FUNDACIÓN AQUAE

TESIS

Indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos:

APLICACIÓN A LA CIUDAD DE ZARAGOZA.

Lucía Soriano Martínez

AQUAE FUNDACIÓN

Indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos: Aplicación a la ciudad de Zaragoza.

Tesis Doctoral

Resumen

En un contexto de rápido crecimiento de la población urbana y de cambio climático global, la consecución de un modelo de desarrollo sostenible pasa inevitablemente por construir ciudades más sostenibles.

Basado en una intensiva impermeabilización de los suelos, el modelo actual de desarrollo urbano modifica profundamente el ciclo natural del agua en las ciudades. La drástica reducción de la capacidad de infiltración del terreno hace que gran parte de la precipitación se transforme en escorrentía superficial, que se concentra rápidamente originando grandes caudales punta. Además, el lavado de las superficies urbanas aporta altas cargas de contaminación a la escorrentía que producen importantes impactos en los medios receptores.

Esta realidad motiva la realización de la presente tesis doctoral cuyo objetivo general es contribuir a la consecución de ciudades sostenibles a través de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

Con el objetivo prioritario de minimizar los riesgos de inundación, el enfoque convencional del drenaje urbano desarrolló las primeras soluciones en relación a los caudales punta, centralizando su gestión en el sistema de saneamiento e incorporando la escorrentía al mismo tan rápido como fuera posible. Pero en episodios de lluvias intensas la sobrecarga tanto hidráulica como de contaminación del sistema provoca un incremento de la vulnerabilidad de la población a las inundaciones, una falta de garantía de salud pública y graves impactos sobre los medios receptores.

La aprobación en 1987 del CleanWaterAct en Estados Unidos, en el que se reconoció por primera vez el problema de la contaminación aportada por la escorrentía urbana, fue el punto de partida de un nuevo enfoque que promueve un conjunto de técnicas de drenaje que integran aspectos como cantidad de agua, calidad de agua y servicio a la sociedad. Estas técnicas, conocidas como Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS), son consideradas como las técnicas más apropiadas para gestionar los riesgos resultantes de la escorrentía urbana así como para contribuir a la mejora medioambiental de la cuenca y de los ecosistemas receptores.

La experiencia internacional apunta a que la efectiva incorporación de los SUDS como sistemas habituales en el desarrollo urbano debe basarse en tres elementos clave: El desarrollo de un marco normativo, la aplicación de instrumentos económicos y la participación ciudadana activa en el proceso.

Además se identifica como una de las líneas estratégicas para avanzar en la resolución de la problemática el desarrollo y aplicación de metodologías que apoyen el proceso de toma de decisiones basadas en indicadores cuantificables. Convergiendo con esta línea estratégica la presente tesis doctoral define unos indicadores de sostenibilidad focalizados en una temática no desarrollada hasta el momento, la gestión integral de las aguas de lluvia.

Para ello, se aplica el marco analítico Presión- Estado –Respuesta bajo un enfoque que rebasa el sistema de saneamiento, enmarcando la gestión de las aguas de lluvia en las múltiples y complejas interrelaciones del sistema urbano. Así se determinan indicadores de presión, de estado y de respuesta para cada elemento del sistema urbano (Medio Receptor – Cuenca Urbana – Sistema de Saneamiento), definiendo para cada indicador el objetivo específico, la unidad de medición, la tendencia deseada de evolución y la periodicidad de seguimiento recomendada.

La validez de la metodología propuesta se comprueba en el estudio de caso de la ciudad de Zaragoza. La determinación de los indicadores permite realizar un diagnóstico y definir unas líneas estratégicas de actuación que contemplan mejoras no sólo en el sistema de saneamiento y drenaje urbano, sino también en el marco normativo, urbanístico, económico, social y ambiental.

Finalmente, se concluye que la integración de la gestión de las aguas de lluvia en las políticas de ordenación del territorio, el desarrollo de mecanismos de coordinación institucional, la mejora del marco normativo y la aplicación de instrumentos económicos son elementos clave para la gestión integral de las aguas de lluvia y el consecuente desarrollo de ciudades más sostenibles en España.

Summary

In a context of rapid urbanization and global climate change, coping with sustainable development challenges requires the development of sustainable cities.

Based on an intensive soil permeability reduction, the current development model deeply modifies the natural water cycle in the urban environment. Reduction of soil infiltration capacity turns most of the rainwater into surface runoff, rapidly leading to heavy peak flows which are highly contaminated due to the flushing of the urban surface.

This is the central motivation for this thesis, which aspires to contribute to the attainment of more sustainable cities through an integrated management of rainwater in urban environments.

With the main objective of minimizing floods, the conventional approach of drainage systems focused on peak flows, centralizing their management on the sewage system and incorporating flows as fast as possible. But during heavy rains the hydraulic and contamination overcharge of the sewage system leads to an increase in the vulnerability of the population, in regards to floods and lack of public health, as well as to severe impacts in receiving waters.

In 1987, the United States'Clean Water Act Declaration, which firstly recognized the problem of runoff contamination, was the starting point of a new approach that promotes a set of techniques known as Sustainable Drainage Systems (SUDS)that integrates issues such as quantity of water, quality of water and service to society. SUDS are considered the most suitable set of techniques to manage the risks resulting from urban runoff, as well as to contribute to the environmental enhancement of urban basins and of the aquatic ecosystems.

International experience points out that the effective adoption of SUDS as usual systems in urban development must be based on three key elements: The enhancement of the legal frame, the application of economic tools and the active public participation throughout the process.

Additionally, one of the strategic actions to advance in the resolution of the problem is the development and application of methodologies based in measurable indicators that

support the decision making process. In that line, this thesis defines a set of sustainability indicators focused in integrated management of rainwater.

To that end, the present document applies the analytical frame Pressure – State – Response under an approach that goes beyond the sewage system and considers the multiple and complex interrelations within urban systems. Thus, for the three basic elements that interact in the issue (Receiving Water Bodies – Urban Basin – Sewage System) a set of Pressure – State – Response indicators are proposed, and the specific aim, the measurement unit, the desired evolution trend and the regularity of monitoring are defined for each of the indicators.

The application of the proposed indicators to the case study of the city of Zaragoza acknowledged their suitability for the definition of lines of action that encompass not only the enhancement of the performance of sewage and drainage systems during rain events, but also the legal, urban, economic, social and environmental framework.

Finally, this thesis concludes that the inclusion of urban rainwater management issues in the definition of regional planning policies, the development of mechanisms to attain an effective institutional coordination, the enhancement of the legal framework and the application of economic tools are key elements in order to achieve an integrated rainwater management and the subsequent sustainability of urban development in Spain.

Págs.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Introducción a la problemática de gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos 1
1.2 Objetivo general y objetivos específicos 5
1.3 Ámbito de estudio 5
1.4 Metodología 6
1.5 Estructura de la tesis doctoral 7
1.6 Caracterización de la contaminación movilizada en tiempos de lluvia 9
1.7 Impacto en los medios receptores de las descargas de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia. 15
1.8 Impacto de las aguas de lluvia en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales 17
1.9 Impacto de las aguas de lluvia en el aumento de los riesgos de inundación y la vulnerabilidad de las poblaciones. 19
1.10 Conclusiones 20

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE EN LA GESTIÓN INTEGRAL DE LAS AGUAS DE LLUVIA EN ENTORNOS URBANOS. 21
2.1 Introducción 21
2.2 Los Sistemas de Drenaje Sostenible 21
2.2.1 Revisión de experiencias internacionales en la aplicación de SUDS. 29
2.2.2 Principales líneas estratégicas de actuación para la incorporación de SUDS en el desarrollo urbano 34
2.3 Experiencias internacionales en la definición de un marco normativo para la gestión integral de las aguas de lluvia en entornos urbanos. 37
2.3.1 Introducción 37
2.3.2 Análisis del marco normativo europeo 37
2.3.3 Marco normativo legislativo de las aguas pluviales en Holanda. 38
2.3.4 Marco normativo legislativo de las aguas pluviales en Alemania 39

2.3.5 Marco normativo legislativo de las aguas pluviales en Francia. 40
2.3.6 Marco normativo legislativo de las aguas pluviales en España....40
2.4 Aplicación de Instrumentos económicos para la gestión integral de las aguas de lluvia....45
2.4.1 Introducción....45
2.4.2 Revisión de experiencias internacionales. 46
2.4.2.1 Instrumentos económicos para la gestión de agua de lluvia en España. 53
2.4.3 Consideraciones para el establecimiento de una tasa de lluvia. 55
2.5 Participación ciudadana para la gestión integral de las aguas de lluvia....58
2.5.1 Introducción....58
2.5.2 Revisión de experiencias internacionales de participación pública en la gestión de las aguas de lluvia. 58
2.6 Conclusiones....59

CAPÍTULO 3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LAS AGUAS DE LLUVIA EN LOS ENTORNOS URBANOS....61
3.1 Introducción....61
3.2 Marco metodológico....61
3.3 El medio receptor. 64
3.3.1 Caracterización del medio receptor....64
3.3.2 Indicadores de sostenibilidad del medio receptor....67
3.4 La cuenca urbana....74
3.4.1 Caracterización de la cuenca urbana....74
3.4.2 Indicadores de sostenibilidad de la cuenca urbana 77
3.5 El Sistema de Saneamiento....84
3.5.1 Caracterización del sistema de saneamiento....84
3.5.2 Indicadores de sostenibilidad del sistema de saneamiento....87
3.6 Metodología para el cálculo de los indicadores hidráulicos. 96
3.7 Conclusiones....98

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LOS INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD EN LA CUENCA URBANA DE ZARAGOZA. 100
4.1 Introducción. 100
4.2 Fuente de datos....103
4.3 Área de estudio....106
4.4 Indicadores de sostenibilidad del medio receptor de la ciudad de Zaragoza. 109
4.4.1 Las masas de agua superficiales de la ciudad de Zaragoza 110
4.4.1.1 Presión sobre las masas de agua superficiales por la descarga de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia....110
4.4.1.2 Estado de las masas de agua superficiales de la ciudad de Zaragoza 115
4.4.1.3 Impacto sobre las masas de agua superficiales de la descarga de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia....118
4.4.1.4 Respuesta: Análisis de medidas existentes en la ciudad de Zaragoza para reducir las presiones e impactos sobre las masas de agua superficiales por la descarga de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia....125
4.4.2 Las masas de agua subterráneas de la ciudad de Zaragoza. 131
4.4.2.1 Presiones e Impactos sobre las masas de agua subterráenas de la ciudad de Zaragoza....131
4.4.2.2 Estado de las masas de agua subterráenas de la ciudad de Zaragoza. 138
4.5 Indicadores de sostenibilidad de la cuenca urbana de Zaragoza....143
4.5.1 Marco Físico 143
4.5.2 Desarrollo urbanístico 145
4.5.3 Ordenación del Territorio y Gestión del riesgo de inundaciones. 154
4.5.4 Marco socioeconómico....159
4.5.5 Marco normativo.....159

4.5.6 Instrumentos económicos. 169
4.5.7 Participación ciudadana. 171
4.6 Indicadores de sostenibilidad del Sistema de Saneamiento 173
4.6.1 Red de Alcantarillado y Colectores principales 173
4.6.2 Capacidad de almacenamiento 174
4.6.3 Puntos de alivio. 179
4.6.4 Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales 184
4.6.5 Diagnóstico hidráulico del funcionamiento del sistema de saneamiento 186
4.6.5.1 Análisis de los resultados globales 186
4.6.5.2 Análisis de resultados a nivel de cuenca vertiente 196
4.7 Conclusiones 210

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 217
5.1 Conclusiones 217
5.2 Limitaciones 217
5.3 Futuras líneas de investigación 220

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA 223

ANEJOS

Nº 1.- Cálculos hidráulicos para la estimación de descargas de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia.

Nº 2.- Caracterización cuenca urbana de Zaragoza.

Nº 3.- Análisis de las ordenanzas municipales relacionadas con la gestión de las aguas de lluviaen la ciudad de Zaragoza.

Nº 4.- Análisis de los procesos de participación ciudadana en la ciudad de Zaragoza.

Nº 5.- Caracterización del sistema de saneamiento de la ciudad de Zaragoza.

Nº 6.- Cálculos hidráulicosdel sistema de saneamiento de Zaragoza.

ÍNDICE DE FIGURAS

Págs.

Figura nº 1.- Grado de impermeabilización de acuerdo con el proceso de urbanización.....2
Figura nº 2.- Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación agua-escorrentía.....3
Figura nº 3.- Componentes de un sistema de saneamiento con red de alcantarillado unitaria.....4
Figura nº 4.- Ámbito de estudio de la tesis doctoral.....6
Figura nº 5.- Comparación de objetivos entre los sistemas convencionales de drenaje y los Sistemas de Drenaje Sostenible. 22
Figura nº 6.- Respuesta hidrológica de una cuenca según grado de desarrollo urbano.....23
Figura nº 7.- Comparación de la escorrentía generada en un pavimento permeable y en un pavimento convencional. 32
Figura nº 8.- Comparación de la evolución de la escorrentía en cubierta convencional y cubierta vegetada en dos episodios de lluvia. 33
Figura nº 9.- Esquema de la propuesta metodológica para la definición de un sistema de indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos. 63
Figura nº 10.- Estado de las masas de agua superficiales en España.....101
Figura nº 11.- Mapa de situación de Zaragoza.....106
Figura nº 12.- Cuencas vertientes del sistema de saneamiento de la ciudad de Zaragoza incluidas dentro del área de estudio. 108
Figura nº 13.- Tipos de medidas en las masas de agua relativas a la gestión de las aguas pluviales incluidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro.....127
Figura nº 14.- Presión sobre las masas de agua subterráneas de la cuenca urbana de Zaragoza debida a las extracciones.....134
Figura nº 15.- Plumas de contaminación térmica y cuencas vertientes del sistema de saneamiento. 137

Figura nº 16.- Red de alcantarillado de Zaragoza y zonificación de peligrosidad de karstificación y vulnerabilidad del acuífero a la contaminación por infiltración de aguas de escorrentía. 144
Figura nº 17.- Localización de Zonas verdes en las cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza. 147
Figura nº 18.- Localización de usos industriales productivos, transporte y logística en las cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza. 149
Figura nº 19.- Localización de equipamientos y densidad de edificación media y baja en las cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza..... 151
Figura nº 20.- Localización de suelo urbano consolidado y alta densidad de edificación en las cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza..... 153
Figura nº 21.- Mapa de zonas inundables 155
Figura nº 22.- Mapa de riesgo de afección a las actividades económicas por inundación en periodo de retorno de 100 años. 157
Figura nº 23.- Localización de tanques de tormenta y propuesta de nuevos tanques en el sistema de saneamiento de Zaragoza. 178
Figura nº 24.- Puntos de alivio al río Ebro del sistema de saneamiento de Zaragoza. 180
Figura nº 25.- Puntos de alivio al río Huerva del sistema de saneamiento de Zaragoza. 181
Figura nº 26.- Puntos de alivio al río Gállego del sistema de saneamiento de Zaragoza. 182
Figura nº 27.- Esquema hidráulico de flujos de la zona servida por la EDAR La Almozara 188
Figura nº 28.- Esquema hidráulico de flujos de la zona servida por la EDAR La Cartuja. 190
Figura nº 29.- Puntuaciones obtenidas en cada cuenca según matriz multicriterio. 205

ÍNDICE DE TABLAS

Págs.

Tabla 1.- Valores típicos de la calidad de las aguas de lluvia previa contaminación por lavado de la cuenca urbana. 10
Tabla 2.- Cargas de contaminación en la escorrentía superficial urbana. 11
Tabla 3.- Contribución a la contaminación movilizada por los sucesos de lluvia en varias cuencas europeas 12
Tabla 4.- Comparación de cargas de contaminación de las aguas residuales, aguas de escorrentía superficial, rebose de alcantarillado unitario y efluente de Estación Depuradora 14
Tabla 5.- Impactos de las Descargas de Sistemas Unitarios en los medios acuáticos receptores considerando la escala temporal. 17
Tabla 6.- Principales impactos en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales debidos a las sobrecargas hidráulicas y de contaminación asociadas a los sucesos de lluvia. 18
Tabla 7.- Beneficios de la implementación de las distintas tipologías de Sistemas de Drenaje Sostenible. 25
Tabla 8.- Rendimiento en la eliminación de contaminantes los pavimentos porosos, zanjas de infiltración y franjas de tierra filtrante. 28
Tabla 9.- Criterios para la comparación de escenarios de drenaje 36
Tabla 10.- Medidas, actuaciones e instalaciones recogidas en el Formulario 5'.2 para limitar la contaminación por desbordamientos de sistemas de saneamiento en episodios de lluvia. 42
Tabla 11.- Instrumentos económicos aplicados a nivel internacional para la gestión integral de las aguas de lluvia. 47
Tabla 12.- Tarifas de aguas de lluvia aplicadas en algunos condados del Estado de Maryland, Estados Unidos. 57
Tabla 13.- Caracterización del medio receptor para el diagnóstico integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos. 66
Tabla 14.- Concentraciones medias de amonio total y amonio no ionizado (mg/l) para salmónidos y otras especies de agua fría sensibles presentes. 69
Tabla 15.- Indicadores de Presión relacionados con los medios receptores. 71

Tabla 16.- Indicadores de Estado relacionados con el medio receptor. 72
Tabla 17.- Indicadores de Respuesta relacionados con el medio receptor. 73
Tabla 18.- Caracterización de la cuenca urbana. 75
Tabla 19.- Indicadores de Presión de la cuenca urbana relacionados con la Ordenación del Territorio y la movilidad urbana. 78
Tabla 20.- Indicadores de Estado de la cuenca urbana relacionados con la Ordenación del Territorio. 79
Tabla 21.- Indicadores de Respuesta de la cuenca urbana relacionados con el Marco Institucional. 80
Tabla 22.- Indicadores de Respuesta de la cuenca urbana relacionados con el Marco Normativo. 81
Tabla 23.- Indicadores de Respuesta de la cuenca urbana relacionados con las Herramientas Económicas. 82
Tabla 24.- Indicadores de Respuesta de la cuenca urbana relacionados con la Participación Ciudadana. 83
Tabla 25.- Caracterización del sistema de saneamiento. 85
Tabla 26.- Indicadores de Presión relacionados con el sistema de saneamiento. 88
Tabla 27. Indicadores de Estado relacionados con el sistema de saneamiento. 90
Tabla 28.- Indicadores de Respuesta relacionados con el sistema de saneamiento. 92
Tabla 29.- Volumen de almacenamiento específico necesario en las cuencas urbanas según distintas normativas nacionales e internacionales. 94
Tabla 30.- Fuente de datos para la caracterización de la gestión de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza. 104
Tabla 31.- Presiones analizadas en la definición del informe IMPRESS por la Agencia Catalana del Agua y la Confederación Hidrográfica del Ebro. 110
Tabla 32.- Comparación características cuencas urbana de Zaragoza con cuencas urbanas PROMEDSU 111
Tabla 33.- Resultado de la aplicación a la ciudad de Zaragoza del indicador EE1 cargas de contaminación de los reboses de los sistemas unitarios de saneamiento. 112

Tabla 34.- Resultado de la aplicación en la ciudad de Zaragoza del indicador EE3 Presión y el indicador EE8 Impacto sobre las masas de agua superficiales. 114
Tabla 35.- Resultado de aplicación en la ciudad de Zaragoza del indicador EE5 de Estado de las masas de agua superficiales. 116
Tabla 36.- Aplicación a la ciudad de Zaragoza del indicador EE6 Caudal mínimo de los medios receptores en época de estiaje. 117
Tabla 37.- Estaciones de control de los Sistemas Automáticos de Información y variables analizadas. 118
Tabla 38.- Variables utilizadas para el diagnóstico cualitativo 119
Tabla 39.- Umbrales para el diagnóstico del estado de las masas de agua según indicadores físico-químicos. 120
Tabla 40.- Concentraciones máximas permitidas de Cobre y Zinc en relación a la dureza del agua 120
Tabla 41.- Descripción de la muestra utilizada en el análisis de frecuencias en la definición del impacto de las descargas de los sistemas unitarios en los medios receptores en la ciudad de Zaragoza. 122
Tabla 42.- Tipología de suceso para el análisis de frecuencias 123
Tabla 43.- Resultado del análisis de frecuencias de variación de concentraciones de oxígeno disuelto y amonio aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Zaragoza. 123
Tabla 44.- Umbrales de concentraciones de Amonio y Oxígeno Disuelto por Estado Ecológico. 124
Tabla 45.- Resultados del análisis de frecuencias de concentración de amonio y oxígeno disuelto aguas abajo de la ciudad de Zaragoza. 124
Tabla 46.- Medidas relativas a la gestión de las aguas de lluvia incluidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro. 126
Tabla 47.- Resultados de aplicación a la ciudad de Zaragoza de los indicadores de respuesta para la disminución de las presiones sobre el medio receptor. 130
Tabla 48.- Balance hídrico de la masa de agua subterránea 058 Aluvial del Ebro - Zaragoza 132
Tabla 49.- Resumen de extracciones totales por bombeo de la masa de agua subterránea 058 Aluvial del Ebro-Zaragoza. 132

Tabla 50.- Estado químico de las masas de agua subterránea 057 Aluvial del Gállego y 058 Aluvial del Ebro 139
Tabla 51.- Aplicación a la ciudad de Zaragoza del Indicador EE9 Número de incumplimientos de los valores umbral para el buen estado ecológico de las masa de agua subterráneas. 141
Tabla 52.- Indicadores del proceso de urbanización en la ciudad de Zaragoza. 146
Tabla 53.- Indicador de movilidad urbana en la ciudad de Zaragoza. 154
Tabla 54.- Comparación de los usos contemplados en la normativa de reutilización según Real Decreto 1620/2007, Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) y Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos (USEPA, 2004). 162
Tabla 55.- Comparación de umbrales de parámetros a contemplar para la reutilización según usos del RD 1670/2007, OMS y USEPA con valores característicos de las aguas de lluvia y las aguas de escorrentía urbana (Puertas Agudo et al., 2008). 163
Tabla 56.- Comparación de las concentraciones máximas para infiltración e inyección de la OMECGIA y los valores típicos de la escorrentía urbana. 166
Tabla 57.- Rendimiento de eliminación de contaminantes de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible. 167
Tabla 58.- Resultados de aplicación de los indicadores de la red de colectores a la ciudad de Zaragoza. 173
Tabla 59.- Resultados aplicación de indicadores de capacidad de almacenamiento a la ciudad de Zaragoza. 174
Tabla 60.- Comparación del volumen de almacenamiento específico necesario en la cuenca urbana de Zaragoza según distintas normativas. 176
Tabla 61.- Resultado de aplicación de los indicadores relacionados con los puntos de alivio a la ciudad de Zaragoza. 183
Tabla 62.- Resultados de la aplicación de los indicadores de funcionamiento de las EDAR a la ciudad de Zaragoza. 185
Tabla 63.- Comparación de las descargas globales por zona servida 187
Tabla 64.- Descargas desde colectores principales en ambas zonas servidas 193

Tabla 65.- Resumen descargas globales del sistema de saneamiento.....194
Tabla 66.- Resultados de aplicación a la ciudad de Zaragoza de los indicadores de funcionamiento global del sistema de saneamiento.....195
Tabla 67.- Resumen descargas sistemas unitarios de las cuencas vertientes en la zona servida por la EDAR La Almozara 197
Tabla 68.- Resumen descargas sistemas unitarios de las cuencas vertientes en la zona servida por la EDAR La Cartuja 199
Tabla 69.- Matriz multicriterio de indicadores de cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza. 204
Tabla 70.- Modificación de los tipos de suelo en la cuenca vertiente CH-A1. 206
Tabla 71.- Resumen del diagnóstico de la cuenca urbana de Zaragoza para la selección de la tipología de Sistemas de Drenaje Sostenible. 209

1. INTRODUCCIÓN

1. Introducción a la problemática de gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos

En las últimas seis décadas el mundo ha experimentado un rápido proceso de urbanización. En 2007, por primera vez en la historia, la población urbana excedió a la población rural, manteniéndose desde entonces esta tendencia. Actualmente el 54 % de la población mundial reside en áreas urbanas y se prevé que para 2050 ésta llegará al 66 %haciendo un total de 6400 millones de personas (UN - DESA, 2014).

