88
Sistema de drenaje urbano sostenible	40,36	19,47	111,58	0,27
Variación	80,60%	69,23%	72,45%	69,24%

Tabla 11.2. Valores medios de los sistemas tradicional y con SDUS de infiltración y escorrentía total junto con picos de caudal y coeficiente de escorrentía.

El SDUS es capaz de reducir (según simulación) en algo más de dos terceras partes la cantidad de agua de escorrentía producida. Esto puede considerarse como una ventaja en la gestión de las aguas pluviales de la ciudad, puesto que se disminuye de forma importante la aportación de ese tramo de la Diagonal a la red de drenaje actual, pudiendo prevenir posibles colapsos o entradas en carga en la misma. Puesto que como se ha dicho, en el estudio sólo se ha considerado el aporte de esa zona de la calle, pero a la red de drenaje desembocan las aguas de todas las zonas colindantes, más las de los edificios, que incluyen aguas negras y la que se recoge en las azoteas en los episodios de lluvias, llevando durante esos episodios un importante caudal.

11.1.2. Resultados de calidad

Lo mencionado hasta el momento sobre la hidrología de las subcuencas, era relativo únicamente cantidad de agua generada en la zona de estudio. Ahora se va a pasar a analizar otro componente que se ve también seriamente afectado y es muy importante en términos de gestión y tratamiento de aguas urbanas, la calidad.

Aunque el programa aún no incluye dentro de sus herramientas LID's ninguna especificación sobre calidad, sí que se puede hacer un estudio de su evolución y cambio incluyendo un SDUS desde las herramientas de usos del suelo. Ahí se contiene un apartado en el que indicar el grado de disminución que padecerá la concentración de un determinado contaminante por la existencia de una TDUS.

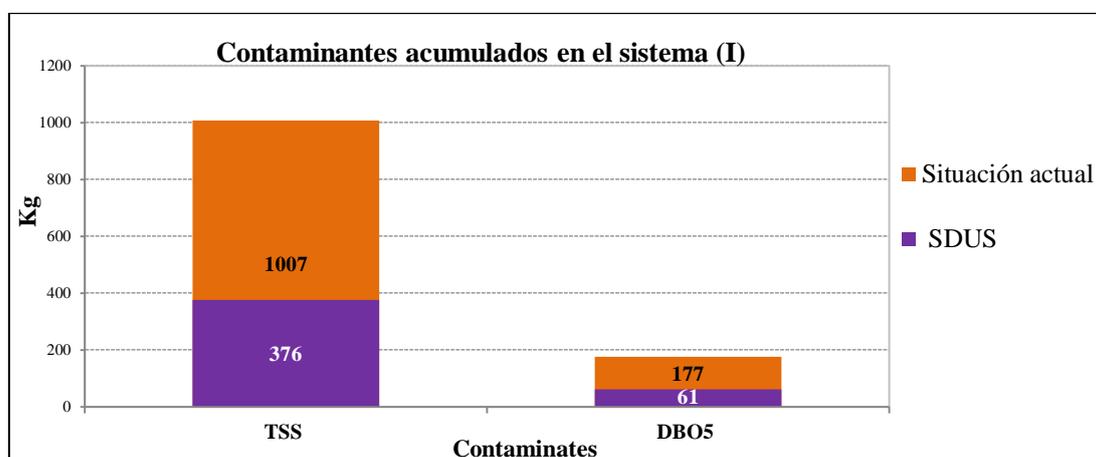


Gráfico 11.2. Sólidos suspendidos totales y DBO5 acumulados en los sistemas. Las cifras son los kilos que hay al final de cada simulación. Fuente: Elaboración propia.

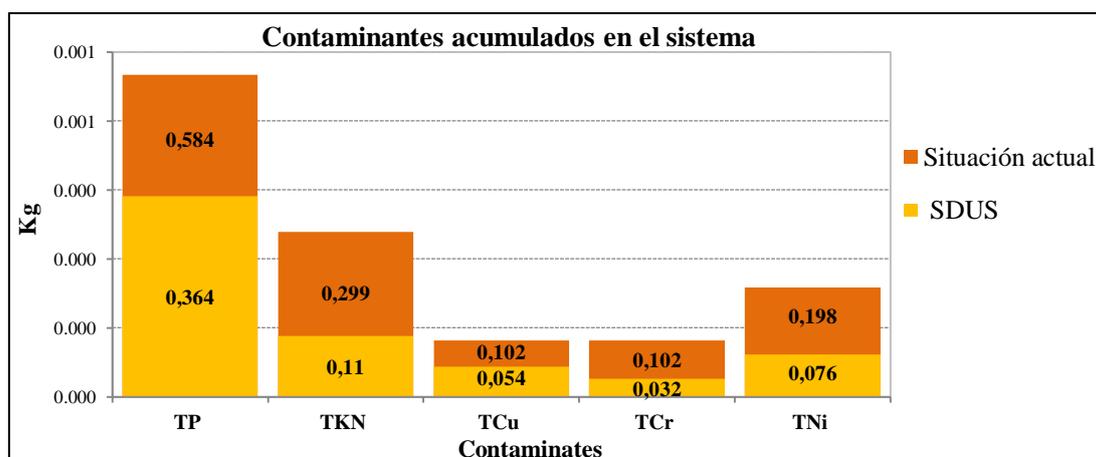


Gráfico 11.3. Contaminación acumulada en cada uno de los sistemas por elemento contaminante minoritario. Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de sólidos totales que se acumulan en un sistema carente de LID's alcanza la tonelada, mientras que con un SDUS es algo más de un tercio. En igual proporción disminuye la DBO₅. En cambio esas proporciones son más variables entre los contaminantes minoritarios, que van desde algo menos de un tercio hasta los dos tercios en el caso del fósforo, elemento minoritario que menos se ve afectado por las TDUS.

Lo visto hasta ahora en el estudio de las cuencas han sido los resultados totales al final de cada simulación. Pero más interesante es observar la evolución de los caudales de escorrentía y de las concentraciones a lo largo del tiempo. Por ello, a modo de ejemplo, se muestran a continuación el hidrograma y los polutogramas durante las primeras cuatro horas de la última de las subcuencas del tramo 1, la número 6. El resto de los gráficos de las otras cuencas pueden verse en el Anejo 5- Resultados de la simulación.

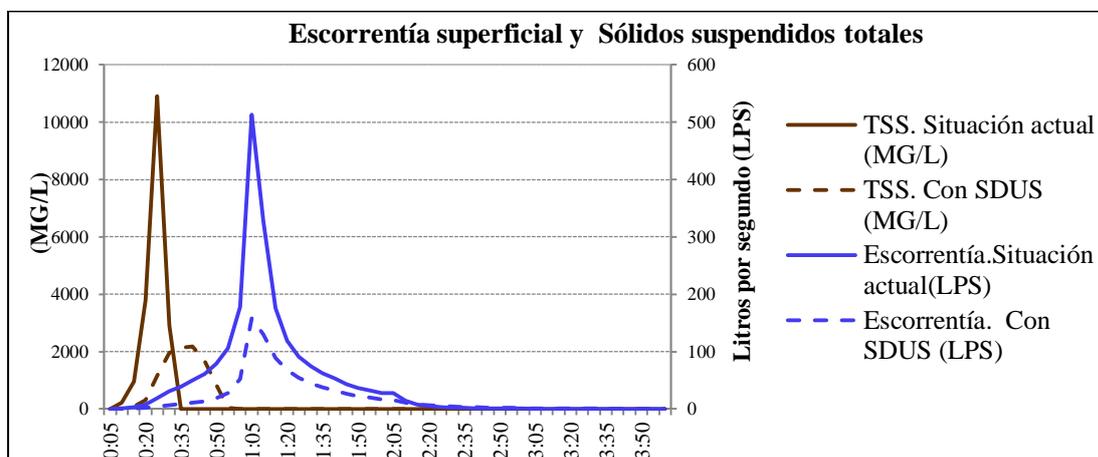


Gráfico 11.4. Subcuenca 6: Hidrogramas frente a las curvas de concentración de sólidos totales en suspensión. Fuente: Elaboración propia.

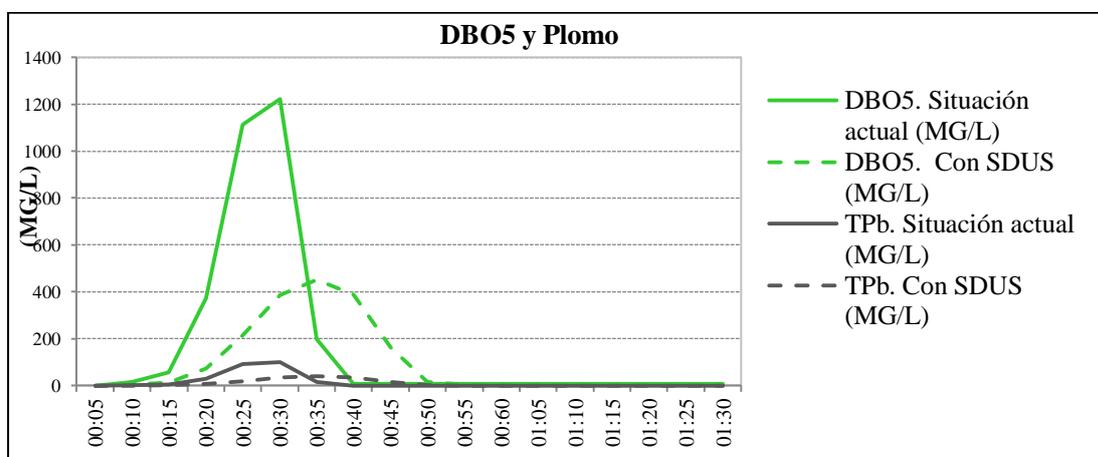


Gráfico 11.5. Curvas de concentración de la demanda biológica de oxígeno a cinco días y de plomo. Fuente: Elaboración propia.

Hay un desfase entre los picos de contaminantes y los de escorrentía, esto es normal ya que a mayor caudal, mayor dilución por lo que la concentración de la contaminación cae. Por ello, los picos de los contaminantes se producen antes del aumento del caudal. Otra cosa que puede observarse en el gráfico 11.4, es que mientras el hidrograma conserva más o menos su forma al instalar las TDUS y el máximo caudal se da casi en el mismo tiempo, los polutogramas, a la vez que sufren un retardo en la aparición del pico, lo tienen más suavizado que en la situación actual. Estas atenuaciones y retardos se producen en todas las subcuencas, aunque los tiempos varían entre los 5 y los 15 minutos, dependiendo de la subcuenca de estudio.

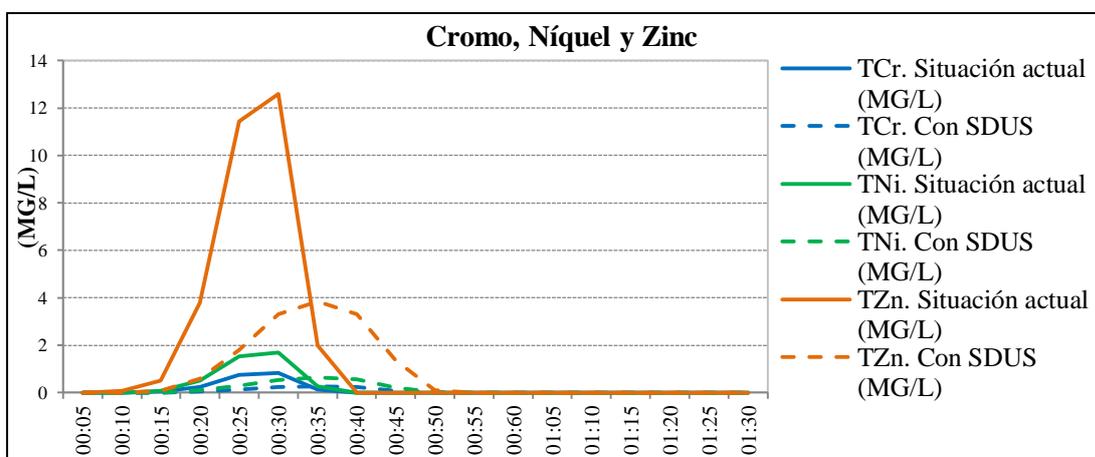


Gráfico 11.6. Curvas de la evolución de las concentraciones de Cromo, Níquel y Zinc, según situación actual y según situación proyectada. Fuente: Elaboración propia.

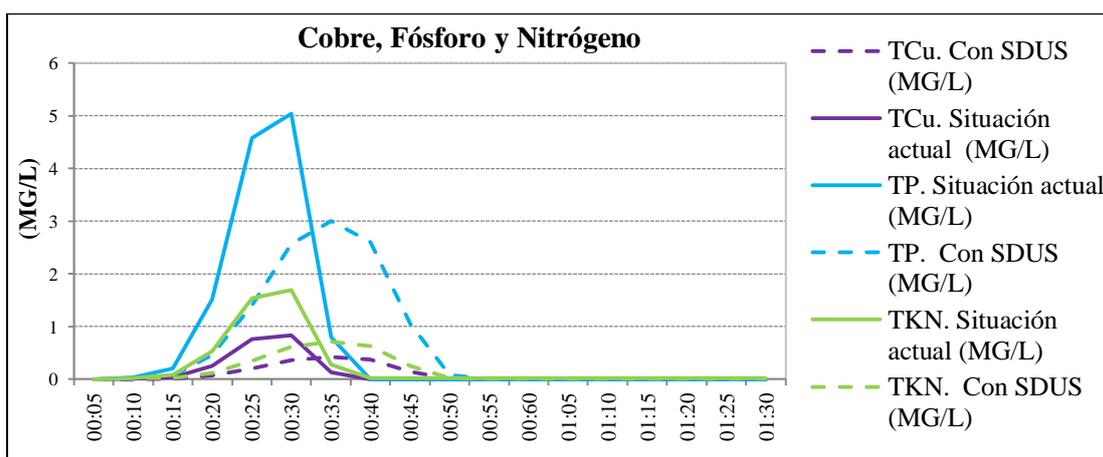


Gráfico 11.7. Curvas de la evolución de las concentraciones de Cobre, Fósforo y Nitrógeno, según situación actual y según situación proyectada. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que sucede con los contaminantes mayoritarios, los polutogramas de éstos elementos que se presentan en menor cantidad, también sufren de una atenuación y de

un retardo en el tiempo. Y aunque el retardo de tiempo en los picos es el mismo para todos los contaminantes por subcuenca, las proporciones en las que se reduce el pico en el polutograma, como es de prever no los son, puesto que los porcentajes de eliminación son diferentes para cada contaminante.

11.2. SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LOS COLECTORES HIPOTÉTICOS DE 1 METRO DE DIÁMETRO

En un principio se iba a realizar una única comparativa usando en la simulación los datos de los colectores reales que hay en funcionamiento actualmente en la zona de estudio y que se han descrito en el capítulo de Hidráulica y en el Anejo 2.

Pero estos colectores tan grandes para el caudal de estudio daban problemas de error en las simulaciones. Mientras que los errores de continuidad de la escorrentía superficial: (- 0,03%) y del flujo (-0,04%) se mantienen dentro de márgenes razonables, inferiores al +/-10% que dan por válidos los resultados hidráulicos, el error en calidad es excesivo, y, aun bajando los pasos computacionales a sólo 1 segundo, se sitúa en valores de - 23,62%.

Y además de este error de calidad, se dificulta la comparativa de los calados en pozos y colectores. Esto se debe a que los colectores presentes en la actualidad en la zona de estudio, son de amplias dimensiones, ya que por ahí circulan las aguas provenientes de gran parte de la Dreta del Eixample, y como sólo se han contabilizado el caudal procedente directamente de la escorrentía en las subcuencas de estudio, los calados alcanzados en tan anchas conducciones son de pocos centímetros en el caso de mayor caudal. Y, aunque se aprecian las diferencias, estas no son tan notables como lo son en colectores con un dimensionamiento ajustado a los caudales de estudio.

Por esta razón se ha realizado la comparativa hidráulica usando unos colectores de diámetro unitario pero manteniendo las mismas distancias entre pozos y los mismos elementos que en el sistema real. En el Anejo 5 Resultados puede leerse el análisis de la simulación hecha con los colectores reales y los gráficos y tablas con los resultados.

Con la red hipotética sustituyendo a la real aparecen ciertas inestabilidades, en tres colectores, hay tres entradas en carga momentáneas en los últimos tramos que son los que más caudal transportan. Pero dichas inestabilidades no suponen ningún problema para la simulación. El error de continuidad en flujo y escorrentía sigue siendo mínimo y el de calidad pasa de ser de aproximadamente del-23,5 % al -1,3%.

En las figuras que se muestra a continuación se aprecia claramente el nivel de agua dentro de los tubos de un metro de diámetro en el momento de máximo caudal, algo que costaba mucho más ver con los colectores reales.

Water Elevation Profile: Node A5 - O1

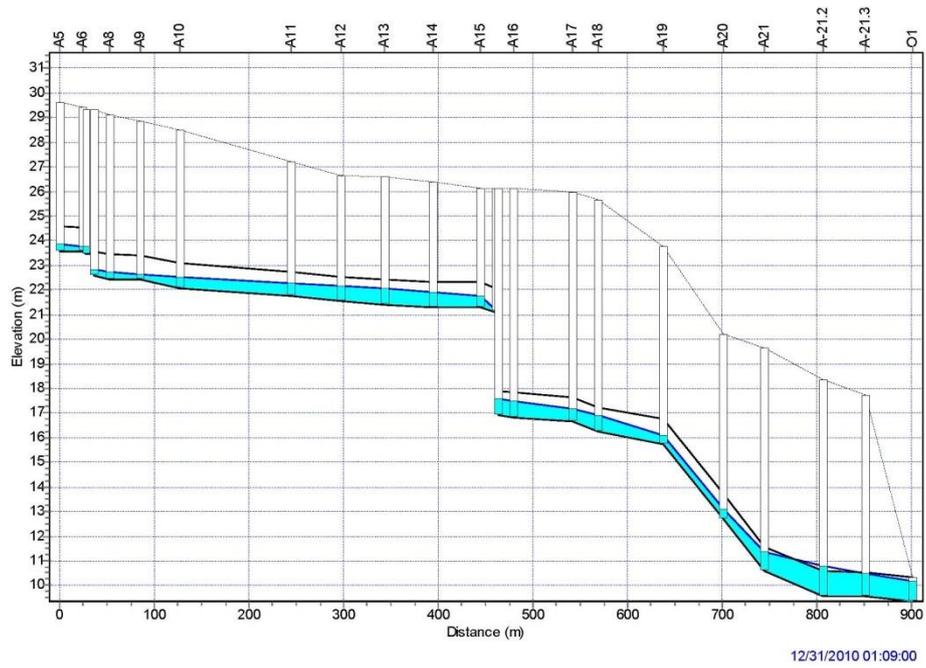


Figura 11.1. Perfil sin presencia de las TDUS en el tramo1.

Water Elevation Profile: Node A5 - O1

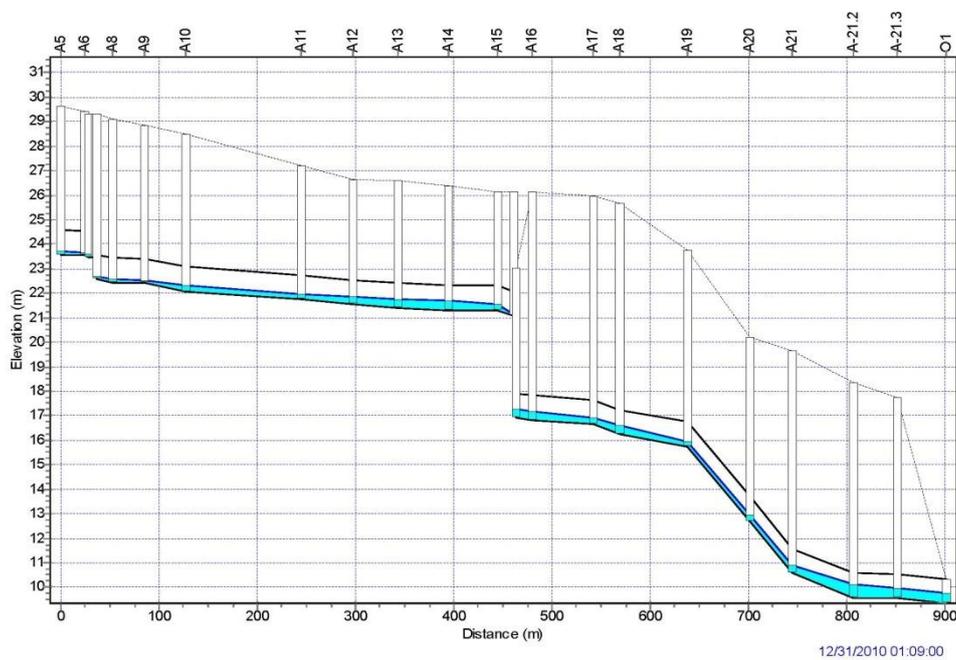


Figura 11.2. Perfil con presencia de las TDUS en el tramo1

Ambas figuras se corresponden con los perfiles longitudinales del primer tramo en el momento en el que se produce el máximo caudal. En ellas se observa, cómo las cotas de

la lámina de agua son más bajas en la figura 11.2 que en la 11.1. Incluso se puede ver cómo, en los tramos aguas abajo del gráfico 11.1 se entra en carga mientras que en 11.2 la capacidad máxima es aproximadamente la mitad del colector. Esto nos da una primera idea de cuán eficaz es un SDUS en la reducción del caudal de escorrentía.

Para analizar mejor la influencia de los SDUS en los calados de los pozos más representativos, se presentan los siguientes gráficos realizados a partir de los valores medios y máximos obtenidos en los resultados de las simulaciones. En ellos que se puede apreciar de forma más clara la influencia que tiene un SDSU, sobre los calados. Tanto los valores medios como los máximos se reducen notablemente. En el tramo 1, las diferencias de calados medios se acentúan conforme nos dirigimos aguas abajo, se pasa de una reducción de un tercio en los primeros nodos a la mitad en la salida del flujo. En cambio, en el tramo 2, las mayores reducciones se dan en los nodos aguas arriba, aunque en los últimos también son del 50%.

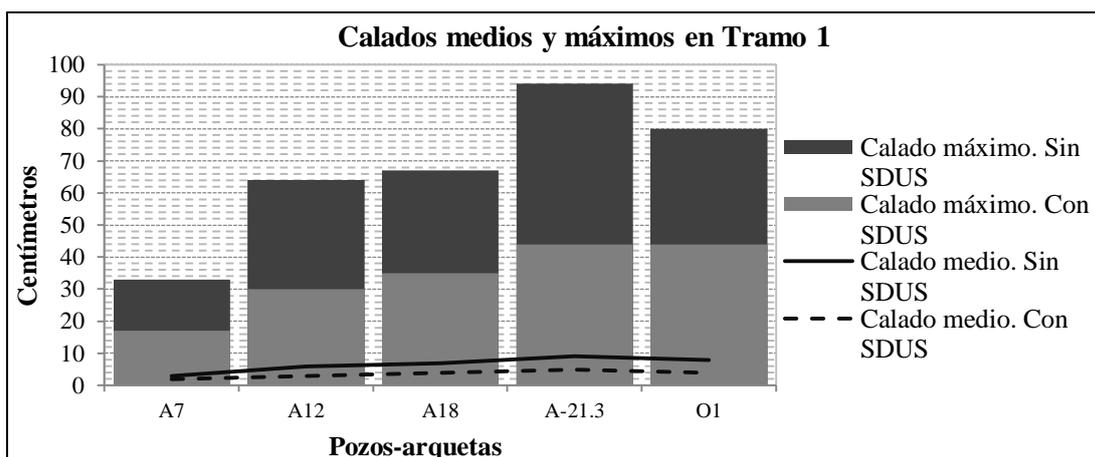


Gráfico 11.8. Comparativa de calados medios y máximos en pozos más representativos de tramo 1. Fuente: Elaboración propia.

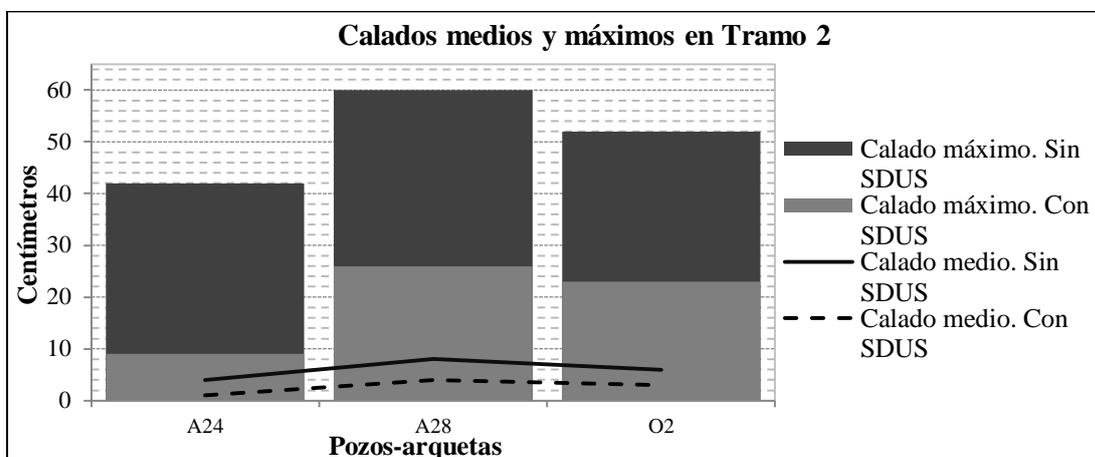


Gráfico 11.9. Comparativa de calados medios y máximos en pozos más representativos de tramo 2. Fuente: Elaboración propia.

Y, para finalizar con el análisis de los calados, donde más patentemente se advierte las diferencias de calados son en los gráficos 11.9 y 11.10. En ellos se presenta su evolución temporal durante las primeras siete horas de la simulación en las dos salidas u *Outfalls*, que, como ya se dijo en el apartado “Condiciones de contorno”, equivale a una sección crítica.

Además del notable descenso en el calado, hay leves diferencias en los tiempos en los que se alcanza su valor el máximo dentro de los pozos. Los picos en un sistema con TDUS se retrasan unos pocos minutos (de 1 a 3 minutos) respecto al sistema convencional, esto es algo que en los gráficos del Anejo 5 no se puede observar porque los valores están recogidos en períodos de cinco minutos, pero sí que pueden verse en las tablas que los acompañan.

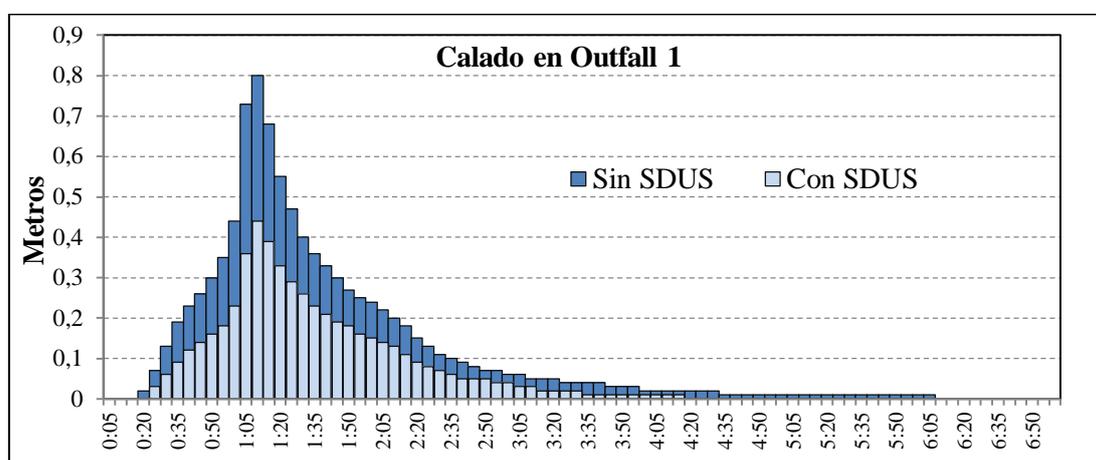


Gráfico 11.10. Evolución temporal de los calados en Outfall 1. Fuente: Elaboración propia.

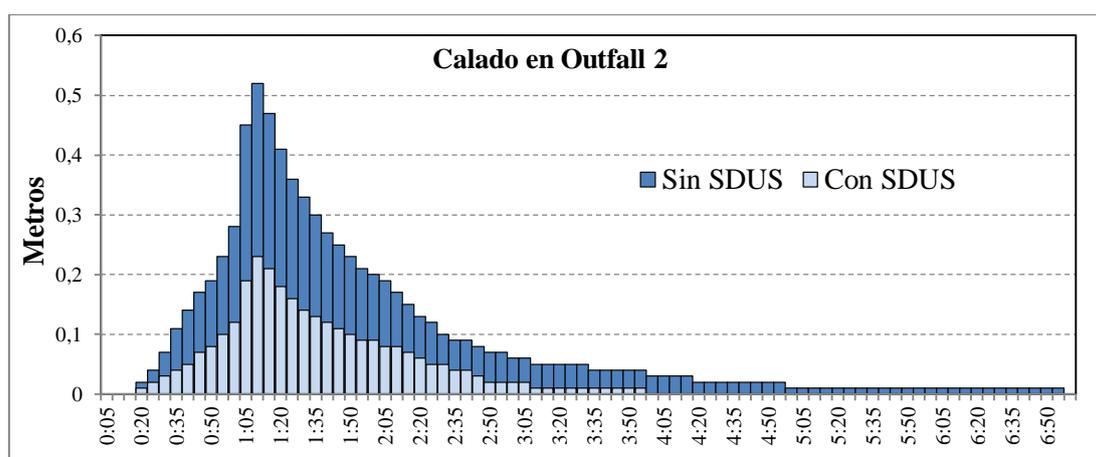


Gráfico 11.11 Evolución temporal de los calados en Outfall 2. Fuente: Elaboración propia.

La influencia de las TDUS sobre la hidráulica del sistema en los nodos de salida queda reflejada en la tabla 11.3, donde se pueden ver los porcentajes de reducción de los

valores de calados, caudales y volúmenes, así como el retardo en el tiempo del pico del calado que en las gráficas anteriores era difícil de apreciar, puesto que es de sólo un minuto en O1 y de dos en O2.

Nodo	O1		Reducción	O2		Reducción
	Sin SDUS	Con SDUS		Sin SDUS	Con SDUS	
Calado medio (m)	0,08	0,04	50%	0,06	0,03	50%
Calado máximo (m)	0,8	0,44	45%	0,52	0,23	55,77%
Maximum HGL (m)	10,16	9,79	3,64%	12,79	12,5	2,27%
Momento en el que el calado es máximo (hr:m)	1:09	1:10	1 minuto	1:08	1:10	2 minutos
Caudal entrante máximo (LPS)	1961,13	604,25	69,19%	845,85	168,5	80,08%
Momento en el que la entrada de caudal es máxima (hr:m)	01:09	01:10	1 minuto	01:08	01:10	2 minutos
Volumen total (10 ⁶ litros)	3,449	1,178	65,85%	1,833	0,364	80,14%

Tabla 11.3. Valores medios y máximos en los dos Outfalls, con sistema de drenaje convencional y con SDUS.

Es muy representativo que los valores en el punto final de ambos tramos se vean reducidos en cualquiera de sus parámetros en más de la mitad. Especialmente remarcable que en O2, sistema que recoge menos agua por ser menos extenso, el volumen total se reduce en cuatro quintas partes, lo cual se debe a la alta infiltración que se produce en las dos subcuencas del Tramo 2.

En el Anejo 5 Resultados, se encuentran los gráficos con la evolución de los calados a lo largo de las primeras horas de la simulación de los nodos más representativos, junto con la tabla de resultados.

Como ya se mencionó con anterioridad, el programa hace el cálculo de caudales en las conducciones. Puesto que el número de colectores implicados en los sistemas de drenaje es muy elevado, se ha hecho como en el caso de los pozos, se han seleccionado los más representativos, aquellos que reciben un aporte de caudal directo y los finales de cada tramo. La Tabla 11.4 es un resumen de los resultados de los colectores escogidos. En ella se observa cómo en todos, la cantidad de caudal y los valores de las velocidades descienden considerablemente. Estando en un rango comprendido entre el 70 y el 90% para el caudal y un tercio y la mitad, en las velocidades.

La presencia de las TDUS, además del descenso del caudal provoca un retardo en el hidrograma, por ello es que menos en el primer colector, al que le llega solamente el agua de la primera cuenca, en el resto el pico se retrase uno o dos minutos. Los calados máximos también se acortan bastante, entre un 40% y un 75%.