Por otra parte, los escenarios de cambio climático indican un incremento de la frecuencia de eventos extremos como lluvias torrenciales (IPCC, 2015), aumentando la vulnerabilidad de las ciudades en cuatro sectores estratégicos: la energía, el agua, el transporte y la salud pública.

La problemática de gestión de las aguas de lluvia cobra especial relevancia en las ciudades continentales que deben afrontar el efecto de la subida del nivel del mar como riesgo adicional asociado al cambio climático junto a los efectos meteorológicos propios de su emplazamiento, como las lluvias intensas o “spark rains”.

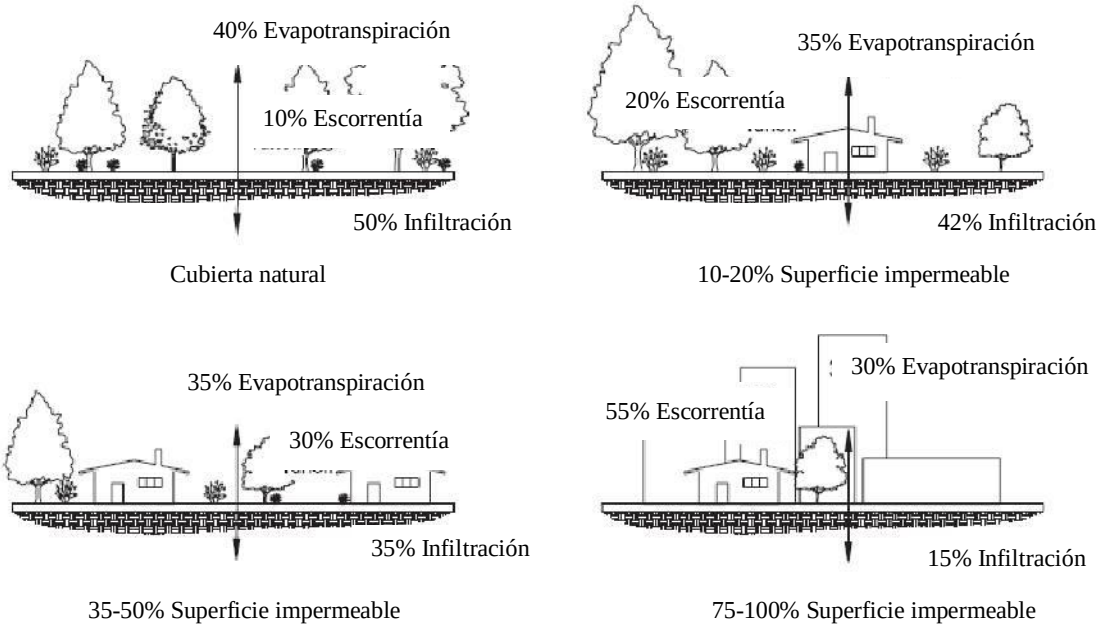
En este contexto global el desarrollo sostenible sólo se podrá alcanzar a través de ciudades sostenibles (World Bank, 2010a).

Uno de los retos para la consecución ciudades sostenibles es la gestión integral de las aguas de lluvia.

Basadoen una intensiva impermeabilizaciónde los suelos, elmodelo actual de desarrollo urbano modifica profundamente el ciclo natural del agua en las ciudades con los consecuentes impactos tanto en el aumento de la vulnerabilidad de las poblaciones como en la salud de los ecosistemas acuáticos. La drástica reducción de la capacidad de infiltración del terreno hace que gran parte de la precipitación se transforme en escorrentía superficial, que se concentra rápidamente originando grandes caudales punta. Por otra parte, el lavado de las superficies urbanas aporta altas cargas de contaminación a la escorrentía que producen importantes impactos en los medios receptores. La Figura nº1muestra la

evolución del grado de impermeabilización de las cuencas en el proceso de urbanización.

Figura nº1.- Grado de impermeabilización de acuerdo con el proceso de urbanización.



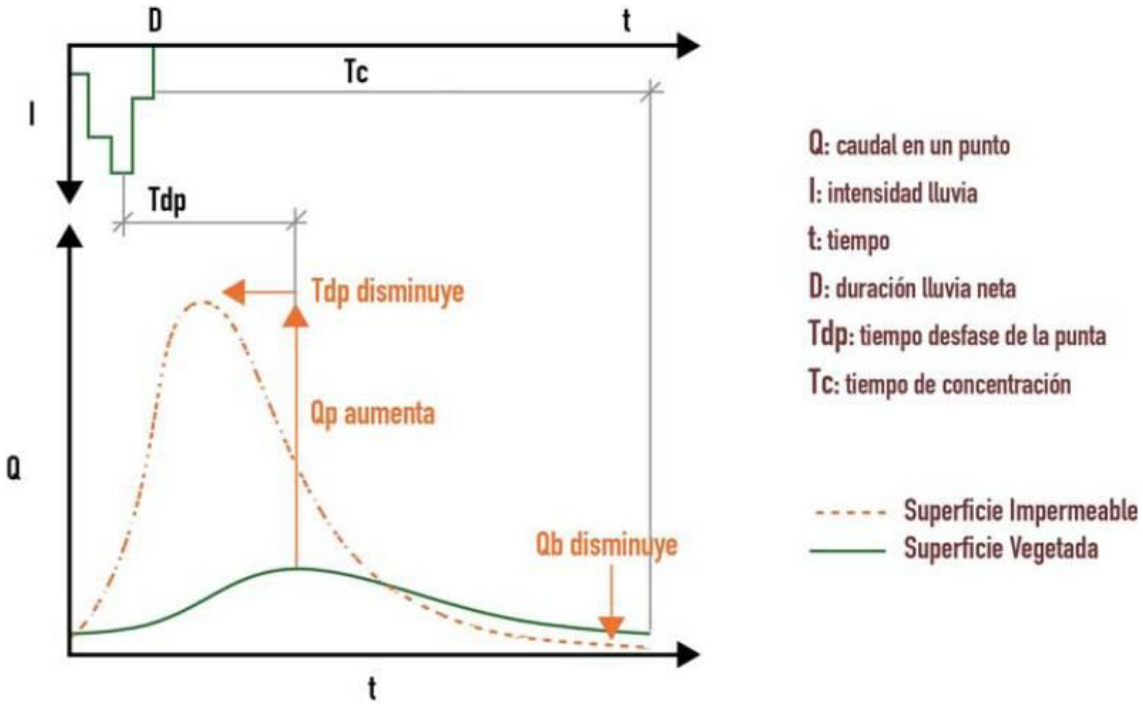
Fuente: (Coffman, 1999)

Como se ve en la Figura nº1, la escorrentía es directamente proporcional al grado de impermeabilización del suelo, pasando del 10% de la precipitación en entornos naturales, al 20% en entornos rurales (10 – 20% de impermeabilización), 30% en entornos suburbanos (35-50% de impermeabilización) hasta el 55% en ciudades altamente impermeabilizadas.

Además el proceso de impermeabilización ligado al actual modelo de desarrollo urbano conlleva que la transformación de la lluvia en escorrentía se produzca de una manera más rápida, disminuyendo el tiempo de desfase de la punta e incrementando notablemente el volumen y el caudal máximo asociado al mismo aguacero tipo.

La Figura nº 2 muestra los cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación agua-escorrentía.

Figura nº 2.- Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación agua-escorrentía.



Fuente: (Perales Momparler & Andrés-Domenech, 2007)

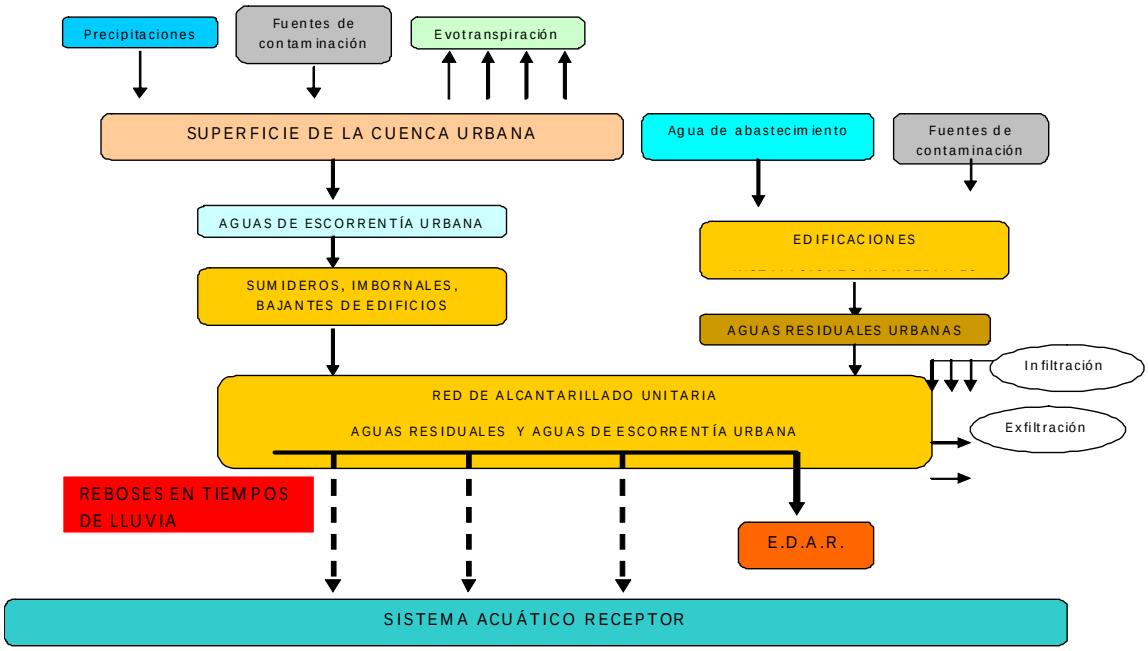
Como se ve en laFigura nº 2, el hidrograma muestra una respuesta significativamente diferente en una superficie vegetada y en una superficie impermeable.

En episodios de lluvia el sistema de saneamiento no tiene capacidad para transportar dichos caudales punta, vertiéndolos directamente al medio receptor mediante un sistema de aliviaderos. Las importantes cargas de contaminación movilizadas durante los sucesos de lluvia supondrán graves impactos sobre el medio receptor. Además afectarán a los procesos de tratamiento de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (Suárez, Puertas, Jácome, Anta, Del Río, 2009), disminuyendo el rendimiento de las mismas y resultando efluentes de peor calidad. Finalmente, en episodios de lluvias intensas la capacidad hidráulica global del sistema de saneamiento puede ser rebasada, provocando inundaciones.

Por tanto, para la consecución de ciudades sostenibles, es necesario avanzar hacia la gestión integral de las aguas de lluvia a través de actuaciones que gestionen los riesgos resultantes de la escorrentía urbana y contribuyan a la mejora medioambiental de la cuenca urbana y los ecosistemas acuáticos receptores.

El primer acercamiento a resolución de esta problemática tuvo como objetivo prioritario minimizar los riesgos de inundación en las ciudades a través del diseño de la propia red. Ante el aumento constante del volumen de agua a evacuar, la alternativa fue un aumento proporcional de los diámetros empleados. La Figura nº 3muestra de manera esquemática el funcionamiento habitual del sistema de saneamiento unitario en tiempo de lluvia.

Figura nº 3.- Componentes de un sistema de saneamiento con red de alcantarillado unitaria.



Fuente: Elaboración propia

Esta primera solución fue eficaz para abordar la problemática de inundaciones aunque se comprobó que, a largo plazo, no era suficiente por sí misma. Así, el primer cambio de enfoque fue considerar las redes de tuberías, unitarias o separativas, como parte de un todo que hay que gestionar de manera completa e integrada en la búsqueda de soluciones, lo que habitualmente se denomina gestión integral del sistema de saneamiento. (Temprano, Suárez, Tejero.1998). La gestión integral considera que el sistema de saneamiento está compuesto por la cuenca de aportación, las redes de alcantarillado, las estaciones depuradoras de aguas residuales y las masas de agua receptoras. Se trata, por tanto de gestionar todo un sistema considerando las interacciones entre las distintas partes del mismo.

Actualmente, la consecución de una gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos se enfrenta a cuatro retos clave: Reducir los volúmenes de escorrentía de

entrada en la red, retrasar la entrada de caudales de lluvia en el sistema de saneamiento, reducir la contaminación de los vertidos directos y minimizar las descargas.

Así, como complemento al tratamiento convencional de las aguas pluviales, las recomendaciones internacionales (EC, 2012) promueven la implementación de Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS) al considerarlos sistemas de drenaje más flexibles y eficientes para gestionar los riesgos resultantes de la escorrentía urbana así como para contribuir a la mejora medioambiental de la cuenca urbana y los ecosistemas acuáticos receptores.

2. Objetivo general y objetivos específicos

El objetivo general de la presente tesis doctoral es contribuir a la consecución de ciudades sostenibles a través de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

A tal fin se definen los siguientes objetivos específicos.

Objetivo específico 1: Analizar las experiencias internacionales en la resolución de la problemática e identificar los principales obstáculos para la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

Objetivo específico 2: Realizar una propuesta de indicadores de sostenibilidad para la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos que permita superar los obstáculos encontrados.

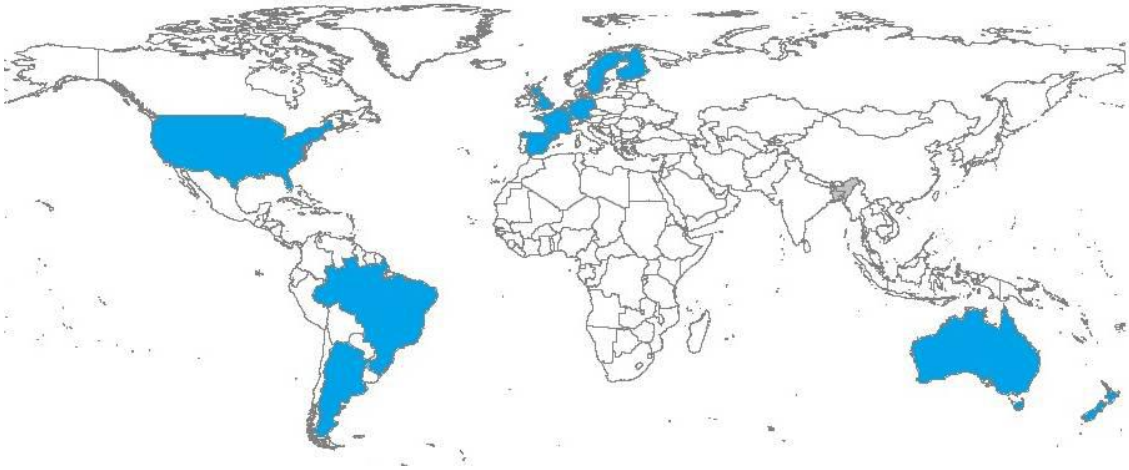
Objetivo específico 3: Comprobar la validez de los indicadores propuestos en un estudio de caso.

Objetivo específico 4: Definir las líneas de actuación prioritarias para avanzar hacia la gestión integral de las aguas de lluvia en España.

3. Ámbito de estudio

Para la realización de la presente tesis doctoral se han analizado experiencias internacionales mostradas en la Figura nº 4:

Figura nº 4.- Ámbito de estudio de la tesis doctoral



Fuente: Elaboración propia.

Destacan las experiencias en implementación de Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS) de Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda y Reino Unido, especialmente Escocia.

Por su parte Brasil y Argentina toman el protagonismo en relación a las experiencias de participación ciudadana en la definición de planes de gestión de las aguas de lluvia.

En relación a las experiencias en el marco normativo y la implementación de instrumentos económicos, tomando como referencia la consolidada experiencia de Estados Unidos, el estudio se centra en el contexto europeo con el que España comparte el marco jurídico, destacando Alemania, Francia, Holanda, Suecia, Finlandia y Dinamarca. Finalmente, el estudio de caso de la aplicación de la metodología propuesta se realiza en la ciudad de Zaragoza (España).

4. Metodología

Para la elaboración de la presente tesis doctoral se realiza una revisión bibliográfica de referencias nacionales e internacionales relacionadas con la problemática así como con las soluciones adoptadas hasta el momento.

En base al estado del arte se propone un sistema de indicadores de la gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos bajo un enfoque que rebasa el propio sistema de saneamiento, entendiendo las ciudades como sistemas urbanos complejos.

Disponer de un sistema de indicadores de la gestión de las aguas de lluvia cumple varias funciones.

Primero, la realización de un diagnóstico basado en indicadores permite medir de manera objetiva la capacidad de la cuenca urbana y del sistema de saneamiento para afrontar los episodios de lluvia y la resiliencia del medio receptor para atenuar las presiones ejercidas por ambos.

Por otra parte, permite hacer un seguimiento de la evolución de la cuenca y un análisis de las tendencias de las distintas políticas adoptadas al respecto.

Finalmente, facilita la comparación de la gestión de las aguas de lluvia en distintos entornos urbanos, conformando un ranking que permita la jerarquización de intervenciones en el territorio así como el establecimiento de objetivos de sostenibilidad en relación con la gestión de las aguas de lluvia.

Los indicadores urbanos propuestos reflejan de forma sintética los retos de la gestión integral de las aguas de lluvia y los insertan coherentemente en el proceso de toma de decisiones, complementando las necesarias actuaciones en el sistema de saneamiento con líneas estratégicas de actuación en el ámbito normativo, económico, urbanístico, de movilidad urbana y de participación pública.

La validez de la metodología propuesta se verifica en el estudio de caso de la ciudad de Zaragoza. Se comprueba que la aplicación de los indicadores propuestos permite definir unas líneas de actuación que, de implementarse, supondrían una mejora ostensible de la situación actual.

5. Estructura de la tesis doctoral

La tesis doctoral se estructura en cinco capítulos.

En el CAPÍTULO 1 se caracterizan los retos de gestión de las aguas de lluvia tanto a nivel cuantitativo como cualitativo, caracterizando las cargas de contaminación movilizadas en episodios de lluvia y los impactos tanto en el funcionamiento del sistema de saneamiento, como en el aumento de los riesgos de inundación y en el estado de los ecosistemas acuáticos receptores.

El CAPÍTULO 2 analiza la evolución de las soluciones a la problemática y el estado del arte en la actualidad identificando los puntos débiles tanto en el enfoque aplicado como en las metodologías existentes para la definición de las actuaciones necesarias para avanzar hacia una gestión integral de las aguas de lluvia.

En el CAPÍTULO 3 se propone una metodología para la definición de un sistema de indicadores bajo un enfoque que considera las ciudades como sistemas urbanos complejos, incorporando los tres elementos básicos que interactúan en la problemática (Medio Receptor – Cuenca Urbana – Sistema de Saneamiento) en el marco analítico Presión-Estado -Respuesta.

La validez de la metodología propuesta se comprueba en el estudio de caso de la ciudad de Zaragoza que se expone en el CAPÍTULO 4.La realización de este trabajo permite además inducir los principales retos a los que se enfrentan las ciudades españolas y definir las líneas de actuación prioritarias para avanzar hacia la gestión integral de las aguas de lluvia en España.

Finalmente, en el CAPÍTULO 5 se detallan las conclusiones de este trabajo, se exponen las limitaciones encontradas y se proponen futuras líneas de investigación que, complementando a la presente tesis doctoral, ayudarían a avanzar en la consecución de una gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

El cuerpo principal de la tesis doctoral se complementa con 6 anejos.

En el Anejo 1 se propone una metodología para el cálculo hidráulico simplificado de las descargas de los sistemas unitarios de saneamiento en tiempo de lluvia, de aplicación general a cualquier sistema de saneamiento. Este anejo complementa la información facilitada en el capítulo 3.

Los cinco anejos restantes se centran en el estudio de caso de la ciudad de Zaragoza, definiendo los elementos clave relativos a la gestión de las aguas de lluvia que nutren el sistema de indicadores que se expone en el capítulo 4. Así, se caracteriza la cuenca urbana (Anejo 2), se analizan las ordenanzas municipales vigentes (Anejo 3) y las experiencias de participación ciudadana (Anejo 4), se caracteriza el sistema de saneamiento (Anejo 5) y se exponen los resultados de los cálculos hidráulicos del sistema de saneamiento (Anejo 6).

6. Caracterización de la contaminación movilizada en tiempos de lluvia

A continuación se realiza una caracterización de la contaminación de las aguas de lluvia y de escorrentía en las cuencas urbanas, así como sus impactos en el medio receptor, en la prestación del servicio de saneamiento y en el aumento de vulnerabilidad de los habitantes de las ciudades.

Por una parte, se analizan las cargas de contaminación atmosférica aportadas por las aguas de lluvia. Una vez que las aguas de lluvia entran en contacto con la cuenca urbana diversas fuentes de contaminación provocan unas cargas adicionales.

La concentración de actividades humanas genera acumulación de polvo, suciedad, arenas, materia orgánica, nutrientes, metales pesados, tóxicos y contaminación bacteriológica sobre las superficies de las cuencas. Se denomina escorrentía urbana a los caudales de lavado de dichas superficies urbanas. Seguidamente, en los sistemas unitarios de saneamiento, la escorrentía entra en la red de alcantarillado generándose un nuevo proceso de contaminación por la mezcla, por una parte con las aguas residuales urbanas y, por otra, por el lavado de los sedimentos depositados en la red(Puertas Agudo, Suárez López, & Anta Álvarez, 2008).

La Tabla 1 recoge los valores típicos de la calidad de las aguas de lluvia (Mattraw, 1997; Brezonik, 1975. Weibel et al. 1996; Huber, 1988 citados por Puertas Agudo et al., 2008). La calidad de las aguas de lluvia, previa contaminación por el lavado de la superficie urbana resulta de interés en relación a la definición de líneas de actuación dirigidas a la recogida de aguas de lluvia y posterior reutilización.

Tabla 1.- Valores típicos de la calidad de las aguas de lluvia previa contaminación por lavado de la cuenca urbana.

Parámetro	Unidades	Valor
PH	-	3-6
DBO5	mg/l	1-13
DQO	mg/l	4-22
COT	mg/l	1-3
C inorg.	mg/l	0-2
Color	PCU	5-10
ST	mg/l	10-24
SS	mg/l	2-10
Turbiedad	JTU	4-7
N org.	mg/l	0.09-0.15
NH3-N	mg/l	0.01-0.04
NO2-N	mg/l	0.0-0.01
NO3-N	mg/l	0.12-0.73
N total	mg/l	0.29-0.84
Ortofosfatos	mg/l	0.01-0.03
P total	mg/l	0.01-0.05
Pesticidas	mg/l	3-600
Plomo	mg/l	30-70

Fuente: Mattraw, 1997; Brezonik, 1975. Weibel et al. 1996; Huber, 1988 citados por Puertas Agudo et al., 2008.

Por otra parte, en la Tabla 2se recogen valores de las cargas de contaminación anual movilizadas por la escorrentía urbana en relación con el uso de la cuenca urbana, medidas por (Burton & Pitt, 2002).

Tabla 2.- Cargas de contaminación en la escorrentía superficial urbana.

	Uso del suelo (kg/(ha/año)								
				Residencial (Densidad)					
Contaminante	**Comercial**	**Centro comercial**	**Aparca-mientos**	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Auto-pistas**	**Industrial**	**Parques**
Sólidos totales	2100	720	1300	670	450	65	1700	670	n/d
SST	1000	440	400	420	250	10	800	500	3
P total	1,5	0,5	0,7	1	0,3	0	0,9	1,3	0,03
NTK	6,7	3,1	5,1	4,2	2,5	0,3	7,9	3,4	n/d
NH^3	1,9	0,5	2	0,8	0,5	0	1,5	0,2	1,5
$NO^3 + NO^2$	3,1	0,5	2,9	2	1,4	0,1	4,2	1,3	n/d
DBO_5	62	n/d	47	27	13	1	n/d	n/d	n/d
DQO	420	n/d	270	170	50	7	n/d	200	n/d
Pb	2,7	1,1	0,8	0,8	0,1	0	4,5	0,2	2
Zn	2,1	0,6	0,08	0,7	0,1	0	2,1	0,4	0
Zr	0,15	0,04	n/d	n/d	0	0	0,06	0,6	n/d
Cd	0,03	0,01	0,01	0	0	0	0,02	0	n/d
As	0,02	0,02	n/d	n/d	0	0	0,02	0	n/d

Fuente:(Burton & Pitt, 2002).

Como se ve en la Tabla 2, a medida que el grado de impermeabilización y la intensidad de tráfico aumentan la contaminación presente en la escorrentía es mayor. Esta relación es crucial a la hora de diseñar las propuestas de actuación para la gestión de la escorrentía urbana, en la medida en la que el urbanismo y la movilidad urbana pueden considerarse, por tanto, ámbitos de prevención de los impactos sobre los medios receptores.

Cuando la escorrentía urbana entra en el sistema de saneamiento las cargas de contaminación aumentan por una parte por el hecho de mezclarse las aguas residuales urbanas e industriales que transportan las redes con las propias cargas de contaminación de la escorrentía, así como por la resuspensión de los depósitos de sedimentos existentes en el sistema, arrastrados en tiempo de lluvia. En la Tabla 3 se resume la contribución de cada fuente de contaminación a la carga movilizada por los sucesos de lluvia.

Tabla 3.- Contribución a la contaminación movilizada por los sucesos de lluvia en varias cuencas europeas

		Fuente de contaminación		
Parámetro	**Referencia**	**Aguas residuales**	**Escorrentía superficial**	**Sedimentos de las conducciones**
SS	Gromaire et al (2001)	21%	15%	64%
	Krejci et al (1987)	6%	35%	59%
	Bachoc (1992)	N/D	N/D	30-44%
	Chebbo (1992)	20%	56%	24%
DQO	Gromaire et al (2001)	34%	15%	51%
	Krejci et al (1987)	20%	22%	58%
	Chebbo (1992)	33%	45%	22%

Fuente:(Gromaire, Garnau, Saad, & Chebro, 2001), citado por (Puertas Agudo et al., 2008)

Como se ve en la Tabla 3 la resuspensión de sedimentos en las conducciones contribuye aproximadamente entre un 40% y un 80% a la carga total de Sólidos en Suspensión (SS) y entre un 25% y un 70% a las cargas de Demanda Química de Oxígeno (DQO). Los valores presentan una gran variabilidad que depende del uso y el tamaño de las cuencas. Además la contribución se focaliza en los tramos más altos de las redes de alcantarillado donde la velocidad del flujo es más baja y existen por tanto más posibilidades de que se forme un lecho de sedimentos permanente (Gromaire et al., 2001). Estos resultados ofrecen un orden de magnitud de la contribución de los sedimentos en la red a las cargas

de contaminación de las aguas transportadas por las redes de saneamiento en tiempos de lluvia.

Finalmente, las cargas de contaminación de los reboses de los sistemas unitarios son muy superiores a las cargas de agua residual urbana en tiempo seco, lo que refleja el proceso de contaminación de las aguas por lavado de la cuenca (escorrentía superficial) unido al fenómeno de la resuspensión de sedimentos comentado anteriormente. Estas mediciones demuestran que no es válido considerar las aguas de lluvia como aguas "blancas" libres de contaminación y con capacidad de dilución de los contaminantes en tiempo seco.

Así, los sucesos de lluvia aportan sus propias cargas de contaminación e inducen procesos internos en las redes de saneamiento que aumentan de manera global la concentración de contaminantes en la red. La Tabla 4 muestra las cargas de contaminación típicas de las aguas residuales urbanas, las aguas de escorrentía superficial, los reboses de alcantarillados unitarios, el efluente de la Estación Depuradora de Aguas residuales y los valores límite marcados por la Normativa 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Tabla 4.- Comparación de cargas de contaminación de las aguas residuales, aguas de escorrentía superficial, rebose de alcantarillado unitario y efluente de Estación Depuradora

Parámetro	Agua residual urbana (mg/l)	Escorrentía superficial(mg/l)	Rebose alcantarillado unitario (mg/l)	Rebose alcantarillado unitario - PROMEDSU (mg/l)	Efluente EDAR (mg/l)	Normativa 91/271/CEE (mg/l)	Medio natural (mg/l)
SS	220	190	425	505	35	35	
DBO5	220	11	90	270	25	25	5
DQO	500	85	380	582	125	125	
N Amoniacal	25	1,45	6	12			1
N Total	40	3,2	8,3	32	10-15	10	
P total	8	0,34	10	7		1	
Pb	0,11	0,21	0,25	0,12			
Zn	0,43	0,3	0,87	0,35			
Aceites	100	0,4	-				
CF	10^6-10^7/100ml	6430/100 ml	10^5-10^8/100ml				10^2-10^4/100ml

Fuente: Elaboración propia basada en datos de (Puertas Agudo et al., 2008), Programa PROMEDSU y Web del MAGRAMA.

Destaca en la Tabla 4 la concentración de Sólidos en Suspensión (SS) que aumenta de manera drástica del agua residual en tiempo seco, con una concentración menor a 300 mg/l a la concentración de los reboses que superan los 425mg/l llegando incluso a 505 mg/l detectado en las mediciones del PROMEDSU.

Por otra parte, se comprueba como las concentraciones de los reboses de los alcantarillados unitarios son significativamente superiores a los efluentes de las Estaciones Depuradoras cuyos límites máximos están recogidos en la Normativa 91/271/CEE. Así, la concentración de SS es entre 12 y 14 veces superior a la permitida en los efluentes, la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) entre 3 y 10 veces superior y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) entre 3 y 4 veces superior a la permitida, superándose igualmente la concentración de Fósforo total (P_{total}) entre 7 y 10 veces.

Aunque la naturaleza de los efluentes de las EDAR son continuos y no puntuales como las descargas de los sistemas unitarios que, en principio, sólo se producen en sucesos de lluvia, las concentraciones de los contaminantes detectadas que se recogen en la Tabla 4 apuntan hacia la necesidad de minimizar tanto la cantidad de caudales descargados por los sistemas unitarios en tiempos de lluvia como la carga de contaminación aportada por los mismos y la frecuencia de dichos desbordamientos.

7. Impacto en los medios receptores de las descargas de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia.

Numerosos estudios realizados en los últimos 25 años apuntan hacia el escaso control de las descargas de los sistemas unitarios (DSU) como una de las principales razones de la persistencia de la mala calidad de las masas de agua (Cherrered & Chocad, 1990; Lee & Jones-Lee, 1993; Field & Pitt, 1990; Desbordes & Heiman, 1990).

Los efectos de dichos vertidos sobre las masas de agua continúa siendo uno de los mayores problemas de gestión en áreas urbanas de todo el mundo. Cada masa de agua va a presentar un determinado tipo de respuesta a las cargas de las DSU, dependiendo principalmente de los caudales base y de sus dimensiones. Así, si una masa de agua presenta los caudales más bajos su capacidad para recibir vertidos es mínima. Si dicha masa de agua tiene una temperatura alta, por una parte su capacidad de disolver oxígeno es baja y por otra los procesos biológicos se ven favorecidos, con la consecuente capacidad para transformar los contaminantes y consumir oxígeno disuelto. Estas

condiciones coinciden en la época de estiaje de los ríos. Si en esta época de estiaje se produce un suceso de lluvia de cierta magnitud se ponen en marcha todos los fenómenos de contaminación asociados con la escorrentía urbana. Si las redes son unitarias y no existen Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS por sus siglas en inglés Sustainable Drainage Systems) la contaminación de una DSU puede ser muy alta (Puertas Agudo et al., 2008).

Así, la conjunción en un mismo momento de un río en época de estiaje y de un suceso de lluvia que produzca una DSU genera una situación de contaminación a la que algunos autores han denominado "estiaje húmedo"(Suárez, 1994). Esta es una situación extrema de contaminación totalmente transitoria cuyas consecuencas en la calidad de las aguas del río y en el ecosistema son complejas.

Según el estudio realizado por (House et al., 1993) sobre la valoración cualitativa de los impactos producidos por los vertidos urbanos sobre sistemas acuáticos, en ríos tanto pequeños como grandes los impactos más frecuentes son la bajada de oxígeno disuelto (con un impacto mayor en ríos pequeños), el aumento de tóxicos y sedimentos, así como la aparición de patógenos y residuos. Por su parte, (Lijklema, Roijackers, & Cupper, 1989) asoció los fenómenos de contaminación a las variables espacio y tiempo obteniendo los resultados que se muestran en laTabla 5.

La Tabla 5 muestra como una de las variables indicadoras de los impactos tanto agudos como diferidos como acumulativos de las descargas de los sistemas unitarios es la bajada de oxígeno disuelto, indicador que igualmente aparece afectado en el tipo de masa de agua río que se analiza en el presente estudio.

Tabla 5.- Impactos de las Descargas de Sistemas Unitarios en los medios acuáticos receptores considerando la escala temporal.

Impacto	Caracterización	Variable indicadora
Agudo (horas)	Hidráulica	Caudal, erosión del fondo, tensiones tangenciales
	Química	Sustancias tóxicas (NH_3)
	Física	Sólidos en suspensión
	Bio-química	Descenso de OD en el agua
	Sanitaria	Bacterias, virus
	Estética	Material flotante, olores
Diferido (días)	Hidráulica	Capacidad de transporte de sedimentos
	Química	Sustancias tóxicas (NH_3, NO_2^-)
	Bio-química	Descenso de OD en los sedimentos
	Sanitaria	Bacterias, virus
	Estética	Flotantes, detritos, aceites
Acumulativo (meses, años)	Hidrológica	Régimen de caudales, morfología
	Química	Metales pesados, orgánicos habituales, sedimentos orgánicos e inorgánicos
	Bio-química	Descenso de oxígeno (eutrofización)

Fuente: (Lijklema et al., 1989)

8. Impacto de las aguas de lluvia en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales

Además de los impactos en el medio receptor por las descargas de los sistemas unitarios, en tiempo de lluvia la llegada de caudales elevados a las estaciones depuradoras puede ocasionar un efluente de baja calidad e incluso la puesta fuera de régimen del proceso biológico de las líneas de tratamiento.

La Tabla 6 resume los principales impactosen las diferentes etapas de la EDAR en función de los nuevos caudales, cargas y concentraciones. Algunos efectos son a muy corto plazo mientras que otros se pueden mantener durante días o semanas.

Tabla 6.- Principales impactos en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales debidos a las sobrecargas hidráulicas y de contaminación asociadas a los sucesos de lluvia.

Etapa	Impactos
Pretratamiento	Sobrecarga canales de desbaste
	Puesta en marcha de los reboses de alcantarillado unitario aguas arriba
	Excesivas velocidades de paso en las rejas que pueden arrastrar los residuos retenidos
	Puesta en marcha de los by-pass
	Sobrecarga de los contenedores de residuos
	Sobrecarga de unidades de desarenado
	Transporte de areas aguas abajo del desarenado
	Obstrucción de canales y tuberías en la EDAR
	Sobrecarga de contenedores
Tratamiento Primario	Sobrecarga hidráulica provocando aumento de velocidada ascensional y disminuyendo el tiempo de retención hidráulica
	Elevadas cargas durante el primer lavado elevando el nivel del manto de fangos
	Liberación de sólidos o flóculos del manto de fangos que tieneden a dirigirse hacia el vertedero de salida del efluente
	Reucción global del rendimiento en SS y DBO
	Cargas inusuales de arenas y residuos de desbaste debido a la sobrecarga en los pretratamientos
	Desbordamiento de las cajas d erecogida y almacenamiento de espumas
Tratamiento Secundario	**Fangos activos**
	Sobrecarga de contaminantes
	Pérdida de biomasa de los reactores y decantadores
	Sobrecarga orgánica debido al lavado de la red y escape de sólidos de los decantadores primarios
	Sobrecarga eléctrica de los aireadores superficiales debido a la elevación del nivel del agua
	Disminución de la edad del fango y por tanto de la reducción de DBO
	Proceso biopelícula (lechos bacterianos y biodiscos)
	Sobrecarga de contaminantes
	Disminución del tiempo de retención hidraulica y consecuente reducción de la eliminación de DBO
	Elevada velocidad de giro de los brazos distribuidores en los lechos bacterianos
	Desprendimiento excesivo de biomasa por sobrecarga hidráulica
	Mala distribución de caudales acentuada por la sobrecarga hidráulica.
Tratamiento Terciario	En procesos basados en biomasa en suspensión Idem tratamiento secundario fangos activos
	Disminución de la eficiencia de eliminación de nitrógeno y fósforo
	En filtros de arena
	Atascamiento prematuro del lecho debido al escape de sólidos de los procesos previos
	Excesiva pérdida de carga debido a la sobrecarga hidráulica
Tratamiento de fangos	Ingreso de exceso de sólidos durante el primer lavado
	Eficiencia muy baja en el tratamiento de las aguas o líquidos de retorno
	Incapacidad para conseguir un buen grado de secado cuando se usan lechas o eras de secado

Fuente: Elaboración propia basada en (Puertas Agudo et al., 2008).

Como se ve en la Tabla 6, la llegada de caudales punta en tiempo de lluvia conlleva una sobrecarga hidráulica y de contaminación lo que provoca unos significativos impactos en las líneas de tratamiento de las Estaciones Depuradoras afectando a los rendimientos de las mismas y, por tanto, aumentando el riesgo de incumplimiento de los parámetros de calidad exigidos a los efluentes por la directiva 91/271/CEE. Se hace así necesario un redimensionamiento de algunos elementos de las líneas de tratamiento para adaptarse a los caudales en tiempo de lluvia así como una gestión específica de los mismos para minimizar los impactos.

9. Impacto de las aguas de lluvia en el aumento de los riesgos de inundación y la vulnerabilidad de las poblaciones.

Existe una relación bidireccional entre la gestión de inundaciones y la gestión de las aguas de lluvia en las ciudades.

Por una parte, las inundaciones provocadas por las masas de agua superficiales afectarán al funcionamiento del sistema de saneamiento, cuyas principales infraestructuras suelen estar alineadas con los sistemas naturales de drenaje. Algunas componentes esenciales como las EDAR pueden quedar fuera de servicio provocando graves impactos sobre los ecosistemas receptores. Por otra parte, en episodios de lluvia intensa, debido a una falta de capacidad hidráulica, puede ser el propio sistema de saneamiento el causante de la inundación.

Así, en un contexto de cambio climático que anuncia el incremento de la frecuencia de fenómenos extremos como lluvias torrenciales, la minimización de la vulnerabilidad de las poblaciones urbanas ante las inundaciones requiere implementar las medidas necesarias para la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos. Para ello se debe garantizar el correcto funcionamiento del sistema de saneamiento en episodios de lluvias intensas, aumentando su capacidad de almacenamiento y gestión de caudales punta. Además se deben tomar medidas para minimizar la afección al sistema de saneamiento de las inundaciones provocadas por el aumento de caudal circulante de los medios receptores de las cuencas urbanas.

10. Conclusiones

El problema de la gestión del agua de lluvia en los entornos urbanos es no sólo un problema cuantitativo de caudales punta a gestionar sino también un problema complejo a nivel cualitativo.

Las cargas contaminantes específicas de las aguas de escorrentía se yuxtaponen espacial y temporalmente a las cargas de las aguas residuales e industriales urbanas.

Esto indica la perentoria necesidad de definir nuevas formas de abordar la gestión de las aguas de lluvia considerando tanto los caudales punta como las nuevas cargas de contaminación aportadas en episodios de lluvia para minimizar el riesgo de inundaciones, garantizar el buen funcionamiento de sistema de saneamiento y drenaje urbano y reducir los impactos en los medios receptores.

El siguiente capítulo realiza una revisión de las experiencias internacionales en la resolución de la problemática y el estado del arte en la actualidad.