Colectores		Q _{max} (LPS)	Momento de Q _{max} (hr:m)	Vmáx (m/s)	Capacidad max	Y _{max} (m)	Fracción del tiempo en el que el flujo es		Valor medio de Froude
							Sub crítico	Super crítico	
C5	Sin SDUS	299,38	01:05	1,67	0,36	0,29	0,71	0,28	0,64
	Con SDUS	74,96	01:05	0,9	0,09	0,17	0,81	0,18	0,43
Reducción		74,96%	0 minutos	46,11%	75,00%	41,38%	-	-	32,81%
C12	Sin SDUS	873,84	01:07	1,61	0,64	0,65	0,99	0	0,53
	Con SDUS	255,26	01:08	1,13	0,19	0,33	0,99	0	0,46
Reducción		70,79%	1 minuto	29,81%	70,31%	49,23%	-	-	13,21%
C18	Sin SDUS	1621,59	01:08	3,99	0,8	0,51	0,14	0,85	1,4
	Con SDUS	513,38	01:08	2,83	0,25	0,28	0,52	0,47	1,09
Reducción		68,34%	0 minutos	29,07%	68,75%	45,10%	-	-	22,14%
C-21.3	Sin SDUS	1961,13	01:09	2,7	1,28	0,87	0,36	0,62	1,03
	Con SDUS	604,25	01:10	1,82	0,39	0,44	0,65	0,33	0,8
Reducción		69,19%	1 minuto	32,59%	69,53%	49,43%	-	-	22,33%
C24	Sin SDUS	322,65	01:05	1,04	0,24	0,45	0,99	0	0,44
	Con SDUS	20,08	01:05	0,53	0,02	0,1	0,78	0	0,19
Reducción		93,78%	0 minutos	49,04%	91,67%	77,78%	-	-	56,82%
C28	Sin SDUS	845,85	01:08	1,86	0,73	0,56	0,79	0,2	0,84
	Con SDUS	168,5	01:10	1,13	0,15	0,24	0,92	0,07	0,61
Reducción		80,08%	2 minutos	39,25%	79,45%	57,14%	-	-	27,38%

Tabla 11.4. Resumen de los valores resultados de las simulaciones en un sistema sin TDUS en otro con SUDU y comparativa en los colectores más relevantes.

A partir de los resultados resumidos en la tabla anterior se ha elaborado el gráfico que se muestra a continuación. En él se pueden observar de forma visual las diferencias entre los dos sistemas, el actual y el proyectado.

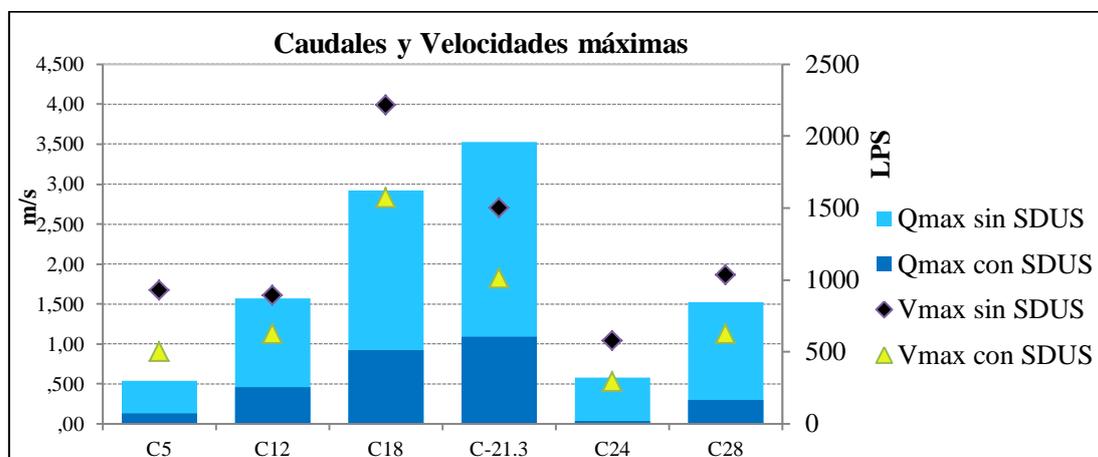


Gráfico 11.12. Comparativa de caudales y velocidades máximos en ambos sistemas. Fuente: Elaboración propia.

Entre los resultados finales, el programa da los valores de los caudales medios y máximos que entran en los *Outfalls* y los de los sistemas en conjunto (cada sistema está formado por dos tramos). Estos resultados se exponen en los gráficos 11.13 y 11.14. Aunque es muy pronunciada la influencia de las TDUS en la disminución de los caudales medios, es más señalada aún en los máximos, reduciendo drásticamente el pico del caudal. En *Outfall 2* va a parar las aguas recogidas de las subcuencas 7 y 8 solamente, mientras que al *Outfall 1* lo hacen las seis primeras subcuencas, de ahí la diferencia de caudales.

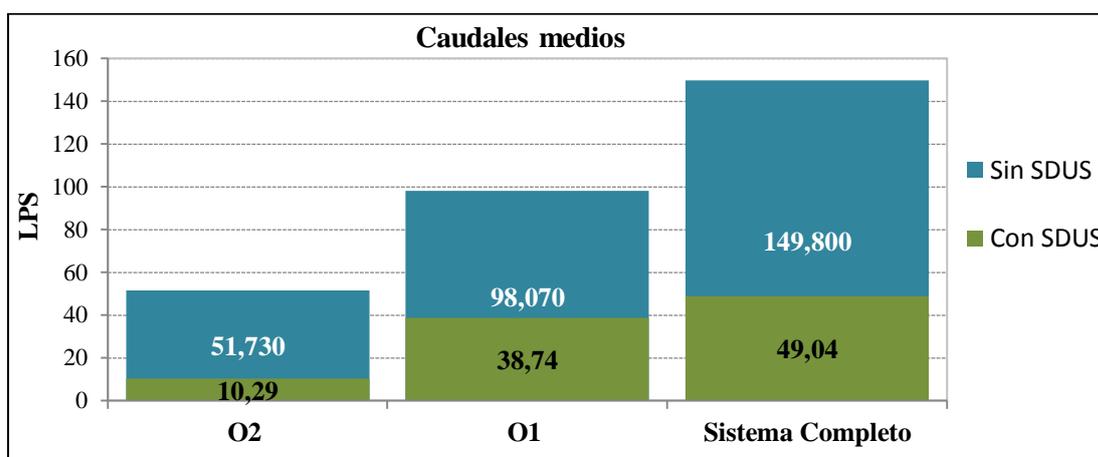


Gráfico 11.13. Comparativa de caudales medios. Fuente: Elaboración propia.

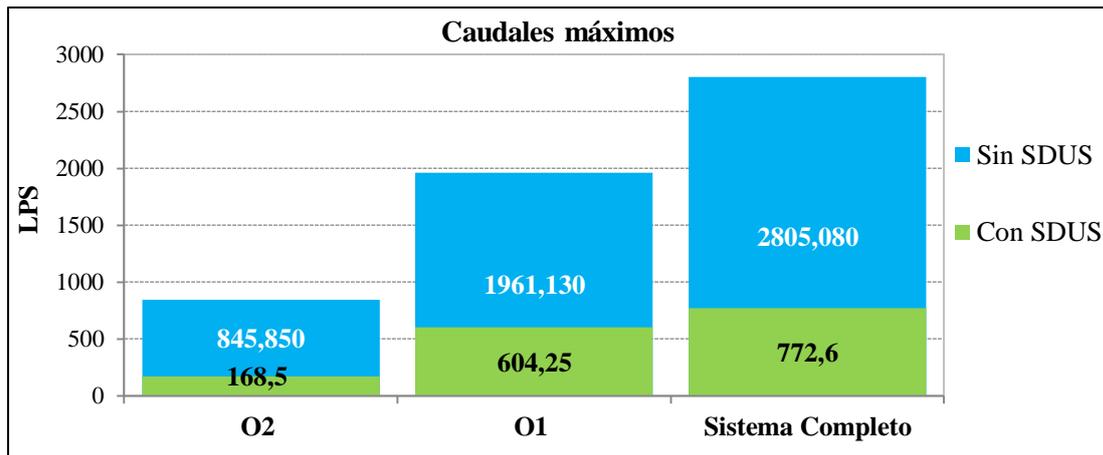


Gráfico 11.14. Caudales máximos en ambos sistemas. Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de los hidrogramas en los principales colectores se observa, además de la disminución del pico de caudales, un ligero retardo en la producción del mismo y una atenuación en la forma con la incorporación de las LID's. Esa atenuación se ve claramente en los gráficos, el ascenso y descenso de las curvas de los hidrogramas tiene lugar, por colector, más o menos a la vez, pero los picos del caudal son mucho menores, dando hidrogramas mucho más suavizados que los correspondientes a un sistema sin TDUS.

Señalar que, en los gráficos, los colectores están ordenados de aguas arriba a aguas abajo, por tanto van de menor a mayor caudal transportado, puesto que a la escorrentía de las diferentes subcuencas se va incorporando paulatinamente el caudal procedente de las subcuencas aguas arriba. Por ello se observa un retardo también en los tiempos de los caudales pico, aunque ligero dada la poca extensión de la zona de estudio. En el gráfico del Tramo 2, es donde mejor se observa esa diferencia en los picos de los hidrogramas de los colectores C24 y C28, donde se alcanzan los tres minutos de retraso.

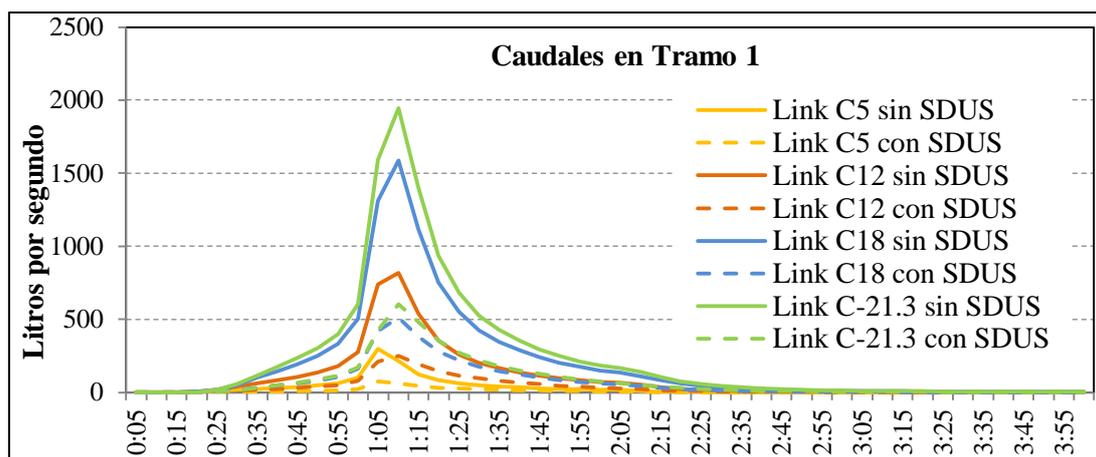


Gráfico 11.15. Caudal en los colectores del tramo 1. Link es el nombre que da el programa al conducto. Fuente: Elaboración propia.

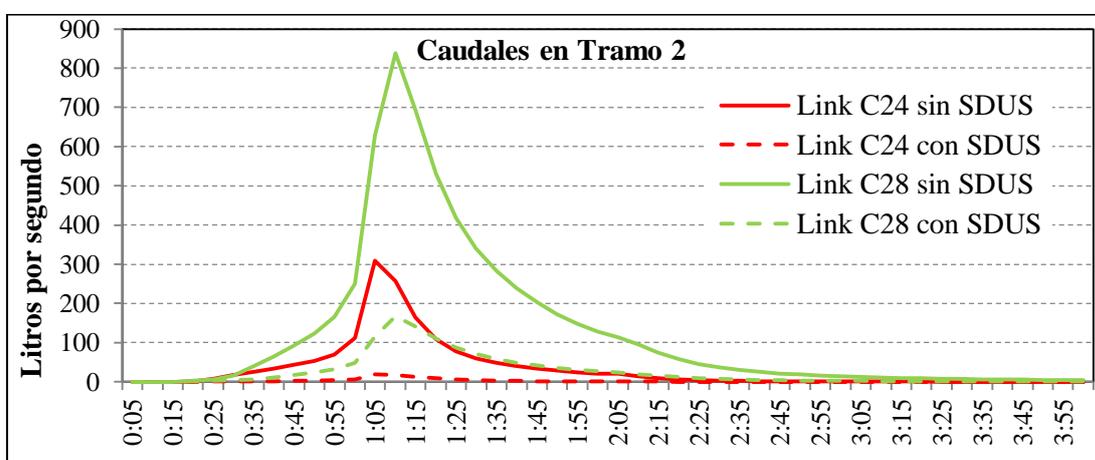


Gráfico 11.16. Caudal en los colectores del tramo 2. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11.4., además de los valores de calados, velocidades y caudal, también se registran los valores medios del número de Froude por conducto y el porcentaje del tiempo en que el valor está por encima y por debajo de uno. Es decir, el porcentaje del tiempo en que el flujo circulante lo hace en régimen subcrítico y en régimen supercrítico. Como resumen de los informes finales de las simulaciones que pueden verse en el Anejo 5 Resultados, indicar que en el sistema actual sin SDUS, los números de Froude en los diferentes conductos se hayan entre 0,07 y 2,58. En todos el valor es inferior a la unidad salvo en los saltos hidráulicos, en los tres conductos antes del cambio de dirección de los colectores del tramo 1 (C18, C19 y C20) y en el último conducto del tramo1 (C21.3). En dichos colectores el flujo circula en régimen supercrítico la mayor parte del tiempo, mientras que en el resto de colectores casi siempre(o siempre en muchos casos) se circula en régimen subcrítico.

En el caso proyectado con un SDUS, con caudales más bajos circulando a menor velocidad, los valores medios del número de Froude se encuentran entre 0,03 y 1,94, Dándose el régimen supercrítico en los mismos conductos que se producía sin SDUS, salvo en el último conducto del tramo 1, que en este caso el flujo circula en régimen subcrítico.

11.3. SIMULACIÓN DE LA CALIDAD CON COLECTORES HIPOTÉTICOS DE 1 METRO DE DIÁMETRO

Del modo que se indicó en el apartado anterior, los valores de error en el cálculo de la calidad son excesivos como para darlos por válidos. Por ello, se han sustituido en la simulación, los colectores reales por otros hipotéticos de sección circular y diámetro de un metro. Con este cambio el error pasa del -23,5 % al -1,3%, que ya se puede considerar como dentro de los límites de la validez de cálculo.

Esta diferencia en el error de cálculo es visible en los resultados finales de contaminantes acumulados, que difieren en una proporción bastante marcada, siendo aproximadamente un 20% más elevados en la simulación con los colectores reales que con los de un metro de diámetro.

Estos resultados finales aparecen recogidos en el informe final de resultados. En ellos se muestran las cantidades totales en kilogramos de contaminantes acumulados que hay en cada una de las salidas de los diferentes tramos de los sistemas y en los sistemas globales. En este caso hay dos salidas por sistema, *Outfall 1* y *Outfall 2*, de dos tramos que recolectan diferente cantidad de agua de las subcuencas. Subcuencas con diferentes características a la hora de retener y movilizar los elementos contaminantes.

Kg totales	O1			O2			Sistema completo		
	Sin SDUS	Con SDUS	Reducción	Sin SDUS	Con SDUS	Reducción	Sin SDUS	Con SDUS	Reducción
TSS	622,686	225,95	63,71%	400,016	154,38	61,41%	1022,70	380,33	62,81%
DBO5	110,427	38,37	65,25%	68,708	23,55	65,73%	179,13	61,92	65,44%
TP	0,361	0,212	41,27%	0,233	0,154	33,91%	0,594	0,366	38,38%
TKN	0,188	0,069	63,30%	0,114	0,041	64,04%	0,302	0,11	63,58%
TCu	0,063	0,033	47,62%	0,040	0,021	47,50%	0,103	0,054	47,57%
TCr	0,063	0,021	66,67%	0,040	0,012	70,00%	0,103	0,033	67,96%
TNi	0,122	0,048	60,66%	0,079	0,029	63,29%	0,201	0,077	61,69%

Kg totales	O1			O2			Sistema completo		
	Sin SDUS	Con SDUS	Reducción	Sin SDUS	Con SDUS	Reducción	Sin SDUS	Con SDUS	Reducción
TPb	7,145	2,99	58,15%	4,626	1,80	61,18%	11,77	4,79	59,34%
TZn	0,896	0,299	66,63%	0,580	0,186	67,93%	1,47	0,485	67,14%

Tabla 11.5. Cantidad de contaminantes que alcanzan el final del sistema junto con el porcentaje de disminución por implantación de un SDUS.

Como puede observarse los porcentajes de descenso de los contaminantes son ligeramente inferiores al valor medio de reducción por BMP (ver *Tabla 10.7*), esto es debido a que aunque casi todo el suelo de las cuencas está ocupado por alguna que otra TDUS, aún permanece una pequeña parte de suelo impermeable que no retiene contaminantes.

A partir de esta tabla se han realizado los siguientes gráficos en los que se muestra de forma sintética la influencia de las TDUS en la cantidad total de contaminantes. Los diferentes contaminantes se han agrupado por orden de magnitud, puesto que juntos no podrían verse en un mismo gráfico, dada la variedad de órdenes presentes, que van desde los miles hasta las centésimas. Los sólidos suspendidos tienen magnitudes del orden de los millares, la demanda biológica de oxígeno, está en las centenas, el plomo, de las decenas, el fósforo y el zinc en unidades. Y el resto, se acumula en cantidades inferiores los trescientos gramos.

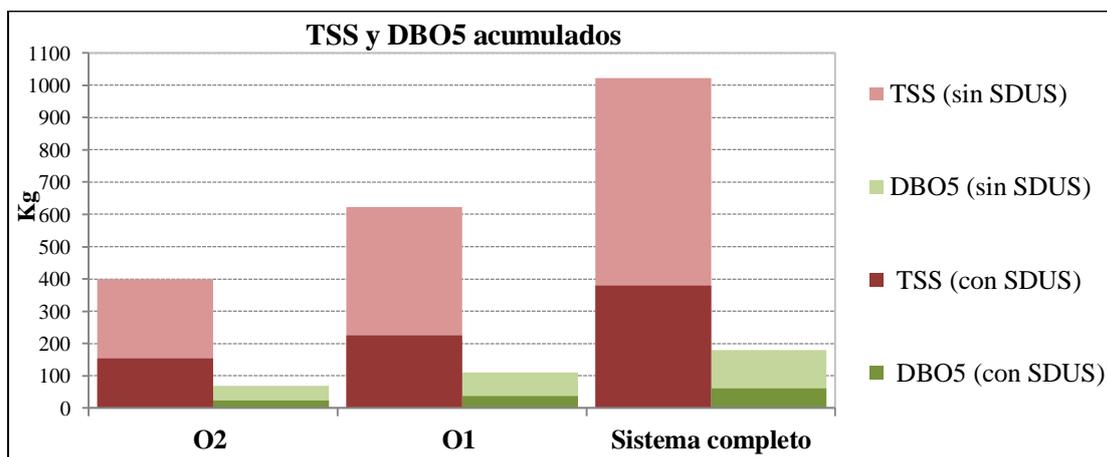


Gráfico 11.17. Cantidad de sólidos suspendidos totales y de DBO5 al final de cada tramo y en el sistema total. Fuente: Elaboración propia.

Se observa claramente cómo, con la presencia de las técnicas de drenaje urbano sostenible, la reducción de los contaminantes principales es de más de la mitad.

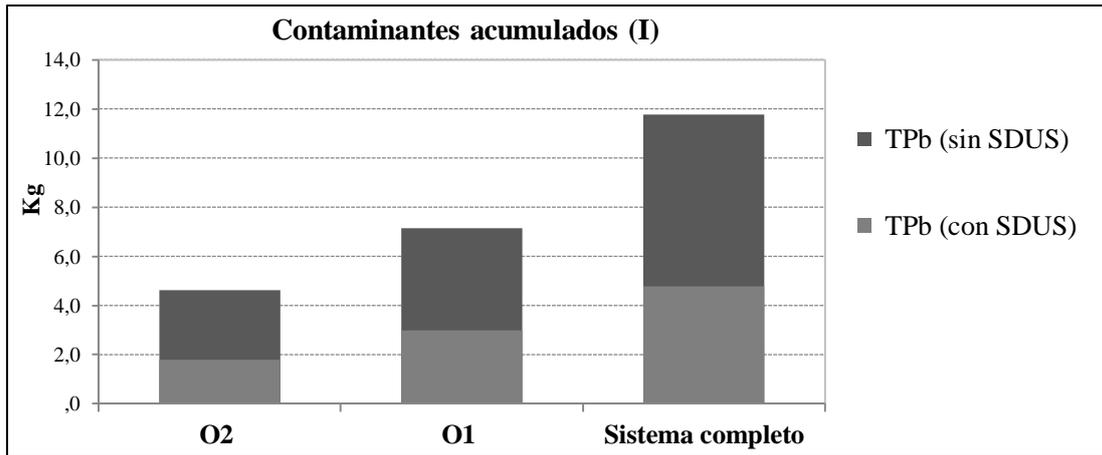


Gráfico 11.18. Kilos de plomo acumulados. Fuente: Elaboración propia.

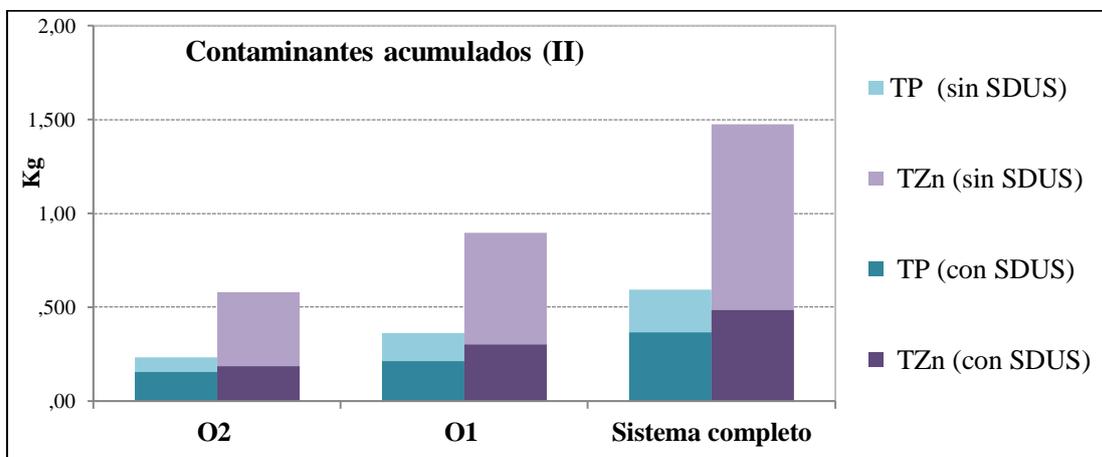


Gráfico 11.19. Fósforo y Zinc totales. Fuente: Elaboración propia.

El plomo representa la fracción, dentro de los sólidos suspendidos, más importante. A diferencia del resto supera el orden de las unidades, por eso se ha representado solo en un gráfico.

Fósforo y Zinc son los siguientes contaminantes en importancia después del plomo. Las TDUS son más efectivas en el caso del Zinc que del fósforo, en este caso no se alcanza una reducción de la mitad como en el resto de los casos.

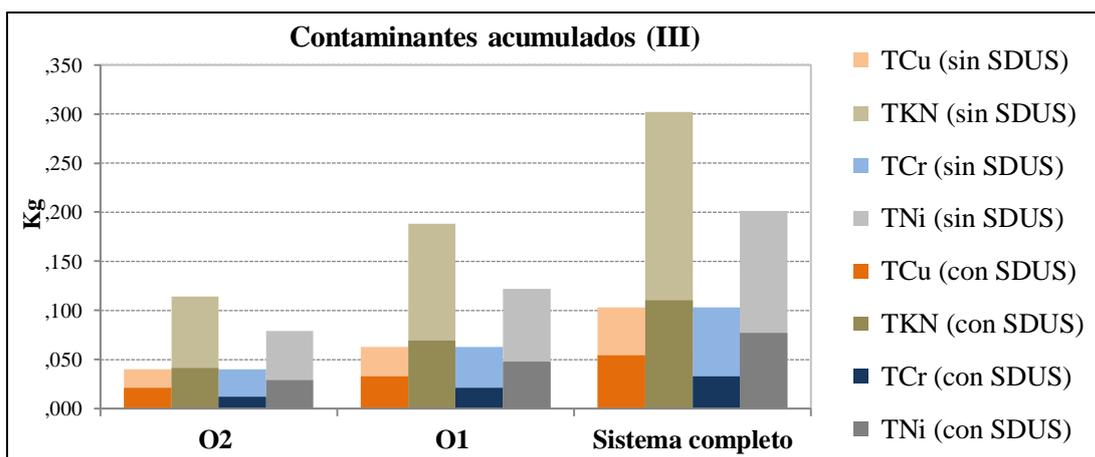


Gráfico 11.20. Contaminantes minoritarios. Fuente: Elaboración propia.

Los contaminantes representados en este *Gráfico 11.20* se encuentran en cantidades muy inferiores al kilo, pero hay que indicar también que, el que se presenta en menor cantidad, es altamente tóxico, por lo que es necesario su control en el medio.

Estos gráficos corresponden a los valores acumulados en el punto final de las redes. Pero para ver cómo influye la presencia de las TDUS en la evolución de la contaminación con la escorrentía es mejor presentar las series temporales, es decir cómo progresan las concentraciones a lo largo del tiempo simulado. Por ello se presentan los polutogramas desde que se inicia la tormenta hasta cuando los valores de las concentraciones de la contaminación se vuelven estables.

Como ejemplo aquí se presentan las concentraciones en el último colector del tramo uno, C-21.3, (el programa SWMM hace el balance de masas al final de cada conducto). El resto de gráficos de los colectores más representativos están en el Anejo 5 Resultados.

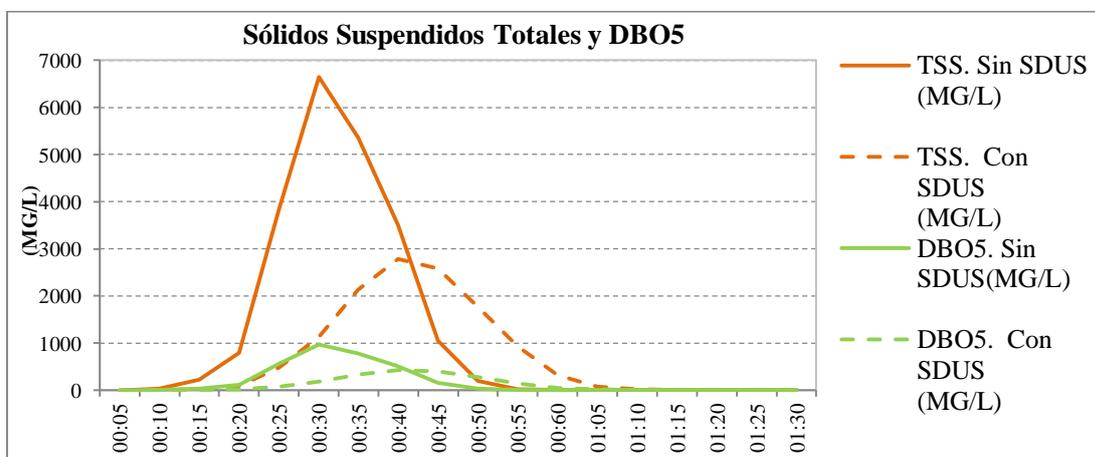


Gráfico 11.21. Polutograma de TSS y DBO5. Fuente: Elaboración propia.

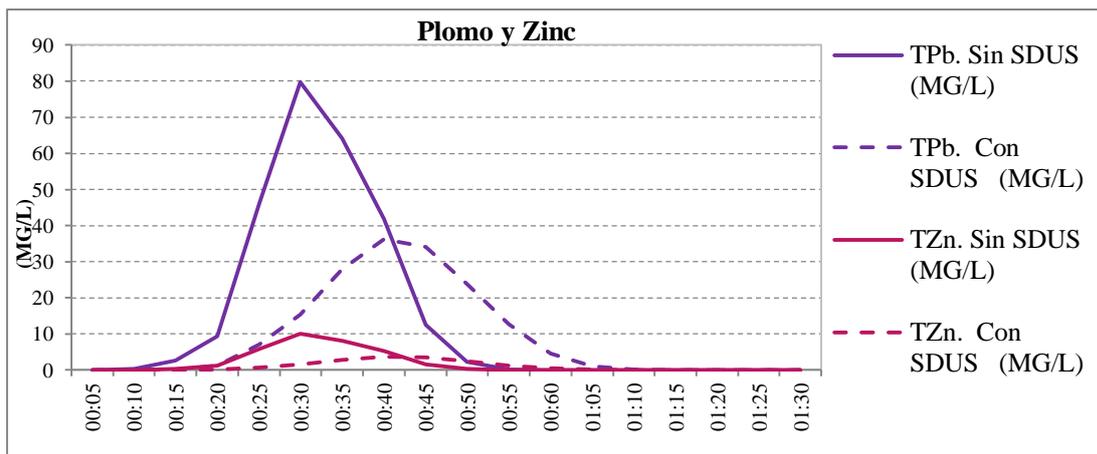


Gráfico 11.22. Polutograma de plomo y zinc. Fuente: Elaboración propia.

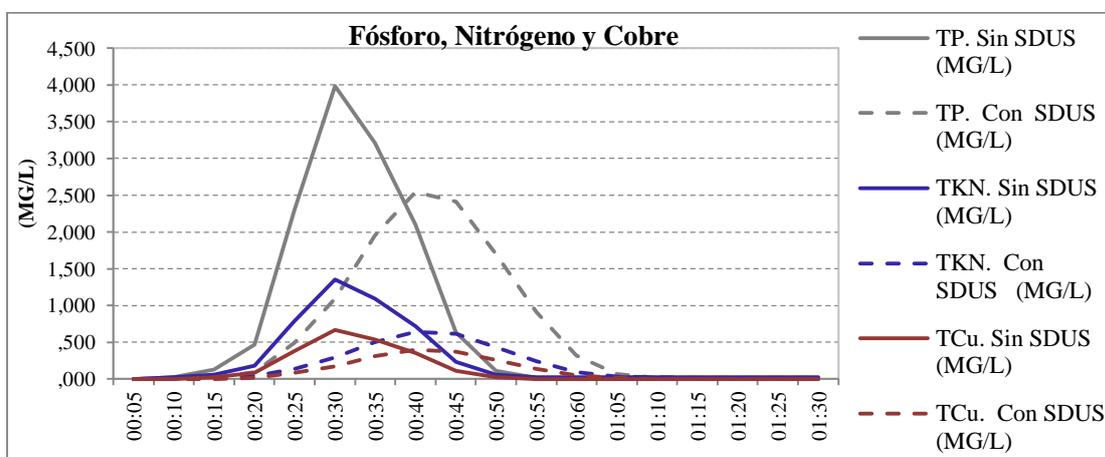


Gráfico 11.23. Polutograma de fósforo, nitrógeno y cobre. Fuente: Elaboración propia.

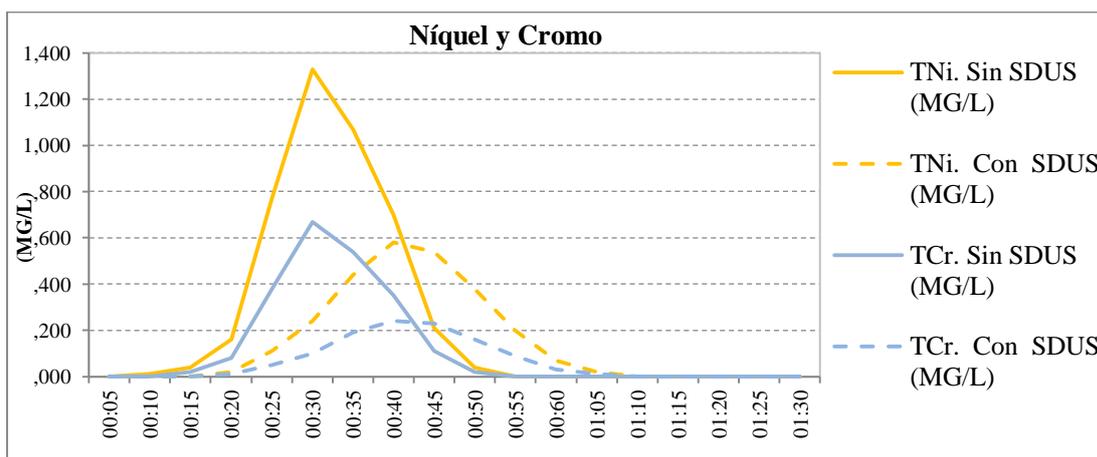


Gráfico 11.24. Polutograma de níquel y cromo. Fuente: Elaboración propia.

Se observa un fuerte descenso en el pico de todas las concentraciones. Además de éste descenso, otro hecho destacado es el retardo de unos quince minutos en la producción de ese pico. En ambos casos, la máxima concentración viene a producirse poco antes de

que el caudal comience a crecer y luego, conforme aumenta el hidrograma descende la concentración bajando la curva a mínimos en el momento del máximo y a partir de ahí se mantiene en valores bajos más o menos estables. Asimismo, hay que subrayar que, en la situación actual, los polutogramas son más pronunciados, en tan sólo 45 minutos alcanzan el valor máximo y descienden a valores mínimos estables, mientras que en la situación proyectada llevarían unos veinte minutos más.

En resumen, los SDUS, además de un cierto retardo temporal y una brusca disminución de la contaminación, provocan unos polutogramas más suavizados, es decir, una homogeneización de las concentraciones en el tiempo.

Los gráficos 11.21 a 11.24 son comparativas realizadas a partir de las tablas-resultado con los valores de las concentraciones que hay cada cinco minutos, contabilizados durante las primeras horas de la simulación. Los valores medios finales de concentraciones de algunos de los contaminantes que aparecen en las colas, trascurrida una hora y media, dos horas, es decir, una vez estabilizados para el tramo final, son los siguientes:

Contaminante	Sin SDSU	Con SDSU	Concentración irreductible
TSS	8 mg/l	4 mg/l	20-40 mg/l
TP	0 mg/l	0 mg/l	0,15-0,2 mg/l
TKN	0,02 mg/l	0,01 mg/l	1,2 mg/l

Tabla 11.6. Valores alcanzados por algunos de los contaminantes al final de las simulaciones, con y sin SDUS y sus concentraciones irreductibles.