2. ESTADO DEL ARTE EN LA GESTIÓN INTEGRAL DE LAS AGUAS DE LLUVIA EN ENTORNOS URBANOS.

1. Introducción

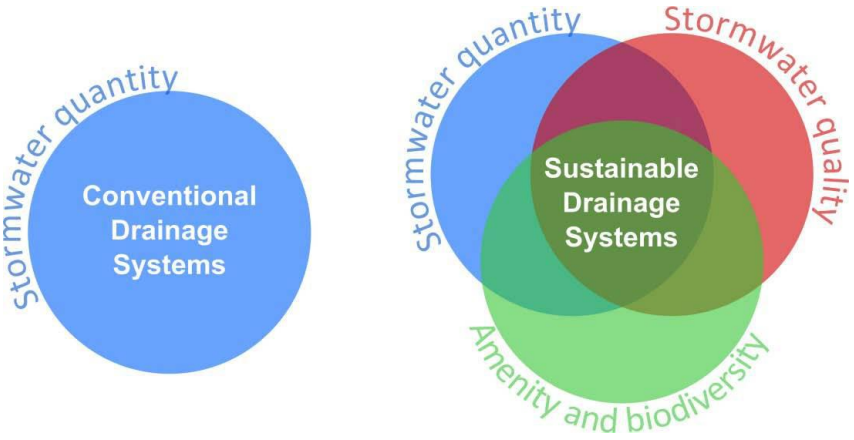
En el presente capítulo se realiza una revisión de las experiencias internacionales en la gestión integral de las aguas de lluvia con el fin de identificar las bases sobre las que definir un sistema de indicadores de sostenibilidad para la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

2. LosSistemas de Drenaje Sostenible

Como consecuencia del trabajo realizado por la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas (Informe Brundtland 1987), en los últimos años se ha planteado un nuevo enfoque en el drenaje urbano consistente en emplear técnicas de drenaje que consideran e integran aspectos como cantidad de agua, calidad del agua y servicio a la sociedad, contribuyendo a la generación de ciudades sostenibles a largo plazo.El conjunto de técnicas que persiguen dichos objetivos se engloban bajo el nombre de Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS).

Así, los objetivos de los SUDS son minimizar los impactos del desarrollo urbano en la calidad y cantidad de las aguas de lluvia y maximizar las oportunidades recreativas y la mejora de la biodiversidad (Woods-Ballard et al., 2007) cambiando la percepción de las aguas de lluvia de un problema a una oportunidad. La Figura nº 5 muestra de manera esquemática el cambio de enfoque entre los sistemas convencionales de drenaje y los SUDS.

Figura nº 5.- Comparación de objetivos entre los sistemas convencionales de drenaje y los Sistemas de Drenaje Sostenible.



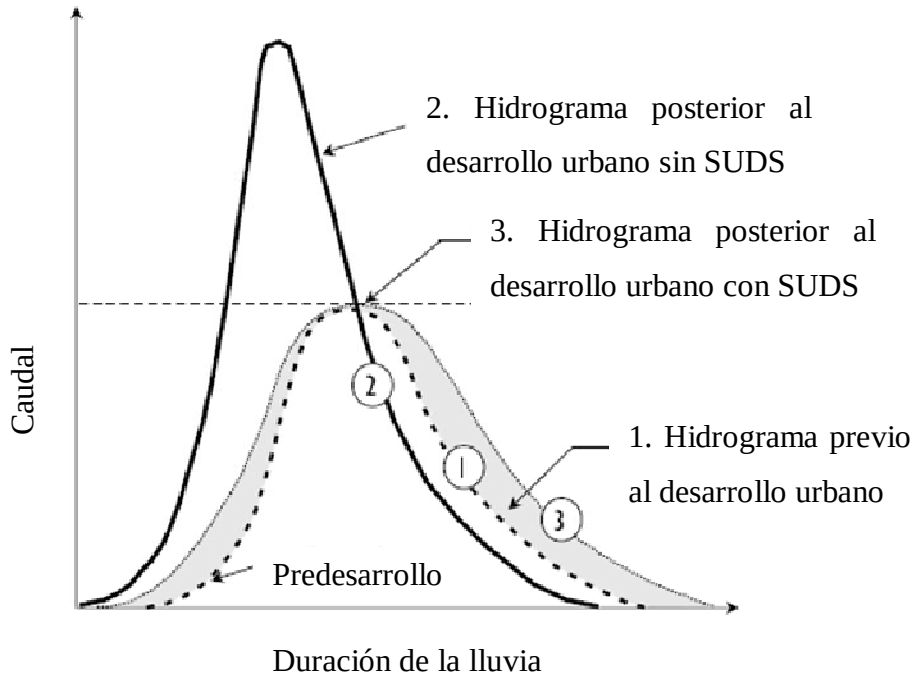
Fuente: Proyecto E2Stormed.

Existen varias diferencias clave del enfoque de los SUDS en relación al enfoque tradicional (Philip, 2011b). Por una parte, bajo el enfoque tradicional las aguas de lluvia se dirigen tan rápido como sea posible lejos del lugar de origen para su vertido o, en el mejor de los casos, su tratamiento. Los SUDS tratan de retener y atenuar en origen los caudales pico y la contaminación asociada a los mismos.

El control y tratamiento de las aguas de lluvia descentralizado utiliza, siempre que sea posible, sistemas naturales de tratamiento como los suelos, la vegetación o los estanques, evitando así la sobrecarga de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales, permitiendo la recarga del acuífero y la restauración y protección de los ecosistemas urbanos.

Además, la atenuación y reducción de los caudales punta contribuyen a la disminución del riesgo de inundación de los núcleos urbanos y a la protección contra la erosión de los cauces fluviales, incorporando además nuevos recursos al ciclo integral del agua a través del aprovechamiento del agua de lluvia. La Figura nº 6 muestra la respuesta hidrológica de una cuenca en distintas opciones de desarrollo urbano.

Figura nº 6.- Respuesta hidrológica de una cuenca según grado de desarrollo urbano.



Fuente: (Coffman, 1999)

Como se ve en la Figura nº 6, el hidrograma 3 muestra la respuesta de la cuenca urbanizada en la que se incluyen técnicas de control de puntas y protección frente a inundaciones. Aunque el caudal máximo sea igual al caudal máximo en las condiciones anteriores al desarrollo urbano, se presenta en la zona sombreada el incremento de volumen y duración del aguacero debido a la urbanización de la cuenca (Coffman, 1999).

Por otra parte, la gestión del agua en los municipios es una de las actividades gestionadas por los gobiernos locales que requiere un mayor consumo energético, pudiendo representar entorno al 35% del consumo municipal. La utilización de SUDS puede reducir el consumo energético de diversas formas.

Primero, la reducción del volumen de escorrentía que entra en la red de alcantarillado y la mejora de la calidad de la misma, reduce, en el caso de las redes unitarias, los costes asociados al tratamiento de las mismas en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. Por otra parte, el aprovechamiento de las aguas de lluvia para distintos usos reduce el uso de agua potable, por lo que se reduce la energía consumida en los procesos de tratamiento y aducción. Además, los SUDS reducen el efecto “isla de calor” en la

ciudad al aumentar las zonas verdes y mejorar el aislamiento de los edificios a través de cubiertas vegetadas. Finalmente, los SUDS permiten la infiltración y el vertido al cauce, lo que reduce el volumen de agua de lluvia tratado y bombeado, produciendo un ahorro energético adicional. Así, la eficiencia energética asociada a la implementación de SUDS respalda la promoción de los mismos como estrategia efectiva de adaptación y mitigación del cambio climático (E2Stormed, 2015).

Como beneficio adicional, la implementación de SUDS permite incorporar nuevos usos recreativos y otros servicios ambientales en las ciudades.

Una de las clasificaciones más recurrentes en la literatura existente sobre las diferentes tipologías de SUDS es la que diferencia entre medidas estructurales y no estructurales.

Las medidas no estructurales previenen por una parte la contaminación del agua, reduciendo las fuentes potenciales de contaminantes, y por otra, evitan parcialmente el tránsito de las escorrentías aguas abajo y su contacto con contaminantes. Abarcan temas como la educación y programas de participación ciudadana, el control de la aplicación de herbicidas y fungicidas en parques y jardines, la limpieza frecuente de superficies para reducir la acumulación de contaminantes, el cuidado en las zonas en obras para evitar el arrastre de sedimentos, el control de las conexiones ilegales al sistema de drenaje y la recogida y reutilización de pluviales, entre otros.

Por su parte, se consideran medidas estructurales aquellas que gestionan la escorrentía contaminada mediante actuaciones que contengan, en mayor o menor grado, algún elemento constructivo, o supongan la adopción de criterios urbanísticos ad hoc. Las medidas estructurales más utilizadas son: Cubiertas Vegetadas, Superficies Permeables, Franjas Filtrantes, Pozos y Zanjas de Infiltración, Drenes Filtrantes, Cunetas Verdes, Depósitos de Infiltración, Depósitos de Detención, Estanques de Retención y Humedales (Perales Momparler, 2008).

A modo de resumen, la Tabla 7muestra las distintas tipologías de SUDS y los beneficios que reportan.

Tabla 7.- Beneficios de la implementación de las distintas tipologías de Sistemas de Drenaje Sostenible.

Beneficios	Drenaje Convencional	Estructuras de detención	Areas de Bioretención	Humedales artificiales	Balsas de detención	Filtros drenantes	Zanjas drenantes	Sistemas Geocelulares	Cubiertas vegetadas	Balsas de infiltración	Zanjas de infiltración	Otros sist.pretratamiento	Pavimentos Permeables	Jardines de lluvia	Estanques de retención	Pozos de infiltración	Zanjas vegetadas	Recolección Aguas lluvia
Control de la calidad del agua			x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Control de la cantidad de agua	x	x	x	x				x	x				x	x			x	x
Remoción de contaminantes urbanos			x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Restauración del ciclo hidrológico natural									x				x					
Reducción y atenuación de escorrentía urbana			x	x	x			x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Rápida remoción de la escorrentía	x	x				x	x											
Mejora del paisaje urbano				x					x				x	x	x		x	
Prevención de la contaminación de las cargas de contaminación											x					x		
Protección de los medios receptores						x	x					x	x					
Recarga de acuíferos					x			x		x	x		x			x	x	
Reducción de los costes energéticos			x	x					x				x	x			x	x
Reducción de la demanda de agua																		x
Reducción del riesgo de inundaciones	x	x	x	x	x				x	x				x	x		x	
Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero			x	x					x				x	x	x		x	
Reducción de sumideros													x					
Control en origen de los caudales													x					
Regulación de microclimas urbanos			x	x					x					x	x		x	
Superficies secas tras episodios de lluvia	x	x											x					
Mejora del aislamiento térmico de los edificios									x									
Mejora de la salud pública			x		x	x								x				
Aumento del valor de la propiedad			x	x					x					x	x		x	
Aumento del caudal de base			x		x				x									

Tabla 7 (continuación). Beneficios de la implementación de las distintas tipologías de Sistemas de Drenaje Sostenible.

Beneficios	Drenaje Convencional	detención	Areas de Bioretención	Humedales artificiales	Balsas de detención	Filtros drenantes	Zanjas drenantes	Sistemas Geocelulares	Cubiertas vegetadas	Balsas de infiltración	Zanjas de infiltración	sist.pretratamiento	Pavimentos Permeables	Jardines de lluvia	Estanques de retención	Pozos de infiltración	Zanjas vegetadas	Recolección Aguas lluvia
Estéticos			x	x	x				x	x			x	x	x			
Mejora de la calidad del aire									x									
Educación y participación comunitaria									x								x	
Reducción costes de gestión de aguas superficiales									x									
Construcción óptima en relación al coste-eficacia					x										x			
Reducción de cargas en la red de alcantarillado									x									
Mejora de la calidad de vida				x														
Ampliación de la vida operativa de cubiertas									x									
Provisión de habitats y biodiversidad			x						x	x	x		x	x	x	x	x	
Mejora de la cohesión de la comunidad			x						x		x			x		x		
Maximización de la longevidad de la superficie de las carreteras						x	x											
Atenuación de la contaminación acústica									x									
Provisión de oportunidades de educación ambiental									x								x	
Usos recreativos			x			x								x	x	x	x	
Reducción de la huella hídrica	x	x				x	x						x					
Aprovechamiento de agua de lluvia				x				x			x		x		x	x		x
Mejora del espacio comunitario			x	x										x	x		x	

Fuente: Adaptación de Tabla resumen de beneficios del proyecto E2Stormed.

Existen numerosos estudios internacionales que demuestran la eficiencia de los SUDS en la atenuación y reducción de los caudales punta y las cargas de contaminación asociadas. El proyecto europeo DayWater (2002-2005) concluye que hay una cantidad considerable de información que demuestra que los SUDS pueden gestionar eficazmente tanto la cantidad como la calidad de las escorrentías pluviales (Deutsch, Revitt, & Ellis, 2003). A modo de ejemplo la Tabla 8muestra la eficiencia en la eliminación de contaminantes de algunos SUDS con altos rendimientos en la reducción y retardo de los caudales pico de escorrentía en episodios de lluvia.

Tabla 8.- Rendimiento en la eliminación de contaminantes los pavimentos porosos, zanjas de infiltración y franjas de tierra filtrante.

	Pavimentos Porosos para distintas lluvias % Medio anual de eliminación					Zanjas de infiltración para distintas lluvias							Franja de tierra filtrante		
Parámetro	31.4 mm/ha imp.	62.9 mm/ha imp.	Tormenta de diseño (2 años)	Depósito de percolación (%)	Depósito de infiltración (%)	31.4 mm/ha imp.	62.9 mm/ha imp.	Tormenta de diseño (2 años)	Depósito de filtración tipo "Austin"	Filtros de arena	Filtro de arena y turba	Canales de drenaje con cubier-ta vegetada	6 m de ancho con césped	30 m de ancho arbustos y dis-tribuidor flujo	Estanque húmedo
SST	60 – 80	80 - 100	80 - 100	99	0 – 99	60-80	80-100	80-100	75 – 95	60 - 80	80 - 100	60 – 80	20 – 40	80 – 100	54
P total	40 - 60	40 - 60	60 – 80	65 – 75	0 – 75	40-60	40-60	60-80	30 – 60	20 - 40	60 - 80	20 – 40	0 - 20	40 – 60	
N total	40 - 60	40 - 60	60 – 80	60 – 70	0 – 70	40-60	40-60	60-80	30 - 50	20 - 40	40 - 60	20 – 40	0 - 20	40 – 60	
NTK									40 – 60						
COT									40 – 60						
Zn				95 – 99	0 – 99										70
Pb				-	0 – 99								0 - 20	60 – 80	70
DBO	60 – 80	60–80	80 - 100	90	0 – 90	60-80	60-80	60-80	30 – 50	60 - 80	80 - 100	20 – 40	0 - 20	80 - 100	
Bacterias	60 – 80	60–80	80 - 100	98	75 - 98	60-80	60-80	80-100	40 – 80 (según metal)	40 - 60	40 - 60				
Metales	40 - 60	60 – 80	80 - 100			60-80	60-80	80-100	40 - 70	60 - 80	80-100	60 - 80			

Fuente: Elaboración propia basada en datos del Manual CIRIA (2007).

1. Revisión de experiencias internacionales en la aplicación de SUDS.

En los Estados Unidos durante muchos años se enfocó la legislación en materia de drenaje urbano al problema de las inundaciones. Sin embargo, ya en la década de los 70 se reconoció el problema de la contaminación difusa, reflejando en 1987 esta problemática en la Clean Water Act que derivó en programas específicos de actuación para resolver este problema.

La progresiva concienciación durante las tres últimas décadas de la necesidad de mejorar la calidad de las aguas condujo a la aparición del concepto de Mejores Prácticas de gestión, conocidas como BMP por sus siglas en inglés Best Management Practices. Desde el desarrollo de las BMP, varios estados y gobiernos locales han adoptado un gran número de leyes, normativas y ordenanzas para fomentarlos u obligar a su utilización. Un proceso similar es el que se produjo en Australia a finales de la década de los 90, contando en la actualidad con normativa, legislación y manuales de diseño propios (Perales Momparler & Andrés-Domenech, 2006).

En Europa, la gestión de la escorrentía urbana se ha centrado en el control de las inundaciones, y no ha sido hasta hace aproximadamente 15 años cuando se ha empezado a tomar conciencia del problema de la contaminación difusa. A partir de entonces, comienzan a adoptarse criterios combinados de cantidad y calidad, intentando maximizar la integración paisajística y el valor social y ambiental de las actuaciones.

La aplicación de SUDS está muy extendida en países del norte y centro de Europa. En términos globales la experiencia europea en la aplicación de SUDS apunta a que los humedales artificiales, las balsas de detención y retención son las infraestructuras más utilizadas, resultando las zanjas de infiltración las que mejor comportamiento ofrecen en relación a la recarga potencial de los acuíferos y a la capacidad de remoción de contaminantes. Además, en términos globales la utilización de SUDS resulta en una reducción de los costes de tratamiento del 18% al 50% de los costes de los sistemas tradicionales. No obstante, los costes de capital inicial pueden ser elevados además de que los costes variarán considerablemente dependiendo de las condiciones locales(Deutsch et al., 2003).

En Reino Unido, los SUDS más comunes son los drenes filtrantes, las balsas de detención y los estanques de retención, cuya incorporación en los planes de drenaje se consi-

dera como una práctica habitual. Además se ha realizado un esfuerzo para hacer compatibles las directrices de Ordenación del Territorio y Urbanismo sobre la densidad de viviendas por hectárea con las necesidades para una gestión sostenible de las aguas de lluvia marcadas por los índices de permeabilidad y las necesidades de espacio para la implementación de sistemas de control de la escorrentía en origen.

Por su parte en Alemania son comunes las zanjas filtrantes y las balsas de retención. Además, en algunos estados como en el Westfalia del Norte, las nuevas edificaciones y otras áreas pavimentadas deben contar con sus propios sistemas de tratamiento de las aguas de lluvia in-situ estableciendo estándares nacionales para las medidas de control de la escorrentía dependiendo del tipo de superficie impermeabilizada (ATV2002).

En Francia, la incorporación de los SUDS está muy extendida debido a la ocurrencia de inundaciones importantes en las últimas décadas. Así medidas como las balsas de retención, el uso de pavimentos permeables y la captación y aprovechamiento de las aguas de lluvia son prácticas habituales incorporadas en muchos casos como medidas obligatorias en el marco normativo regional o local como medidas para el control de inundaciones con beneficios económicos, estéticos y paisajísticos.

En países con climas fríos como Suecia y Dinamarca, los estanques de retención son usados frecuentemente para reducir los picos de caudal y para retener las cargas de contaminación de los sistemas separativos. Además las balsas de infiltración se utilizan para controlar tanto las aguas de lluvia como las aguas de deshielo ofreciendo además ventajas como áreas de depósito potenciales de nieve.

Finalmente, una medida habitual común en todos los países europeos es el baldeo de las calles como medida preventiva para la minimización de las cargas de contaminación de la escorrentía urbana (Deutsch et al., 2003).

Los SUDS más extendidos y estudiados en España son los tanques de retención o tanques de tormenta, en combinación con las redes de alcantarillado convencionales (Puertas, Suárez, Anta, 2008). Los tanques de tormenta se basan en la utilización de volúmenes de almacenamiento no solamente para minimizar el número de alivios, sino también para mejorar la calidad del efluente bien por almacenamiento de las aguas de primer lavado más contaminadas bien proporcionando un tratamiento de decantación en aquellas redes en las que el fenómeno del primer lavado no es importante. Estos tanques

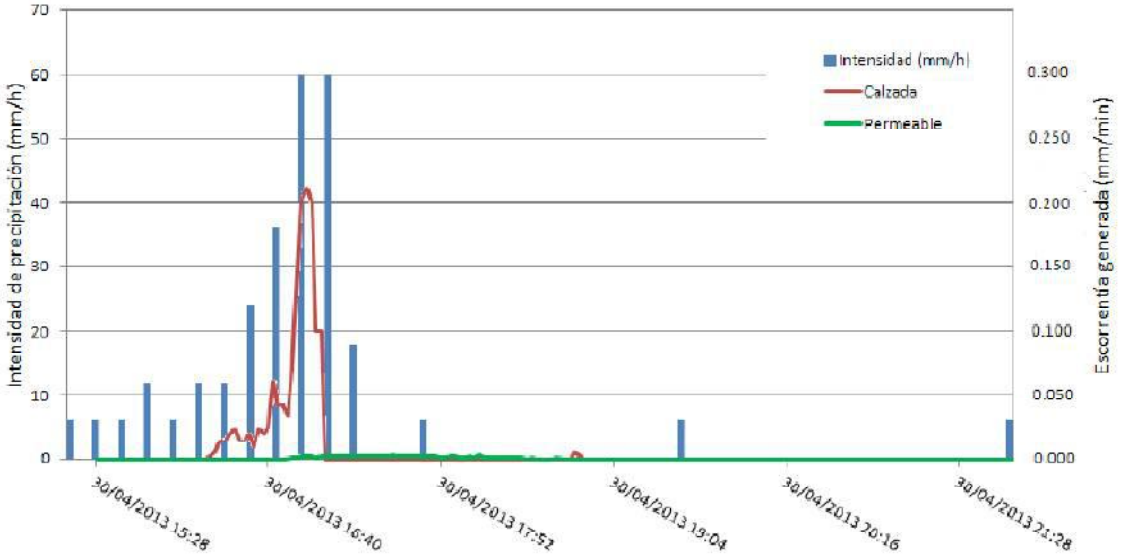
pueden situarse en los puntos de entrada al interceptor general, en la EDAR, o en algún punto intermedio. Su volumen, sus características y su ubicación dependen fundamentalmente de la capacidad de admisión del medio receptor.

La instalación de tanques de tormenta en las principales áreas metropolitanas españolas supone un importante avance en la resolución de la problemática de gestión de las aguas pluviales. Cabe destacar que el Plan Nacional de Calidad de las Aguas 2007-2015 (PNCA), incluye una inversión de 3.106 millones de euros para tanques de tormenta, que supone un 16,3% de las inversiones totales y un 27,5% del presupuesto destinado a nuevas actuaciones. Aunque en el momento de redacción del presente documento no existe un informe de seguimiento del grado de cumplimiento de los objetivos planteados en el PNCA, la previsión de inversión en tanques de tormenta muestra que las autoridades identifican la problemática de gestión de las aguas de lluvia como un problema cuya resolución es prioritaria. Además el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente ha publicado recientemente un Manual Nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta (Ramón, Estudio, De, & General, 2015).

No obstante, experiencias previas en otras ciudades del mundo muestran que los tanques de tormenta, por sí mismos, no resuelven el problema en su totalidad y son necesarias actuaciones más integrales a distintos niveles (local, regional y nacional) y en diversos ámbitos (normativo, económico, urbanístico, etc.) dirigidos a la prevención y a la mitigación de los impactos de las aguas de lluvia en las aglomeraciones urbanas.

En España existen algunas experiencias piloto puntuales de implementación de SUDS que complementan la instalación de los tanques de tormenta. El proyecto AQUAVAL (2010-2013) implementó y monitorizó algunos SUDS en Valencia (Xátiva y Benaguasil). Los resultados muestran un alto rendimiento de los SUDS tanto en la atenuación de los caudales punta en episodios de lluvia, como en la reducción de las cargas de contaminación y la mejora de la eficiencia energética. La Figura nº 7la figura muestra los resultados en relación al control de caudales punta de un pavimento permeable instalado en Benaguasil (Valencia).

Figura nº 7.- Comparación de la escorrentía generada en un pavimento permeable y en un pavimento convencional.

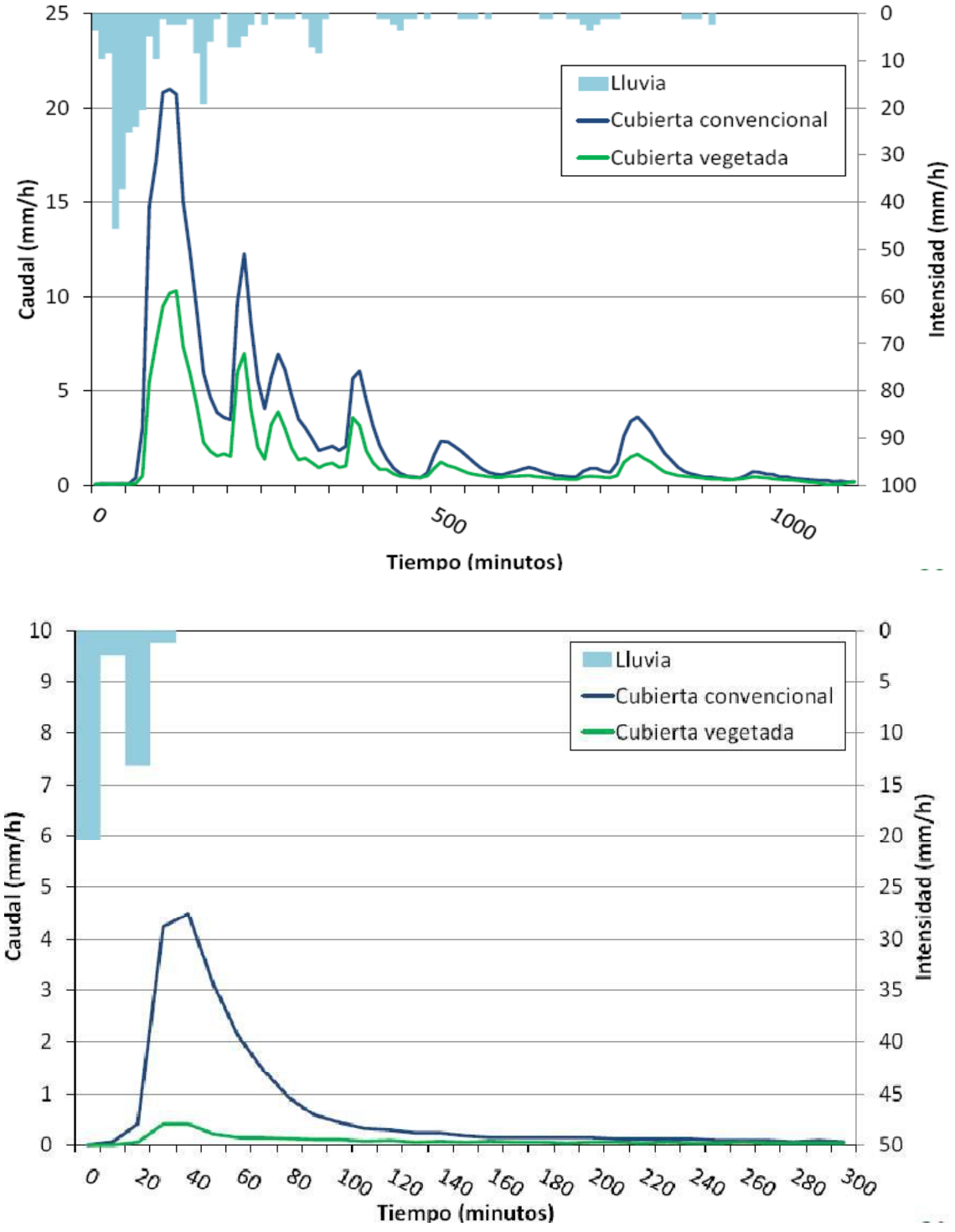


Fuente: Proyecto AQUAVAL

Como se ve en la Figura nº 7, el pavimento permeable muestra un alto rendimiento volumétrico de más del 90%, gestionando por completo la escorrentía generada y retardando el vertido. Además la monitorización dio unos resultados muy positivos en términos de reducción de la contaminación, concluyendo que los pavimentos permeables son un importante filtro de contaminantes, evitando el vertido de materia orgánica y nutrientes tanto disueltos como particulados (*Demostración de Benaguasil del proyecto AQUAVAL*, 2013).

Por su parte, la Figura nº 8 muestra los resultados de la monitorización de una cubierta vegetada en Benaguasil, con unos rendimientos volumétricos superiores al 50%. Además, en todos los casos se observa un desfase temporal entre el momento en que drenan las infraestructuras convencionales, y el momento en que empiezan a drenar los pilotos, constatándose el efecto laminador de los mismos.

Figura nº 8.- Comparación de la evolución de la escorrentía en cubierta convencional y cubierta vegetada en dos episodios de lluvia.



Fuente: Proyecto AQUAVAL

En relación al consumo energético, la conclusión que se extrae de la monitorización de la cubierta vegetada instalada en Benaguasil es que el principal consumo energético del edificio se produce en verano (mayor consumo por día y mayor número de días con necesidades de aire acondicionado). En la parte del edificio con cubierta convencional, la capa externa de grava provoca un efecto de almacenamiento térmico de la radiación solar, efecto ligeramente beneficioso en invierno pero muy negativo en verano. Sin embargo, con la cubierta vegetada no ocurre este efecto, reduciéndose la absorción de la radiación solar, lo que se traduce en una reducción del consumo para climatización en verano del 25-30%, y un ahorro en el ciclo anual del 15%. En caso de edificios con peor aislamiento y horarios de mañana y tarde los ahorros en verano podrían superar el 50%.

No obstante es España queda un largo camino por recorrer para incorporar los SUDS como técnicas habituales en el planeamiento urbano.

2. Principales líneas estratégicas de actuación para la incorporación de SUDS en el desarrollo urbano

Existen numerosos manuales para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS).

Un manual de referencia es el publicado por la asociación CIRIA (por sus siglas en inglés, Construction Industry Research and Information Association). Este manual se aplica en el Reino Unido y cuenta con un reconocido prestigio internacional.

En España el primer manual de referencia en la implementación de SUDS es la publicación del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Hidráulicas (CEDEX). Esta monografía, publicada en 2008, recoge la experiencia en la caracterización de la problemática y la implementación de SUDS, principalmente en dos países: Reino Unido a través del citado manual CIRIA y Estados Unidos, a través de los distintos informes publicados por su Agencia de Medioambiente (Environmental Protection Agency, EPA).Además se cuenta con el recientemente publicado Manual Nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta (Ramón, Estudio, De, & General, 2015).

En Europa existe mucha información y experiencia de aplicación de SUDS en regiones en las que los eventos de lluvia son de larga duración y baja intensidad. Sin embargo la falta de datos disponibles en relación al rendimiento de los SUDS en climas mediterráneos, que se caracterizan por lluvias de corta duración y alta intensidad, genera dudas

sobre su rendimiento en los países del Sur de Europa (Grecia, Italia, Portugal y España), lo que se traduce en que su aplicación es muy limitada (Deutsch et al., 2003). Así, en 2003 el proyecto europeo de investigación aplicada DayWater concluye dos líneas estratégicas para avanzar en la gestión sostenible de las aguas de lluvia en Europa.

La primera línea estratégica es la implementación de proyectos piloto en climas mediterráneos para obtener datos reales de rendimiento de distintos SUDS, que desvíen las dudas sobre la idoneidad de su implementación. Bajo este objetivo se ha implementó el proyecto europeo de investigación aplicada AQUAVAL.

La segunda línea estratégica es el desarrollo y aplicación de metodologías que apoyen al proceso de toma de decisión basadas en indicadores cuantificables de sostenibilidad. Persiguiendo este objetivo el proyecto europeo E2STORMED (Junio 2013 -Junio 2015)ha desarrollado un software de apoyo a la toma de decisiones para la gestión de las aguas de lluvia y lo aplicó a 5 estudios de caso de la cuenca mediterránea (España, Croacia, Italia, Grecia, Malta y Montenegro). Basándose en una matriz multicriterio el software compara las ventajas e inconvenientes de distintos escenarios de drenaje, incorporando en la toma de decisiones no sólo los criterios económicos sino también los energéticos, medioambientales y sociales. La Tabla 9resume los principales criterios incluidos en el software.

No obstante, se detecta un vacío de conocimiento para la elaboración de un diagnóstico integral de la gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos. Dicho diagnóstico es la fase previa a la selección de SUDS, y permite analizar la situación actual de las ciudades en relación a la gestión de las aguas de lluvia y detectar la necesidad de aplicar nuevas técnicas de gestión. El desarrollo de una metodología unificada para el diagnóstico de la situación, basada en indicadores cuantificables y comparables, permitiría establecer objetivos de sostenibilidad a nivel nacional o europeo que unificaran la definición de políticas de actuación para la consecución de la gestión integral y sostenible de las aguas de lluvia en las ciudades europeas.

Tabla 9.- Criterios para la comparación de escenarios de drenaje

Criterios	Indicadores
Financieros	Coste de la gestión de las aguas de lluvia
	Coste neto de la gestión de las aguas de lluvia (coste de gestión menos beneficios)
	Coste de construcción y de terreno
	Coste de mantenimiento
	Beneficios de la reutilización del agua
	Coste del tratamiento de las aguas de lluvia
	Beneficios del aislamiento térmico
	Beneficios de la protección frente a inundaciones
Energéticos	Energía consumida en la gestión de las aguas de lluvia
	Energía neta (energía consumida menos energía ahorrada)
	Energía consumida durante la construcción
	Energía consumida en el mantenimiento
	Energía ahorrada por la reutilización del agua
	Energía consumida por el tratamiento del agua de lluvia
	Energía ahorrada por el aislamiento térmico
Emisiones	Emisiones por la gestión del agua de lluvia
	Emisiones netas (emisiones menos emisiones evitadas)
	Emisiones por la construcción
	Emisiones por el mantenimiento
	Emisiones evitadas por la reutilización del agua
	Emisiones evitadas en el tratamiento de aguas de lluvia
	Emisiones evitadas por el aislamiento térmico
	Dióxido de carbono reducido por la vegetación
Otros criterios cuantitativos	
	Volumen de agua reutilizada
	Volumen de escorrentía producido
	Volumen de descargas de sistemas unitarios (DSU)
	Número de DSUs al año
	Caudal pico
	Recarga del acuífero y evapotranspiración
	Pérdidas de agua en la red
Medioambientales y calidad del agua	
	Calidad global del agua
	Eficiencia en la remoción de sólidos en suspensión
	Eficiencia en la remoción de nutrientes
	Eficiencia en la remoción de metales pesados
	Evaluación de los servicios ecosistémicos

Fuente: Elaboración propia basada en datos del proyecto E2Stormed.

Así, en coherencia con las líneas estratégicas establecidas por los proyectos de investigación europeos desarrollados hasta el momento y cubriendo un vacío de conocimiento, la presente tesis doctoral define unos indicadores de sostenibilidad cuantificables y comparables sobre los que realizar un diagnóstico integral de las aguas de lluvia bajo una metodología unificada que permita la definición y seguimiento de unas líneas de

actuación así como el establecimiento de unos valores umbral de sostenibilidad en la gestión de las aguas de lluvia.

Para la incorporación en el sistema de indicadores de una visión integral de los retos en la gestión de las aguas de lluvia se revisan a continuación las experiencias internacionales en la definición de un marco normativo, la aplicación de instrumentos económicos y la participación ciudadana, tres elementos clave para una efectiva promoción de la implementación de SUDS en los entornos urbanos.

3. Experiencias internacionales en la definición de un marco normativo para la gestión integral de las aguas de lluvia en entornos urbanos.

1. Introducción

La consecución de una gestión integral del las aguas de lluvia en los entornos urbanos requiere de la definición de un marco normativo que respalde la incorporación de los Sistemas de Drenaje Sostenible como sistemas habituales en el desarrollo de las ciudades.

Para ello, en coherencia con el cuarto objetivo específico de la presente tesis doctoral de definir las líneas de actuación prioritarias para avanzar hacia la gestión integral de las aguas de lluvia en España, se analizan a continuación las principales directivas relacionadas con la gestión de las aguas de lluvia acotando el análisis al marco normativo europeo.

2. Análisis del marco normativo europeo.

La Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (DMA) establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas para la consecución del buen estado de las masas de agua superficiales y subterráneas de los Estados Miembro. Para ello se establece la necesidad de desarrollar un Programa de medidas que formará parte del Plan Hidrológico de la demarcación hidrográfica. En estos Programas habrá que tratar aspectos específicos de los sistemas de drenaje urbano, tales como medidas para controlar la presencia de sustancias prioritarias o para reducir las descargas de los sistemas unitarios, aspectos que pueden resultar críticos para conseguir el buen estado ecológico de las masas de aguas receptoras de drenajes de aguas pluviales (Puertas Agudo, Suárez

López, & Anta Álvarez, 2008). Además, también se indica que es necesario establecer una nueva política de precios que incentive el uso eficiente de los recursos hídricos.

Estrechamente relacionada con la anterior, la Directiva 2007/60/CEE relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación promueve la redacción de planes de gestión de inundación en coordinación con los Planes Hidrológicos.

Finalmente, la Directiva 91/271/CEE, relativa a la recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas y de algunos sectores industriales. La finalidad de esta Directiva es proteger el medio ambiente contra todo deterioro debido al vertido de esas aguas. Así, las aguas residuales industriales que se vierten a los sistemas colectores y de evacuación de aguas residuales y los lodos procedentes de las depuradoras de aguas residuales urbanas están sujetas a normativas y autorizaciones específicas por parte de las autoridades competentes. La Directiva establece un calendario que los Estados miembros deben respetar para equipar las aglomeraciones urbanas de sistemas de colectores y de tratamiento de las aguas residuales. En relación con las aguas pluviales, la directiva es poco explícita.

En ninguna de las directivas nombradas, ni en otras directivas europeas de los años ochenta y noventa orientadas a regular los vertidos o los distintos usos del agua, la cuestión principal es la gestión de las aguas de lluvia aunque los preceptos recogidos en ellas conlleven importantes restricciones en la gestión de las mismas.

Se analizan a continuación algunas singularidades en la trasposición de las directivas europeas a los reglamentos y normativas de algunos Estados Miembro de la Unión Europea para contemplar la gestión de las aguas pluviales.

3. Marco normativo legislativo de las aguas pluviales en Holanda.

La política en gestión de aguas pluviales holandesa tiene cuatro pilares fundamentales; la prevención de la contaminación del agua de lluvia mediante medidas de control en origen; la recogida y el almacenamiento del agua de lluvia; la implantación de redes separativas; el equilibrio de todas estas consideraciones a nivel local (Jong & Hobma, 2011).

En este sentido, la Ley de aguas holandesa establece la obligación de que, a nivel local, se vele por una recogida eficiente de la escorrentía siempre que no sea razonable que

quien disponga de esa agua, quiera disponer de ella o tenga que disponer de ella, la deje fluir por el terreno o por las aguas superficiales. Además, los municipios velarán por el tratamiento eficaz del agua de lluvia recogida. Este tratamiento incluirá al menos las siguientes medidas: almacenamiento, transporte, uso efectivo o descarga, antes o después del tratamiento, en el terreno o en las aguas superficiales, así como su transporte a una planta de tratamiento.

Por otra parte, de conformidad con la Ley de Gestión Ambiental, a través de una ordenanza municipal se pueden imponer reglas específicas sobre la descarga del agua de lluvia. Además, cuando sea razonable que el dueño de una parcela gestione las aguas que emergen o caen sobre su propio terreno, el Ayuntamiento puede dar un plazo para que estas aguas se desconecten de la red de saneamiento. En esta misma ley, en su sección 4.22 se establece que periódicamente los ayuntamientos tienen que elaborar un plan de saneamiento municipal en donde, entre otros asuntos, se debe indicar cómo se va a recoger y procesar la escorrentía de las aguas de lluvia. En este sentido, es importante señalar que la legislación no requiere para estas aguas la existencia de un sistema de alcantarillado, sino que se permiten soluciones alternativas que consigan el mismo resultado (Mosqueira, 2012).

Por otro lado, la legislación en materia de ordenación del territorio permite que se establezcan, a través de los planes de ordenación urbana, requisitos para la gestión de las aguas pluviales con efectos vinculantes para los propietarios, pero sólo si los requisitos se consideran “especialmente relevantes”. En este sentido, en este tipo de legislación, en Holanda no se incluyen prescripciones relativas a la obligatoriedad de que un determinado edificio gestione sus propias aguas pluviales. En todo caso, estas especificaciones se incluirían en los códigos de construcción holandeses, pero nunca imponiendo una determinada solución constructiva (tipo cubiertas vegetales), sino incluyendo un determinado rendimiento de autogestión de las aguas pluviales (Jong & Hobma, 2011).

4. Marco normativo legislativo de las aguas pluviales en Alemania

Los planes de ordenación del territorio alemanes establecen medidas para evitar los efectos negativos de la impermeabilización del suelo sobre el ciclo hidrológico. Así, en el planeamiento urbano se incluyen límites a la impermeabilización de superficies. Para ello, se establece un límite superior de m^2 construido / m^2 de parcela. La adopción de uno u otro valor para esta relación tiene que estar justificada en el planeamiento urbano.

Por otra parte, establece con carácter obligatorio una proporción de superficie que debe estar destinada a la infiltración compatible con los usos y la impermeabilización del terreno. Así, en base al artículo 9 del Código Alemán de Edificación, de carácter federal, se puede estipular como tiene que ser la estructura de las zonas de tráfico, la vegetación de las márgenes de las carreteras, o las zonas verdes en general. Además, los nuevos desarrollos urbanísticos tienen que incorporar elementos ecológicos en su diseño.

Finalmente, a través del planeamiento urbano se establecen medidas para retener e infiltrar aguas pluviales, delimitando las áreas para la construcción de instalaciones de gestión del agua de lluvia (tanques de retención). De igual manera se adoptan medidas relacionadas con el empleo de cubiertas vegetadas o tejados verdes.

5. Marco normativo legislativo de las aguas pluviales en Francia.

Desde la perspectiva de ordenación del territorio, se puede citar legislación recientemente aprobada en Francia: la denominada Ley Grenelle I y Ley Grenelle II. Con estas dos leyes se busca la creación de un patrón de crecimiento diferente (Benoit, 2012). Así, junto a disposiciones de planificación territorial y desarrollo sostenible, que intentan garantizar la coherencia de la sostenibilidad ecológica, mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, también se plantean nuevos planes de prevención de riesgos naturales o planes de energía y cambio climático.

Pero, además, la parte operativa de la ley también prevé una amplia gama de instrumentos financieros y fiscales, entre los que se puede citar un impuesto anual para la gestión de las aguas pluviales.

Por otro lado, la Ley de Aguas y Medio Acuáticos, de 30 de diciembre de 2006, permite a los ayuntamientos instaurar un impuesto local específico para gestionar las aguas pluviales (0,20 euros/m^2 como máximo). En paralelo, esta ley instauró una línea de créditos para financiar trabajos de recuperación de aguas pluviales y permitió su utilización para usos exteriores a las viviendas (riego, lavado de coches, etc.).

6. Marco normativo legislativo de las aguas pluviales en España.

En la actualidad en España se están dando pasos importantes para mejorar la gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos. La incorporación en nuestra legislación del Real Decreto 1290/2012 publicado el 20 de Septiembre de 2012para conseguir un buen

estado ecológico de las masas de agua, ha establecido la obligatoriedad de obtener una Autorización de vertido para los desbordamientos de los sistemas de saneamiento de ciudades con más de 50.000 habitantes equivalentes. El RD 1290/2012 establece que las Confederaciones Hidrográficas de la demarcación a la que pertenezca cada población otorgarán la Autorización de vertido tras la remisión de la solicitud cursada por los titulares de los sistemas de saneamiento de las poblaciones correspondientes. Junto a la solicitud de vertido se debe entregar el Formulario 5' cuyo objetivo es realizar una caracterización básica de la problemática de gestión de las aguas de lluvia en dichas poblaciones.

Así el Formulario 5' se focaliza en recopilar información sobre las cuencas vertientes, la red de alcantarillado, los puntos de desbordamiento y las infraestructuras de regulación (Formulario 5'1 de acuerdo con el Artículo 246.2.e', 246.3.c y Disposición adicional segunda 1. RDPH), información sobre la que solicita se realice un plan de medidas, actuaciones e instalaciones para limitar la contaminación por desbordamientos de sistemas de saneamiento en episodios de lluvia (Formulario 5'.2, Artículo 259.ter.3 del RDPH). Dichas medidas deben ir encaminadas a la reducción de los impactos en los medios receptores para lo que se propone profundizar en el conocimiento de las infraestructuras del sistema de saneamiento, su estado y su funcionamiento en tiempo de lluvia, detectando y caracterizando los desbordamientos de los sistemas de saneamiento (en tiempo de lluvia y en tiempo seco) y su impacto en el medio receptor.