Hay que decir que en ausencia de SDSU, una vez se ha producido el descenso de la curva de concentraciones ésta se mantiene estable a partir de la 1:10 horas para todos los contaminantes. Los sólidos suspendidos totales lo hacen aproximadamente en un valor de 8mg/l. Sin embargo, la presencia de las TDSU, sobre todo el aumento de la infiltración, provoca que se produzcan ligeras oscilaciones en las colas. Por ello, en la *Tabla 11.6* se han reflejado las medias de los valores de las últimas 8,5 horas de la simulación. Estas oscilaciones son mucho más marcadas en el tramo 2 que en el 1, ya que la proporción de suelo en el que se produce la infiltración es mayor.

En los dos sistemas la concentración final es inferior a la supuestamente irreductible (*Schueler 2000*), es decir a aquel nivel de concentración del que no se puede bajar, lo que sí que es diferente es el tiempo en el que se alcanzan esas concentraciones mínimas

irreductibles. Y aunque las concentraciones finales acaben siendo las mismas dado que hay un punto del que, por ahora, no pueden descender, el total acumulado seguiría siendo muy diferente en ambos casos, ya que como se ha apreciado en los gráficos los polutogramas de lo SDUS quedan muy por debajo de los de la situación actual.

11.4. SIMULACIÓN CON LOS NUEVOS COLECTORES DISEÑADOS PARA EL SDUS.

En el punto “8.8 Descripción de los elementos de la red en situación prevista (SDUS)” se presentan los nuevos elementos propuestos para su funcionamiento en el tramo de estudio con la recogida única y exclusivamente las aguas de escorrentía de las subcuencas con un SDUS implantado. Estos elementos son colectores de 600 mm de material plástico y 50 metros de longitud, 24 pozos de profundidades variables y un elemento de salida u *Outfall*, que, como en los casos anteriores, es una sección crítica.

Tras la simulación se ha comprobado que el flujo en todos los colectores es estable, ninguno entra en carga y ningún pozo se inunda. Los errores de continuidad en esta simulación son muy bajos, siendo nulo el error de flujo:

- Escorrentía: -0,12%
- Flujo: 0,0%
- Calidad: -0,39%

Y el nuevo perfil es un solo tramo lineal de colectores discurriendo de forma paralela a la superficie de la calle Diagonal, salvando la parte de la zona de la calle Marina, que va en contrapendiente. La línea de colectores apenas si se ve truncada por cambios bruscos de pendientes. No hay ni saltos hidráulicos ni compuertas ni ningún elemento complementario ya que no se han considerado necesarios, puesto que se ha dimensionado teniendo en cuenta limitaciones de capacidad y velocidades.

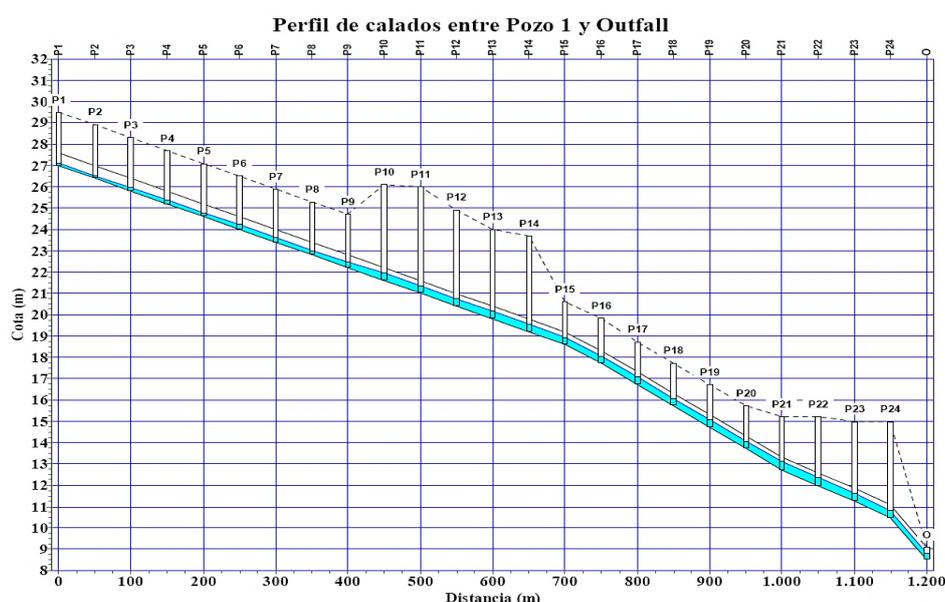


Figura 11.3. Colectores dimensionados para evacuar el agua del tramo de estudio con SDUS implantados. Perfil de agua correspondiente a la hora y diez minutos de la simulación.

Los resultados hidráulicos obtenidos en esta nueva simulación vienen resumidos en las siguientes tablas. La primera contiene información hidráulica en los nodos y la segunda en los colectores. Dado que el número de elementos de la red es mucho más bajo que los presentes en la situación actual, en las tablas vienen especificados todas las arquetas y conducciones.

Nodo	Calado medio (m)	Calado máximo (m)	Maximum HGL (m)	Momento en el que el calado es máximo (hr:m)	Caudal entrante máximo (l/s)	Volumen total (m ³)
P1	0,01	0,13	27,13	1:05	75,72	0,129
P2	0,01	0,12	26,52	1:05	75,37	0,129
P3	0,02	0,20	26,00	1:05	177,59	0,321
P4	0,02	0,20	25,40	1:05	177,87	0,321
P5	0,02	0,19	24,79	1:06	178,13	0,321
P6	0,03	0,25	24,25	1:05	275,32	0,511
P7	0,03	0,25	23,65	1:06	275,58	0,511
P8	0,03	0,25	23,05	1:06	276,18	0,511
P9	0,03	0,31	22,51	1:06	414,10	0,757
P10	0,04	0,38	21,98	1:05	563,95	1,002
P11	0,04	0,39	21,39	1:05	565,34	1,002
P12	0,04	0,39	20,79	1:06	567,29	1,002
P13	0,04	0,39	20,19	1:06	569,28	1,002
P14	0,04	0,39	19,59	1:06	571,23	1,002
P15	0,04	0,38	18,98	1:06	666,50	1,178
P16	0,04	0,36	18,08	1:07	668,08	1,178
P17	0,04	0,41	17,13	1:07	669,74	1,178
P18	0,04	0,37	16,09	1:07	686,45	1,208
P19	0,04	0,37	15,09	1:07	687,86	1,208
P20	0,04	0,37	14,09	1:07	689,19	1,208
P21	0,04	0,41	13,13	1:08	690,50	1,208
P22	0,04	0,42	12,39	1:08	691,50	1,208
P23	0,04	0,41	11,66	1:08	692,42	1,208
P24	0,04	0,34	10,81	1:08	842,05	1,541
O	0,03	0,33	8,83	1:08	842,75	1,541

Tabla 11.7. Resultados hidráulicos en los nodos.

Hay mucha diferencia entre el calado medio y el calado máximo. Esto se debe a que casi todo el tiempo de la simulación por los pozos transcurre muy poca agua. Los tiempos en los que se produce el pico van incrementándose de forma homogénea conforme descendemos aguas abajo dado que la separación entre los pozos es fija y la introducción del caudal desde las subcuencas se ha repartido también de modo uniforme.

Es interesante ver cómo el caudal máximo entrante en el *Outfall* es mayor que la suma de caudales máximos entrantes en O1 y O2 en la simulación con SDUS en los colectores de diámetro 1 m. Esto es porque se termina de desaguar antes que en el sistema actual, a la hora y ocho minutos se produce el caudal pico, dos minutos antes que en O2 y 4 que en O1. Pero el volumen total entrante sigue siendo el mismo, 1541 m³.

Colector	Q _{max} (l/s)	Momento en de Q _{max} (hr:m)	V _{max} (m/s)	Capacidad de llenado máximo	Y _{max}	Fracción del tiempo en el que el flujo es		Valor medio de Froude
						Subcrítico	Supercrítico	
1	75,37	1:05	1,77	0,09	0,21	0,65	0,34	0,92
2	74,23	1:05	1,23	0,09	0,27	0,81	0,18	0,50
3	177,87	1:05	2,23	0,22	0,33	0,58	0,41	1,11
4	178,13	1:05	2,26	0,22	0,32	0,58	0,41	1,11
5	176,99	1:06	1,89	0,22	0,37	0,64	0,34	0,90
6	275,58	1:06	2,50	0,35	0,41	0,53	0,47	1,15
7	276,18	1:06	2,52	0,35	0,41	0,52	0,47	1,16
8	277,01	1:06	2,15	0,35	0,47	0,63	0,36	0,89
9	414,64	1:06	2,44	0,52	0,58	0,56	0,43	1,05
10	565,34	1:05	2,96	0,71	0,64	0,35	0,64	1,26
11	567,29	1:06	2,96	0,71	0,64	0,35	0,64	1,26
12	569,28	1:06	2,96	0,72	0,64	0,34	0,65	1,26
13	571,23	1:06	2,96	0,72	0,65	0,35	0,63	1,25
14	573,17	1:06	3,01	0,72	0,64	0,28	0,70	1,29
15	668,08	1:07	3,67	0,69	0,62	0,00	0,99	1,57
16	669,74	1:07	3,52	0,65	0,64	0,12	0,87	1,48
17	670,5	1:07	3,47	0,77	0,65	0,12	0,87	1,46
18	687,86	1:07	3,77	0,67	0,62	0,00	0,99	1,62
19	689,19	1:07	3,79	0,67	0,61	0,00	0,99	1,63
20	690,5	1:08	3,56	0,67	0,65	0,03	0,95	1,52
21	691,5	1:08	3,33	0,78	0,69	0,18	0,81	1,40
22	692,42	1:08	3,36	0,80	0,69	0,16	0,82	1,41
23	693,35	1:08	3,77	0,76	0,62	0,43	0,56	1,32
24	842,75	1:08	5,21	0,58	0,56	0,00	0,99	2,66

Tabla 11.8. Resultados hidráulicos en los colectores.

Al igual que ocurre con los calados en los pozos, los tiempos en los que se alcanza el caudal máximo en los diferentes colectores van incrementándose de forma consecutiva e uniforme de manera que nos desplazamos aguas abajo ya que la longitud de los colectores es la misma y la introducción del caudal desde las subcuencas se ha distribuido de forma más o menos homogénea.

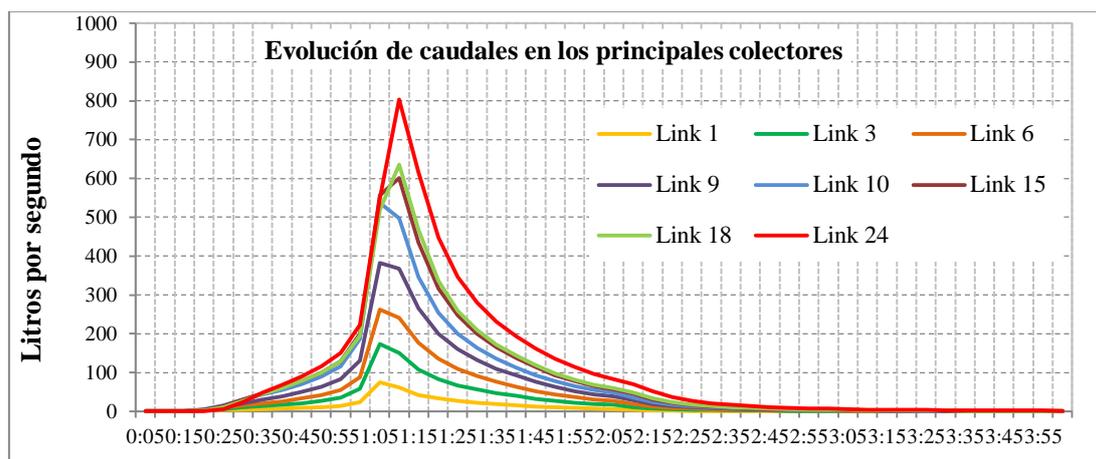


Gráfico 11.25. Hidrogramas de los principales colectores durante las cuatro primeras horas de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

En los conductos 17, 21, 22 y 23, durante un muy breve período de tiempo se supera la capacidad de llenado del 75%, pero esta diferencia es muy pequeña y se da durante muy poco tiempo. Por ejemplo, el colector 22, que es el peor de los casos, alcanza un llenado del 80% a la hora y ocho minutos, y sólo dos minutos después baja al 66%. Por ello es que no se ha considerado realizar un cambio de colectores por otros de mayor tamaño, puesto que en ese caso lo que habría sería un sobredimensionamiento en la mayor parte del tiempo.

La máxima velocidad de toda la red concurre en el último colector, que es por el que más caudal pasa. Y tal y como especifica CLABSA en sus directrices, no supera el límite superior de 6 m/s, a partir del cual podrían aparecer problemas de erosión en los conductos. A las velocidades mínimas se llega sólo en las colas del hidrograma, cuando apenas si circula caudal por los colectores.

Al tratarse ahora de conductos más pequeños, el número de Froude aumenta, siendo su media en la mayoría de los tubos, algo más de 1 (régimen supercrítico). En general, el flujo circula por el sistema dos tercios del tiempo en régimen supercrítico y un tercio en subcrítico.

En lo referente a la calidad del agua, las cantidades totales que llegan a la salida del sistema son casi iguales que las de la simulación con tubos de 1 metro de diámetro. Estas mínimas diferencias se deben a que los errores de cálculo en calidad son

ligeramente diferentes, en la nueva simulación son menores, por lo que los resultados se pueden considerar mejores.

En la tabla mostrada a continuación se exponen las soluciones de calidad, que son muy parecidas a las mostradas en la Tabla 11.15 en la columna Sistema Completo con SDUS.

Kg totales de contaminantes	
TSS	377,24
DBO5	61,51
TP	0,37
TKN	0,11
TCu	0,05
TCr	0,03
TNi	0,08
TPb	4,75
TZn	0,48

Tabla 11.9. Kilos de contaminantes acumulados a la salida del sistema.

Para finalizar, a modo de resumen de esta simulación con los nuevos colectores, se muestran los gráficos proporcionados por el programa SWMM para el *Outfall*.

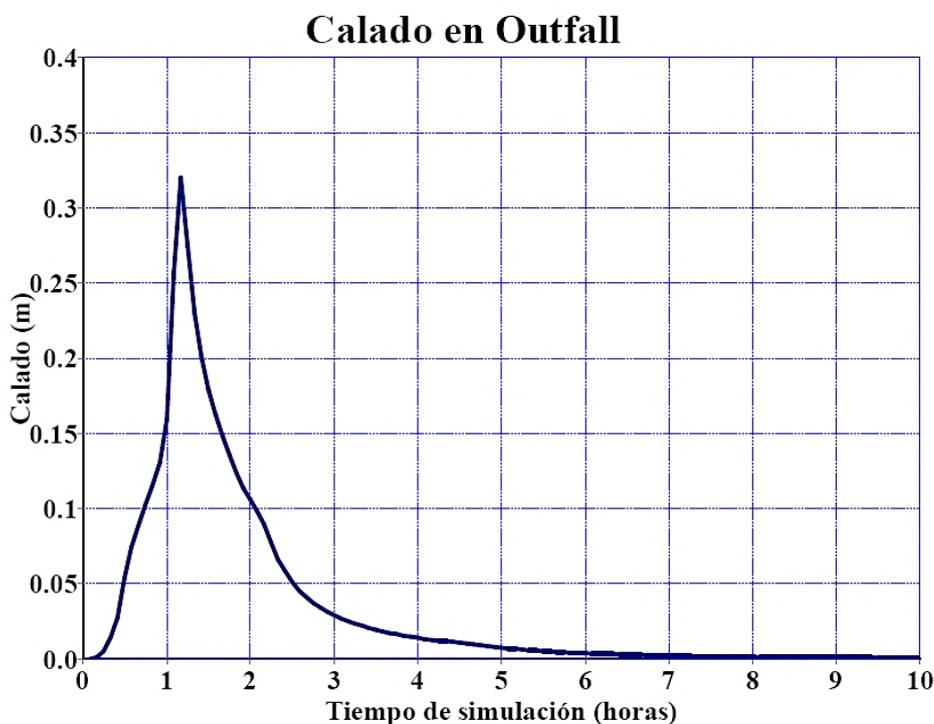


Gráfico 11.26. Evolución temporal del calado en metros.

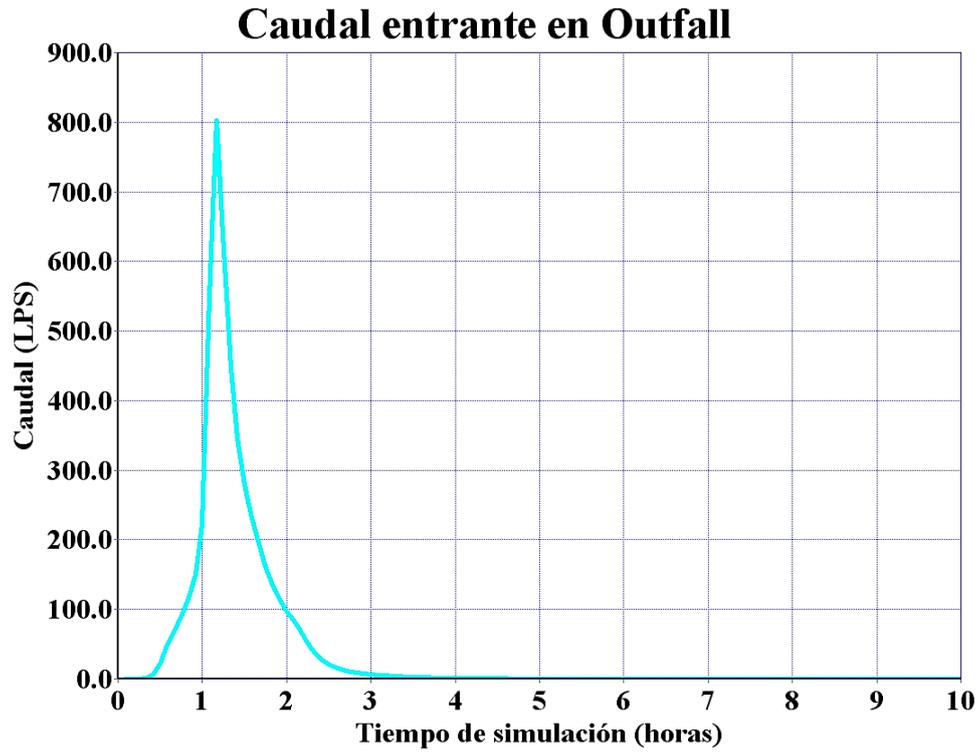


Gráfico 11.27. Caudal que entra a la sección crítica de salida.

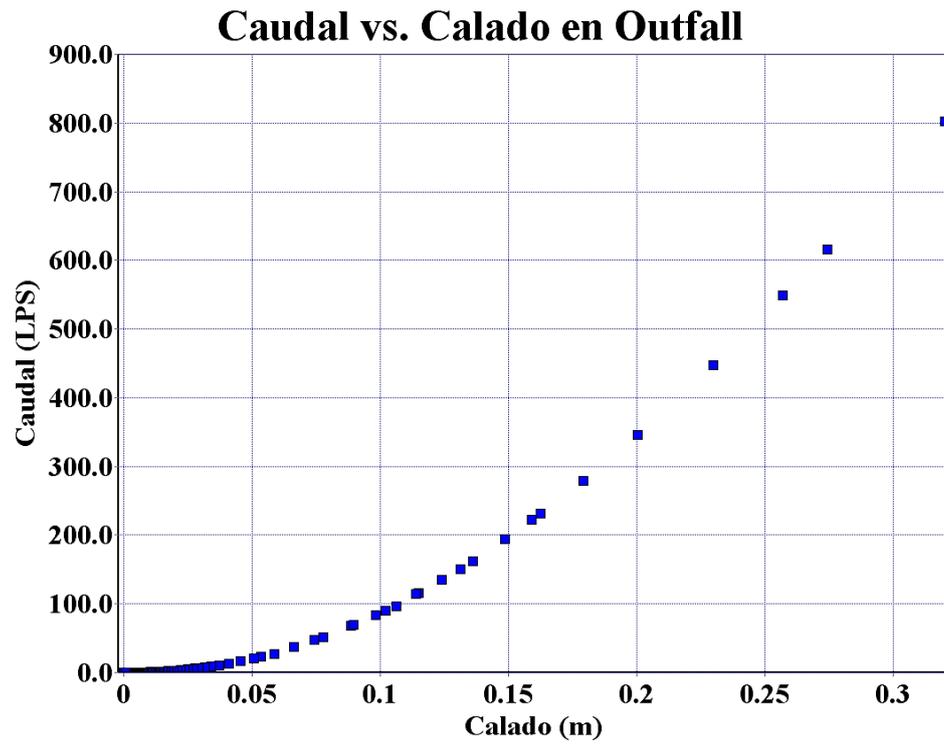


Gráfico 11.28. Relación entre el caudal entrante y el calado en la salida.

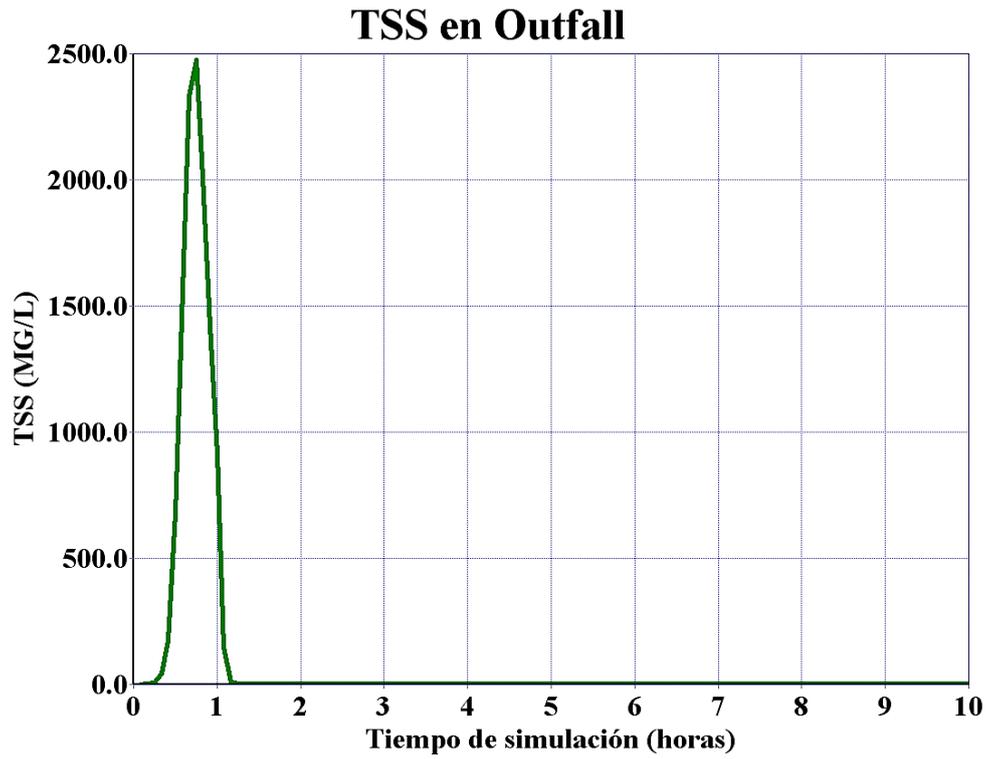


Gráfico 11.29. Polutograma de los Sólidos Totales en Suspensión.

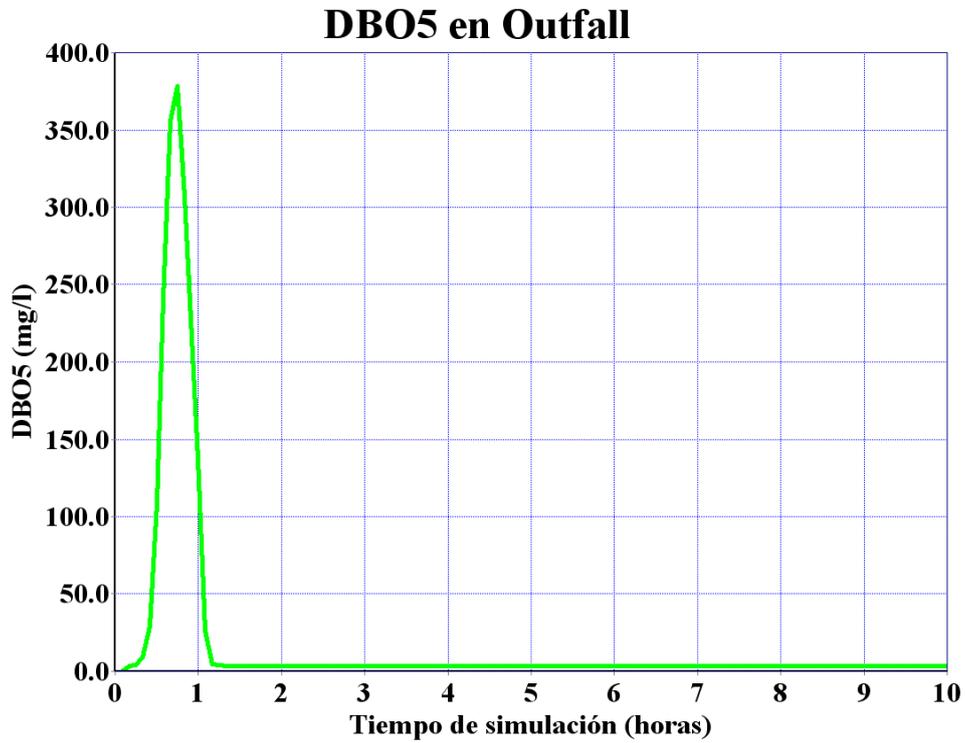


Gráfico 11.30. Polutograma de la DBO5.

12. CONCLUSIONES

1. Relativas a la primera parte del trabajo.

La primera vez que supe de este tipo de técnicas fue cursando la signatura de “Redes de Saneamiento”. Por entonces yo estaba trabajando en un estudio de ingeniería diseñando pequeñas redes de colectores para urbanizaciones y me llamó mucho la atención este nuevo enfoque que se hacía del drenaje. Esta fue la razón que me impulsó a escribir esta tesina.

La realización de este trabajo me ha supuesto ampliar mi conocimiento en un campo del drenaje que, si bien ya se está empezando a desarrollar en este país, aquí aún es un gran desconocido. Aunque me gustaría mencionar a Sara Perales (a la cual no conozco personalmente, pero he leído muchas de sus ponencias y estudios) y el grupo de investigación GITECO, como los más prolíficos en este país en publicaciones dentro de este campo. También hay algunas empresas, sobre todo en el País Vasco, basadas en la implantación de algunas de las técnicas que podrían englobarse dentro del drenaje urbano sostenible. Y la reciente normativa de Aguas en Galicia ya recoge la necesidad de implantar estas técnicas sobre las denominadas de drenaje convencional. Pero a diferencia de lo que ocurre en Reino Unido, Estados Unidos o Australia, aquí no hay organizaciones que fomenten la investigación, uso y funcionamiento de las técnicas de drenaje urbano sostenible. Por lo que casi toda la bibliografía consultada y los casos de estudio han sido extranjeros.

La baja implantación que tienen estas técnicas en este país puede deberse al tipo de régimen de lluvias que tenemos en la mayor parte del territorio. Concentradas en unos meses al año, de tipo torrencial y con largos periodos de estiaje. Hablando con algunos proyectistas e foros de construcción, comentaban el desconocimiento existente sobre de cómo iban a funcionar las técnicas que pensaban implantar por las pocas prácticas que hay para el tipo de climatología presente en España. Sí que hay algunas experiencias, como por ejemplo la de Torre Baró en Barcelona, la ampliación de la Castellana en Madrid o la incorporación de SDUS al nuevo planeamiento urbanístico de Paterna (Valencia). Pero no todas están publicadas ni a disposición pública, por lo que no pueden usarse como base o comparativa en posteriores proyectos.

Esta ausencia de comunicación entre los diferentes proyectistas, puede ser otra de los motivos de la baja implantación que tenemos en este país. Por ejemplo, en Reino Unido, donde hay plataformas donde las empresas constructoras y proyectistas comparten y valoran sus trabajos, hay un mayor desarrollo de estas técnicas, puesto que hay un mayor conocimiento de ellas. Pero no creo que esta sea la mayor de las causas en su reducido desarrollo.

Más importante sería el hecho de que aún no se tienen en cuenta de forma rigurosa en los planeamientos urbanísticos. En Galicia, como ya he mencionado, se acaban de incorporar a la normativa. Pero en dicha normativa lo que podemos encontrar son descripciones de las técnicas, se echan de menos unas pautas de colaboración entre los diferentes agentes que desarrollan los planeamientos urbanísticos, ya que es ahí donde debe comenzar la inclusión de estos sistemas.

2. Relativas a la segunda parte del trabajo.

Las simulaciones realizadas se han hecho a partir de datos pluviométricos reales y en un caso se ha contado con la red existente. Pero los valores relativos a la calidad se han supuesto en función de estudios en zonas cercanas, por lo que los resultados seguramente estén bastante alejados de lo que en realidad ocurriría. Hay que dejar claro que esto es una simulación no realizada con datos reales recogidos en la zona de estudio y que las conclusiones aquí sacadas están apoyadas solo y únicamente de unos resultados “hipotéticos”.

La elección del programa SWMM en su versión 5.0.22, se ha fundamentado en varias razones: Permite la introducción de LID's, es de uso abierto, es un programa muy extendido con el que trabaja mucha gente, lo que genera confianza y está elaborado por una administración de renombre la EPA. Aunque eso sí, el programa tiene algunas limitaciones. Problemas o inconvenientes con los que nos podemos topar al usar este programa para simular son:

- En algunos casos, no permite introducir la red tal cual está. Así que hubo que poner un depósito tras una compuerta cuando según plano no había tal depósito. Por tanto ya se producen modificaciones respecto a la situación real.

- Aún no incluyen las rebajas de contaminantes desde las herramientas LID's, se hace desde la de Usos del Suelo y como las diferentes técnicas tienen eficacias de descontaminación diferentes, hay que meter los contaminantes con los parámetros de acumulación, de arrastre y el porcentaje de eficacia por BMP, uno a uno. Esto en un estudio más exhaustivo de la calidad de las aguas de escorrentía que contase con varios contaminantes a analizar, supondría un importante gasto de tiempo.
- El programa permite crear un tipo de LID con iguales características (espesor de la capa de suelo, porosidad,...) y extensión unitaria. De esta manera se puede definir una sola vez y utilizar varias veces y en varias cuencas, añadiendo únicamente la extensión que ocupa en cada situación diferente. Por ejemplo, se define un área de biorretención y se determinan las características relativas a la superficie, suelo y almacenamiento. Luego esa área de biorretención se puede colocar en cualquier cuenca y en cada una de ellas se le da el valor del área que ocupa. De esta manera sólo hay que introducir los datos una vez, lo cual es bastante cómodo. El problema surge cuando alguna de las variables a definir es diferente, lo que ha ocurrido en este caso con las pendientes. Las pendientes eran diferentes en la mayoría de las cuencas, por lo que ha habido que definir cada técnica LID empleada (área de biorretención, cunetas verdes y pavimentos permeables) específicamente para cada cuenca. Esto supone un inconveniente porque requiere de una mayor inversión de tiempo en la definición del proyecto a simular.
- Otro inconveniente curioso ha sido comprobar los fallos en los cálculos de la calidad en las simulaciones. Cuando los colectores son muy grandes para un determinado caudal, como era este el caso, los errores en calidad se disparaban, pero éstos iban disminuyendo simplemente con reducir las dimensiones.

En todas las simulaciones realizadas ha quedado más que patente las ventajas de una implantación de un Sistema de Drenaje Urbano Sostenible, tanto en la gestión de la cantidad como de la calidad del agua de escorrentía. Los valores pico se han reducido en más de la mitad en la mayoría de los casos, alcanzando hasta en algún colector más del 90% del caudal máximo.

Pero claro está, el papel lo aguanta todo. Esto es una simulación, no es la realidad, aún hace falta más investigación acerca del funcionamiento conjunto de las diferentes

técnicas para poder dar unos valores más concisos de las tasas reales de reducción en la zona de estudio, tanto de caudal como de calidad. Lo que sí apunta es a una notable mejoría respecto a la situación actual, pero no creo que ésta pueda determinarse simplemente con simulaciones. Además se recuerda que los valores de calidad introducidos no son los reales, sino de zonas cercanas por no disponerse de datos y que la eficacia de reducción de la DBO₅ se ha supuesto por no encontrarse ningún valor en la bibliografía consultada.

Hay algunos estudios empíricos, como el recogido en la publicación “*The National Pollutant Removal Performance Database, version 3*” (Center for Watershed Protection, 2006), que demuestran la variabilidad en la eficacia del funcionamiento de las técnicas de drenaje urbano sostenible. Esta eficacia no sólo depende de la técnica en sí, sino del emplazamiento, de las características físicas y climatológicas de dicha localización, de las especies vegetales existentes (de haberlas), de la carga contaminante que lleve el agua, etc.... Así que cada proyecto con SDUS, tendrá unas influencias en los caudales y calidad específicos, por lo que es recomendable el seguimiento de cada una de ellos una vez ejecutados.