LaTabla 10 resume las medidas planteadas en el Formulario 5'.2.

Tabla 10.- Medidas, actuaciones e instalaciones recogidas en el Formulario 5'.2 para limitar la contaminación por desbordamientos de sistemas de saneamiento en episodios de lluvia.

1. Descripción y caracterización detallada del sistema de saneamiento	
Recopilación y análisis información existente	Cartografía de la cuenca
	Conocimiento sistema de saneamiento
	Identificación de las fuentes de contaminación
Control del sistema de saneamiento	Estaciones de control
	Frecuencia de control
	Muestreo y análisis de la calidad de los Desbordamientos del Sistema de Saneamiento (DSS)
	Análisis y control de episodios de lluvia
	Análisis y control de flujo de DSS
Modelización del sistema de saneamiento	
2. Actuaciones para controlar la contaminación	
Programa de operación y mantenimiento del sistema de saneamiento	Identificación de elementos críticos del sistema
	Procedimientos de mantenimiento periódico preventivo rutinario
	Procedimientos de mantenimiento no rutinario y situaciones de emergencia
	Programa de inspecciones de la red
	Programa de limpiezas de la red
Medidas para la eliminación de desbordamientos de sistemas de saneamiento en tiempo seco	Identificación de desbordamientos
	Corrección de desbordamientos
	Notificación de sucesos a la autoridad competente
Medidas para la maximización de la capacidad de almacenamiento en la red de saneamiento	Inspección del sistema colector
	Mantenimiento y reparación de compuertas de retención
	Ajustes de los sistemas de regulación
	Retardo de flujos de entrada
	Sistemas de retención aguas arriba
	Modernización de las operaciones de bombeo en estaciones elevadoras
	Eliminación de elementos que obstruyan el flujo

Tabla 10 (continuación).- Medidas, actuaciones e instalaciones recogidas en el Formulario 5'.2 para limitar la contaminación por desbordamientos de sistemas de saneamiento en episodios de lluvia.

2. Actuaciones para controlar la contaminación (continuación)	
Medidas para la maximización de caudales transportados a EDAR para tratamiento	Depósitos de retención en momentos de fuertes lluvias
Programa de vigilancia de los desbordamientos	Sistema de cuantificación de alivios Sistema para la determinación del caudal Control de contaminantes
Medidas para la reducción de la contaminación en desbordamientos de sistemas de saneamiento	Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible
Medidas para limitar la presencia de sólidos y flotantes en desbordamientos de sistemas de saneamiento	Rejas, pantallas deflectoras o estáticas, camara de retención (decantación) y limipiezas de fangos en el colector
Otras actuaciones	
3. Cronograma de ejecución de las actuaciones	

Fuente: Elaboración propia basada en datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

En relación al programa de vigilancia de los desbordamientos, cabe destacar que, de manera obligatoria, el sistema de cuantificación, que permitirá conocer el número de alivios que se producen en un año, debe estar instalado antes del 21 de Septiembre de 2016 para vertidos procedentes de aglomeraciones urbanas de más de 50.000 h.e.

Por otra parte, los programas de medidas deberán ir acompañados de un cronograma de ejecución de las actuaciones así como un documento que describa los elementos de control de las medidas, obras e instalaciones planteadas, concretando su ubicación, los puntos de vertido asociados a cada elemento de control, el objetivo que persigue y el tipo de elemento de control (caudalímetro, limnímetro, medidor en continuo de parámetros de contaminación, etc).

Destaca, por otra parte, que la aplicación de sistemas urbanos de drenaje urbano sostenible (SUDS) se incluye, en el Formulario 5' (MAGRAMA, 2014), en las medidas para la reducción de la contaminación en desbordamientos de sistemas de saneamiento. En dicho documento los SUDS se describen como un conjunto de técnicas para reproducir, de la manera más fiel posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización, con el objetivo de minimizar los impactos del desarrollo urbanístico en cuanto a la calidad y cantidad de escorrentía. Por otra parte, en el Formulario 5' se indica que los SUDS incluyen programas de educación y sensibilización ciudadana para reducir la contaminación que llega a las redes de saneamiento. Cabría por tanto esperar la aplicación de SUDS en todos los elementos del programa de medidas y, de manera específica, entre las medidas a implementar para la maximización de la capacidad de almacenamiento en la red de saneamiento. Por otra parte habría que completar los aspectos sociales recogidos en el documento, ampliando los objetivos de los programas de educación y sensibilización (por ejemplo con programas de promoción de la reutilización del agua de lluvia) así como promoviendo una participación ciudadana real en la definición de los principios básicos necesarios para una gestión integral de las aguas de lluvia en las ciudades.

La aprobación del Real Decreto 1290/2012 y su concreción en el procedimiento recogido en el Formulario 5', supone un avance significativo para la mejora del estado de las masas de agua. Con ese objetivo se promueven medidas centradas en profundizar el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema de saneamiento, limitando y controlando los desbordamientos en episodios de lluvia y reduciendo de esta manera los im-

pactos en los medios receptores. Así, el planteamiento sobre el que se basa esta iniciativa promueve una mejora en la gestión de las aguas de lluvia en el marco de la gestión hidráulica del sistema de saneamiento, dejando fuera otros aspectos transversales de igual importancia para conseguir una solución efectiva a la problemática.

Debido a la complejidad de la distribución competencial existente en España, en la actualidad hay diecisiete legislaciones autonómicas en materia de urbanismo y ordenación del territorio, a las que se suman las distintas ordenanzas municipales para la gestión del sistema de saneamiento, del drenaje urbano y del desarrollo urbanístico. La gestión integral de las aguas de lluvia debe estar respaldada por un planeamiento regional o a nivel de cuenca hidrográfica, mezclando controles en origen y controles aguas abajo (Beneyto González-Baylín, 2004).

Se deben por tanto seguir dando pasos para que, por una parte, los entes municipales definan ordenanzas que avancen en la gestión integral de las aguas de lluvia en el ámbito de sus competencias y que dichas ordenanzas sean respaldadas por un marco normativo a nivel de cuenca hidrográfica, con competencias a nivel estatal (Confederaciones Hidrográficas) y autonómico (Gobiernos autónomos).

4. Aplicación de Instrumentos económicos para la gestión integral de las aguas de lluvia.

1. Introducción

Otro de los pilares sobre los que se basa la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos es la aplicación de instrumentos económicos para conseguir una racionalidad económica en la gestión de las aguas de lluvia.Se realiza a continuación una revisión de las experiencias internacionales en la materia.

Se definen los instrumentos económicos en la gestión del agua como el sistema de incentivos económicos (positivos o negativos) que se aplican para aumentar la eficiencia en el uso de los recursos naturales y para recaudar recursos financieros adicionales. La aplicación de instrumentos económicos empieza a ser una medida habitual para la consecución de una gestión sostenible del agua, siendo las más comunes las tarifas autonómicas y locales por el servicio de abastecimiento y saneamiento, o los cánones medioambientales por extracción o vertido (Mattheiß, Le Mat,Strosser. 2009).

En la Unión Europea, una de las innovaciones más relevantes de la nueva política del agua establecida por la Directiva Marco del Agua (DMA 2000/60/EC) es el lugar central que se le otorga a los instrumentos de carácter económico. Así, desde el análisis de los usos económicos del agua como elemento integrante de la planificación, al análisis coste-eficacia de las medidas, pasando por la política de precios, la economía está presente a lo largo de todo el proceso de decisión en la política hídrica (La Roca, F. 2013).

Así, el Artículo 5 marca la obligatoriedad de realizar en cada demarcación hidrográfica un análisis económico del uso del agua lo suficientemente detallado para, por una parte, aplicar el principio de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua (según el Artículo 9) y, por otra, encontrar la combinación más rentable de medidas que, sobre el uso del agua, deben incluirse en el programa de medidas (de conformidad con el Artículo 11).

En cuanto a la recuperación de costes de los servicios relacionados con el agua de conformidad con el principio de quien contamina paga, el Artículo 9 obliga a los estados miembro a garantizar, antes de 2010, que la política de precios del agua proporciona los incentivos adecuados para que los usuarios utilicen de forma eficiente los recursos hídricos, y que la contribución de los diversos usos del agua es adecuada a la recuperación de costes basada en el análisis económico efectuado.

2. **Revisión de experiencias internacionales.**

Existen experiencias exitosas de aplicación de una variedad de instrumentos económicos para la promoción de medidas de control en origen para la gestión de las aguas pluviales que pueden servir de referencia para la definición de una necesaria estrategia que complemente las medidas estructurales y normativas ya adoptadas, en aras a una gestión más sostenible de las aguas de lluvia. La Tabla 11resume las experiencias más relevantes.

Tabla 11.- Instrumentos económicos aplicados a nivel internacional para la gestión integral de las aguas de lluvia.

Medida	Objetivo	País	Instrumento económico
Desconexión de desagües de aguas de lluvia	Reducción de contaminación	Países Bajos	Subvención de la inversión
	Reducción escorrentía y reutilización	Francia	Reducción IRPF derivada de inversiones
Instalación de tejados verdes	Reducción escorrentía	EEUU y Australia	Subvención de la inversión
		Alemania, Suiza, Reino Unido	Subvención de la inversión y Reducción de tasas de alcantarillado y *Rain Tax*
Gestión aguas pluviales in situ	Reducción escorrentía	EEUU y Australia	Subvención de la inversión
		Alemania. Suecia y Dinamarca	Reducción Canon de gestión de escorrentía pluvial
	Reducción escorrentía y contaminación in situ	EEUU y Australia	Descuentos tarifas e impuestos residenciales y comerciales
Medidas para aumento de la infiltración	Reducción impermeabilización	Alemania, Suecia, Dinamarca	Tasas por impermeabilización del terreno
Creación de humedales multifuncionales	Prevención inundaciones ámbitos urbanos	Finlandia	Subvención de la inversión
Ordenanzas de descargas de efecto cero	Reducción impermeabilidad terreno	Estados Unidos	Flexibilización de la normativa de construcción
Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible			Créditos modelización de las aguas pluviales
			Bonos de densidad edificativa
		Estados Unidos	Agilización de permisos y reducción de tasas
	Reducción escorrentía y contaminación	Estados Unidos y Australia	Cumplimiento alternativo: comercio de compensación y comercio basado en cuotas

Fuente: Elaboración propia

Una medida de control en origen efectiva es la desconexión de desagües de las aguas de lluvia de la red de saneamiento. Para promover su implantación, en los Países Bajos, en el marco de las políticas nacionales encaminadas a reducir los desbordamientos en las redes unitarias en un 50% en términos de fósforo y Nitratos, proporcionaron de 1995 a 2005 ayuda financiera a los propietarios de viviendas que quisieran desconectar (p. ej. 5 € /m² de superficie desconectada del municipio de Nÿmegen) (Chouli, 2007).

En este mismo sentido, en Francia, se ha aplicado una política de incentivos a través de la reducción del impuesto sobre la renta derivada de inversiones en la recogida de agua de lluvia y en su reutilización (Ministère de l'ecologie, du développement durable et de l'energie. 2013). Esta medida tiene por objeto reducir las aguas pluviales que fluyen por los sistemas de saneamiento, pero también alentar la reutilización del agua de lluvia y, por lo tanto, la reducción del consumo de agua potable. Así, los ciudadanos que invierten en la recogida de agua de lluvia y en sistemas de reutilización pueden beneficiarse de una reducción de impuestos equivalentes al 25% del total de los gastos asociados a la instalación de estos dispositivos. El decreto del gobierno que introduce el sistema indica las especificaciones técnicas que tienen que tener los equipos que pueden ser instalados. Además, se hace hincapié en que la reducción fiscal sólo se aplica a la reutilización del agua de lluvia para (1) usos al aire libre (jardinería, riego de espacios públicos verdes, lavado de coches…) y (2) para determinados usos interiores (inodoros, limpieza de pisos, etc.). Debido a que esta medida es de reciente implantación no existen todavía datos sobre la efectividad de su aplicación.

Por su parte, los tejados verdes pueden reducir hasta un 75% la escorrentía de las aguas de lluvia (English Nature, 2003). En relación a la promoción de la instalación de tejados verdes Alemania muestra una interesante experiencia en la utilización de instrumentos económicos. Como resultado, en Alemania en 2002 el 15% de todos los tejados planos eran tejados verdes (Mattheiß, Le Mat, Strosser, 2009). Por una parte, el 43% de las ciudades alemanas ofrecen subvenciones para las inversiones en instalación de techos verdes Así, 29 grandes ciudades, entre ellas Berlín, dan apoyo financiero directo para este tipo de tecnologías que van desde 5 €/m^2 de cubierta a 50 €/m^2, o entre el 25 y el 100% de la instalación. Las subvenciones se basan en estimaciones de costes evitados, asociados con el mantenimiento de la infraestructura y su reposición. Por otra parte, el 17 % de las ciudades alemanas ofrecen ayudas indirectas para la construcción de tejados verdes consistentes en una reducción en las tasas de alcantarillado. Finalmente, 13 ciu-

dades alemanas permiten una reducción de entre el 50% y el 80% en el impuesto denominado "rain tax" para la instalación de techos verdes. Considerando una vida útil de 36 años para este tipo de cubiertas, la reducción fiscal puede compensar al propietario del edificio hasta un 50% de los costes adicionales asociados a este tipo de instalaciones frente a otras convencionales. Además con el objetivo de reducir la impermeabilización del terreno permitiendo así la reducción de la escorrentía por infiltración, países como Suecia, Dinamarca y Alemania aplican una tasa por m^2 de superficie impermeabilizada de terreno a los propietarios. Mientras que en Suecia y en Alemania la tasa es exclusiva para las aguas de lluvia, en Dinamarca la tasa es parte de las tasas por drenaje que se imponen según el consumo de agua (Chouli, 2007).

En relación con la promoción de las medidas de gestión de las aguas pluviales in situ (pavimentos permeables, desconexión de bajantes, técnicas de infiltración, etc.), en Berlín se aplica un descuento en el canon por escorrentías pluviales a los propietarios que instalen dichas medidas en sus hogares. En Suecia, los propietarios que apliquen estas medidas obtienen descuentos en la tasa de aguas de lluvia, mientras que en Dinamarca obtienen un reembolso de hasta el 40% de las tasas de drenaje (Chouli, 2007).

Esta misma experiencia se ha aplicado en distintos Estados de Estados Unidos y de Australia a través de implementación de programas que, además de ofrecer descuentos en la factura del agua y ayudas financieras para la inversión en medidas de drenaje urbano sostenible, incluyen actividades divulgativas y formativas. Así, en algunos casos se ofrece asistencia técnica y subvenciones para desconectar las bajantes de la red de pluviales o para implementar cubiertas verdes. En otros se proporcionan fondos para fomentar actividades que mejoran la comprensión del desarrollo urbano y los impactos de las aguas pluviales en el medio ambiente. También hay programas enfocados a la reconstrucción de carreteras o a la gestión de las aguas pluviales recogidas en las calles (Puddephatt, y otros, 2007).

Otra interesante experiencia se da en Finlandia, donde se promueve la creación de humedales multifuncionales. Este es un ejemplo de aplicación de subvenciones en el desarrollo rural que ayudan en la prevención de inundaciones en ámbitos urbanos. El objetivo es conceder subvenciones a los propietarios de tierras para la construcción de humedales multifuncionales que, entre otras cosas, retengan un importante volumen de

agua en la zona de aguas arriba de las cuencas durante episodios de fuertes escorrentías (MMM 2007).

En relación a las medidas de gestión sostenible de las aguas pluviales en el campo del urbanismo y de la ordenación del territorio, es en Estados Unidos y en Australia donde se encuentran las experiencias más interesantes. En todos los casos, la situación de partida es que el promotor que desarrolla nuevas urbanizaciones tiene que incluir en su proyecto los mecanismos necesarios para gestionar las aguas pluviales que recoja. Así, con el fin de reducir la impermeabilidad del terreno en nuevas urbanizaciones, en algunas ciudades del Estado de Washington (Estados Unidos), se han creado las ordenanzas de descargas de efecto cero, basadas en el concepto del diseño flexible. A través de estas ordenanzas se permite que los promotores de nuevas urbanizaciones se aparten de diseños tradicionales y de las normas de construcción, empleando técnicas de gestión sostenible de aguas pluviales. Las ordenanzas exigen demostrar que la impermeabilidad efectiva conseguida con estas técnicas es cero (Puddephatt, y otros, 2007).

De igual manera se fomenta el empleo de técnicas de drenaje urbano sostenible a través de créditos en la modelización de las aguas pluviales (Departamento de Ecología del Estado de Washington, Departamento de Conservación y Recreación del Estado de Virginia y Condado de Sacramento, USA), permitiendo que las hipótesis de cálculo de los modelos hidrológicos sean menos restrictivas, de tal modo que el volumen de la escorrentía que se tiene que gestionar a través de autorización es menor. En otras ciudades, el incentivo en el empleo de dichas técnicas se ofrece a través de los bonos de densidad edificativa, que permiten aumentar la edificabilidad o la altura de las viviendas y, en algunos casos, reducir aparcamientos o zonas de juegos. En algunas ciudades, estos bonos están ligados al empleo de cubiertas verdes. En este mismo sentido, algunos condados de los Estados de Florida y Washington reducen las tasas y la tramitación de aquellos proyectos de planeamiento urbanístico que incorporen técnicas de drenaje urbano sostenible (Puddephatt, y otros, 2007).

Finalmente, una interesante iniciativa para promover la implantación de técnicas de gestión sostenible de las aguas pluviales en el campo de la ordenación del territorio, es el denominado Cumplimiento alternativo. En este contexto, el Cumplimiento Alternativo es un término utilizado para describir la posibilidad que ofrecen algunas administraciones de países como USA o Australia a los promotores de nuevas urbanizaciones para

cumplir con los objetivos de gestión de las aguas pluviales del municipio fuera del emplazamiento del proyecto (Puddephatt, y otros, 2007). Esta flexibilidad en el cumplimiento de los objetivos permite a los promotores de un desarrollo urbanístico pagar al ayuntamiento para que se implementen las medidas de gestión de las aguas pluviales en un lugar diferente, dentro de la cuenca hidrográfica. Esto es aplicable cuando la implementación de las medidas estipuladas para gestionar el drenaje urbano no es factible en el lugar que se está urbanizando, por limitaciones del espacio, por el tipo de suelo, por la profundidad a la que se encuentran las aguas subterráneas, por los costes de construcción, etc. (Pristel, 2011). Este tipo de instrumentos permite que, sean cuales sean las circunstancias del proyecto, nunca haya exenciones a la implantación de medidas de gestión de aguas pluviales. Además, esto posibilita que estas medidas se puedan llevar a cabo en un contexto general de gestión en toda la cuenca, pudiendo dirigir la protección de los recursos naturales en general, y de los hídricos en particular, hacia aquellas zonas de las cuencas hidrográficas de mayor valor ecológico. En general, este tipo de políticas en EEUU ofrecen dos opciones: el mercado de compensación y el mercado basado en cuotas.

El mercado de compensación tiene por objetivo gestionar, en un lugar distinto a donde se está desarrollando un proyecto, un volumen de aguas pluviales y una carga contaminante equivalente a la que movilizaría ese proyecto, de tal modo que, tomando como ámbito territorial toda la cuenca hidrográfica, se logre un beneficio medioambiental neto. Para poder desarrollar adecuadamente esta opción, hay que definir claramente las unidades en las que se comercia. A modo de ejemplo, la United States Envioronmental Protection Agency (USEPA) cita los créditos basados en contaminantes específicos, como medio de transacción en casos relacionados con la calidad del agua (USEPA, 2003). Para la gestión de aguas pluviales, además de los parámetros de calidad habituales, la USEPA cita otros factores a tener en cuenta, que relacionen volumen de escorrentía, patrones de uso del suelo o porcentaje de superficie impermeable por unidad de superficie o por unidad de carga contaminante. A la hora de hacer los intercambios, en un principio, serían válidos, por ejemplo, los que sean equivalentes en volumen de escorrentía gestionada o en superficie impermeable creada; sin embargo, si hay una relación de equivalencia entre estos y otros parámetros, la USEPA también permite un comercio cruzado (USEPA, 2007-2009). A modo de ejemplo, los intercambios entre la generación de escorrentía y la protección de la zona de servidumbre o de la zona de recarga de

aguas subterráneas no serían aceptables, salvo que exista una correlación clara entre los impactos que en ambos casos se generan sobre la calidad del agua (Pristel, 2011).

Por su parte, el Mercado basado en cuotas consiste en que el promotor pague una parte de un proyecto de gestión de aguas pluviales a escala regional, que recoge y trata las aguas de escorrentía de varios proyectos de la misma cuenca. En este caso, se ofrece la posibilidad de que haya un banco de mitigación, de tal modo que se acumula un importe basado en créditos por adelantado y se ponen a disposición para su compra posterior. La guía del comercio basado en cuotas establece una preferencia por la compensación en especie, pero puede permitir una compensación sin especie (comercio cruzado) si se alcanza un mayor valor ecológico (Pristel, 2011).

Para finalizar, cabe destacar una cuestión clave relacionada con la implantación de éstas medidas, y es que las infraestructuras asociadas a la gestión de las aguas pluviales tienen generalmente unos elevados costes de mantenimiento que se prolongan a lo largo de toda la vida útil de la infraestructura. Algunos autores han llegado a cifrar que ese coste puede suponer hasta un 70% del coste de construcción, siendo menor esa proporción cuanto mayor es el coste de construcción de la obra (Committee on Reducing Stormwater Discharge, 2009). Un estudio realizado en Seine, condado de St. Denis, Francia, demostró que el 60 % de los depósitos subterráneos estaban fuera de servicio 10 años después de su construcción debido a la falta de mantenimiento. En Soisy-Sur-Seine, Francia, el 50% de las viviendas en las que se había instalado algún sistema de gestión de aguas pluviales en origen durante los años 80 o 90, en 2007 estaban conectadas a algún colector público de aguas pluviales (Chouli, 2007). Antes de promover a través de los diversos instrumentos económicos comentados la implantación de técnicas de control en origen, y con objeto de garantizar la sostenibilidad de las mismas a largo plazo, es necesario establecer un esquema de financiación de los costes de operación y mantenimiento y de las responsabilidades entre los distintos agentes involucrados, fijando qué costes se deben imputar a los usuarios privados y cómo hacer el seguimiento y regulación de los mismos (Kaspersen, 2000). Además el mantenimiento deberá ser realizado o inspeccionado por el gestor de la red pública, de tal manera que se garantice el buen funcionamiento de todo el sistema de alcantarillado (la parte privada y pública, tuberías e instalaciones especiales). Estas inspecciones redundarían en gastos adicionales, pero se garantizaría la sostenibilidad de los proyectos privados (Chouli, 2007).

1. Instrumentos económicos para la gestión de agua de lluvia en España.

En España, existen dos instrumentos económicos básicos relacionados con la gestión de las aguas residuales.

Por una parte, con competencia estatal y a través de las Confederaciones hidrográficas, el canon de control de vertidos. Se regula en el art. 113 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA), donde se establece que los vertidos al Dominio Público Hidráulico están gravados con una tasa destinada al estudio, control, protección y mejora del medio receptor de cada cuenca hidrográfica. El canon de control de vertidos es independiente de los cánones y tasas que puedan establecer las Comunidades Autónomas o las corporaciones locales para financiar obras de saneamiento y depuración, por tanto no podrá destinarse a financiar este tipo de obras. El canon de control de vertidos no tiene una estructura adecuada para gravar los vertidos derivados de la gestión de las aguas pluviales. En estos casos, aunque el canon depende del volumen autorizado, no del realmente vertido, la imposibilidad de estimar adecuadamente los volúmenes en la autorización de vertido hace imposible poder fijar un canon de control de vertido ajustado a las aguas pluviales. Además, los coeficientes de mayoración y minoración dependen de factores asociados a la naturaleza y características del vertido, al grado de contaminación del vertido y a la calidad ambiental del medio receptor, factores que son difícilmente cuantificables para las aguas pluviales. (Ruza J., 2011).

Por otra parte, a nivel municipal, se establecen tarifas de gestión del ciclo integral del agua, que engloban los costes de los servicios de abastecimiento y saneamiento, o bien tarifas específicas de saneamiento, a veces denominadas tasas de alcantarillado, cuyo hecho imponible es la prestación de servicios de saneamiento. La base imponible de dicha la tarifa se compone de una parte fija y otra variable en función del consumo de agua. Al existir una relación directa entre el volumen de agua residual generada y el volumen de agua consumida, esta tarifa permite inducir una responsabilidad en la generación de la contaminación y promueve buenas prácticas en la gestión de las aguas residuales, siendo por tanto una herramienta económica coherente con el principio de "quien contamina paga" marcado por la Directiva Marco de Aguas. No obstante en el caso de las aguas pluviales, no existe una relación directa entre el agua consumida y las aguas pluviales introducidas en la red. Así, para converger con el principio de quien contamina paga, inducir una responsabilidad en relación a esta problemática y promover

buenas prácticas, sería coherente crear una tarifa de gestión de aguas de lluvia cuya base imponible relacionara el origen del problema, en este caso la impermeabilización de la cuenca urbana, con la solución al mismo, véase la implementación de las técnicas de gestión sostenibles de los drenajes urbanos. Como veremos más adelante, las experiencias internacionales muestran que una tarifa de aguas de lluvia cuya base imponible se calcule por m^2 de impermeabilización de suelo, puede resultar una herramienta económica efectiva para avanzar en la resolución de la problemática de gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

En relación con la estructura competencial, en España la gestión del sistema de saneamiento es una competencia municipal. Así, los ayuntamientos establecen una tasa calculada para cubrir los costes de inversión y operación y que permite como máximo la recuperación de costes, admitiendo subvenciones a los mismos, pero no siendo permitida la generación de lucro. No obstante los Ayuntamientos pueden ceder sus competencias, bien a empresas concesionarias públicas o privadas, bien a las comunidades autónomas. En el primer caso, se establecerán tarifas o precios privados según la naturaleza pública o privada de la empresa, y que, aunque se calculan para financiar las inversiones y la prestación de servicios, permiten la generación de un beneficio. Por su parte, en el caso de cesión de competencias a las comunidades autónomas los ciudadanos pagarán un canon o impuesto autonómico cuyo objetivo es la financiación de las inversiones y la prestación del servicio.

En la Guía de tarifas de los servicios de abastecimiento y saneamiento (AEAS – FEMP, 2014a) se realiza una propuesta para sistematizar el establecimiento de las tarifas del ciclo integral del agua, intentando en la medida de lo posible poner a disposición de los agentes intervinientes en el proceso un lenguaje compartido, así como unos conceptos comunes que faciliten el intercambio de información y agilicen el propio proceso de actualización periódica de las tarifas.

En relación a la gestión de las aguas pluviales en el caso de redes unitarias, dichas tarifas incluyen los costes asociados a los bombeos, a la instalación y gestión de tanques de tormenta y depósitos de laminación así como la gestión de aliviaderos y emisarios. No obstante, no se incluyen otros posibles instrumentos económicos para la promoción de medidas de control en origen de la escorrentía urbana. Por otra parte, en las Recomendaciones técnicas para la regulación del servicio de saneamiento (AEAS- FEMP, 2014b)

se especifica que, en casos especiales o cuando existan redes separativas, el servicio de evacuación de las aguas pluviales será objeto de contrato específico, según las condiciones de este uso singular. En este caso, se recomienda que la contraprestación económica por el servicio se efectúe de forma proporcional a la superficie impermeabilizada del inmueble o solar, teniendo presente las condiciones particulares de escorrentía de cada superficie que componga la cubierta del terreno cuyas aguas pluviales se evacuen.

Vemos así una primera aproximación a la utilización de cargas impositivas que estimulan prácticas de gestión sostenible de las aguas pluviales como es el cálculo de la tasa impositiva proporcional al aumento de impermeabilización del terreno.

3. Consideraciones para el establecimiento de una tasa de lluvia.

El argumento para el establecimiento de una tasa de lluvia es que las aguas pluviales conectadas a la red de saneamiento tienen que ser tratadas en las EDAR, generando costes. Además para minimizar los riesgos de inundación y los impactos en el medio receptor es necesaria la implementación de unas medidas que también generan costes. Parte de estos costes se facturan a los habitantes a través de la tasa de lluvia.

Latasa de lluvia deberá contar con una parte variable que se defina en función de los doselementos clave relacionados con la problemática de gestión de las aguas de lluvia: la contaminación de la superficie urbana asociada al tipo de actividad y el grado de impermeabilización del suelo. Así se puede definir la parte variable en función del tipo de actividad (comercial, industrial, residencial), la tipología de vivienda (viviendas unifamiliares, más consuntivas en suelo, con una cuota variable más elevada frente a la vivienda en bloque), o la impermeabilidad del suelo (hormigón, asfalto permeable, etc). Así, la cuota variable penalizará el tipo de actividad más consumidora de suelo impermeable y con altas cargas de contaminación.

Las experiencias en el establecimiento de una tasa de lluvia coinciden en que un aspecto fundamental para su diseño es la caracterización unívoca de la superficie impermeable, definiendo si se incluyen tejados y cómo se asignan las zonas comunes impermeabilizadas, concluyendo la idoneidad de utilización de programas de análisis de fotografías aéreas para la definición de dichas superficies.

En Alemania el cálculo de los costes para la definición de la tasa de lluvia es distinto en cada estado. Así, por ejemplo, en Berlín se calculan tomando como base las superficies

de cubierta y de suelo impermeabilizado que han sido conectados directa o indirectamente a la red de colectores públicos. En el importe a pagar se tiene en cuenta el tipo de superficie y su permeabilidad (asfalto, hormigón, losas, adoquines, gravas, césped, etc), de tal modo que cuanto más permeable sea una superficie, menos hay que pagar por este concepto.

Por su parte en Francia la Ley de Aguas y Medio Acuáticos, de 30 de diciembre de 2006, permitió a los ayuntamientos instaurar un impuesto local específico para gestionar las aguas pluviales (0,20 euros/m^2 como máximo). En paralelo, esta ley instauró una línea de créditos para financiar trabajos de recuperación de aguas pluviales y permitió su utilización para usos exteriores a las viviendas (riego, lavado de coches, etc.) (Oficina Internacional del Agua, 2013).

Finalmente, en Estados Unidos cada Estado marca unas líneas generales para el establecimiento de la tasa de lluvia dando competencias a cada condado para la configuración de las mismas. A modo de ejemplo la Tabla 12 muestra las distintas tarifas de agua de lluvia aplicadas en diversos condados del Estado de Maryland, Estados Unidos.

Tabla 12.- Tarifas de aguas de lluvia aplicadas en algunos condados del Estado de Maryland, Estados Unidos.

Condado	ERU (sq-feet)	Nivel	$/ERU	€/m2	Tasa anual (€) por vivienda unifamiliar de 185 m2
Montgomery	2406	Residencial Nivel 1	36	0,145	63,3
		Residencial Nivel 3	88,4	0,356	
		Comercial	88,4	0,356	
		Nivel 1 Casas independientes y en suelo agrícola	29,17	0,118	35,15
		Nivel 4 Casas independientes y en suelo agrícola	265,2	1,069	
		Establecimientos comerciales	88,4	0,356	
Baltimore	1050	Nivel 1 - Residencial	12	0,111	130
		Nivel 2 - Residencial	18	0,166	
		Nivel 3 - Residencial	36	0,333	
		Comercial	69	0,637	
Howard	500	Residencial	15	0,291	54
Harford	500	Residencial	125	2,425	112,6
		Apartamentos y negocios	7	0,136	
Anne Arundel	2800	Nivel 1 (residencial, condominios)	34		54,7
		Nivel 2 - Unifamiliares	85		
		Agricultura	170		

Fuente: Elaboración propia basada en datos del Estado de Maryland, USA (2015).

Como se ve en la

Tabla 12, la tarifa se define en función de las ERU, Unidades residenciales equivalentes por sus siglas en inglés (Equivalent Residential Units) cuya equivalencia en pies cuadrados varía en cada condado. Se definen además diversos niveles en los que se aplican tasas distintas. Por ejemplo en el condado de Anne Arundel se definen 36 niveles que clasifican la superficie impermeabilizada no sólo por usos (residencial, agrícola, industrial, etc.) y tipología de vivienda (unifamiliar, en bloque, fuera del casco urbano, etc.) sino también por su ubicación dentro del espacio urbano (delimitación de zonas sensibles), o el fin lucrativo o no de la actividad.

Algunos condados ofrecen también créditos para el pago de la tasa, o implementación gradual de la misma. Por ejemplo el condado de Harford fija para el primer año de implementación de la tasa el cobro de únicamente del 10% de la misma, que se incrementará al 100% en el segundo año. Además existe posibilidad de rembolso de la tasa si la propiedad implementa proyectos de remediación como desconexión de bajantes e instalación de tanques de aprovechamiento de pluviales, creación de jardines de agua, etc. Tienen en común la aplicación de una tasa única y no binómica, y el cobro anual de la misma.

5. Participación ciudadana para la gestión integral de las aguas de lluvia

1. Introducción

Solucionar los problemas asociados a temas medioambientales y en particular a la gestión de las aguas pluviales implica no sólo disponer del conocimiento, las tecnologías, el marco normativo y la financiación adecuada, sino también resolver cuestiones sociales que, en general, se han dejado bastante apartadas.

Los ciudadanos entenderán más fácilmente la necesidad de invertir en la mejora de los sistemas de alcantarillado, depuradoras y sistemas de tratamiento y control de los reboses si están sensibilizados e informados sobre los beneficios de las mismas y perciben una mejora en su calidad de vida.

Existe ya una sensibilidad e interés por los temas medioambientales y específicamente por la contaminación de las masas de agua. Esto supone una oportunidad única para promover la participación activa de la ciudadanía en la búsqueda de soluciones que mejoren la calidad de las aguas a través de una gestión avanzada de las aguas pluviales.

2. Revisión de experiencias internacionales de participación pública en la gestión de las aguas de lluvia.

Destacan las siguientes experiencias en el ámbito internacional. Por una parte, en Argentina y Brasil la redacción de planes maestros de drenaje urbano en los que, a partir de diferentes experiencias y estudios pilotos, se ha desarrollado una metodología basada en la Planificación Participativa y Gestión Asociada (Morroni, y otros, 2003). La idea central es la de planificar mientras se gestiona y gestionar mientras se planifica, interviniendo con actores colectivos de manera continua en los procesos que modelan la realidad que se quiere transformar.

Por otra parte, muchos planes de gestión de aguas pluviales realizados en países como EE.UU., Australia o Nueva Zelanda incluyen la educación pública y la información como una parte importante del desarrollo de los mismos. Por ejemplo, el proceso de implementación de infraestructuras verdes para gestionar las aguas pluviales, en la ciudad de Milwaukee, USA (The Civic Federation, 2007); o la gestión de las aguas pluviales en Auckland, Nueva Zelanda (Auckland City Council, 2006).

En España la principal experiencia de procesos participativos se concentra en el proceso de participación para la definición de los planes hidrológicos de cuenca, organizados por las Confederaciones Hidrográficas en el último periodo de planificación. A nivel municipal existen diversas iniciativas contempladas en ordenanzas que promueven la participación ciudadana en los distintos procesos en la línea con los principios de la Agenda 21 local. Pero no se encuentra una definición clara de los procesos a seguir ni de la obligatoriedad de incluir la participación en todo el proceso de diagnóstico, definición, implementación y seguimiento de las actuaciones en relación al ciclo integral del agua. Se detecta por tanto un trabajo a desarrollar en este sentido para garantizar una participación pública real y efectiva en la definición de las estrategias para una gestión integral de las aguas de lluvia en las ciudades.

6. Conclusiones

En la actualidad los Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS) son considerados como los sistemas más adecuados para resolver la problemática de la gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos, integrando aspectos como cantidad de agua, garantía de

servicio y protección del medio receptor y ofreciendo otros beneficios adicionales como la mitigación y adaptación al cambio climático.

Existe una gran variedad de tipología de SUDS y su grado de implementación a nivel internacional varía, siendo Estados Unidos, Australia y Reino Unido los países más avanzados en la aplicación de dichas medidas. En Europa los SUDS son más comunes en países del centro y del norte, siendo su uso más limitado en países con clima mediterráneo del Sur de Europa.

Los proyectos de investigación europeos desarrollados hasta el momento han avanzado en dos líneas prioritarias de actuación. Por una parte, en la implementación de proyectos piloto en climas mediterráneos para la obtención de datos reales de rendimiento de SUDS que despejen las dudas sobre su idoneidad para la gestión de las aguas de lluvia. Por otra parte, se ha avanzado en el desarrollo y aplicación de metodologías que apoyen al proceso de toma de decisiones basadas en indicadores cuantificables.

No obstante, se detecta un vacío de conocimiento en la definición del paso previo necesario a la implementación de los SUDS: la definición de un sistema de indicadores de sostenibilidad cuantificables y comparables sobre los que realizar un diagnóstico integral de las aguas de lluvia bajo una metodología unificada que permita la definición y seguimiento de unas líneas de actuación así como el establecimiento de unos valores umbral de sostenibilidad en la gestión de las aguas de lluvia.

Para la incorporación en el sistema de indicadores de una visión integral de los retos en la gestión de las aguas de lluvia se revisan en el presente capítulo las experiencias internacionales en la definición de un marco normativo, la aplicación de instrumentos económicos y la participación ciudadana, tres elementos clave para una efectiva promoción de la implementación de SUDS en los entornos urbanos.

En el siguiente capítulo, basándose en las experiencias internacionales a la resolución de la problemática estudiada, se plantea un sistema de indicadores para la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LAS AGUAS DE LLUVIA EN LOS ENTORNOS URBANOS.

1. Introducción

En el presente capítulo se definen unos indicadores cuantificables de sostenibilidad que sirvan de base para la realización de un diagnóstico de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos y la definición de unas líneas estratégicas de actuación para la resolución de la problemática estudiada.

La definición de los indicadores abarca tanto aspectos técnicos relacionados con el funcionamiento del sistema de saneamiento y drenaje urbano en episodios de lluvia como las necesarias mejoras en el ámbito normativo, económico y social para la efectiva incorporación de las soluciones adoptadas.

2. Marco metodológico

El marco de análisis para la definición de los indicadores de sostenibilidad es el denominado de Presión-Estado-Respuesta. Este marco teórico, implementado por primera vez por Frien y Rapport (1979), se basa en el concepto de causalidad: “las actividades humanas ejercen presiones sobre el medio y cambian su calidad y la cantidad de los recursos naturales. La sociedad responde a esos cambios a través de políticas ambientales, sectoriales y económicas” (OCDE, 1994).

Esta metodología es la recomendada por la Agencia Europea de Medio Ambiente, que ha publicado varios informes de diagnóstico ambiental basado en indicadores a nivel europeo, entre los que destaca el publicado en 2003 “El agua en Europa: una evaluación basada en indicadores”.

Se desarrollan tres tipos de indicadores de sostenibilidad de la gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

Los indicadores de presión incluyen presiones directas e indirectas. Directas son, por ejemplo, las de las descargas de los sistemas de saneamiento. Indirectas serían, por ejemplo, el aumento del grado de impermeabilización de la cuenca urbana.

Los indicadores de estado serían aquellos que describen la consecuencia directa de las presiones ejercidas. En el caso de la gestión de las aguas de lluvia los indicadores de estado se organizarán en indicadores calidad de los medios receptores y en indicadores de vulnerabilidad frente a inundaciones.

Los indicadores de respuesta miden los esfuerzos en términos de políticas ambientales y de recursos naturales para la resolución de la problemática. Se identifican con la fase de definición del plan de actuaciones, instrumentalizándose como una herramienta de planificación y seguimiento de las acciones a implementar para una gestión sostenible de las aguas de lluvia.

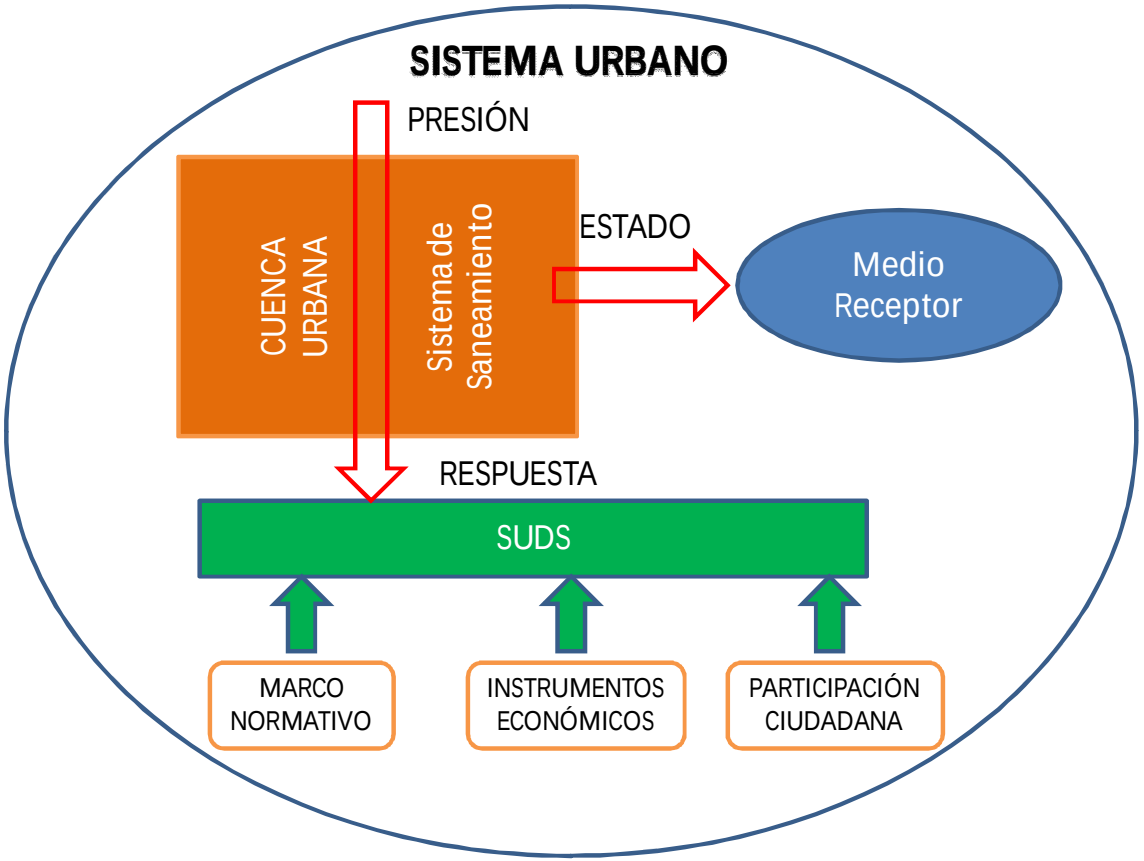
El enfoque sobre el que se basa la definición de indicadores amplía el foco del sistema de saneamiento al sistema urbano.