Quizá sería interesante disponer de parcelas de estudio en las que poder evaluar el funcionamiento de los SDUS, pero por desgracia esto no siempre es viable económicamente o por razones de espacio, aunque ayudaría a conocer las técnicas y sobre todo los materiales a usar en cada técnica que mejor se ajustan a una determinada climatología. Lo que sí que podría hacerse sería monitorizar los SDUS recién instalados para ir evaluando su funcionamiento a lo largo del tiempo y poder acceder a dicho datos. Esto ayudaría enormemente a los proyectistas en un futuro a la hora de diseñar y escoger los elementos más adecuados en la concepción de nuevos sistemas de drenaje.

Otro de los motivos por los que serían recomendables las parcelas de estudio, es para analizar el comportamiento de estos sistemas, especialmente aquellos que forman parte del paisaje urbano como áreas de biorretención o pavimentos permeables, frente a episodios torrenciales típicos de la ribera mediterránea, ya que apenas si se ha encontrado información sobre este caso. Y creo que sería de vital importancia comprobar cómo funcionan y si ayudan a controlar las inundaciones que se producen con las lluvias de finales de verano/otoño, conocidas también como la gota fría.

En la última de las simulaciones, se propusieron unos colectores de pequeñas dimensiones (las mínimas establecidas por la entidad gestora de las aguas urbanas). Al separar estas aguas de la red convencional, podrían reutilizarse más fácilmente para el riego, ya que el proceso de descontaminación que requerirían sería más simple y más barato que el de las EDAR. Esto, representaría una inversión económica que habría que valorar, pero podría resultar beneficioso en una ciudad como Barcelona que ya ha sufrido de restricciones en el abastecimiento de agua con bastante frecuencia en un pasado reciente.

Esa sería la parte positiva de la ejecución de nuevas redes de drenaje asociadas únicamente a espacios con SDUS incorporados, pero claro, hay que contemplar el gasto que ello conlleva, que a lo mejor los ayuntamientos no están en disposición de soportar. Sobre todo contando ya con una red de alcantarillado. Como se ha podido ver en el Anejo 2 Hidráulica, bajo la zona de estudio ya existe una red de colectores. En realidad existe más de una red, actualmente hay muchos colectores instalados bajo la zona de estudio, circulando de forma paralela entre sí, perpendicular, incluso haciendo recorridos circulares. Así que en casos como este, es muy probable que la administración no contemple la creación de otra red más. Lo que quizá sí que quizá podría hacerse es separar dentro de esta red, una parte por la que circule el agua procedente de los SDUS.

De todas formas, tanto si se construye una red independiente o no, como conclusión final me gustaría remarcar lo ventajoso que supone la implantación de estos sistemas. Rebajan el caudal pico, lo que reduce el riesgo de inundación, disminuyen la cantidad de contaminantes en el agua, lo que permite la reutilización del agua y mejoran la calidad paisajística dentro de las ciudades, revalorizándolas.

Este trabajo versa sobre un caso hipotético, por lo que los resultados obtenidos no pueden ajustarse a una “predicción real” de lo que ocurriría tras implantar un Sistema de Drenaje Urbano Sostenible. Para ello se tendría que haber trabajado sobre una parcela de experimentación, estudiando las características físicas del sitio, recogiendo datos y haciendo las calibraciones pertinentes. Pero sí que puede considerarse una “predicción estimada” de lo que ocurriría, es decir, las simulaciones han servido para comprobar cómo, sustituyendo una parte de las superficies impermeables por otras permeables y por áreas verdes, el caudal de escorrentía y la concentración de contaminantes

CONCLUSIONES

arrastrados disminuyen de manera considerable, aunque los valores de los resultados no se correspondan con la realidad. Y esto ocurre sin hacer grandes modificaciones importantes en las infraestructuras preexistentes en una ciudad, por lo que creo que este sistema de drenaje debería ser más valorado en las planificaciones urbanísticas, tanto por los proyectistas como por las administraciones locales.

BIBLIOGRAFÍA

- ALTAREJOS GARCÍA, L. (2007): “*Aplicación de sistemas de drenaje urbano sostenible en el desarrollo urbanístico de Paterna (Valencia)*”. V Congreso de Ingeniería Civil. Sevilla 26,27 y 28 de Noviembre de 2007.
- ARROJO AGUDO, P. (2007): “*Bases para un documento de directrices en materia de prevención y gestión de sequías en la planificación hidrológica. La sequía en España. Directrices para minimizar su impacto.*” Edita: Ministerio de Medio Ambiente, págs. 12-13.
- ARROJO AGUDO, P.; SAURA MARTÍNEZ, J.; CUBILLO GONZÁLEZ, F.; LA CALLE MARCOS, A.; PITA LÓPEZ, M.F.; LÓPEZ GETA, J.A.; MUJERIEGO SAAHUQUILLO, R.; HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, S.; ROLDAN CAÑAS, J.; CABRERA MARCET, E.; CASTRO, A. y GUIJARRO L. (2007): “*La sequía en España. Directrices para minimizar su impacto.*” Edita: Ministerio de Medio Ambiente
- A.S.C.E. (1992): “*Design, and Construction of Urban Stormwater Management Systems*”. American Society of Civil Engineers, New York, 1992
- AUGAS DE GALICIA.EMPRESA PÚBLICA DE OBRAS E SERVICIOS HIDRÁULICOS. (Noviembre 2009): “*Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia. Sistemas de Saneamiento.*” ITOHG-SAN-0/0, ITOHG-SAN-1/0, ITOHG-SAN-1/4.
- BANNERMAN, R.T.; BAUN, K.; BOHM, M.; HUGHES, P.E. y GRACZYK, D.A. (1984): “*Evaluation of Urban Nonpoint Source Pollution Management in Milwaukee County, Wisconsin, Report N° PB84-114164*”. U.S. EPA, Chicago, Illinois.
- CABRERA CAZORLA, L. y RASO QUINTANA, J. (2006):”*Parque urbano de laminación de avenidas de Gavá y Viladecans (Barcelona)*”. III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente: “*Agua, Biodiversidad e Ingeniería*”. Zaragoza, España, 25-27 de octubre de 2006.
- CASTRO FRESNO, D.; RODRÍGUEZ BAYÓN, J.; RODRÍGUEZ, HERNÁNDEZ J.; BALLESTER MUÑOZ, F. (2005): “*Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*”. Interciencia, vol.30, número 005, Asociación Interciencia Venezuela, Caracas, págs. 255-260, ISSN 0378-1844.

- CENTER FOR WATERSHED PROTECTION (2006): *"The National Pollutant Removal Performance Database v. 3"* The Stormwater Manager's Resource Center, Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Wastewater Management, Ellicott City, Maryland.
- CIRIA. SUDS Bulletin _ *"The bi-annual bulletin of news and development in Sustainable Urban Drainage Systems"*. Issue 1 January 2002, Issue 2 July 2002, Issue 3 February 2003, Issue 4 July 2003, Issue 5 February 2004, Issue 5 July 2004, Issue 6 February 2005, Issue 7 July 2005. Edita: CIRIA
- CLARK COUNTY REGIONAL FLOOD CONTROL DISTRICT. (1999): *"Hydrologic Criteria and Drainage Design Manual"*.
- CSIRO (1999): "Urban Stormwater. Best Practice Environmental Management Guidelines". Edita: Csiro Publishing. ISBN: 0-643-09350-8.
- ELORRIETA PÉREZ DE DIEGO, I.; Perlado Hergueta, S.; RUEDA PALENZUELA, S.; CUCHÍ, A.; DE MINGO ESTEBAN, M.; SANZ, A.; SUBIRATS HUMET, J.; TERRADAS, J. y VELÁZQUEZ VALORIA I. (2007): *"Libro Verde de Medio Ambiente Urbano. Tomo I"*. Edita: Ministerio de Medio Ambiente, pág. 52.
- FERNÁNDEZ, B.; RIVERA P. y MONTT J. (2004): *"Drenaje de aguas lluvia urbanas en zonas semiáridas"*. ARQ Ensayos y documentos, julio, número 057. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile, págs. 64-67.
- FOUNDATION FOR WATER RESEARCH (FWR). (1998): *"Urban Pollution Management Manual (UPM)"*. Second Edition. ISBN: 0-9521712-4-4.
- GIRONÁS J. y ROESNER L.A., DAVIS J. (2009): *"Storm Water Management Model Applications Manual"*. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH 45268. NATIONAL. EPA/600/R-09/000 Julio 2009.
- GOMEZ, M. (2007): *"Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0"*. Flumen. Universitat Politècnica de Catalunya. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental.
- HUBER W. C.; CANNO, N L. y STOUDEER, M. (2006). *"BMP Modeling Concepts and Simulation"*. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH 45268. EPA/600/R-06/033

Julio 2006.

- IRENE SECO, R. (Julio 2010): “*Modelo para la estimación del transporte de sedimentos y contaminantes asociados en una red de alcantarillado unitario mediante la utilización de SWMM 5.0.*” Tesina de Máster. UPC
- KELLAGHER, R. (2004): “*Drainage of a development sites - a guide*” (CIRIA X108). Edita CIRIA y HR Wallinford. ISBN: 0-86017-900-1.
- YOUNG, K.D.; YOUNOS, T.; DYMOND, R. L.; KIBLER, D.F. y LEE, D.H. (2010): “*Application of the Analytic Hierarchy Process for Selecting and Modeling Stormwater Best Management Practices.*” Universities Council on Water Resources Journal of Contemporary Water Research & Education Issue 146, Pages 50-63, December 2010
- MIDDLESEX UNIVERSITY. (2003): “*Report 5.1. Review of the Use of Stormwater BMPs in Europe*”. DayWater. WP / Task / Deliverable N°: WP5 / T5.1 / D5.1. Dissemination Level: PU.
- MMA (2002): “*Experiencia piloto de medición y estudio de las descargas de sistemas unitarios (DSU) del alcantarillado a los medios receptores en tiempo de tormenta, en varios municipios españoles. Resumen de los trabajos realizados.*” Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Agua y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.
- MONTT MONCKEBERG, J. P. (2000): “*Antecedentes empíricos y modelación de la calidad de las aguas lluvias urbanas*”. Tesis dirigida por Bonifacio Fernández e integrada en el proyecto FONDECYT 1971186. Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. (2000)
- MOPU (1987): *Mezclas bituminosas porosas. Secretaria General Técnica, Centro de Publicaciones, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.* ISBN: 84-7433-491-8.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES. Committee on Reducing Stormwater Discharge to Water Pollution. Water Science and Technology Board. Division on Earth and Life Studies. (2009): “*Urban Stormwater Management in the United States*”. Edita: The National Academies Press. ISBN-13: 978-0-309-12539-0.

- NATIONAL SDSU WORKING GROUP (2004): *“Interim Code of Practice for Sustainable Drainage Systems”*. ISBN: 0-86017-904-4.
- PERALES MOMPARDER, S.; ANDRÉS-DOMÉNECH I. (2007): *“Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia”* Equipamiento y Servicio Municipales, septiembre-octubre; año 24 (133), págs.66-77. ISSN: 11316381.
- PETRUCCI G., (2009): *“A methodology to assess sustainability of urban storm water management (USWM)”*. First World Young Earth-Scientists Congress 2009. Pekin, China, del 25 al 28 de Octubre de 2009.
- PUERTAS AGUDO, J.; SUÁREZ LÓPEZ, J. y ANTA ÁLVAREZ, J. (2008): *“Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano.”* Edita: CEDEX. ISBN: 978-84-7790-475-5.
- REVITT, D.M.; ELLIS J.B. y SCHOLE L. (MIDDLESEX UNIVERSITY) (2003): *“Criteria Relevant to the Assessment of BMP Performance”*. DayWater. WP 5 / Task 5.2 / Deliverable N° 5.2. Dissemination Level: PU.
- REVITT, D.M.; ELLIS J.B. y SCHOLE L. (MIDDLESEX UNIVERSITY) (2005): *“Determination of Numerical Values for the Assessment of BMPs”*. DayWater. WP 5 / Task 5.4 / Deliverable N° 5.4. Dissemination Level: (PU).
- REVITT, D.M.; ELLIS, J.B. y SCHOLE, L. (MIDDLESEX UNIVERSITY) (2005): *“The Fate of Stormwater Priority Pollutants in BMPs”*. DayWater. WP 5 / Task 5.3 / Deliverable N° 5.3. Dissemination Level: PU.
- RIERA I LLORDERA, S. (2008): *“Anàlisi dels abocaments en temps de pluja desde la xarxa de sanejament de Granollers. Comparació de metodologies SWMM5.0 i SIMPOL”*. Tesina Predoctoral dirigida por Manuel Gómez. UPC
- RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, J.; RODRÍGUEZ BAYÓN, J.; CASTRO FRESNO, D.; CALZADA PÉREZ, M.A.; CANTERAS JORDANA, J.C.; BALLESTER MUÑOZ, F.; MARAÑÓN MAISON, E.; MUÑOZ VEGAS M. y LASA, P. (2006): *“Construcción de pavimentos permeables para el control en origen de la escorrentía urbana: ejemplo práctico del aparcamiento del palacio de deportes de la guía.”* III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Agua, Biodiversidad e Ingeniería. Zaragoza, 25-27 de octubre de 2006.
- ROSSMAN, L.A. (2005): *“Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0.”* National Risk Management Research Laboratory. U.S. EPA.

- ROSSMAN, L.A. (2010): “*Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0.*” EPA/600/R-05/040. Revised July 2010
- SÁNCHEZ PACHÓN, C. (2009): “Gestión sostenible del agua en el desarrollo urbano.” Edita: Cámara Argentina de la Construcción. Área Pensamiento Estratégico. Buenos Aires, Argentina.
- SCHUELER, T. (2000): “*National Pollutant Removal Performance Database: for Stormwater Treatment Practices, Second Edition*”. Center for Watershed Protection.
- SHAHEEN, D.G. (1975): “*Contributions of Urban Roadway Usage to Water Pollution. 600/2-75-004.*” U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- SIDEK, L. M.; BASRI, H. y ZALALUDDIN, Z. (2008): “Development of Decision Support Tools for Urban Storm Drainage”. The International Conference on Construction and Building Technology. Kuala-Lumpur, Malasia, 16 20 de Junio.
- STAHERE, P. y URBONAS, B. (1990): “*Stormwater Detention for Drainage, Water Quality and CSO Management.*” Prentice-Hall, New Jersey.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1983). “*Results of the Nationwide Urban Runoff Program (NURP), Vol. 1, NTIS PB 84-185552.*” Water Planning Division, Washington, DC.
- US-EPA (2005): “*Manual Usuario SWMM5.0 ve. Modelo de Gestión de aguas Pluviales*”. Traducción al Español por GMMF. UPV.
- VALLS BENAVIDES, G. y PERALES MOMPALER, S. (2008): “*Integración de las aguas pluviales en el paisaje urbano: un valor social a fomentar*”. I Congreso Nacional de Urbanismo y Ordenación del Territorio. Bilbao 7, 8 y 9 de Mayo de 2008.
- WOODS BALLARD, B.; KELLAGHER, R.; MARTIN, P.; JEFFERIES, C.; BRAY, R. y SHAFFER, P. (2007): “*Site handbook for the construction of SDSUS*” (CIRIA C698). Edita CIRIA. ISBN-13: 978-0-86017-698-5.
- WOODS BALLARD, B.; KELLAGHER, R.; MARTIN, P.; JEFFERIES, C.; BRAY, R. y SHAFFER, P. (2007): “*The SDSU manual*” (CIRIA C697). Edita: CIRIA. ISBN-13: 978-0-86017-697-8.

WEBS CONSULTADAS

<http://www.bmpdatabase.org/>

<http://blog.cunysustainablecities.org/2009/03/nyc-green-roof-tax-abatement/>

<http://cfpub.epa.gov/npdes/stormwater/menuofbmps/index.cfm>

<http://charmeck.org/stormwater/regulations/Documents/BMP%20DSM/4.1%20Bioretention-July%201%2c%202013.pdf>

<http://daywater.enpc.fr/www.daywater.org/>

<http://swmm2000.com>

http://www.aquatecnic.es/index.php?option=com_content&task=view&id=44&Itemid=58

http://www.camarco.org.ar/DL_Publicaciones/3%20Gesti%C3%B3n%20Sostenible%20del%20Agua%20en%20el%20Desarrollo%20Urbano%20Borrad.pdf

<http://www.ccrfcd.org/hcddm.htm>

<http://www.chiwater.com>

<http://www.ciria.com/suds/>

http://www.ciria.org/service/Home/AM/ContentManagerNet/HomePages/CIRIA_1502_20080929T115140HomePage.aspx?Section=Home

<http://www.environment-agency.gov.uk/business/sectors/36998.aspx>

<http://www.epa.gov/watertrain/cwa/>

http://www.epa.vic.gov.au/water/stormwater/stormwater_management.asp

<http://www.giteco.unican.es/gitecoSUDS/index.html>

<http://www.interdrain.net/viadrain.html>

<http://www.itp-depuracion.com/documentacion/articulos.php?accion=leer&id=38>

<http://www.ncwe.org.au/arq/>

http://www.retop.es/retop.php?tabla=obra&id_tabla=7

http://www.sepa.org.uk/water/water_regulation/regimes/pollution_control/suds.aspx

<http://www.toolkit.net.au/music/>

<http://www.uwtc.tay.ac.uk/>

<http://www.wsud.melbournewater.com.au/>

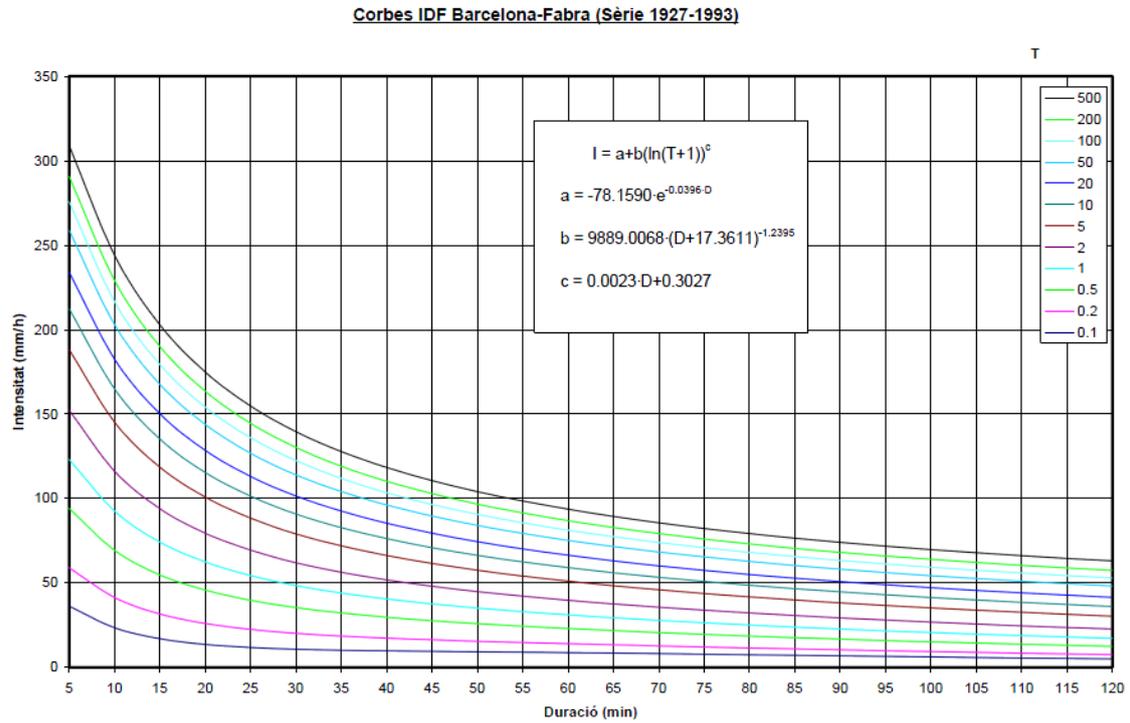
<http://www.wsud.org/water-quality/>

ANEJOS

Subcuencas de la zona de estudio



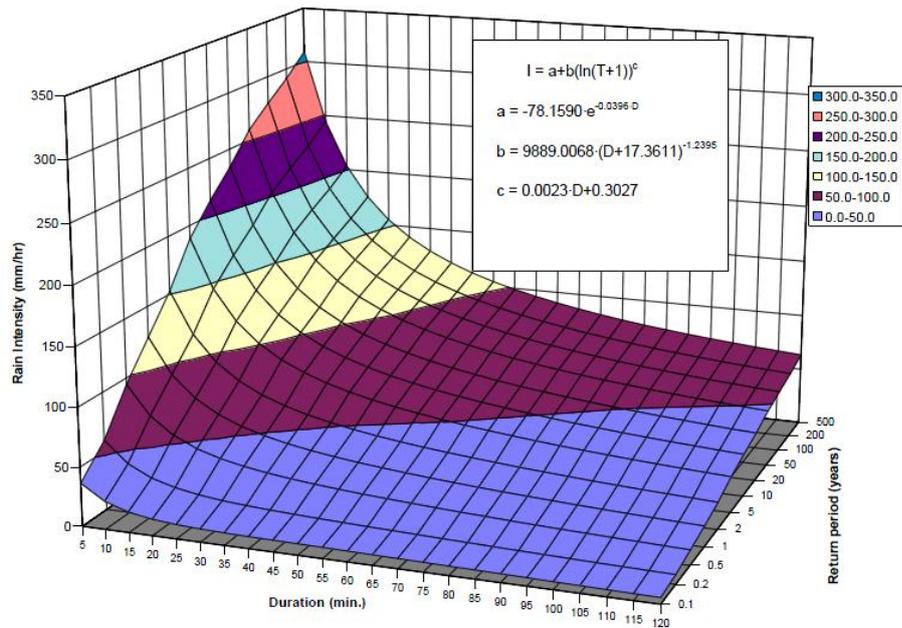
Gráficos de CLABSA



Curvas de Intensidad -duración -frecuencia (IDF) para Barcelona según la serie del observatorio Fabra. Gráfico 2D. Fuente: CLABSA

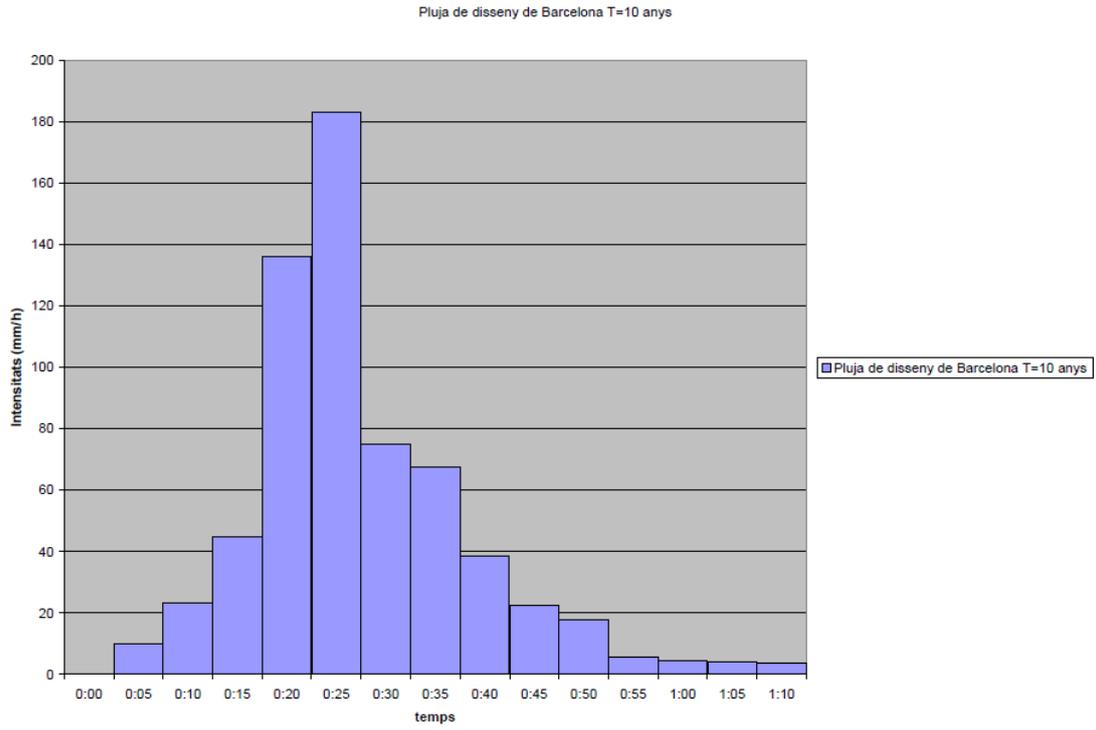


Figure 3: GENERALIZED IDF FUNCTION FOR THE CITY OF BARCELONA



Curvas IDF para Barcelona. Gráfico 3D. Fuente: CLABSA

ANEJO 1.HIDROLOGÍA



Lluvia de diseño para Barcelona de periodo de retorno 10 años. Fuente: CLABSA

Niveles freáticos en las inmediaciones de la Diagonal

TXAL							
G. V. Corts Catalanes, 670							
COORDENADAS X		430859		COORDENADAS Y		4582777	
FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)
24-ene-00	4,94	23-sep-02	4,61	07-jun-05	3,89	12-mar-08	4,59
21-feb-00	5,16	26-nov-02	5,21	19-jul-05	3,67	09-abr-08	4,95
17-abr-00	5,28	27-ene-03	5,29	07-sep-05	3,97	09-jul-08	4,22
29-may-00	5,19	20-feb-03	5,32	18-oct-05	4,74	04-ago-08	2,60
26-jun-00	4,01	24-mar-03	5,28	16-nov-05	4,92	17-sep-08	4,23
19-jul-00	4,44	28-abr-03	5,21	12-dic-05	5,02	15-oct-08	4,63
28-ago-00	3,94	26-may-03	5,14	18-ene-06	4,93	19-nov-08	4,91
26-sep-00	4,38	30-jun-03	4,10	13-feb-06	4,99	18-dic-08	4,78
23-oct-00	5,10	29-jul-03	4,11	03-abr-06	4,49	16-feb-09	5,03
27-nov-00	5,23	08-sep-03	4,48	08-may-06	4,96	16-mar-09	4,86
18-dic-00	5,32	10-nov-03	4,90	15-jun-06	4,71	22-abr-09	5,01
22-ene-01	4,97	09-ene-04	5,06	12-jul-06	4,21	26-may-09	4,94
27-feb-01	5,24	09-feb-04	4,60	12-sep-06	1,25	17-jun-09	4,16
27-mar-01	5,25	22-mar-04	5,06	26-oct-06	4,69	13-jul-09	3,01
23-abr-01	5,14	13-abr-04	4,96	13-nov-06	4,79	04-ago-09	4,47
29-may-01	3,65	10-may-04	5,11	15-dic-06	5,16	16-sep-09	4,68
25-jun-01	3,90	07-jun-04	4,82	16-ene-07	4,81	07-oct-09	4,20
23-jul-01	4,07	19-jul-04	4,50	16-feb-07	5,09	17-nov-09	4,88
29-oct-01	5,07	14-sep-04	4,18	19-mar-07	5,11	15-dic-09	4,76
29-nov-01	3,71	18-oct-04	4,61	23-abr-07	7,06	20-ene-10	4,98
28-ene-02	5,36	16-nov-04	4,94	19-jun-07	4,36	16-feb-10	4,86
25-feb-02	4,79	20-dic-04	4,54	18-jul-07	4,36	15-mar-10	4,98
25-mar-02	4,81	18-ene-05	5,17	16-oct-07	4,99	19-abr-10	5,05
22-abr-02	5,28	14-feb-05	4,98	20-nov-07	4,96	19-may-10	5,12
27-may-02	5,03	14-mar-05	5,09	19-dic-07	4,96	15-jun-10	5,04
25-jun-02	4,73	11-abr-05	5,03	21-ene-08	4,70		
15-jul-02	4,41	10-may-05	5,08	20-feb-08	5,03		

ANEJO 1.HIDROLOGÍA

MAL3							
Cruce C. Mallorca - Pg. de Sant Joan							
COORDENADAS X		430725,1		COORDENADAS Y		4583635,75	
FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)
24-ene-00	16,44	27-ene-03	16,20	09-mar-06	16,18	09-jul-08	16,01
29-may-00	16,44	20-feb-03	16,20	15-jun-06	16,09	04-ago-08	16,00
26-jun-00	16,43	28-abr-03	16,20	12-sep-06	16,13	17-sep-08	15,26
19-jul-00	16,38	08-sep-03	16,17	26-oct-06	16,12	15-oct-08	15,97
28-ago-00	16,18	14-oct-03	16,18	13-nov-06	16,14	19-nov-08	15,98
26-sep-00	16,11	01-dic-03	16,18	15-dic-06	16,14	18-dic-08	15,85
23-oct-00	16,13	09-feb-04	16,16	16-ene-07	16,11	19-ene-09	16,02
27-nov-00	16,15	12-mar-04	16,20	13-feb-07	16,11	16-feb-09	16,05
18-dic-00	16,15	13-abr-04	16,17	14-mar-07	16,10	22-abr-09	16,07
22-ene-01	16,16	10-may-04	16,20	23-abr-07	16,14	02-jun-09	16,04
27-feb-01	16,19	07-jun-04	16,17	14-may-07	16,14	17-jun-09	15,94
27-mar-01	16,19	18-oct-04	16,10	19-jun-07	16,12	13-jul-09	16,06
23-abr-01	16,18	16-nov-04	16,10	18-jul-07	16,10	04-ago-09	16,06
29-may-01	16,18	20-dic-04	16,20	08-ago-07	16,10	16-sep-09	16,06
25-jun-01	16,19	18-ene-05	16,16	19-sep-07	16,10	07-oct-09	16,08
23-jul-01	16,18	14-mar-05	16,13	16-oct-07	16,07	17-nov-09	16,05
21-ago-01	16,18	10-may-05	16,10	20-nov-07	16,11	15-dic-09	16,02
25-sep-01	15,88	07-jun-05	16,03	19-dic-07	16,10	20-ene-10	16,00
29-oct-01	16,19	11-jul-05	16,13	21-ene-08	16,10	15-mar-10	15,99
29-nov-01	16,19	07-sep-05	16,17	20-feb-08	16,06	19-abr-10	15,96
28-ene-02	16,20	18-oct-05	16,15	12-mar-08	16,02	19-may-10	15,93
25-mar-02	16,21	12-dic-05	16,08	09-abr-08	16,03	15-jun-10	15,83
21-oct-02	16,20	17-ene-06	16,15	22-may-08	16,01		
16-dic-02	16,20	13-feb-06	16,20	23-jun-08	16,02		

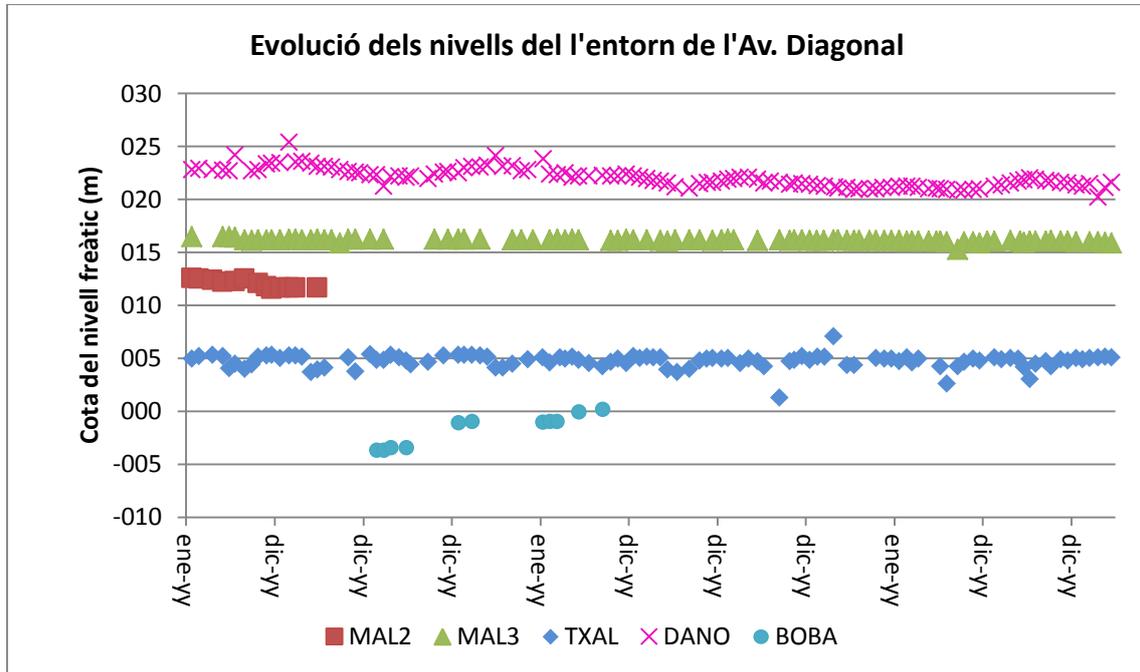
SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA
DIAGONAL DE BARCELONA

MAL2							
Cruce C. Mallorca - C. Castillejos							
COORDEANDAS X		431460,59		COORDEANDAS Y		4584350,93	
FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)
24-ene-00	12,53	19-jul-00	12,25	27-nov-00	11,73	27-feb-01	11,63
21-feb-00	12,46	28-ago-00	12,47	18-dic-00	11,48	27-mar-01	11,60
17-abr-00	12,33	23-oct-00	12,05	22-ene-01	11,63	25-jun-01	11,65
29-may-00	12,19						

BOBA							
Cruce C. Bolívia - C. Badajoz							
COORDEANDAS X		432430,53		COORDEANDAS Y		4583935,87	
FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)
25-feb-02	-3,71	25-jun-02	-3,48	09-ene-04	-1,07	07-jun-04	-0,09
25-mar-02	-3,70	27-ene-03	-1,08	09-feb-04	-1,01	14-sep-04	0,14
22-abr-02	-3,48	24-mar-03	-1,00	08-mar-04	-0,98		

ANEJO 1.HIDROLOGÍA

DANO							
C. Còrsega , 590							
COORDENADAS X		431168,02		COORDENADAS Y		4584621,35	
FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)	FECHA	COTA NIVEL FREÁTICO (m)
24-ene-00	22,81	21-oct-02	22,36	11-jul-05	21,16	20-feb-08	21,24
21-feb-00	22,89	26-nov-02	22,56	07-sep-05	21,06	12-mar-08	21,24
17-abr-00	22,81	16-dic-02	22,61	18-oct-05	21,44	09-abr-08	21,12
29-may-00	22,71	27-ene-03	22,51	21-nov-05	21,56	22-may-08	20,95
26-jun-00	22,66	20-feb-03	22,96	12-dic-05	21,61	23-jun-08	21,04
19-jul-00	24,20	24-mar-03	23,06	17-ene-06	21,70	09-jul-08	20,97
26-sep-00	22,66	28-abr-03	23,04	13-feb-06	21,89	04-ago-08	20,91
23-oct-00	22,81	26-may-03	23,21	09-mar-06	21,92	17-sep-08	20,88
27-nov-00	23,31	30-jun-03	24,11	03-abr-06	22,04	15-oct-08	20,87
18-dic-00	23,40	29-jul-03	23,06	08-may-06	22,04	19-nov-08	20,91
22-ene-01	23,45	08-sep-03	23,13	15-jun-06	21,90	18-dic-08	20,98
27-feb-01	25,40	14-oct-03	22,69	12-jul-06	21,51	16-feb-09	21,20
27-mar-01	23,51	10-nov-03	22,76	07-ago-06	21,69	16-mar-09	21,34
23-abr-01	23,55	12-ene-04	23,79	12-sep-06	21,61	22-abr-09	21,51
29-may-01	23,41	09-feb-04	22,38	26-oct-06	21,42	26-may-09	21,68
25-jun-01	23,06	12-mar-04	22,31	13-nov-06	21,49	17-jun-09	21,82
23-jul-01	23,06	13-abr-04	22,49	15-dic-06	21,48	13-jul-09	21,98
21-ago-01	23,03	10-may-04	22,06	16-ene-07	21,41	04-ago-09	21,91
25-sep-01	22,78	07-jun-04	22,16	16-feb-07	21,28	16-sep-09	21,77
29-oct-01	22,59	19-jul-04	22,21	19-mar-07	21,24	07-oct-09	21,71
29-nov-01	22,54	14-sep-04	22,26	30-abr-07	21,16	17-nov-09	21,57
17-dic-01	22,46	18-oct-04	22,16	14-may-07	21,06	15-dic-09	21,50
28-ene-02	22,29	16-nov-04	22,16	19-jun-07	21,08	20-ene-10	21,34
25-feb-02	22,29	20-dic-04	22,39	18-jul-07	20,91	16-feb-10	21,21
25-mar-02	21,23	18-ene-05	22,21	08-ago-07	20,97	15-mar-10	21,45
22-abr-02	22,12	14-feb-05	22,06	19-sep-07	20,95	19-abr-10	20,18
27-may-02	22,16	14-mar-05	21,94	16-oct-07	20,96	19-may-10	21,11
25-jun-02	22,09	11-abr-05	21,79	14-nov-07	21,09	15-jun-10	21,58
15-jul-02	22,19	10-may-05	21,73	19-dic-07	21,09	20-feb-08	21,24
23-sep-02	21,96	07-jun-05	21,52	21-ene-08	21,21		



ANEJO 1.HIDROLOGÍA

ANEJO 2.HIDRÁULICA

**Planos Situación actual del alcantarillado en la zona de estudio y leyenda de los
planos.**

ANEJO 2.HIDRÁULICA



XARXA DE CLAVEGUERAM DE BARCELONA

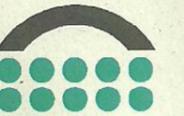
IX PG. SANT JOAN-PL. GLORIES.

Projecció UTM. Escala: 1/2000

Coordenada Inferior esquerra: (431053.806, 4583598.758) m. Coordenaça Inferior dreta: (431822.194, 4583598.758) m.
 Coordenaça Superior dreta: (431822.194, 4584077.242) m. Coordenaça Superior esquerra: (431053.806, 4584077.242) m.

LLEGGENDA

- Xarxa planificada Primària (P)
- Xarxa planificada Secundària (S)
- Xarxa planificada anti-DSU (D)
- Xarxa planificada anti-inundació T>10
- Zones en obres
- Xarxa altres organismes
- Clavegueró longitudinal particular
- Xarxa fora de servei

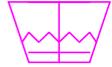


CLABSA

Data: 07/07/2010

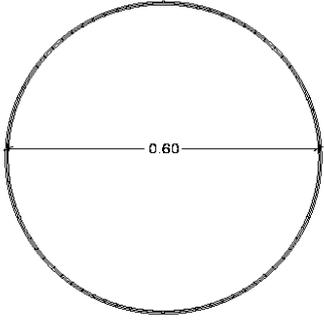
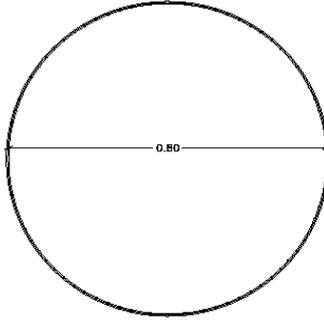
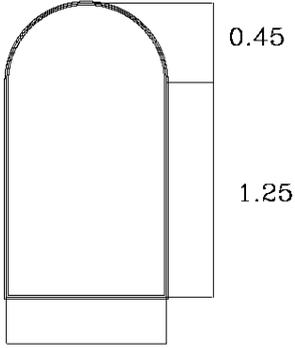
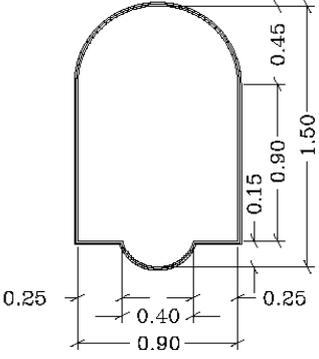
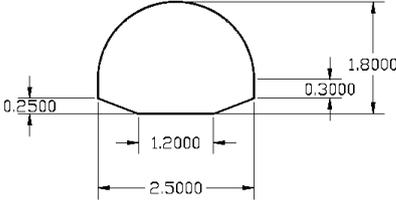
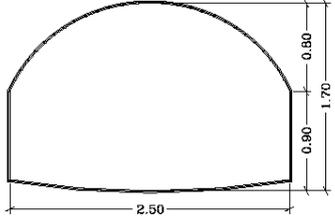
LLEGENDA DELS PLÀNOLS D'INFORMES DE XARXA

XARXA EXISTENT

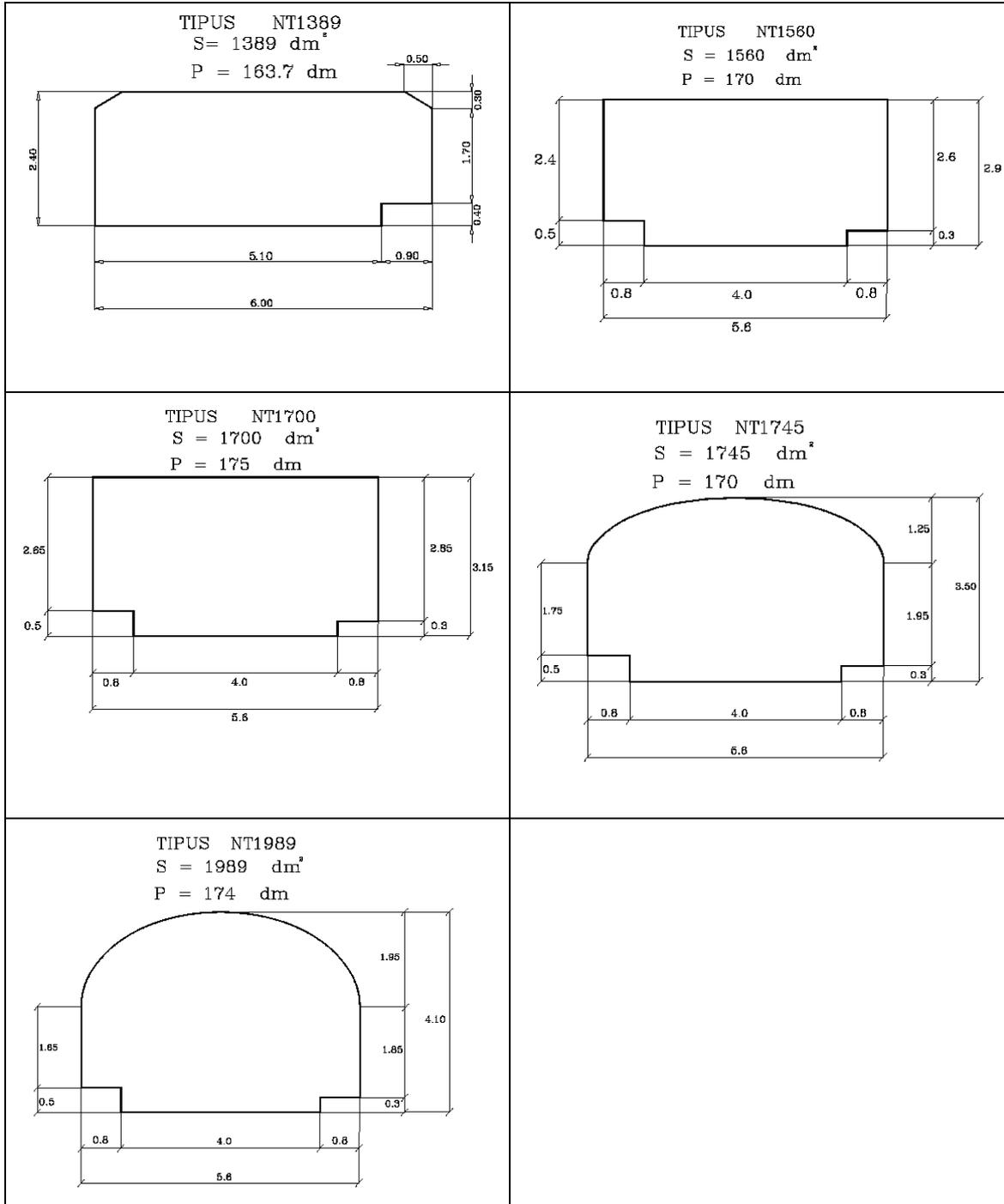
<p>T111 D600A</p> <p>Cota tapa</p> <p>Cota solera</p> 	<p>Col.lector</p> <p>- D600A: Tub Ø600 mm</p> <p>- T111: Claveguera 111dm2 de secció</p>	 Envà total
	Pou de registre	 Envà parcial
	Entronc	 Canvi de sentit de circulació
	Embornal	 Ràpid
	Reixa	 Salt
	Comporta	 Sifó
	Finestra	 Canvi de secció
	Sobreeixidor	 Inici de claveguera
	Estació de bombament	 Punt d'abocament
	Estació de bombament	 Fossar de sedimentació
	Velocímetre	 Clapeta
	Estació de qualitat	 Punt amb desperfectes greus
	Estació de qualitat	<p style="color: red;">Codi</p> <p style="color: red;">[HxV]</p> 
	Limnímetre	<p><u>XARXA PLANIFICADA</u></p> <p>Col.lector planificat</p> <p>- [HxV] Secció rectangular</p> <p>- (HxV) Secció amb volta</p>
	Estació remota	 Envà planificat
	Estació remota	 Comporta planificada
	Pluviòmetre	<p style="color: red;">Cota connexió</p>  Connexió planificada
	Piezòmetre	<p style="color: red;">Codi</p> <p style="color: red;">Volum m3</p>  Dipòsit planificat

TIPOLOGÍA DE LAS SECCIONES DE LA RED ACTUAL DE ALCANTARILLADO.

1. No transitables

<p>TIPUS D600A S = 28.3 dm² P = 18.8 dm</p> 	<p>TIPUS D800 S = 50.2 dm² P = 25.1 dm</p> 	<p>TIPUS NT148A S = 148 dm² P = 48.7 dm</p> 
<p>TIPUS T116B S = 117 dm² P = 43 dm</p> 	<p>TIPUS NT366 S = 366 dm² P = 71.1 dm</p> 	<p>TIPUS T368 S = 360 dm² P = 72 dm</p> 

2. Transitables



ELEMENTOS HIDRÁULICOS

Datos sobre los pozos de la red de drenaje

Pozo	Elevación del fondo (m)	Máxima profundidad (m)
A1	25,42	5,01
A2	24,17	6,03
A3	23,78	6,15
A4	23,68	6,10
A5	23,56	6,05
A7	23,46	5,85
A8	22,43	6,70
A9	22,40	6,47
A10	22,08	6,40
A11	21,75	5,45
A12	21,55	5,11
A13	21,40	5,20
A14	21,31	5,10
A15	21,30	4,81
A16	16,83	9,29
A17	16,65	9,35
A18	16,25	9,43
A19	15,75	8,00
A20	12,72	7,48
A21	10,57	9,05
A22	13,74	4,82
A23	12,72	4,17
A24	12,71	3,77
A25	12,64	3,32
A26	12,56	2,69
A27	12,45	2,79
A28	23,45	3,33
A-21.2	9,56	8,81
A-21.3	9,55	8,17
O1	9,35	-
O2	4,38	-

Datos sobre los conductos de la red de drenaje

Colector	Nodo de entrada	Nodo de salida	Tipología del conducto	Longitud	Coef. Maning
C1	A1	A2	NT1745	58,50	0,015
C2	A2	A3	NT1745	22,78	0,015
C3	A3	A4	NT1745	24,63	0,015
C4	A4	A5	NT1745	24,59	0,015
C5	A5	A7	NT1745	24,68	0,015
C7	A7	A8	NT1745	25,53	0,015
C8	A8	A9	NT1745	32,40	0,015
C9	A9	A10	NT1745	41,54	0,015
C10	A10	A11	NT1989	117,29	0,015
C11	A11	A12	NT1989	52,10	0,015
C12	A12	A13	NT1989	45,91	0,015

Colector	Nodo de entrada	Nodo de salida	Tipología del conducto	Longitud	Coef. Maning
C13	A13	A14	NT1700	51,28	0,015
C14	A14	A15	NT1700	50,41	0,015
C15	A15	A16	NT1989	37,29	0,015
C16	A16	A17	NT1989	61,91	0,015
C17	A17	A18	NT1745	26,55	0,013
C18	A18	A19	NT148A	69,15	0,013
C19	A19	A20	NT148A	64,03	0,013
C20	A20	A21	NT148A	42,67	0,013
C22	A22	A21	NT366	98,86	0,013
C23	A23	A22	NT366	26,56	0,012
C24	A24	A23	NT366	32,03	0,012
C25	A25	A24	NT366	58,55	0,012
C26	A26	A25	NT366	88,26	0,012
C27	A27	A26	NT366	49,02	0,012
C28	A28	O2	NT366	77,12	0,012
C-21.1	A-21	A-21.2	NT1389	44,50	0,012
C-21.2	A-21.2	A-21.3	NT1389	62,50	0,012
C-21.3	A-21.3	O1	NT1389	50,00	0,012

Datos sobre la unidad de almacenamiento de la red de drenaje

Nombre	Profundidad	Cota	Curva de Almacenamiento	Coefficiente de la curva	Coefficiente de la curva	Exponente
A6	5,9	23,53	Funcional	5	1	0

Datos sobre la compuerta (orificio) de la red de drenaje

Nombre	Elemento de entrada	Nodo de salida	Tipología del conducto
C6	A6	A7	NT1745

Pérdidas hidráulicas de estimadas en los conductos

Conductos alineados con los pozos: 0,1

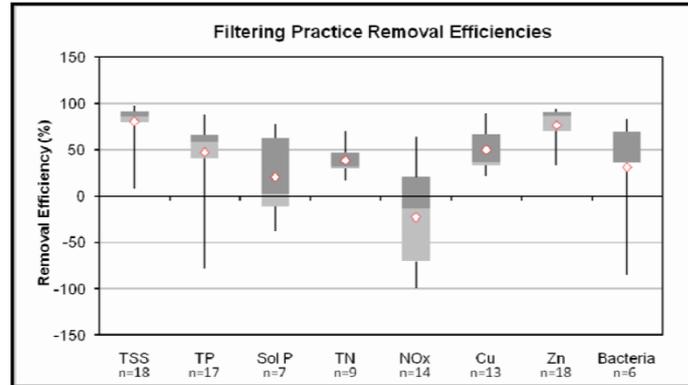
Conductos que forman un ángulo de 90° con la dirección del flujo: 0,5

**COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE AGUA
RESIDUAL Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL (Suárez, 1994).**

<i>Parámetro</i>	<i>Agua residual Urbana (mg/l)</i>	<i>Escorrentía superficial urbana (mg/l)</i>
SS	220	190
DBO₅	220	11
DQO	500	85
N amoniacal	25	1,45
N total	40	3,2
P total	8	0,34
Plomo	0,11	0,21
Zinc	0,43	0,3
Aceites	100	0,4
CF (Nº/100 ml)	10 ⁶ -10 ⁷	6430

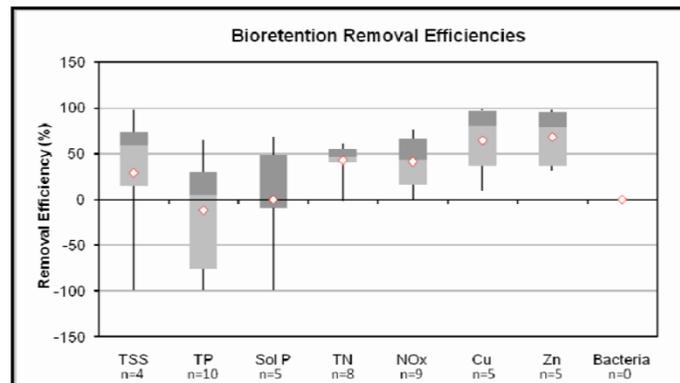
GRÁFICOS/TABLAS: EFICIENCIAS EN LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Fuente: “The National Pollutant Removal Performance Database, version 3” (Center for Watershed Protection (2006))

Estadísticas de eficiencia en eliminación de contaminantes por filtración



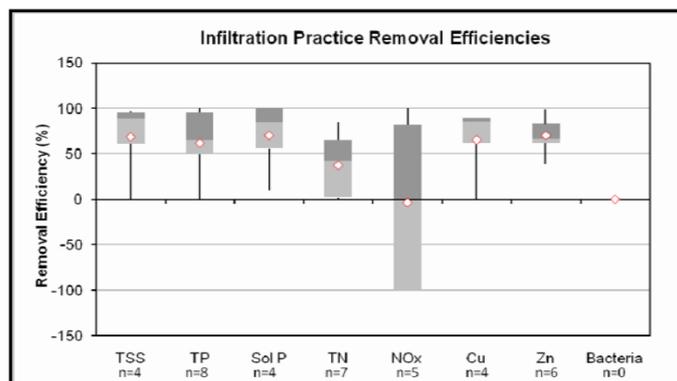
	TSS	TP	SolP	TN	NOx	Cu	Zn	Bacteria
Median	86	59	3	32	-14	37	87	37
Min	8	-79	-37	17	-100	22	33	-85
Max	98	88	78	71	64	90	94	83
Q1	80	41	-11	30	-70	33	71	36
Q3	92	66	63	47	21	67	91	70
Number	18	17	7	9	14	13	18	6

Estadísticas de eficiencia en eliminación de contaminantes por biorretención



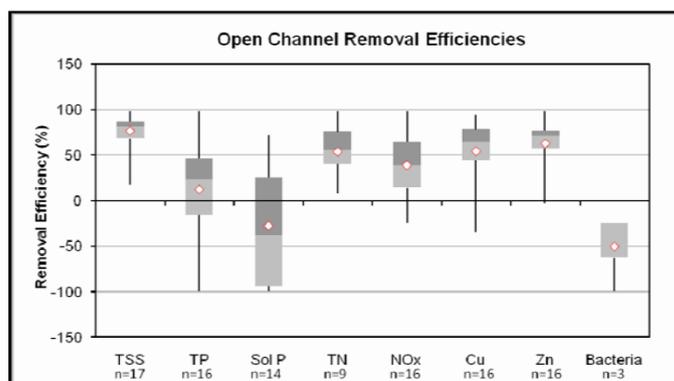
	TSS	TP	SolP	TN	NOx	Cu	Zn	Bacteria
Median	59	5	-9	46	43	81	79	N/A
Min	-100	-100	-100	-2	0	9	31	N/A
Max	98	65	69	61	76	99	98	N/A
Q1	15	-76	-9	40	16	37	37	N/A
Q3	74	30	49	55	67	97	95	N/A
Number	4	10	5	8	9	5	5	0

Estadísticas de eficiencia en eliminación de contaminantes por infiltración



	TSS	TP	SolP	TN	NOx	Cu	Zn	Bacteria
Median	89	65	85	42	0	86	66	N/A
Min	0	0	10	0	-100	0	39	N/A
Max	97	100	100	85	100	89	99	N/A
Q1	62	50	55	2	-100	62	63	N/A
Q3	96	96	100	65	82	89	83	N/A
Number	4	8	4	7	5	4	6	0

Estadísticas de eficiencia en eliminación de contaminantes en canales abiertos-cunetas verdes



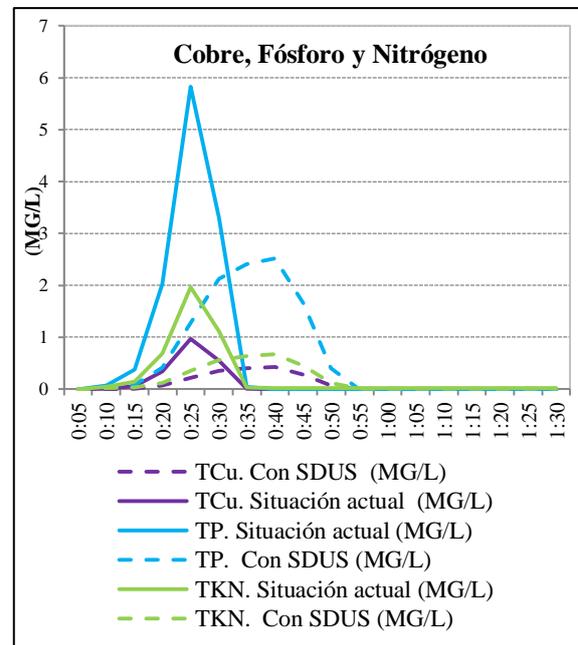
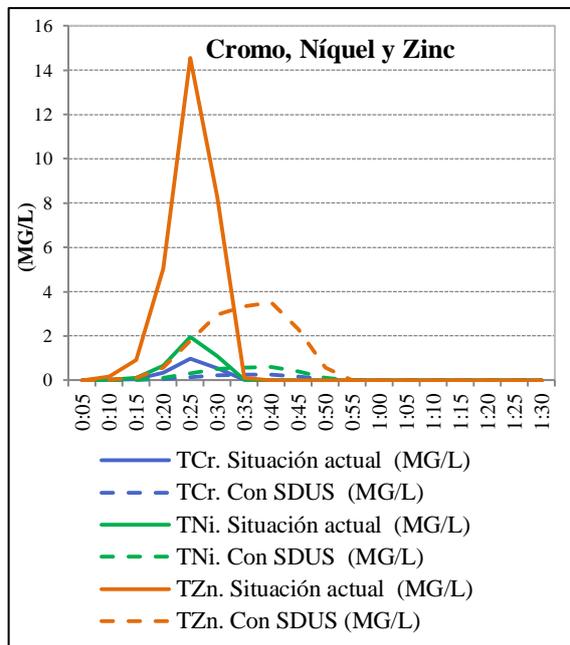
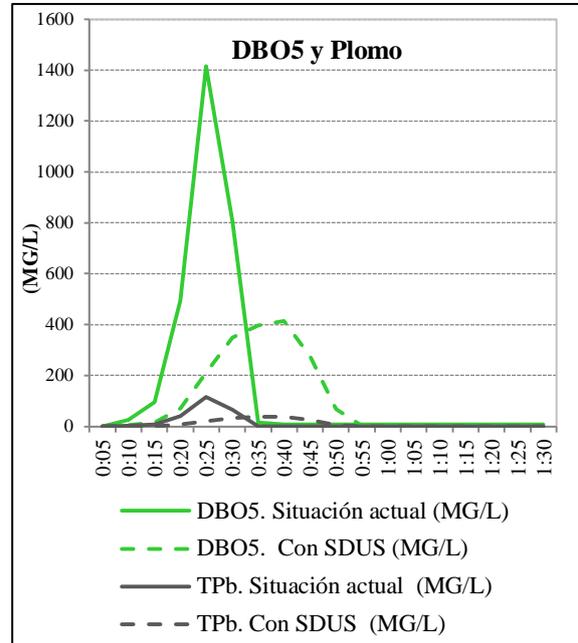
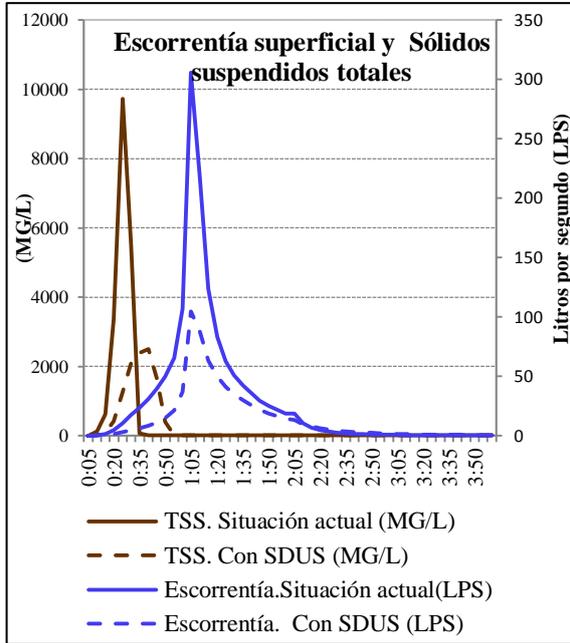
	TSS	TP	SolP	TN	NOx	Cu	Zn	Bacteria
Median	81	24	-38	56	39	65	71	-25
Min	18	-100	-100	8	-25	-35	-3	-100
Max	99	99	72	99	99	94	99	-25
Q1	69	-15	-94	40	14	45	58	-63
Q3	87	46	26	76	65	79	77	-25
Number	17	16	14	9	16	16	16	3

ANEJO 5. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

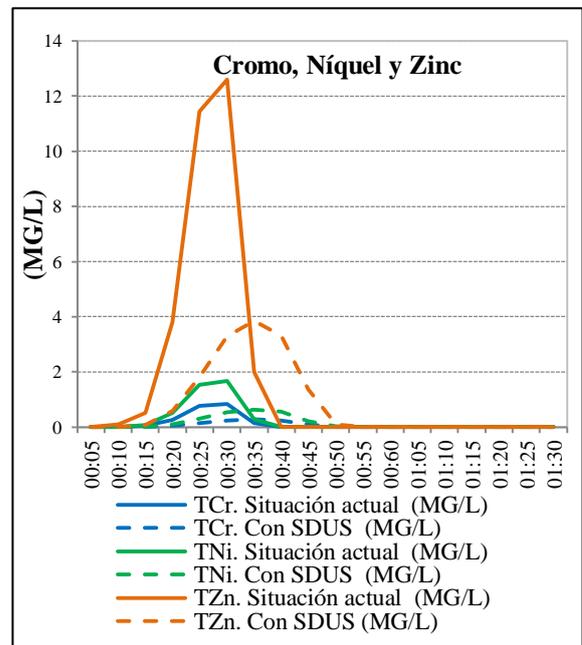
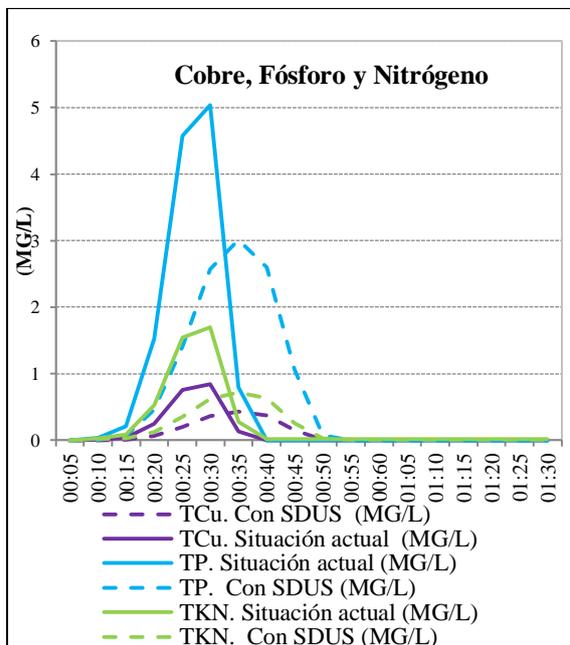
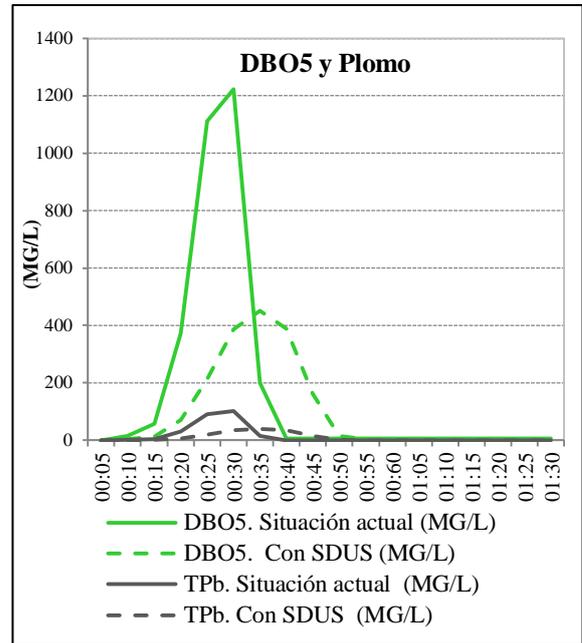
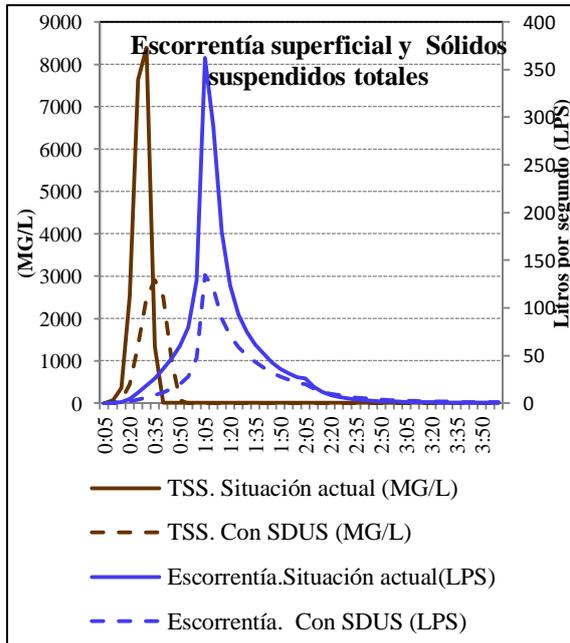
ANEJO 5.RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

COMPARATIVAS EN CUENCAS-GRÁFICOS

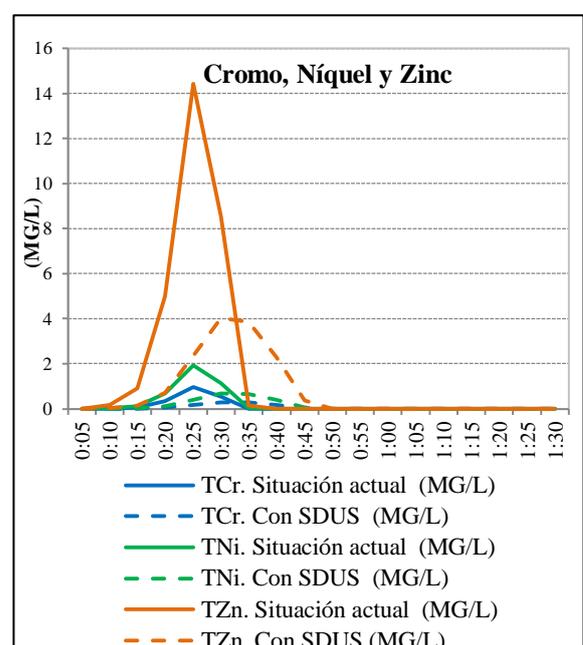
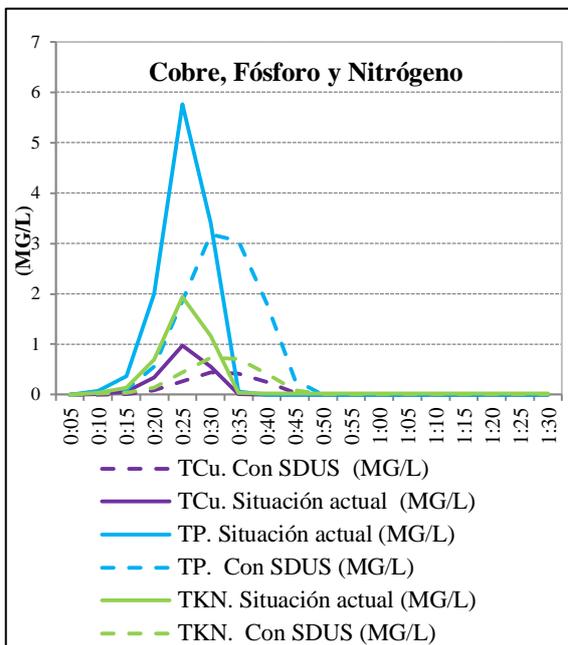
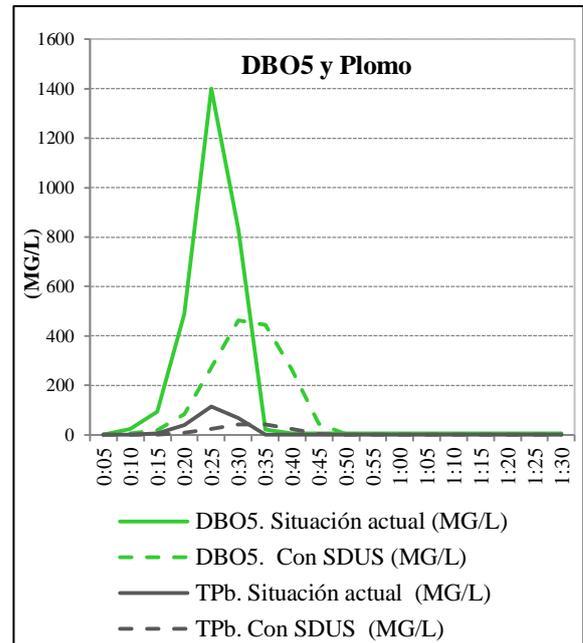
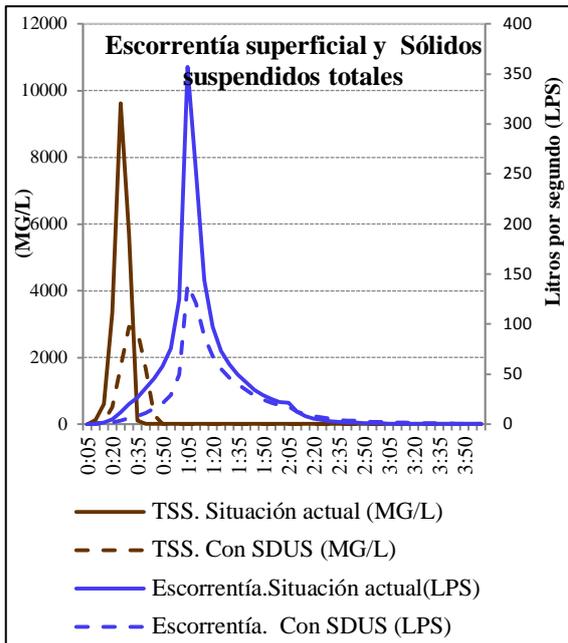
SUBCUENCA 1



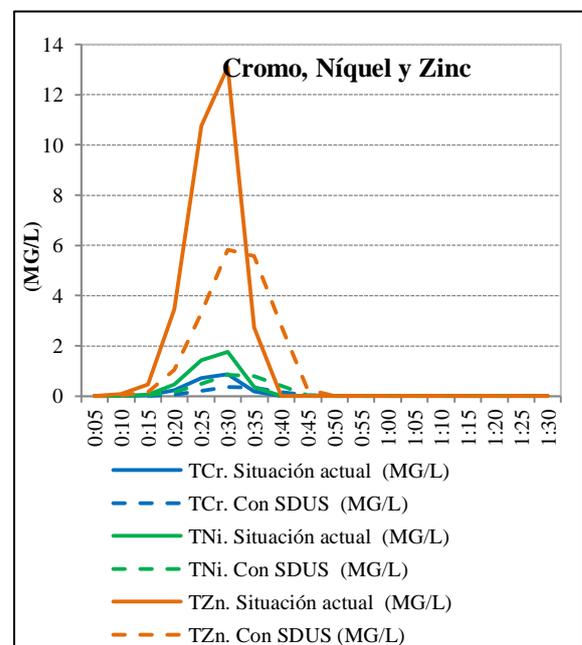
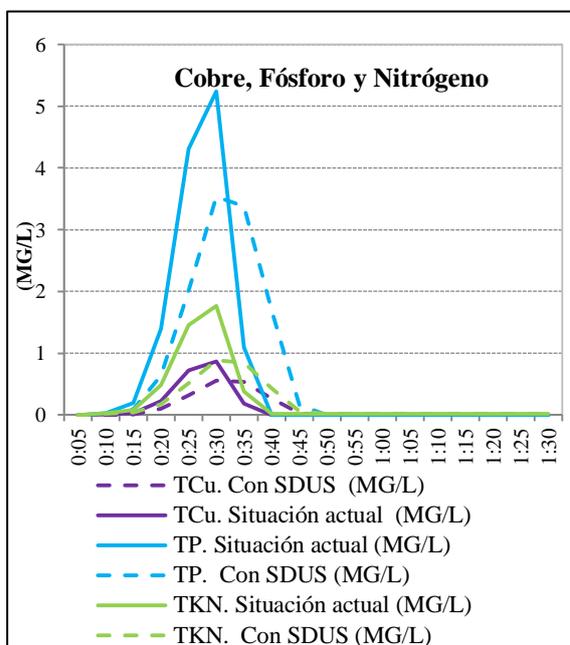
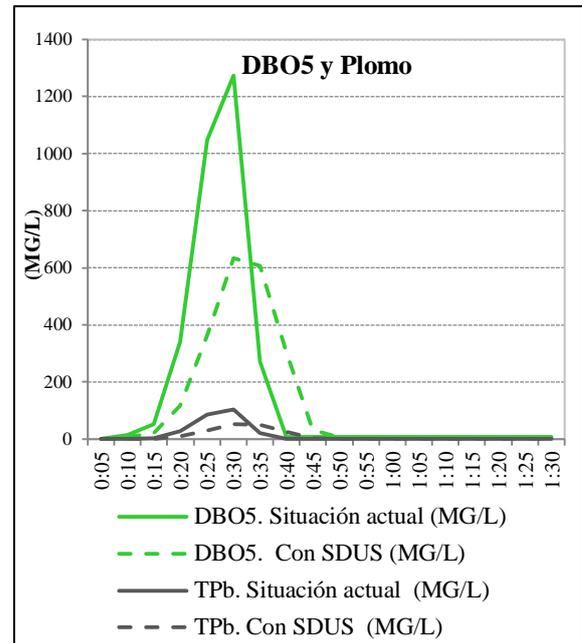
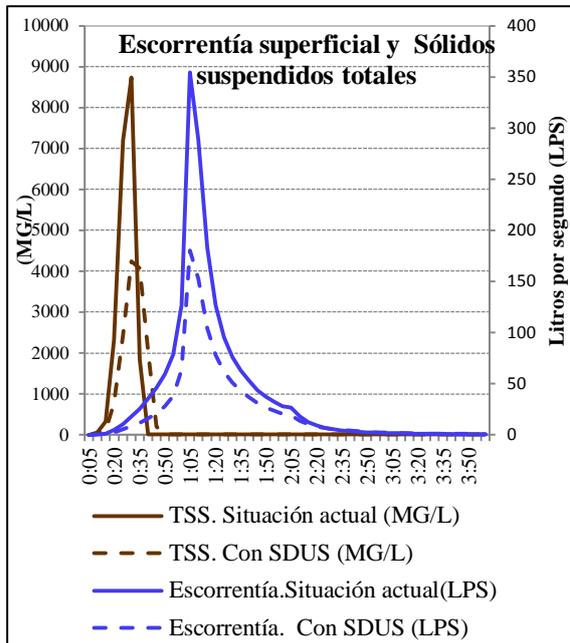
SUBCUENCA 2



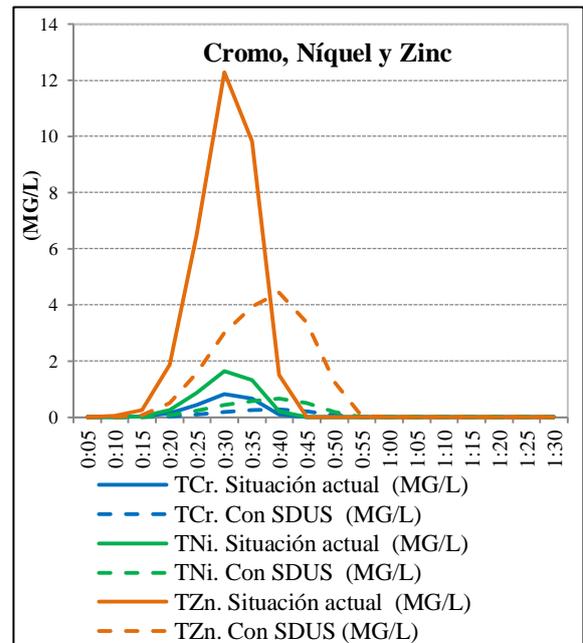
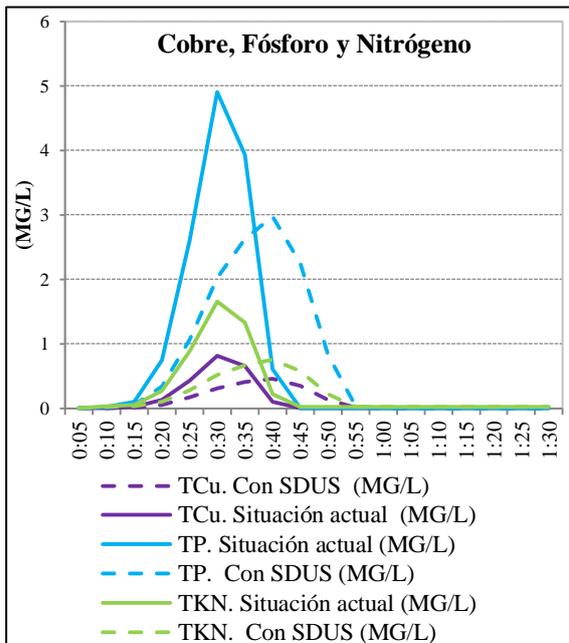
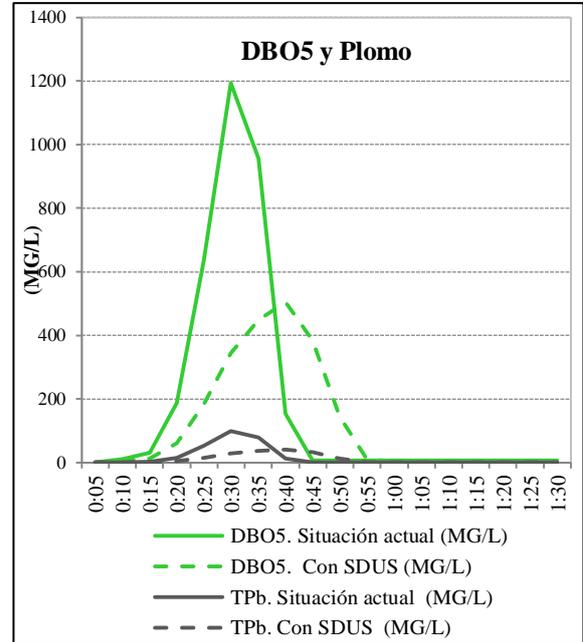
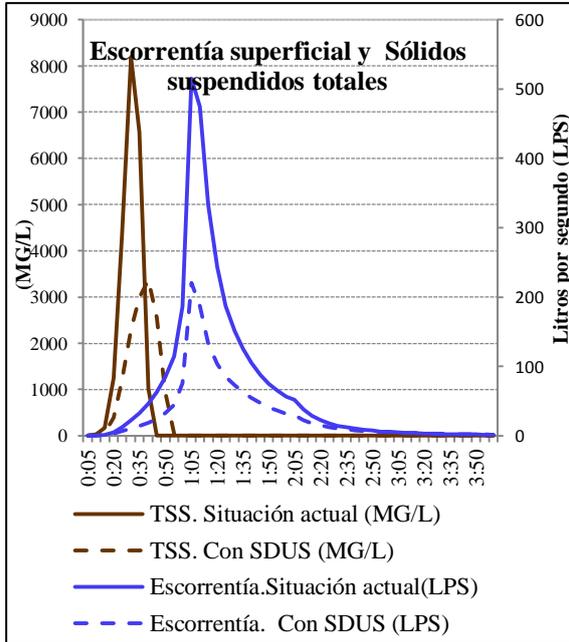
SUBCUENCA 3



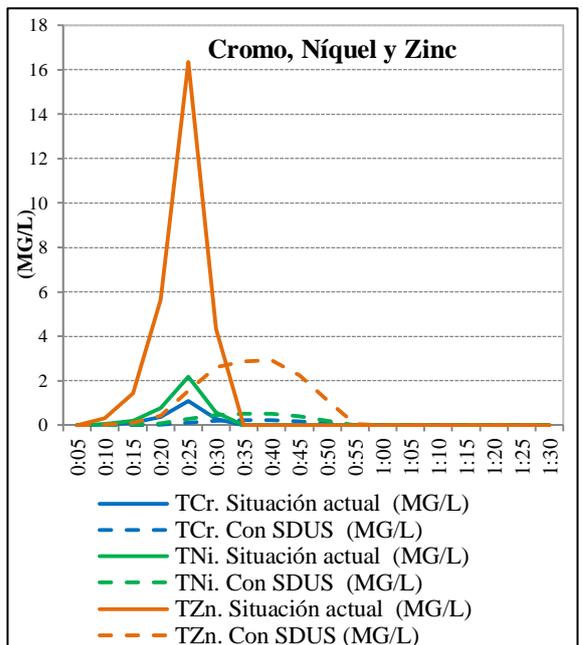
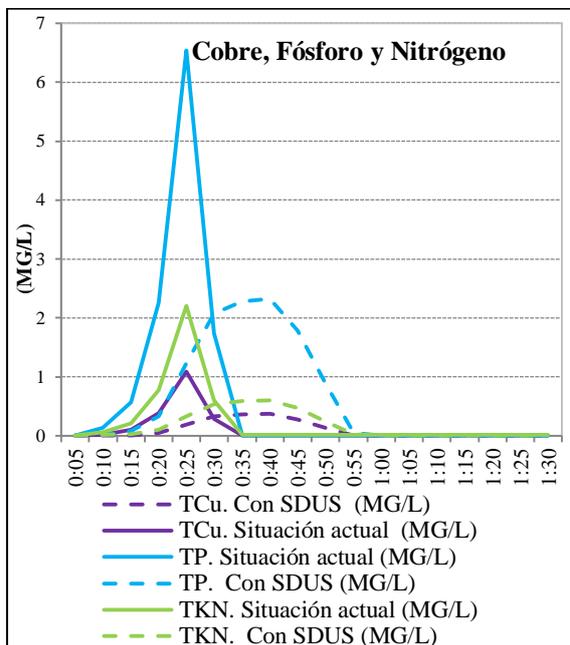
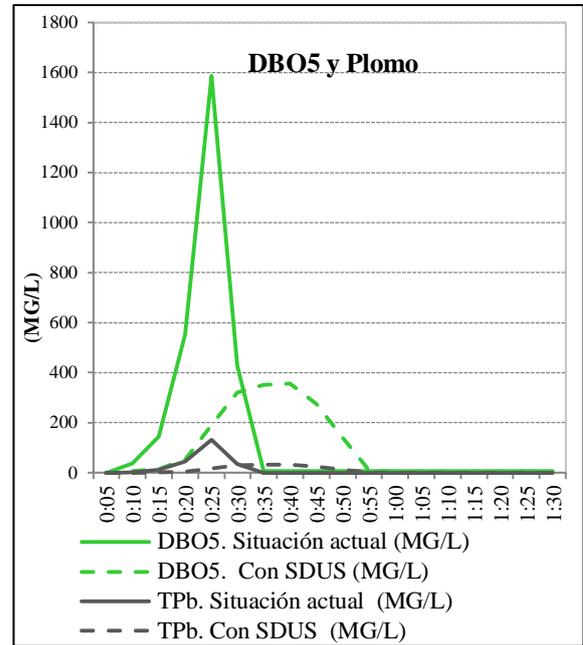
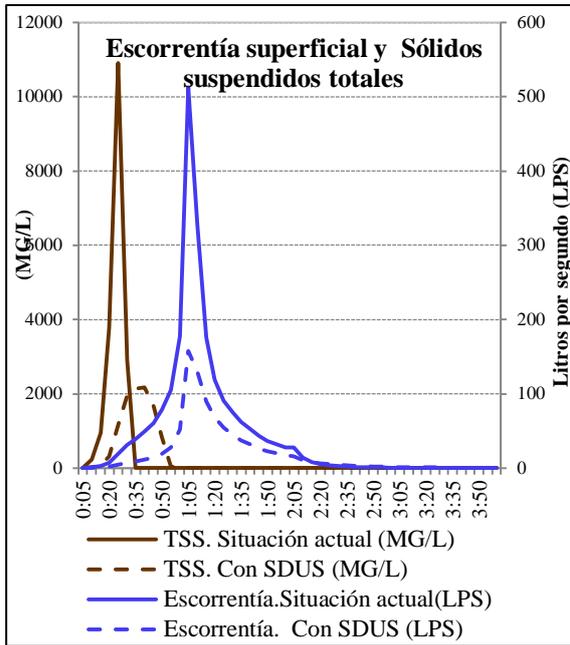
SUBCUENCA 4



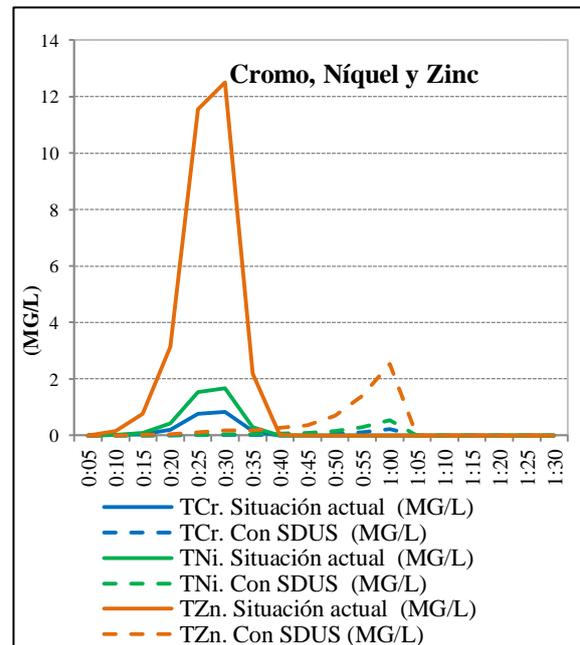
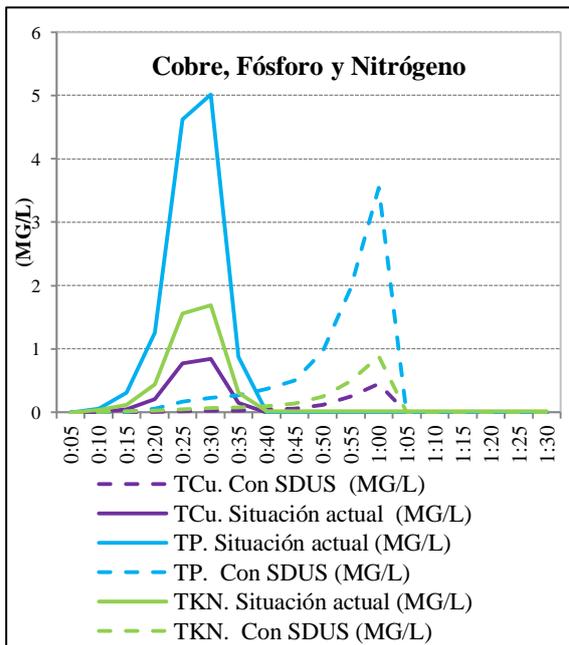
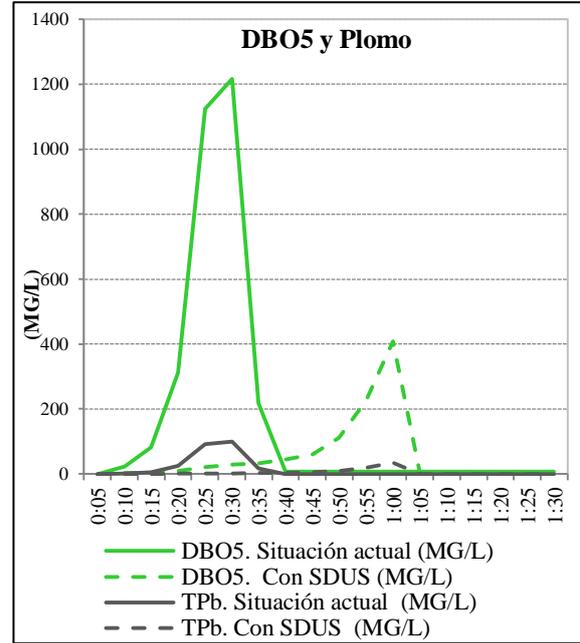
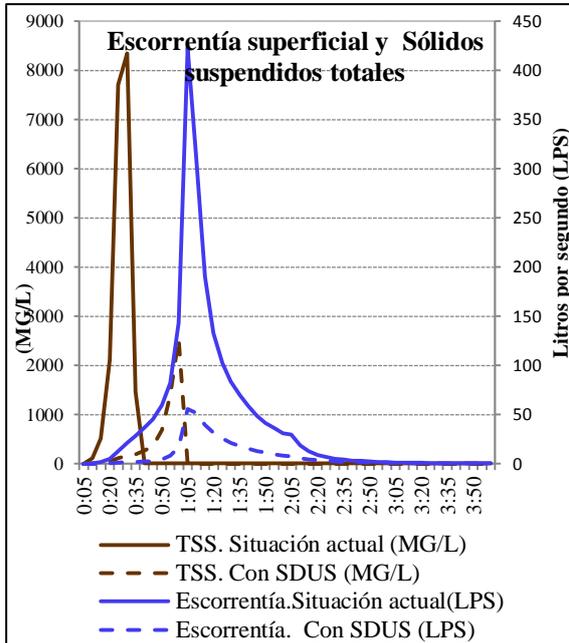
SUBCUENCA 5



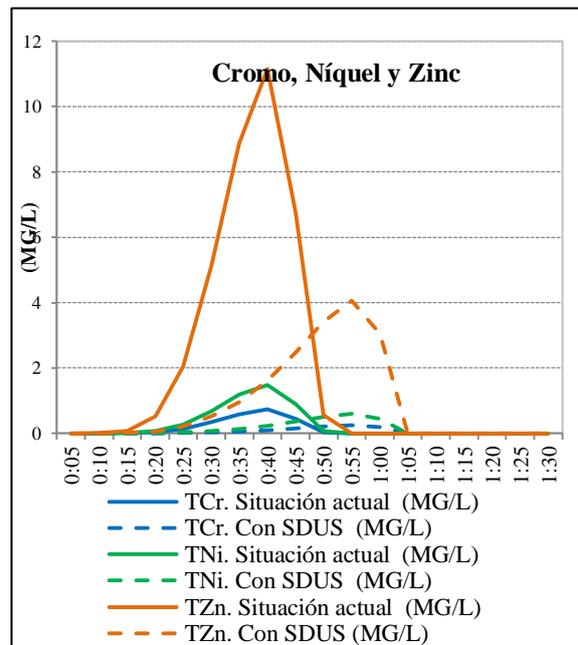
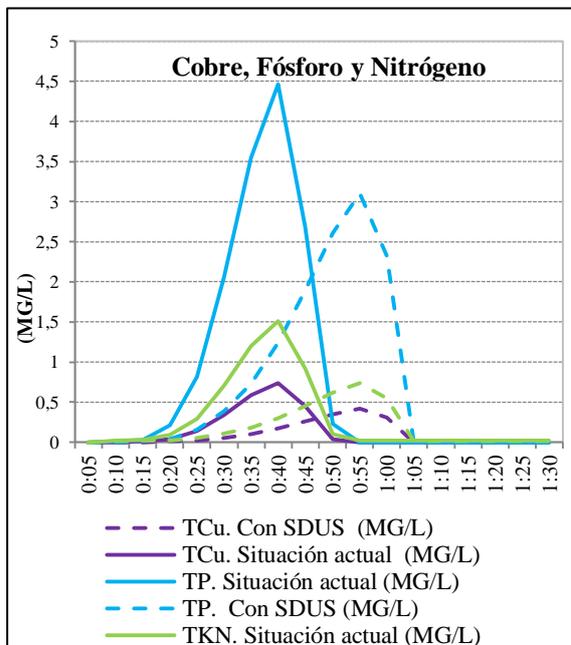
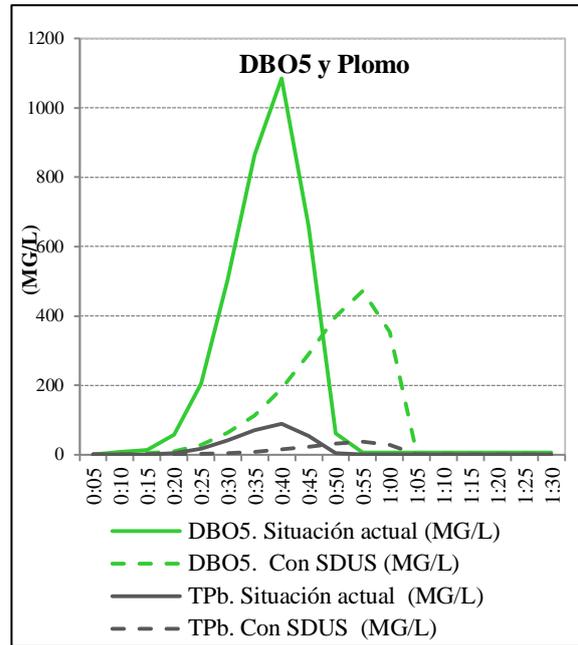
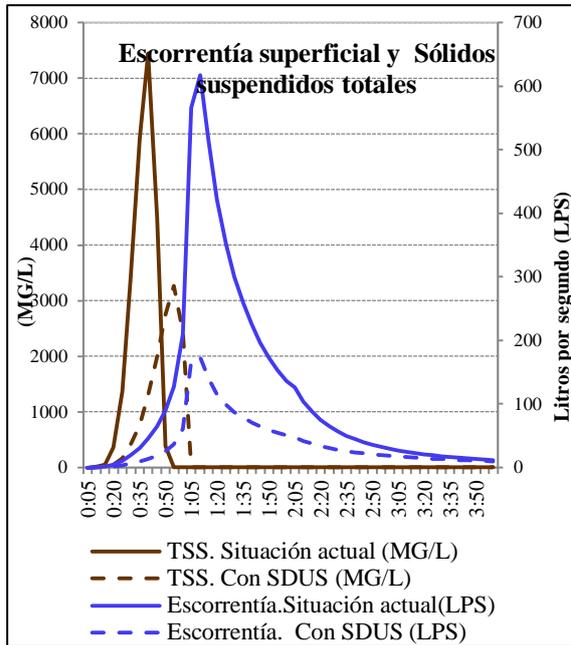
SUBCUENCA 6



SUBCUENCA 7



SUBCUENCA 8



RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRAULICA USANDO LOS COLECTORES REALES

EVOLUCIÓN DE CALADOS EN NODOS MÁS REPRESENTATIVOS

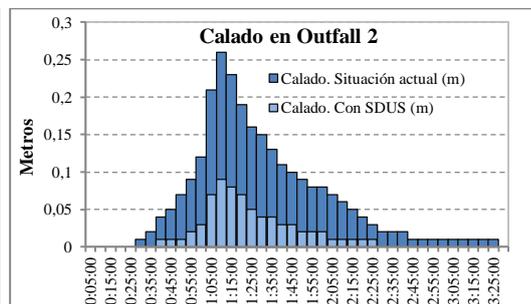
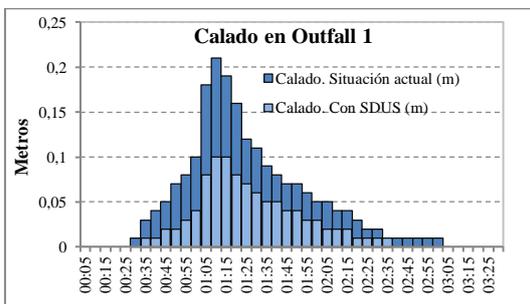
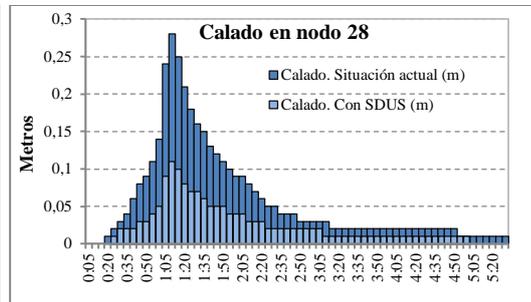
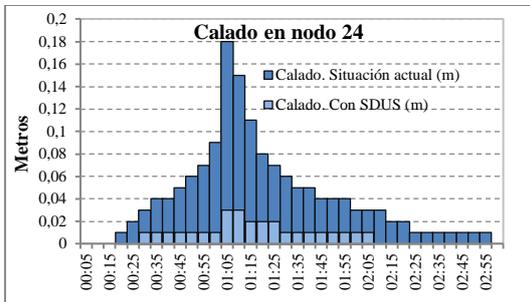
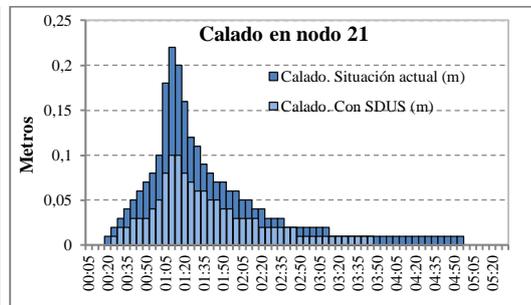
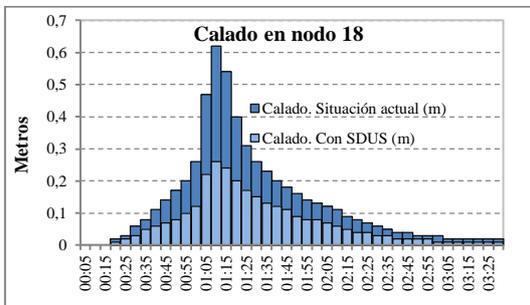
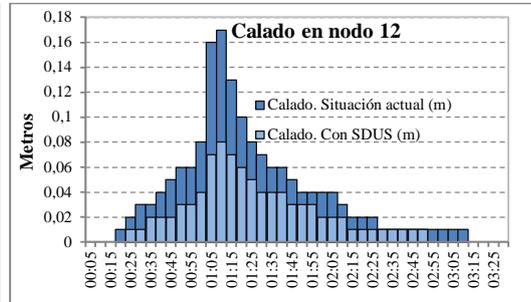
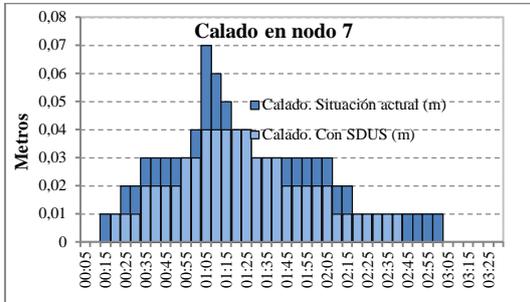


TABLA COMPARATIVA CON VALORES MEDIOS Y MÁXIMOS

Nodo		Calado medio (m)	Calado máximo (m)	Maximum HGL (m)	Momento en el que el calado es máximo (hr:m)	Caudal entrante máximo (LPS)	Momento en el que la entrada de caudal es máxima (hr:m)	Volumen total (10 ⁶ litros)
A7	Sin SDUS	0,01	0,07	23,53	1:05	292,67	1:05	0,412
	Con SDUS	0,01	0,04	23,5	1:12	73,79	1:05	0,129
Reducción		0,00%	42,86%	0,13%	7 minutos	74,79%	0 minutos	68,69%
A12	Sin SDUS	0,01	0,17	21,72	1:07	879,13	1:07	1,446
	Con SDUS	0,01	0,08	21,63	1:10	252,34	1:09	0,511
Reducción		50%	52,94%	0,41%	3 minutos	71,30%	2 minutos	64,66%
A18	Sin SDUS	0,05	0,62	16,87	1:10	1538,36	1:10	2,838
	Con SDUS	0,03	0,26	16,51	1:11	451,39	1:11	1,002
Reducción		50%	58,06%	2,13%	1 minuto	70,66%	1 minuto	64,69%
A-21.3	Sin SDUS	0,02	0,22	9,78	1:10	1844,87	1:10	3,462
	Con SDUS	0,01	0,1	9,66	1:11	530,53	1:11	1,178
Reducción		50%	54,55%	1,23%	1 minuto	71,24%	1 minuto	65,97%
A24	Sin SDUS	0,01	0,18	12,89	1:05	348,56	1:05	0,481
	Con SDUS	0	0,03	12,74	1:06	20,72	1:05	0,031
Reducción		50%	83,33%	1,16%	1 minuto	94,06%	0 minutos	93,56%
A28	Sin SDUS	0,03	0,29	12,73	1:08	877,03	1:08	1,835
	Con SDUS	0,01	0,11	12,55	1:10	161,96	1:08	0,372
Reducción		50%	62,07%	1,41%	2 minutos	81,53%	0 minutos	79,73%
O1	Sin SDUS	0,02	0,22	9,57	1:11	1847,01	1:11	3,462
	Con SDUS	0,01	0,1	9,45	1:12	530,31	1:12	1,177
Reducción		50%	54,55%	1,25%	1 minuto	71,29%	1 minuto	66,00%
O2	Sin SDUS	0,02	0,26	12,53	1:09	879,7	1:09	1,833
	Con SDUS	0,01	0,09	12,35	1:10	161,69	1:10	0,364
Reducción		50%	65,38%	1,44%	1 minuto	81,62%	1 minuto	80,14%

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRAULICA USANDO LOS (COLECTORES D:1000mm)

EVOLUCIÓN DE CALADOS EN NODOS MÁS REPRESENTATIVOS

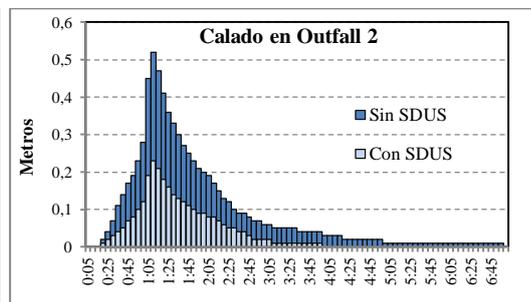
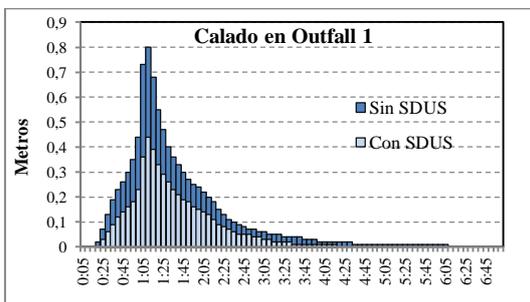
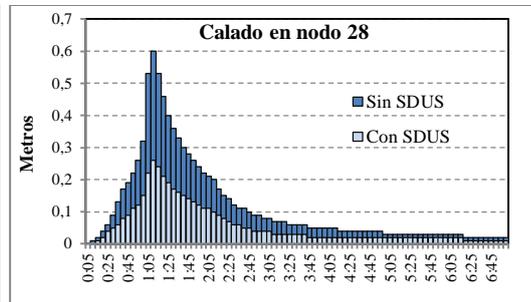
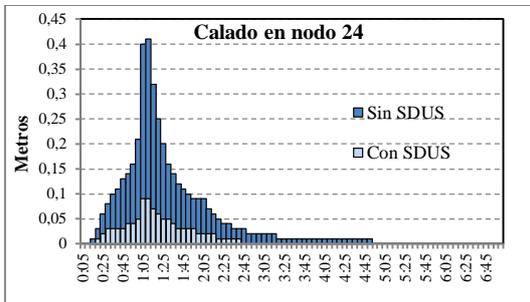
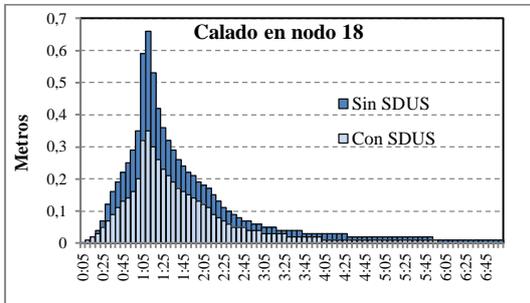
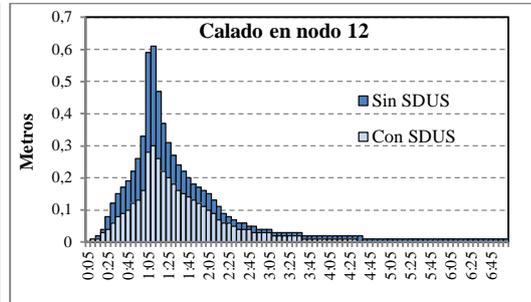
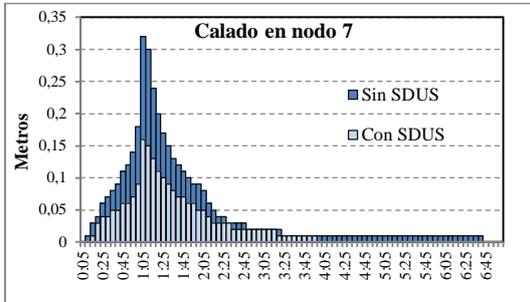
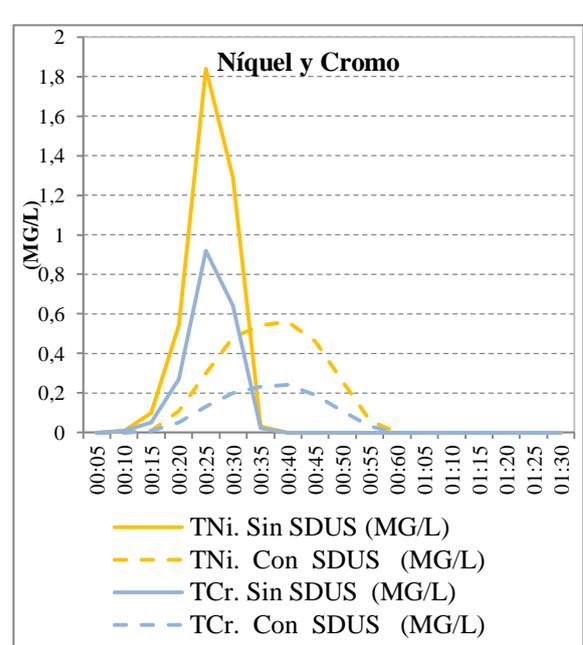
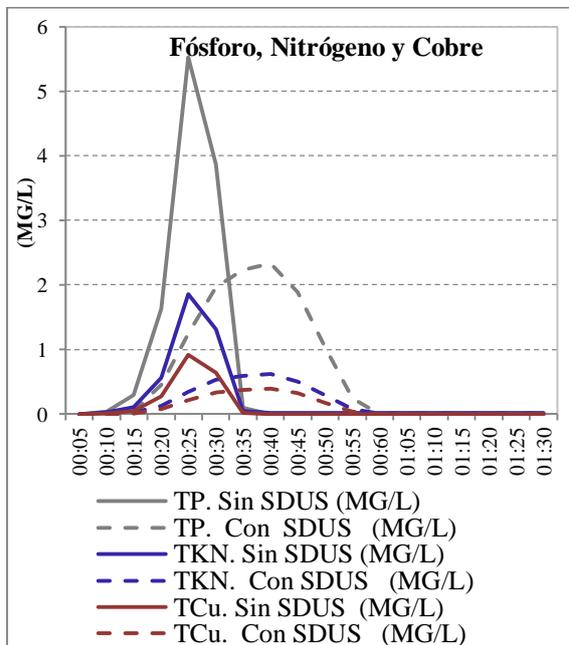
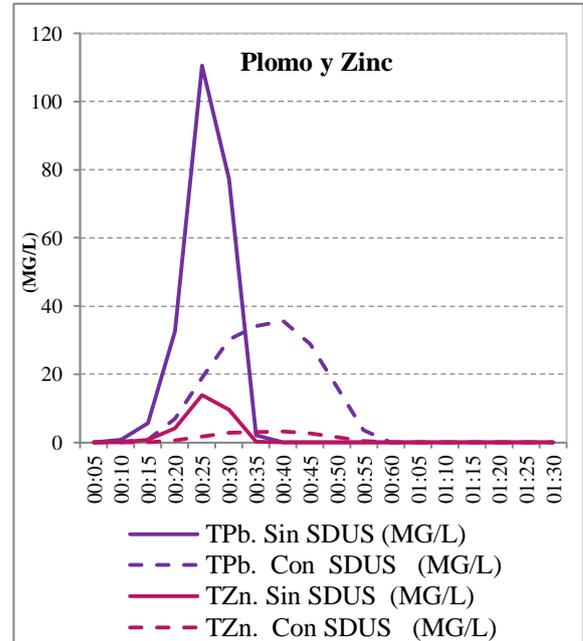
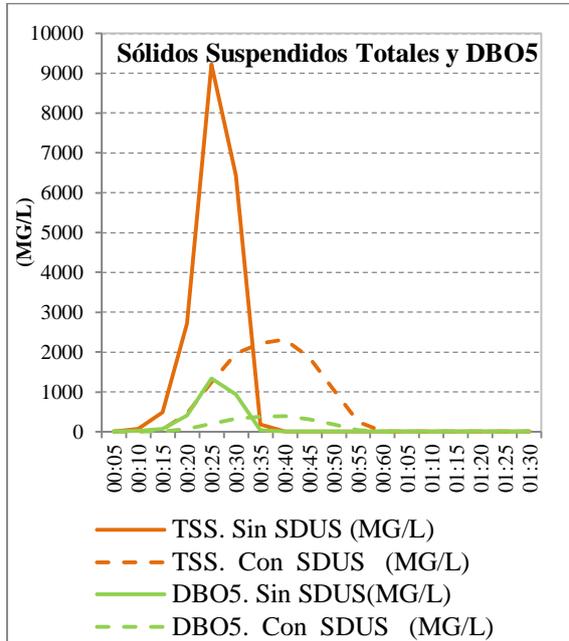


TABLA COMPARATIVA CON VALORES MEDIOS Y MÁXIMOS

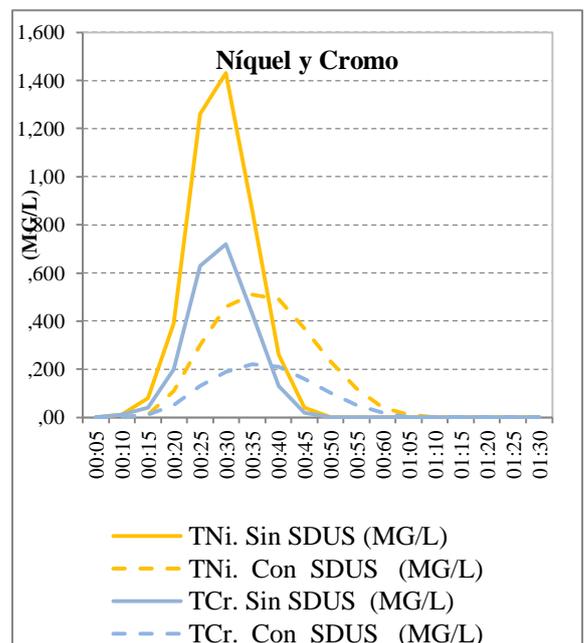
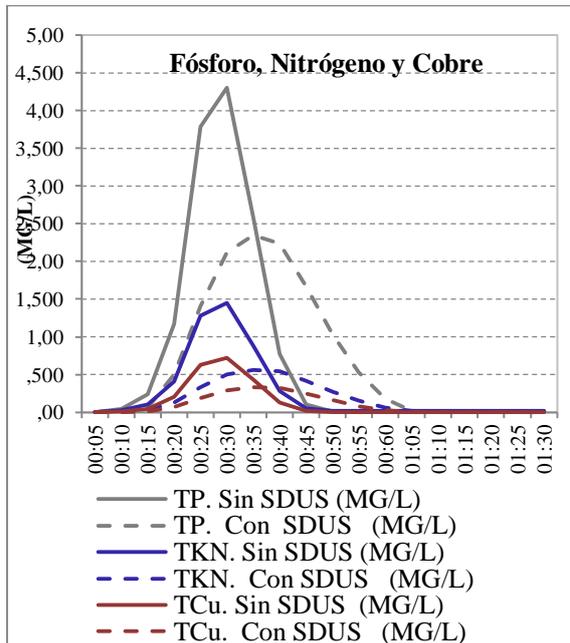
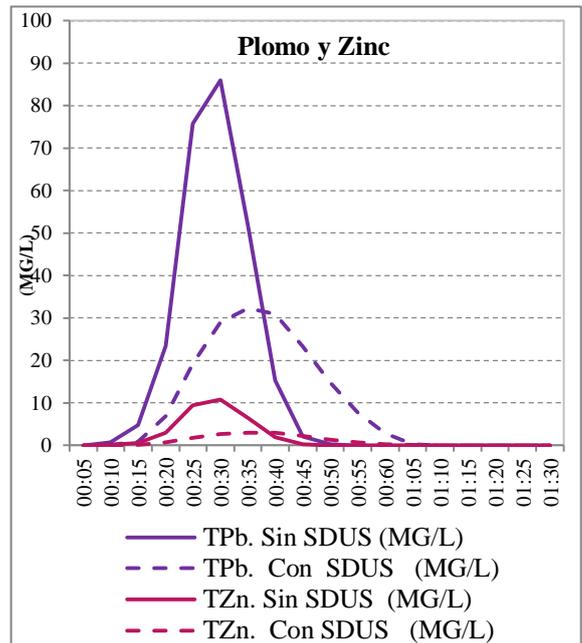
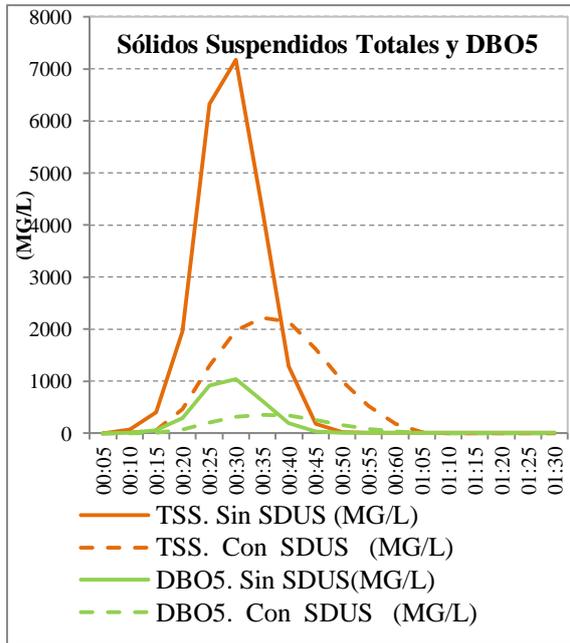
Nodo		Calado medio (m)	Calado máximo (m)	Maximum HGL (m)	Momento en el que el calado es máximo (hr:m)	Caudal entrante máximo (LPS)	Momento en el que la entrada de caudal es máxima (hr:m)	Volumen total (10 ⁶ litros)
A7	Sin SDUS	0,03	0,33	23,79	1:06	300,26	1:04	0,412
	Con SDUS	0,02	0,17	23,63	1:05	75,72	1:04	0,129
Reducción		33,33%	48,48%	0,67%	-1 minuto	74,78%	0 minutos	68,69%
A12	Sin SDUS	0,06	0,64	22,19	1:07	872,23	1:07	1,429
	Con SDUS	0,03	0,3	21,85	1:08	255,69	1:07	0,512
Reducción		50,00%	53,13%	1,53%	1 minuto	70,69%	1 minuto	64,17%
A18	Sin SDUS	0,07	0,67	16,92	1:08	1622,92	1:08	2,825
	Con SDUS	0,04	0,35	16,6	1:08	513,05	1:08	1,003
Reducción		42,86%	47,76%	1,89%	0 minuto	68,39%	0 minuto	64,50%
A-21.3	Sin SDUS	0,09	0,94	10,49	1:08	1960,67	1:08	3,449
	Con SDUS	0,05	0,44	10	1:10	603,83	1:10	1,179
Reducción		44,44%	53,19%	4,67%	2 minutos	69,20%	2 minutos	65,82%
A24	Sin SDUS	0,04	0,42	13,13	1:06	331,2	1:05	0,482
	Con SDUS	0,01	0,09	12,8	1:05	20,45	1:05	0,031
Reducción		75,00%	78,57%	2,51%	1 minuto	93,83%	0 minutos	93,57%
A28	Sin SDUS	0,08	0,6	13,05	1:08	843,28	1:07	1,834
	Con SDUS	0,04	0,26	12,71	1:10	169,32	1:10	0,371
Reducción		50,00%	56,67%	2,61%	2 minutos	79,92%	3 minutos	79,77%
O1	Sin SDUS	0,08	0,8	10,16	1:09	1961,13	1:09	3,449
	Con SDUS	0,04	0,44	9,79	1:10	604,25	1:10	1,178
Reducción		50,00%	45,00%	3,64%	1 minuto	69,19%	1 minuto	65,85%
O2	Sin SDUS	0,06	0,52	12,79	1:09	845,85	1:08	1,833
	Con SDUS	0,03	0,23	12,5	1:10	168,5	1:10	0,364
Reducción		50,00%	55,77%	2,27%	1 minuto	80,08%	2 minutos	80,14%

COMPARATIVAS CALIDAD-GRÁFICOS (COLECTORES D:1000mm)

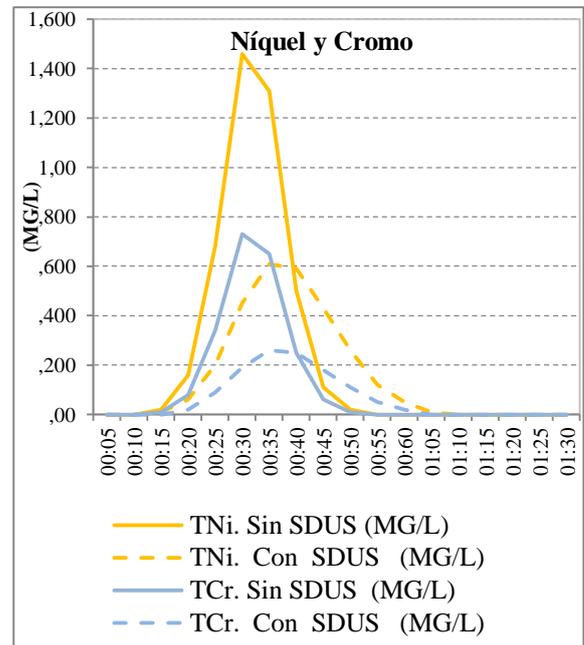
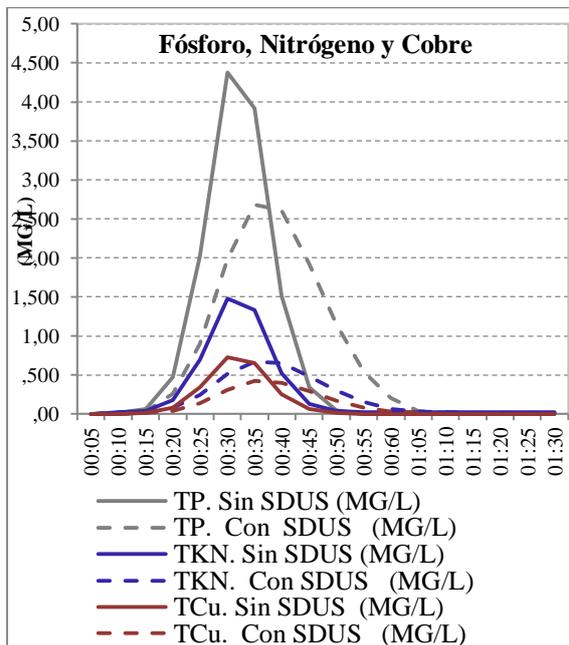
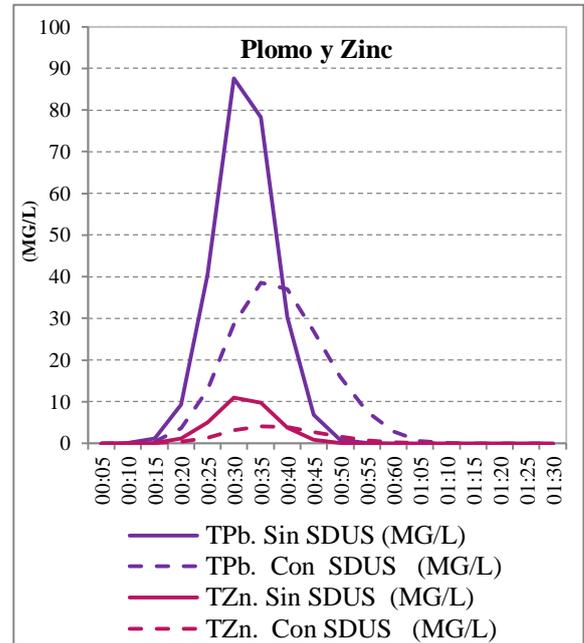
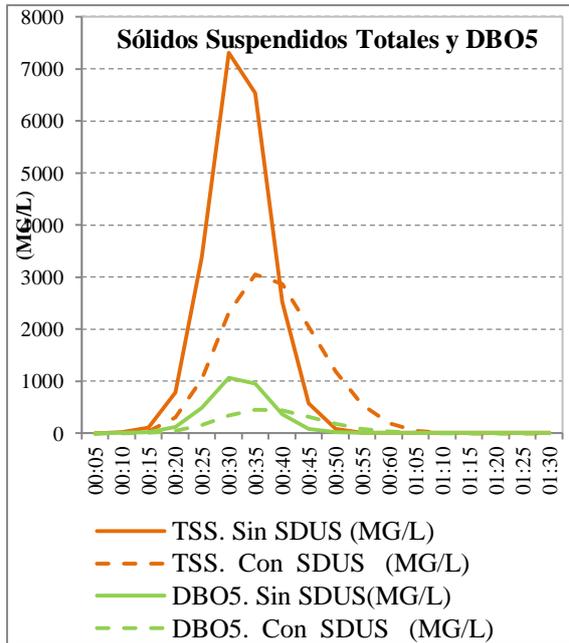
COLECTOR 5



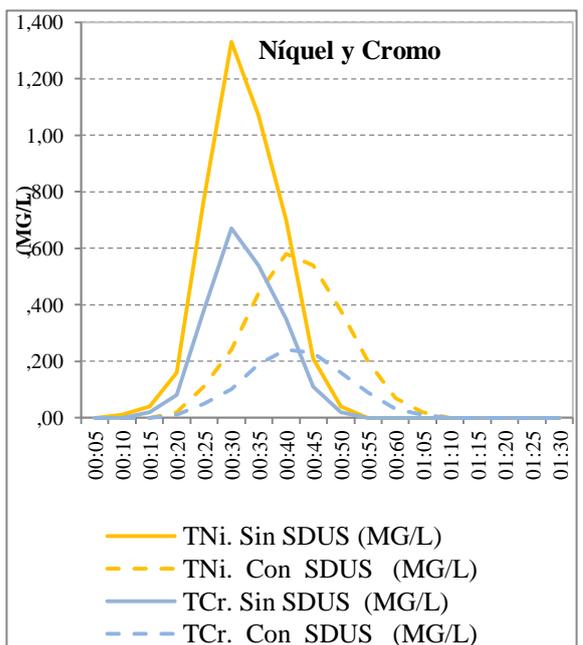
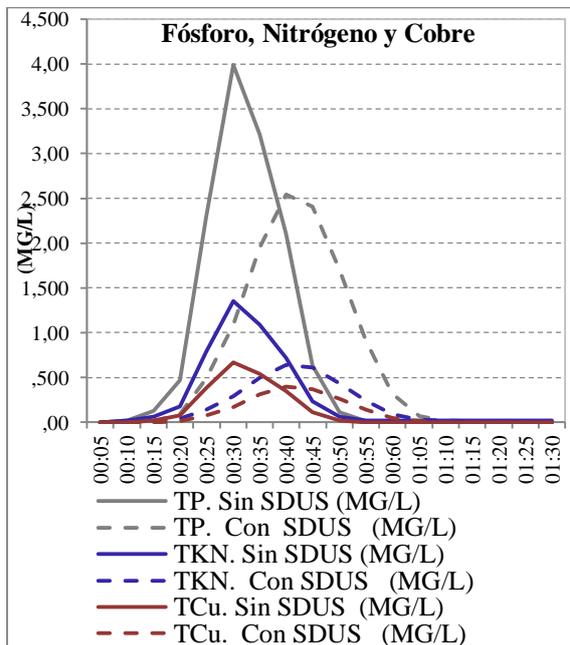
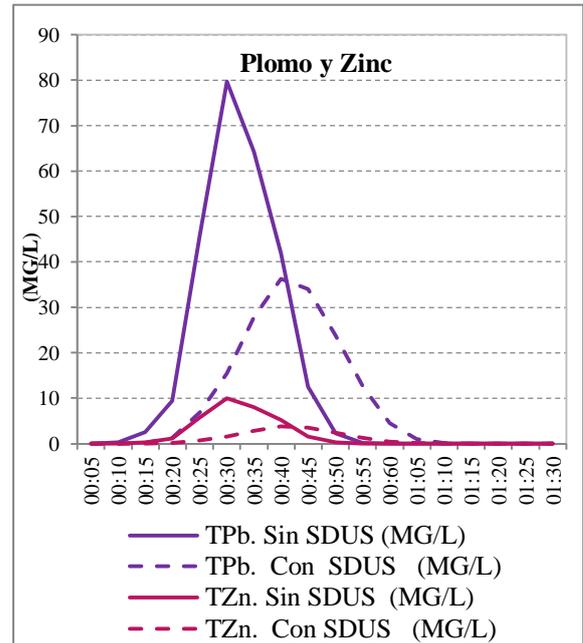
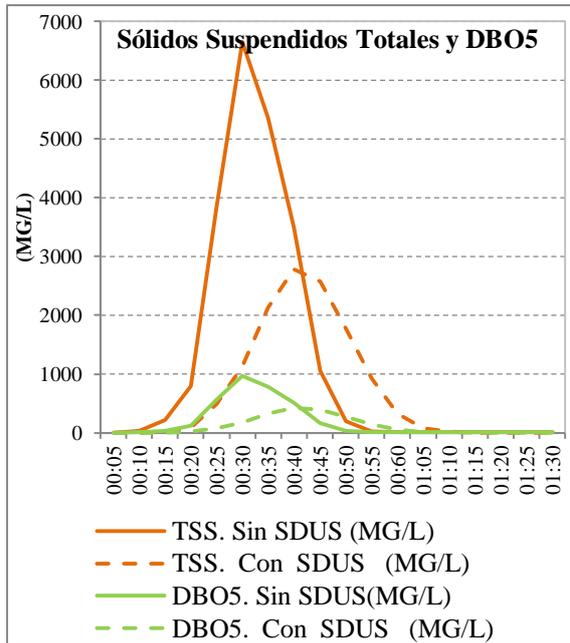
COLECTOR 12



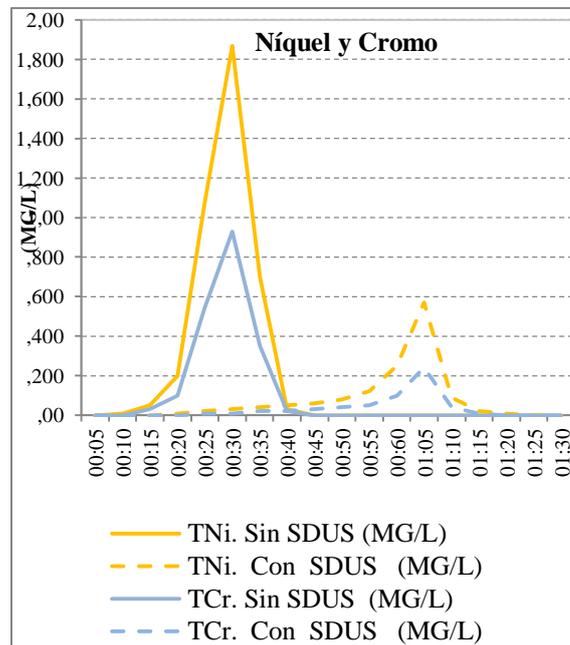
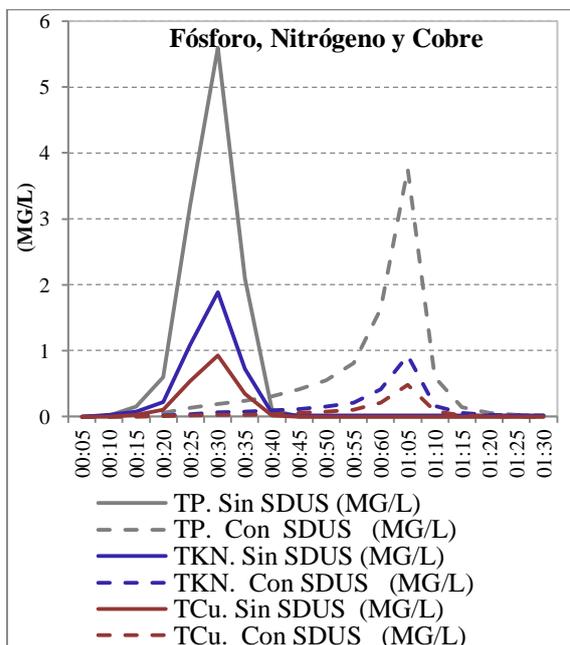
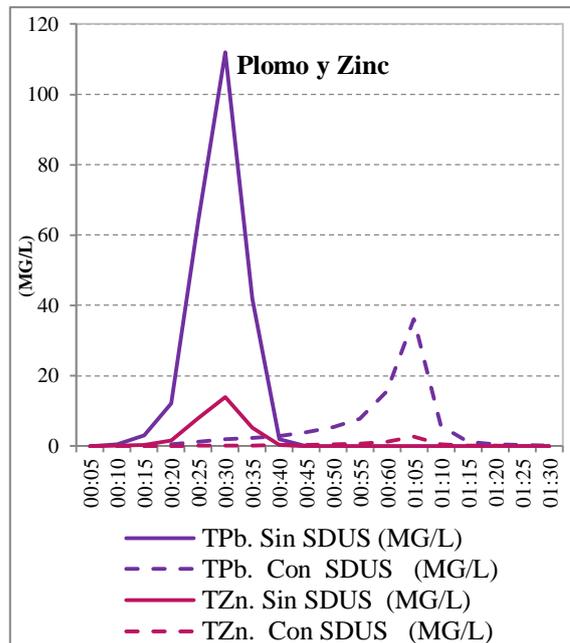
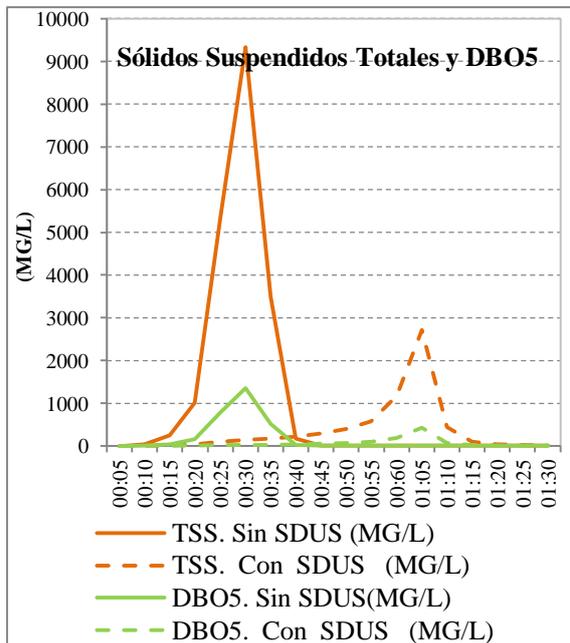
COLECTOR 18



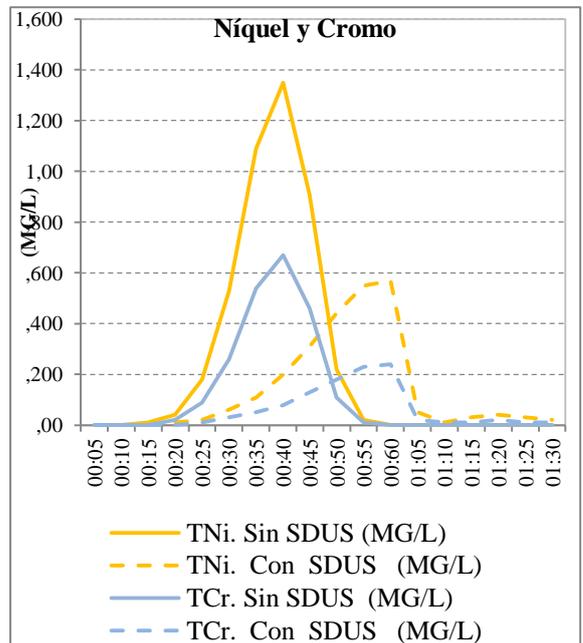
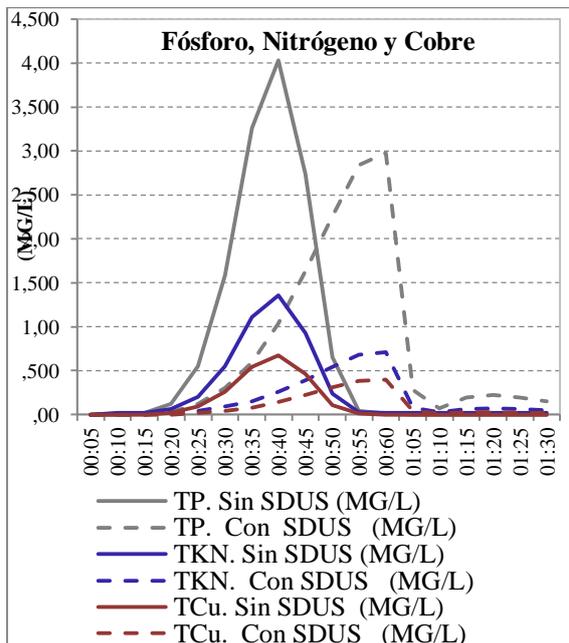
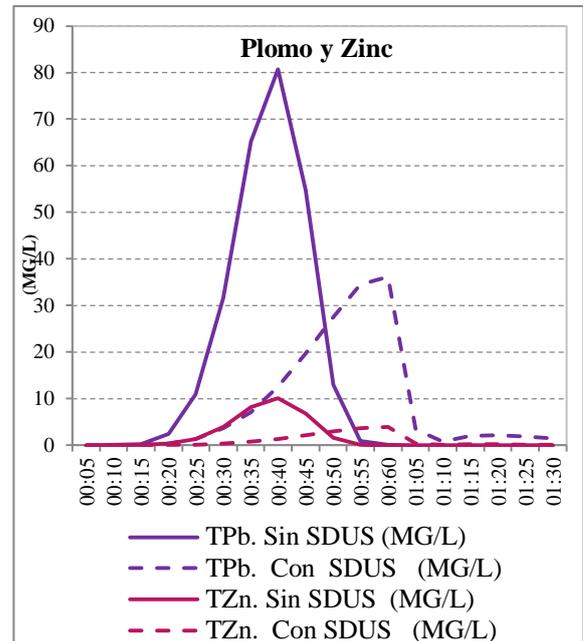
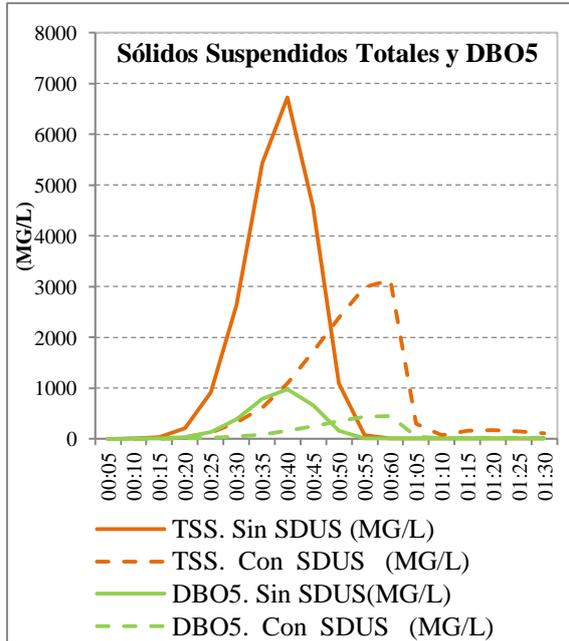
COLECTOR 21.3



COLECTOR 24



COLECTOR 28



SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON COLECTORES REALES

En un principio se iba a realizar una única comparativa usando en la simulación los datos de los colectores reales que hay en funcionamiento actualmente en la zona de estudio. Pero, mientras que los errores de continuidad de la escorrentía superficial: (- 0,03%) y del flujo (-0,04%) se mantenían dentro de márgenes razonables, inferiores al +/-10% que daban por válidos los resultados hidráulicos, el error en calidad era excesivo, y, aun bajando los pasos computacionales a sólo 1 segundo, se situaba en (-23,62%). Este es el motivo por lo que en este apartado se estudia sólo la hidráulica y en el siguiente sustituyendo los colectores actuales por otros de diámetro de 1 metro, la calidad.

Los colectores presentes en la actualidad en la zona de estudio, son de amplias dimensiones ya que por ahí circulan las aguas provenientes de gran parte de la Dreta del Eixample. Como sólo se han contabilizado el caudal procedente directamente de la escorrentía en las subcuencas de estudio, los calados alcanzados en tan anchas conducciones son de pocos centímetros en el caso de mayor caudal. De todas formas, incluso siendo calados muy bajos en relación con la altura de los colectores, en las figuras resultantes de las simulaciones con y sin SDUS, se puede apreciar las diferencias entre ambas.

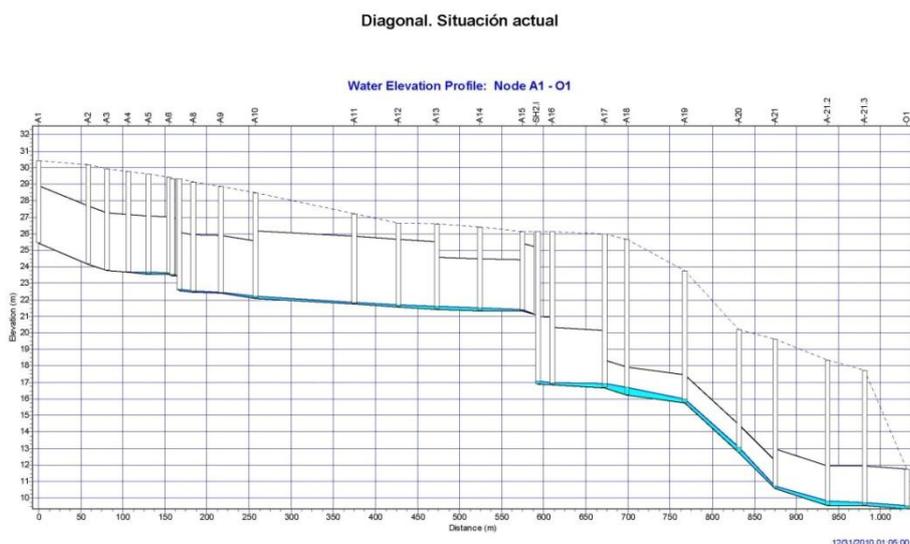


Figura: Colectores reales en situación actual, sin presencia de las TDUS en el tramo I.

Diagonal. SDSU

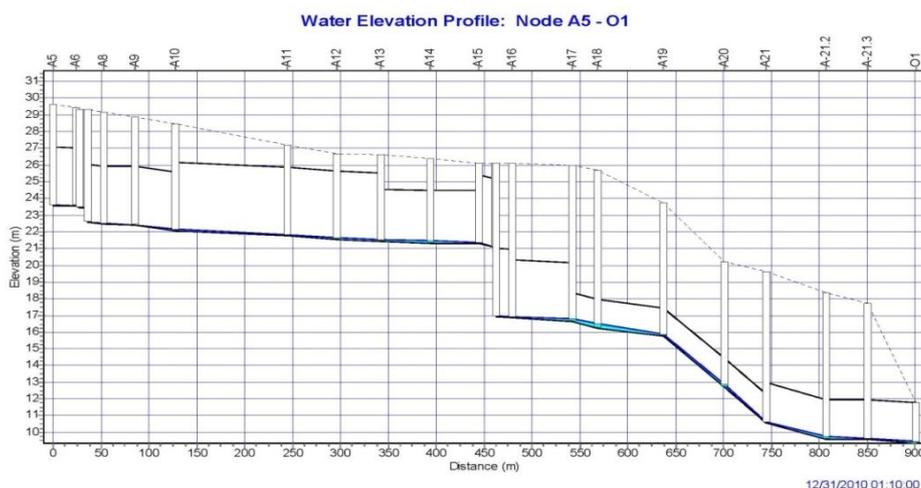


Figura: Colectores reales en situación proyectada, con un SDSU implantado.

Ambas figuras se corresponden con los perfiles longitudinales del primer tramo en el momento en el que se produce el máximo caudal. En ellas se observa, cómo las cotas de la lámina de agua son ligeramente más bajas en la figura 11.2 que en la 11.1. Esta diferencia de calados no es muy marcada en estos gráficos, dada la gran anchura de los conductos por la que transcurren los caudales.

Para analizar mejor la influencia de los SDSU en los calados de los pozos más representativos, se presentan los siguientes gráficos realizados a partir de los valores medios y máximos obtenidos en los resultados de las simulaciones. En ellos sí que se puede apreciar claramente la influencia que tiene un SDSU, especialmente cuando se alcanzan los calados máximos. En ese caso, el calado se reduce aproximadamente a la mitad con la implantación de las TDUS. En los mismos gráficos aparecen también los calados medios. Éstos son muy bajos, ya que durante casi todo el tiempo de la simulación, tienen valores mínimos dado el escaso caudal que transcurre por esos colectores de gran tamaño. Este es el motivo por que en los pozos del inicio del tramo uno, por los que circula solamente el caudal de las dos primeras cuencas, apenas si se haya distinción entre los calados medios. En otros pozos esta diferencia sí que llega a ser del 50%, éstos son aquellos a los que llega ya más caudal por incorporación de las sucesivas subcuencas. Hay que señalar que, como se verá más adelante, estos calados corresponden, en ambos sistemas, a un régimen subcrítico.

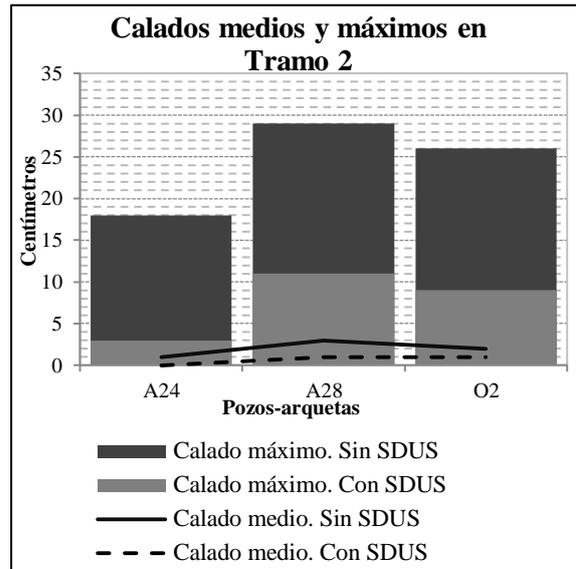
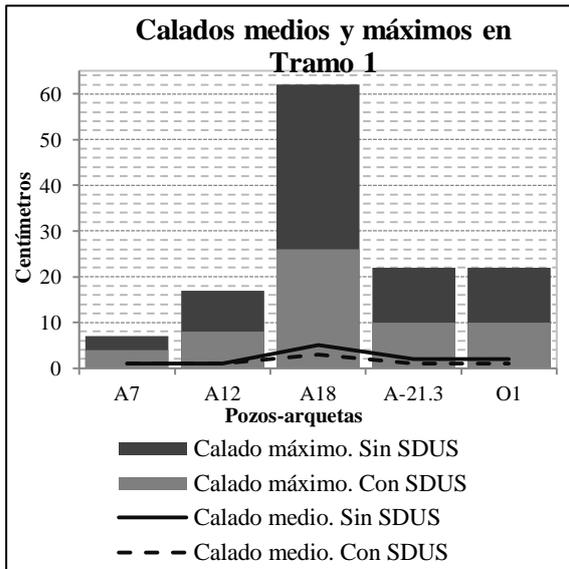


Gráfico: (Izquierda) Comparativa de calados medios y máximos en pozos más representativos de tramo 1. (Derecha). Comparativa de calados medios y máximos en pozos más representativos de tramo 2.

Y, para finalizar con el análisis de los calados, donde más patentemente se advierte las diferencias de calados son en los gráficos 11.9 y 11.10. En ellos se presenta su evolución temporal en los dos Outfall en las primeras cinco horas y media de la simulación. Además del descenso en el calado hay diferencias en los tiempos en los que se produce el máximo calado en los pozos. Los picos en un sistema con TDUS se retrasan unos minutos respecto al sistema convencional.

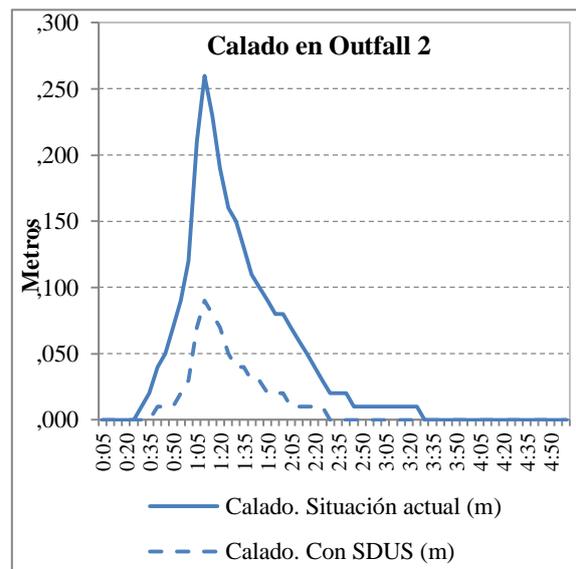
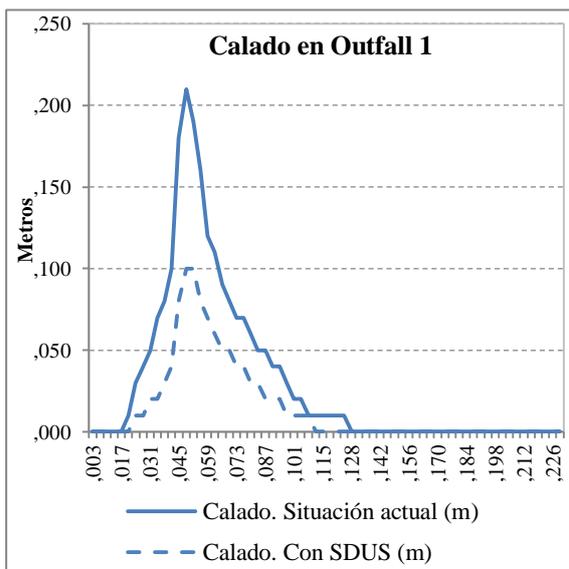


Gráfico: (Izquierda). Evolución temporal de los calados en Outfall 1. (Derecha). Evolución temporal de los calados en Outfall 2.

La influencia de las TDUS sobre la hidráulica del sistema en los nodos de salida queda reflejada en la tabla 11.3, donde se pueden ver los porcentajes de reducción de los valores de calados, caudales y volúmenes, así como el retardo en el tiempo del pico del calado que en las gráficas anteriores era difícil de apreciar, puesto que es de sólo un minuto.

Nodo	O1		Reducción	O2		Reducción
	Sin SDUS	Con SDUS		Sin SDUS	Con SDUS	
Calado medio (m)	0,02	0,01	50%	0,02	0,01	50%
Calado máximo (m)	0,22	0,1	54,55%	0,26	0,09	65,38%
Maximum HGL (m)	9,57	9,45	1,25%	12,53	12,35	1,44%
Momento en el que el calado es máximo (hr:m)	1:11	1:12	1 minuto	1:09	1:10	1 minuto
Caudal entrante máximo (LPS)	1847,01	530,31	71,29%	879,7	161,69	81,62%
Momento en el que la entrada de caudal es máxima (hr:m)	1:11	1:12	1 minuto	1:09	1:10	1 minuto
Volumen total (10 ⁶ litros)	3,462	1,177	66,00%	1,833	0,364	80,14%

Tabla: Valores medios y máximos en los dos Outfalls, con sistema de drenaje convencional y con SDUS.

Es muy representativo que los valores en el punto final de ambos tramos se vean reducidos en cualquiera de sus parámetros en más de la mitad. Especialmente remarcable que en O2, sistema que recoge menos agua por ser menos extenso, el volumen total se reduce en cuatro quintas partes, lo cual se debe a la alta infiltración que se produce en las dos subcuencas del Tramo 2.

En el Anejo 5-Resultados, se encuentran los gráficos con la evolución de los calados a lo largo de las primeras horas de la simulación de los nodos más representativos, junto con la tabla de resultados.

Como ya se mencionó con anterioridad, el programa hace el cálculo de caudales en las conducciones. Pues que el número de colectores implicados en los sistemas de drenaje es muy elevado, se ha hecho como en el caso de los pozos, se han seleccionado los más representativos, aquellos que reciben un aporte de caudal directo y los finales de cada tramo. La tabla 11.4 es un resumen de los resultados de los colectores escogidos. En ella se observa cómo en todos, la cantidad de caudal y los valores de las velocidades descienden considerablemente, estando en un rango comprendido entre el 70 y el 90%

para el caudal y la mitad en velocidades. La variación en velocidad es menor porque, en este caso, al tratarse de colectores tan grandes, éstos tiene más peso en la determinación de la velocidad que el caudal que por ellos circula.

La presencia de las TDUS, además del descenso del caudal provoca un retardo en el hidrograma, por ello es que menos en el primer colector, al que le llega solamente el agua de la primera cuenca, en el resto el pico se retrase uno o dos minutos. Los calados máximos también se acortan más de la mitad. Donde más se manifiestan esos descensos es en el Tramo 2. La tipología de los colectores en ese tramo es diferente a los del Tramo 1, siendo con diferencia más pequeños y con mucha menos anchura (ver Anejo 2 Hidráulica), esa es la razón de que ahí sean más pronunciadas las diferencias en los calados y también en las velocidades.

Colectores		Q _{max} (l/s)	Momento en el que el caudal es máximo (hr:m)	V _{máx} (m/s)	Capacidad máxima (%)	Y _{max} (m)	Fracción del tiempo en el que el flujo es		Valor medio de Froude
							Sub- crítico	Super- crítico	
C5	Sin SDUS	294,88	1:05	0,56	1,0%	0,03	0,99	0	0,15
	Con SDUS	74,65	1:05	0,33	0,0%	0,01	0,99	0	0,11
Reducción		74,68%	0 minutos	41,07%	100,00%	66,67%	-	-	26,67%
C12	Sin SDUS	879,05	1:08	0,93	1,0%	0,05	0,99	0	0,19
	Con SDUS	251,21	1:10	0,58	0,0%	0,02	0,99	0	0,15
Reducción		71,42%	2 minutos	37,63%	100,00%	60,00%	-	-	21,05%
C18	Sin SDUS	1535,25	1:10	3,6	35,0%	0,27	0,21	0,78	1,24
	Con SDUS	451,23	1:11	2,5	10,0%	0,12	0,53	0,46	1,07
Reducción		70,61%	1 minuto	30,56%	71,43%	55,56%	-	-	13,71%
C-21.3	Sin SDUS	1847,01	1:11	1,66	3,0%	0,09	0,91	0,08	0,34
	Con SDUS	530,31	1:12	1,03	1,0%	0,04	0,95	0,03	0,25
Reducción		71,29%	1 minuto	37,95%	66,67%	55,56%	-	-	26,47%
C24	Sin SDUS	345,37	1:05	0,87	4,0%	0,11	0,98	0	0,32
	Con SDUS	19,93	1:06	0,33	0,0%	0,02	0,98	0	0,21

Colectores	Q_{\max} (l/s)	Momento en el que el caudal es máximo (hr:m)	V_{\max} (m/s)	Capacidad máxima (%)	Y_{\max} (m)	Fracción del tiempo en el que el flujo es		Valor medio de Froude	
						Sub- crítico	Super- crítico		
Reducción	94,23%	1 minuto	62,07%	100,00%	81,82%	0,00%	-	34,38%	
C28	Sin SDUS	879,7	1:09	1,46	9,0%	0,15	0,99	0	0,58
	Con SDUS	161,69	1:10	0,82	1,0%	0,05	0,99	0	0,47
Reducción	81,62%	1 minuto	43,84%	88,89%	66,67%	-	-	18,97%	

Tabla: Resumen de los valores resultados de las simulaciones en un sistema sin TDUS en otro con SUDU y comparativa en los colectores más relevantes.

A partir de los resultados resumidos en la tabla anterior se ha elaborado el gráfico que se muestra a continuación. En él se pueden observar de forma visual las diferencias entre los dos sistemas, el actual y el proyectado.

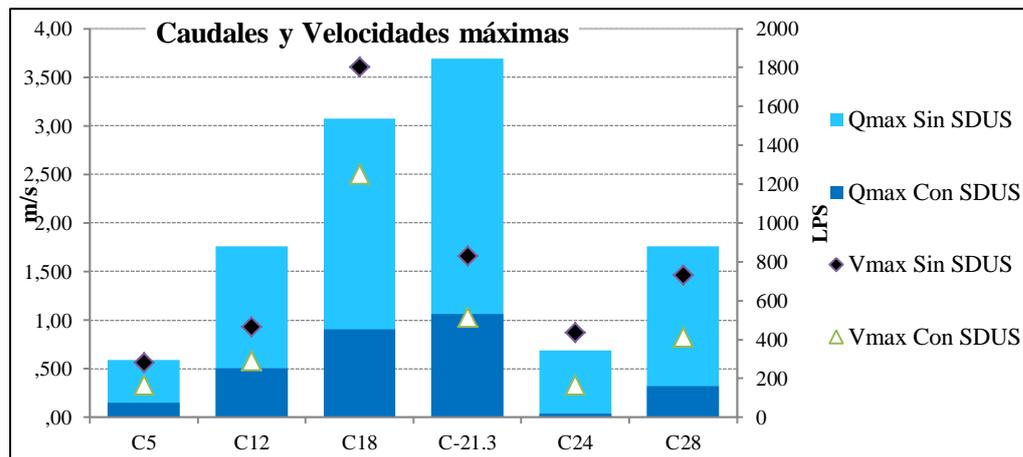


Gráfico: Comparativa de caudales y velocidades máximos en ambos sistemas.

Entre los resultados finales, el programa da los valores de los caudales medios y máximos que entran en los Outfalls y los de los sistemas en conjunto (cada sistema está formado por dos tramos). Estos resultados se exponen en los gráficos 11.13 y 11.14. Aunque es muy pronunciada la influencia de las TDUS en la disminución de los caudales medios, es más señalada aún en los máximos, reduciendo drásticamente el pico del caudal. En Outfall 2 va a parar las aguas recogidas de las subcuencas 7 y 8 solamente, mientras que al Outfall 1 lo hacen las seis primeras subcuencas, de ahí la diferencia de caudales.

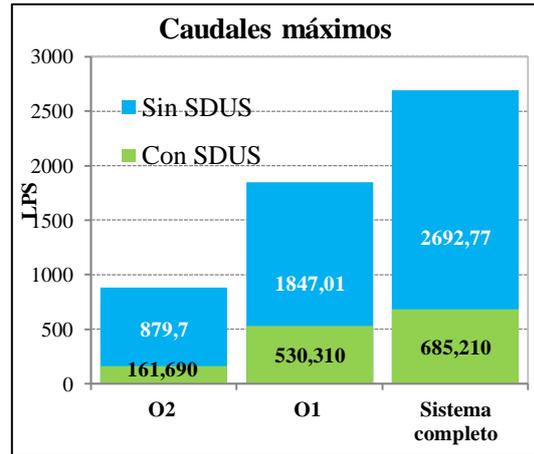
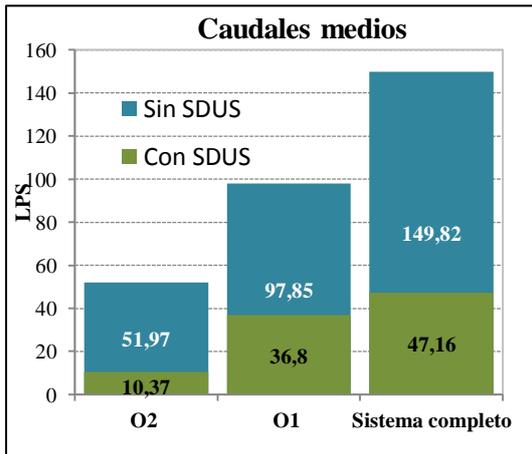


Gráfico: (Izquierda) Comparativa de caudales medios. (Derecha) Caudales máximos en ambos sistemas.

En el análisis de los hidrogramas en los principales colectores se observa, además de la disminución del pico de caudales, un ligero retardo en la producción del mismo y una atenuación en la forma con la incorporación de las LID's. Esa atenuación se ve claramente en los gráficos, el ascenso y descenso de las curvas de los hidrogramas tiene lugar, por colector, más o menos a la vez, pero los picos del caudal son mucho menores, dando hidrogramas mucho más suavizados que los correspondientes a un sistema sin TDUS.

Señalar que, en los gráficos, los colectores están ordenados de aguas arriba a aguas abajo, por tanto van de menor a mayor caudal transportado, puesto que a la esorrentía de las diferentes subcuencas se va incorporando paulatinamente el caudal procedente de las subcuencas aguas arriba. Por ello se observa un retardo también en los tiempos de los caudales pico, aunque ligero dada la poca extensión de la zona de estudio. En el gráfico del Tramo 2, es donde mejor se observa esa diferencia en los picos de los hidrogramas de los colectores C24 y C28, donde se alcanzan los cuatro minutos de retraso.

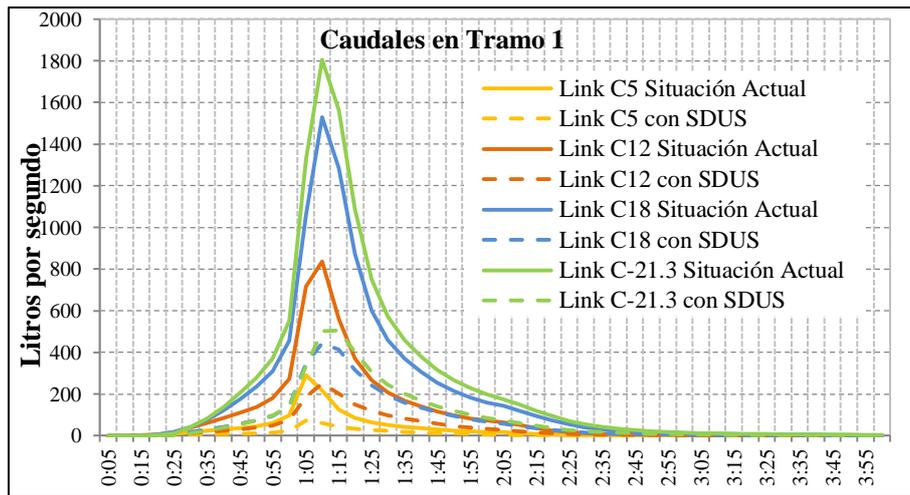


Gráfico: Caudal en los colectores del tramo 1. Link es el nombre que da el programa al conducto.

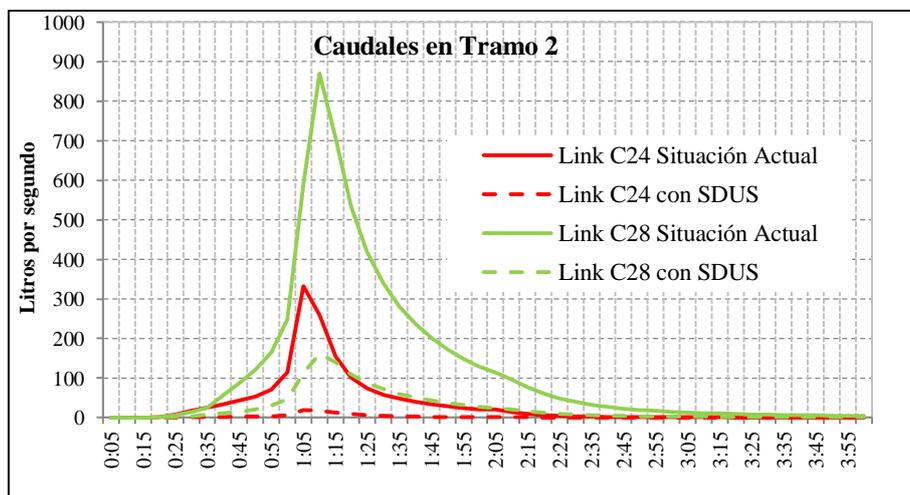


Gráfico: Caudal en los colectores del tramo 2

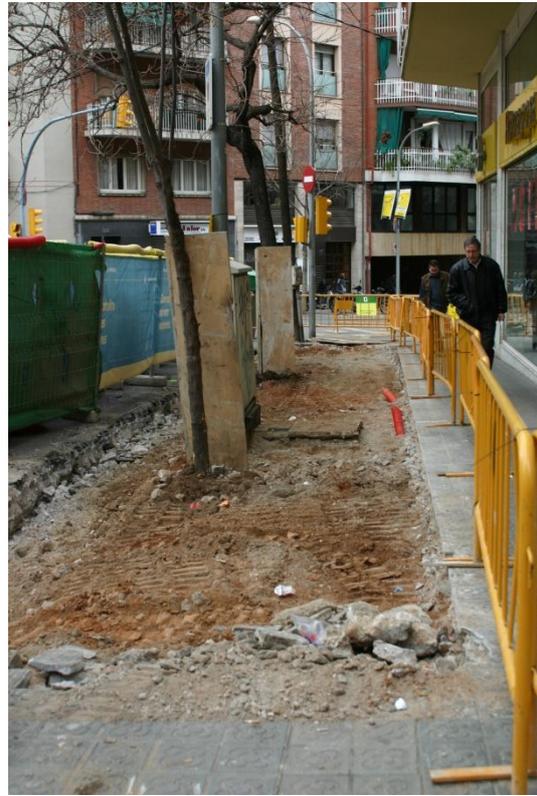
En la tabla 11.4., además de los valores de calados, velocidades y caudal, también se registran los valores medios del número de Froude por conducto y el porcentaje del tiempo en que el valor está por encima y por debajo de uno. Es decir, el porcentaje del tiempo en que el flujo circulante lo hace en régimen subcrítico y en régimen supercrítico. Como resumen de los informes finales de las simulaciones que pueden verse en el Anejo 5-Resultados, indicar que en el sistema actual sin SDUS, los números de Froude en los diferentes conductos se hayan entre 0,07 y 3,21. Solamente la media de tres de los conductos tienen valores superiores a 1, C18, C-19 y C-20. Estos son los tres últimos colectores antes del cambio de dirección de la red del tramo 1, y aunque su

media se corresponda con un régimen supercrítico, el régimen subcrítico es el predominante en el tiempo.

En el caso proyectado con un SDUS los valores medios del número de Froude se encuentran entre 0,4 y 2,84, algo inferiores que en el sistema actual. Pero también aparecen los mismos tres conductos con medias superiores a 1 que, aunque con valores algo menores. En ambos casos más del 80% del tiempo el flujo es subcrítico. Esto es debido a las bajas velocidades que hay en general y que como ya se señaló anteriormente se dan a causa de las dimensiones de los colectores.

ANEJO 6. REPORTAJE FOTOGRÁFICO

FOTOGRAFÍAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA ACERA IMPERMEABLE



ANEJO 6. REPORTAJE FOTOGRÁFICO



FOTOGRAFÍAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA ACERA PERMEABLE



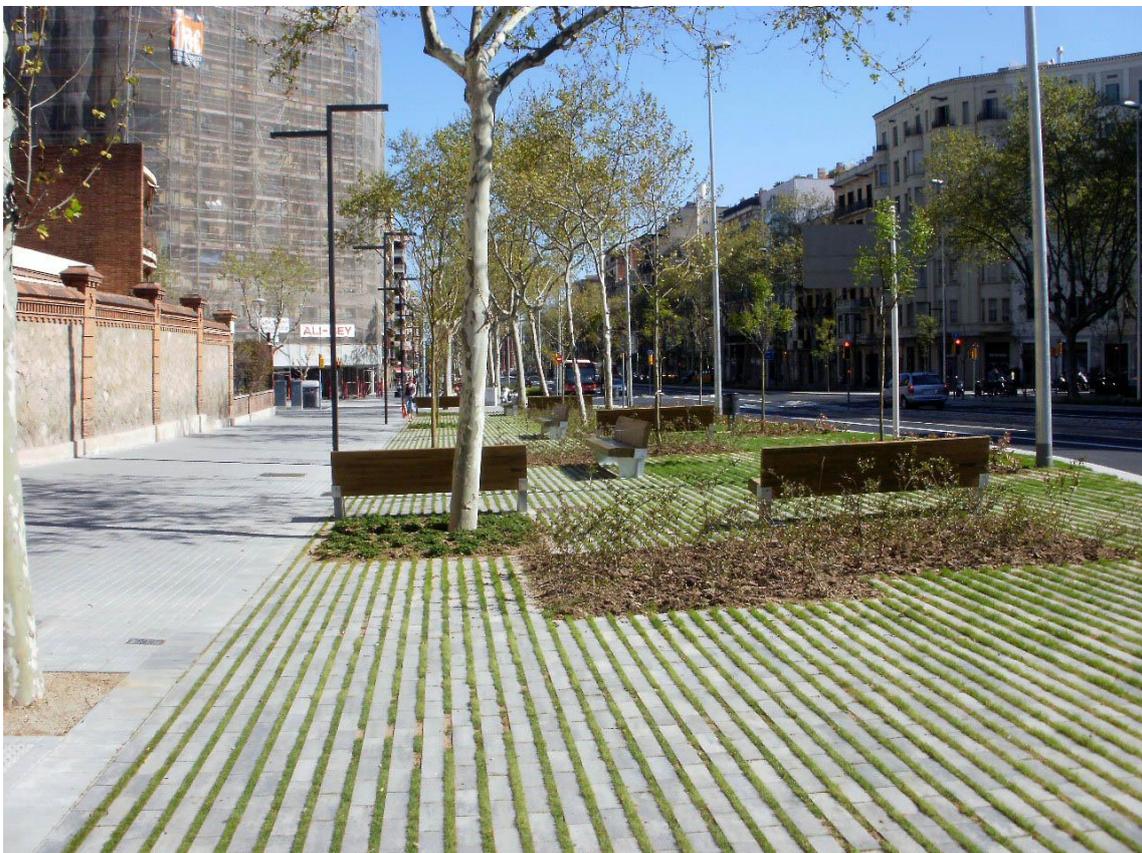
ANEJO 6. REPORTAJE FOTOGRÁFICO



SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA
DIAGONAL DE BARCELONA



FOTOGRAFÍAS DE LA ACERA PERMEABLE YA CONSTRUIDA



SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA DIAGONAL DE BARCELONA



FOTOGRAFÍAS DE LA DIAGONAL EN LA ZONA DE ESTUDIO



SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA DIAGONAL DE BARCELONA



ANEJO 6. REPORTAJE FOTOGRÁFICO



SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE: APLICACIÓN PRÁCTICA A UN TRAMO DE LA
DIAGONAL DE BARCELONA



ANEJO 6. REPORTAJE FOTOGRÁFICO