El sistema urbano engloba las múltiples y complejas interrelaciones que se producen en los entornos urbanos (Rueda, 1999). Así, la aplicación de este enfoque en la gestión de las aguas de lluvia permite incorporar en la definición del sistema de indicadores elementos normativos, económicos, sociales y ambientales de forma sintética, abordando los retos de la gestión integral de las aguas de lluvia e insertándolos coherentemente en el proceso de toma de decisiones.

Así, la organización del sistema de indicadores responde al cruce del enfoque de sistema urbano sobre el que se asienta el presente estudio (Medio receptor – Cuenca Urbana – Sistema de Saneamiento), con el marco teórico Presión-Estado-Respuesta.

Para la determinación de cada indicador se realiza una caracterización de los tres componentes del sistema urbano estudiados, recopilando los datos necesarios y la fuente de información. Se define además el objetivo específico, su tipología (presión-estado-respuesta), la unidad de medición, la tendencia deseada de evolución y la periodicidad de seguimiento recomendada para cada indicador. La Figura nº 9 muestra un esquema de la metodología aplicada.

Figura nº 9.- Esquema de la propuesta metodológica para la definición de un sistema de indicadores de sostenibilidad de lagestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.



Fuente: Elaboración propia.

3. El medio receptor.

1. Caracterización del medio receptor

La caracterización del medio receptor es de vital importancia para el diagnóstico de la gestión de las aguas de lluvia en la ciudad y la definición de un plan de actuación.

Por una parte, el conocimiento de la red de drenaje natural de la cuenca urbana facilitará la comprensión de los flujos previos al proceso de urbanización y marcará las líneas de intervención para la naturalización del ciclo integral del agua en la cuenca.

Por otra parte, la caracterización del estado de las masas de agua superficiales y subterráneas, así como el análisis de presiones e impactos que soportan, permitirán diagnosticar el impacto de las descargas de los sistemas de saneamiento apuntando hacia la priorización de actuaciones para la mejora del estado de dichas masas de agua.

En este sentido, la aprobación de la Directiva Marco de Aguas 2000/60/EC (DMA) marca un punto de inflexión en relación a los objetivos de gestión y planificación del agua y de los ecosistemas acuáticos. La consecución del buen estado tanto ecológico como químico de las masas de agua, objetivo último de la DMA, ha supuesto un reto para los organismos de gestión de las demarcaciones hidrográficas que han realizado un importante esfuerzo para la actualización y ampliación de los sistemas y redes de control para la implementación de un sistema de caracterización del estado de todas las masas de agua de los Estados Miembro de la Unión Europea. Esta caracterización, basada en unos indicadores normalizados y calibrados a nivel europeo, sirve como línea de base para la definición de un programa de medidas que permitan la consecución de dicho objetivo central, así como para el seguimiento y monitorización de la eficiencia y eficacia de las medidas propuestas.

Así, la caracterización del medio receptor que se propone en la presente tesis doctoral converge con la nomenclatura y metodología de trabajo de la Directiva Marco de Aguas 2000/60/EC. Los medios receptores de las descargas de los sistemas unitarios se denominan masas de agua superficial y masas de agua subterránea.

El estado de una masa de agua, en el contexto de la Directiva Marco, se define como el grado de alteración que presenta respecto a sus condiciones naturales y viene determinado por el peor valor de su estado químico y ecológico.

El estado químico es una expresión del grado de cumplimiento de las normas de calidad ambiental,establecidas reglamentariamente para los contaminantes presentes en una masa de agua superficial. Por su parte, el estado ecológico es una expresión de la calidad de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos asociados a las aguas superficiales y evaluadas en mediante una serie de indicadores biológicos (fauna bentónica de invertebrados, flora acuática, fitoplancton y fauna ictiológica), fisicoquímicos e hidromorfológicos en relación con las condiciones naturales en ausencia de presiones (condiciones de referencia).

En relación a los distintos tipos de presiones, en el mundo académico se distingue entre fuentes de contaminación puntual y fuentes de contaminación difusa.

Se habla de fuentes puntuales de contaminación cuando la contaminación es aportada al medio a través de un colector o canal en un lugar concreto. Son vertidos de fácil localización y su origen puede ser determinado relativamente bien.

Las fuentes difusas o no localizables son aquellas cuya contaminación se origina y se encuentra dispersa en zonas muy extensas. Su control es muy difícil ya sea en origen o en su acceso a los sistemas acuáticos y se caracterizan por descargas intermitentes normalmente asociadas a sucesos meteorológicos y con alta variabilidad de concentraciones (Puertas Agudo, Suárez López, & Anta Álvarez, 2008).

Las descargas de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia son una fuente de contaminación difusa. No obstante, de acuerdo con la metodología y nomenclatura de la DMA seleccionadas en este estudio se consideran las descargas de los sistemas de saneamiento como una presión puntual dado que se pueden localizar en un inventario de puntos de vertido. Así, se considera que “las presiones sobre las masas de agua superficial incluirán la fuente de contaminación puntual de los vertidos de tormentas pluviales procedentes de poblaciones, zonas industriales, carreteras u otro tipo de actividad humana, a través de aliviaderos de depuradoras y otras canalizaciones o conducciones que tengan un caudal de diseño superior a 100m^3/h.”(Informe IMPRESS, 2012).

A modo de resumen, la Tabla 13 recopila la información necesaria para una caracterización del medio receptor, especificando los datos necesarios y el objetivo de los mismos.

Tabla 13.- Caracterización del medio receptor para el diagnóstico integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

Elemento	Datos necesarios para la caracterización	Objetivo
Masas de agua superficiales	Red hidrográfica natural: ríos y barrancos	Estudiar los mecanismos para la restitución del ciclo natural del agua a través de la recuperación de las redes de drenaje natural de la cuenca urbana.
	Red hidrográfica artificial	Estudiar los mecanismos naturales de drenaje que aportan caudales de lluvia a la cuenca urbana e incluirlos en la planificación de sistemas de drenaje. Limitar la entrada de caudales en origen.
	Localización y denominación masas de agua Caudal Estado de la masa de agua superficial	Diagnosticar el estado de las masas de agua superficiales.
	Análisis de presiones e impactos	Diagnóstico estado de las masas de agua superficial en episodios de lluvia
	Indicadores de calidad	Concentración de Amonio y Oxígeno disuelto medidos en contínuo aguas arriba y aguas abajo del punto de vertido.
	Análisis de propuestas de actuación existentes	Conocer qué actuaciones se plantean para la disminución de las presiones e impactos sobre las masas de agua.
Masas de agua subterránea	Localización y denominación Espesor de la zona no saturada	Analizar el riesgo de contaminación del acuífero por infiltración de aguas de lluvia y/o escorrentía.
	Estado de las masas de agua subterráneas	Diagnosticar el estado de las masas de agua subterráneas.
	Análisis de presiones e impactos	Diagnóstico de las masas de agua subterráneas en episodios de lluvia
	Indicadores de calidad	Concentración de nitratos y metales pesados provenientes de las aguas residuales urbanas.
	Análisis de propuestas de actuación existentes	Complementar actuaciones existentes para la disminución de las presiones sobre las masas de agua.

Fuente: Elaboración propia.

2. Indicadores de sostenibilidad del medio receptor

A continuación se realiza una revisión de la experiencia internacional en la selección de los indicadores más adecuados para la medición del impacto en los medios receptores de las descargas del sistema de saneamiento en tiempo de lluvia

El oxígeno disuelto es un indicador que detecta los impactos agudos, diferidos y acumulativos de las masas de agua tipo río. El oxígeno es uno de los elementos imprescindibles para el ecosistema acuático y su disminución por debajo de ciertos valores, o su ausencia, altera profundamente el mismo. Esta característica ha hecho que la concentración de oxígeno disuelto (OD) haya sido, y siga siendo, el indicador de calidad por excelencia y, en la mayor parte de los ríos, un buen indicador de su estado. Sin embargo, el OD presenta dos limitaciones en relación a la medición de los impactos de las descargas de los sistemas de saneamiento unitarios: por un lado corresponde a un parámetro global resultante de complejas interacciones de procesos ecológicos/químicos/físicos que tienen lugar en el seno del agua, pero, por esta misma causa, no permite reconstruir estas interacciones; por otro lado, no proporciona información de determinadas sustancias que pueden ser críticas, como por ejemplo la presencia de metales pesados o la existencia de tóxicos.

Existe una extensa literatura sobre los descensos de los niveles de oxígeno disuelto que se producen en los ríos tras los vertidos asociados a las aguas pluviales y a las descargas de los sistemas unitarios (DSU). En la bibliografía aparecen referencias a que es mejor utilizar la Demanda Química de Oxígeno (DQO) para valorar los efectos de este tipo de vertidos, ya que la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) subestima la demanda al ser ralentizada la actividad bacteriana del ensayo por los posibles tóxicos que acompañan al agua (W.E.F.-A.S.C.E., 1993)

Algunos investigadores han apreciado en sus estudios que las peores condiciones no se dan durante el paso del pico de caudales de la DSU, sino que se producen después, asociados a un problema de sedimentos (Keefer, Simons, & Mc.Quivey, 1979). En sus estudios sobre la evolución del oxígeno disuelto en ríos próximos a núcleos urbanos, apreciaron que la variación en las concentraciones de oxígeno, en situación de caudales bajos, era muy fuerte, sensible sobre todo al ciclo diario, y por el contrario, cuando se producían lluvias, la concentración de oxígeno se estabilizaba en niveles altos, debido sobre todo al cambio de las condiciones hidráulicas.

Otro indicador determinante para la detección de los impactos de las descargas en los medios receptores es la concentración de amoniaco (NH_3). El NH_3 ha demostrado ser la forma más tóxica del amonio. Las concentraciones de amoniaco de toxicidad aguda para peces pueden causar pérdida de equilibrio, hiperexcitabilidad, aumento de la respiración, parada cardiaca y, en casos extremos, convulsiones, coma y muerte. Concentraciones menores de amoniaco tienen efectos en peces como reducción de la velocidad de crecimiento y cambios morfológicos. Los factores que afectan la toxicidad del amonio incluyen la concentración de Oxígeno Disuelto (OD), temperatura, pH, fluctuaciones o intermitentes exposiciones, concentración de CO2, salinidad y presencia de otros tóxicos (Puertas Agudo et al., 2008).

Las descargas de los sistemas de saneamiento en los medios receptores se caracterizan por ser sucesos intermitentes y con impactos sobre la calidad del agua de naturaleza aguda y crónica. Sería necesario por tanto disponer de unos estándares para controlar los impactos de los reboses que se adaptaran a la irregularidad de éstos así como a la especificidad de cada cuenca y cada medio receptor.

Este tipo de estándares se conocen como estándares intermitentes de emisión. Se definen, entre otras variables, en función del medio receptor. Así, el medio debe ser modelizado con softwares disponibles en el mercado, por ejemplo QUAL-2E, INFORWORKS. Una vez modelizado y calibrado el medio receptor se deben realizar mediciones de las cargas de contaminación aportadas por los vertidos en cada suceso de lluvia, y analizar los indicadores seleccionados para detectar el impacto en las masas de agua receptoras, indicadores que deben medirse en continuo (OD, pH, turbidez, amonio, conductividad, temperatura y caudal).

Los datos recopilados se evaluarán sobre las bases estadísticas de sucesos extremos (datos de descargas) y de acumulación de cargas contaminantes en el medio (impactos sobre la calidad del medio receptor). El resultado serán unas curvas de concentración de contaminantes en términos de magnitud (dosis), duración (tiempo de exposición) y frecuencia (periodo de retorno) de los sucesos transitorios, junto con la definición de qué indicadores deben protegerse en función de los usos del agua fijados.

La definición de unos estándares intermitentes de emisión, junto con procesos de modelización para asistir en el diseño de sistemas y estructuras de saneamiento, permitiría alcanzar en los ríos los objetivos de calidad previstos. Reino Unido, Canadá y Estados

Unidos han desarrollado manuales técnicos con estándares que especifican la magnitud, la duración y la frecuencia de las concentraciones de Oxígeno Disuelto (OD) y de amonio no ionizado necesarias para la protección de los peces de agua dulce.

A modo de ejemplo, laTabla 14 muestra los valores de concentración de amonio total propuestos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (E.P.A. por sus siglas en inglés) en su "Deriving Numerical National Water Quality Criteria" los valores (EPA, 1986).

Tabla 14.- Concentraciones medias de amonio total y amonio no ionizado (mg/l) para salmónidos y otras especies de agua fría sensibles presentes.

	pH	5ºC	10ºC	15ºC	20ºC
			1 hora		
amonio total	6,5	33	31	30	29
	6,75	30	28	27	27
	7	26	25	24	23
	7,25	22	20	19,7	19,2
amonio no ionizado	6,5	0,0129	0,0182	0,026	0,036
	6,75	0,021	0,03	0,042	0,059
	7	0,033	0,046	0,066	0,093
	7,25	0,048	0,068	0,095	0,135
			4 días		
amonio total	6,5	2,4	2,2	2,2	1,49
	6,75	2,4	2,2	2,2	1,49
	7	2,4	2,2	2,2	1,49
	7,25	2,4	2,2	2,2	1,5
amonio no ionizado	6,5	0,0009	0,0013	0,0019	0,0019
	6,75	0.0017	0,0023	0,0033	0,0033
	7	0,0029	0,0042	0,0059	0,0059
	7,25	0,0052	0,0074	0,0105	0,0105

Fuente: Environmental Protection Agency (1986).

Como se ve en la Tabla 14, la E.P.A. define las concentraciones máximas de amonio total y amonio no ionizado permitidas para los vertidos intermitentes en tiempos de lluvia en función del tiempo de exposición, las condiciones del medio receptor que afectan a dichos indicadores (pH y Temperatura) y el uso del agua (protección de salmónidos y otras especies de agua fría). De esta manera se evalúa la intensidad del impacto, en el sentido de la concentración de contaminante en función del tiempo, permitiéndose vertidos con mayores concentraciones puntuales y acotadas.

Así, la Tabla 15 recoge los indicadores de sostenibilidad relativos al medio receptor. Los indicadores se organizan por indicadores de presión (P), de estado (E) y de respuesta (R).

Tabla 15.- Indicadores de Presión relacionados con los medios receptores.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Medio Receptor	Caracterización de las Presiones ejercidas sobre el medio receptor	EE1. Cargas de contaminación de los reboses de los sistemas unitarios de saneamiento	P	Disminución	mg/l	Anual
		EE2. Cargas de contaminación de los vertidos de los sistemas separativos	P	Disminución	mg/l	Anual
		EE3. Presión sobre masas de agua receptoras por vertidos de descargas de sistemas unitarios	P	Disminución	Cualitativo	Anual
		EE4. Uso aguas subterráneas para sistemas cerrados de refrigeración	P	Optimización	hm^3/año	Anual

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16.- Indicadores de Estado relacionados con el medio receptor.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Medio Receptor	Caracterización del Estado del medio receptor	EE5. Estado ecológico de las masas de agua receptoras	E	Mejora	Indicadores cualitativos	Anual
		EE6. Caudal mínimo de los medios receptores en época de estiaje	E	Optimización	m^3/s	Anual
		EE7.Balance hídrico de los acuíferos	E	Mantenido	hm^3/año	Anual
		EE8. Impacto sobre masas de agua receptoras por vertidos de descargas de sistemas unitarios	E	Disminución	Cualitativo	Anual
		EE9. Número de incumplimientos de los valores umbral para el buen estado ecológico de las masas de agua	E	Disminución	N/año	Anual
		EE10. Número de días al año que se abren las playas	E	Aumento	N	Anual
		EE11. Número de zonas de marisqueo de clasificación A	E	Aumento	N	Anual
		EE12. Número de autorizaciones de vertido solicitadas	E	Aumento	N	Anual
		EE13. Número de denuncias (ciudadanas o de guardería fluvial) por vertidos directos emitidas a los órganos	E	Disminución	N	Anual
		EE14. Gradiente térmico por inyección de aguas de sistemas de refrigeración	E	Disminución	ºC	Anual

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17.- Indicadores de Respuesta relacionados con el medio receptor.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Medio Receptor	Caracterización de la Respuesta para la disminución de las presiones sobre el medio receptor	EE15. Número de medidas relacionadas con la gestión de las aguas de lluvia incluidas en el Plan Hidrológico de cuenca	R	Aumento/Optimización	N	Quinquenal
		EE16. Tipología de medidas relacionadas con la gestión de las aguas de lluvia del Plan Hidrológico de cuenca	R	Optimización	%	Quinquenal
		EE17. Número de programas de coordinación entre organismos de cuenca y entidades gestoras del sistema de saneamiento para la mejora de la gestión de las aguas de lluvia con presupuesto asignado.	R	Optimización	N	Quinquenal
		EE18. Recarga areal del acuífero	R	Aumento	hm^3/año	Anual
		EE19. Reducción y control de plumas térmicas por infiltración de pluviales	R	Mantenido	ºC/día	Anual
	Identificación y puesta en valor de los servicios ambientales de las masas de agua receptoras	EE20. Servicios ambientales de los ecosistemas acuáticos	R	Aumento	€/año	Anual

Fuente: Elaboración propia.

Como se ve en la Tabla 15, uno de los indicadores introduce el concepto de servicios ambientales. Se entiende por servicio ambiental la contribución al bienestar humano obtenida directa o indirectamente de los ecosistemas (Sukhdev, Wittmer, & Miller, 2014).

El objetivo de este indicador es la identificación y puesta en valor de los beneficios que reporta el buen estado de los medios acuáticos receptores, y su relación con las aguas de lluvia. Así, una gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos incrementará dichos servicios reportando beneficios directos cómo la producción de agua por la captación y reutilización de las aguas de lluvia (servicios de aprovisionamiento), o la regulación de las inundaciones por permeabilización de los suelos. Los beneficios indirectos, relacionados con el funcionamiento de procesos del ecosistema que genera los servicios directos (servicios de apoyo), serían el proceso de recarga de los acuíferos o la reducción de las plumas térmicas provocadas por los sistemas de refrigeración.

Se incorporan también bajo el enfoque de los servicios ambientales los beneficios no materiales, como los valores estéticos, espirituales y culturales, o las actividades recreativas. Los estudios más recientes incluyen el enfoque de servicios ambientales en el proceso de diagnóstico y diseño del plan de actuaciones (Jefferies, 2015).

4. La cuenca urbana

1. Caracterización de la cuenca urbana

Para analizar la sostenibilidad de la gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos es esencial conocer el medio que los sustenta, profundizando tanto en los aspectos físicos (topografía, geología, climatología, etc.), como en los urbanísticos (usos del suelo, planes de ordenación, etc.), administrativos, normativos, económicos y socioambientales. La Tabla 18 recoge la información necesaria para la caracterización de la cuenca urbana.

Tabla 18.- Caracterización de la cuenca urbana.

Elemento	Datos necesarios para la caracterización	Objetivo
Topografía	Mapas topográficos	Conocer las pendientes del terreno para el cálculo hidráulico y el diseño de nuevos sistemas de drenaje.
Geología	Tipos de suelo - permeabilidad	Estudiar la potencialidad y limitaciones de implementación de mecanismos de infiltración de aguas de lluvia.
	Mapas de peligrosidad - Karstificación	Localización de zonas de riesgo de colapso del suelo .
Climatología	Distribución temporal y espacial de las precipitaciones	Establecer hidrogramas para la modelización de los eventos de lluvia.
Ordenación Territorial	Evolución histórica de la ciudad	Comprensión de la dinámica de evolución del drenaje de la ciudad para integrar de manera óptima nuevas actuaciones para la gestión de las aguas de lluvia .
	Evolución del uso del suelo industrial	Localización de suelos altamente contaminados en los que se evitará la implementación de mecanismos de infiltración.
	Usos del suelo en la ciudad	Conocer el grado de impermeabilización de la cuenca urbana y diseñar estrategias de drenaje de las aguas de lluvia.
	Planes de desarrollo vigentes	Seleccionar areas potenciales para la implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible.
	Red de transportes - Ejes principales de transporte, caracterización de modos de transporte e intensidades	Localizar fuentes de contaminación de la escorrentía urbana y definir técnicas de reducción de la contaminación, tanto preventiva (fomento de transporte sostenible) como paliativa (reducción en origen de la contaminación de la escorrentía).
Gestión del Riesgo de Inundaciones	Mapas de riesgo de inundación y mapas de afección a sistemas de saneamiento con periodos de retorno de 10 y 50 años.	Conocer la vulnerabilidad de la cuenca urbana y la afección de las inundaciones a los sistemas de saneamiento.

Tabla 18 (continuación). Caracterización de la cuenca urbana.

Elemento	Datos necesarios para la caracterización	Objetivo
Organización Administrativa	Organismos de gestión internos en la cuenca urbana	Favorecer la coordinación interadministrativa e intercompetencial en la cuenca urbana
Marco socioeconómico	Caracterización actividades productivas de la cuenca urbana	Viabilidad de promocionar la gestión de las aguas de lluvia como actividad económica.
		Cuantificar la aportación al desarrollo económico de la ciudad de las actividades industriales altamente contaminantes.
Marco de gestión de las aguas de lluvia	Caracterización del marco competencial municipal	Analizar de la idoniedad del esquema organizativo y competencial para la gestión intersectorial y coordinada de las aguas de lluvia.
	Caracterización del marco normativo	Analizar la integración de la gestión de las aguas de lluvia en las ordenanzas municipales.
		Analizar los programas sectoriales existentes.
	Caracterización del sistema tarifario	Revisión de los principios por los que se rige la definición de tarifas sobre los que diseñar posibles herramientas económicas para la gestión de las aguas de lluvia.
Información, educación y participación pública	Caracterización de las iniciativas en marcha relacionadas con información y educación ambiental y participación pública	Integrar o definir actuaciones para la participación ciudadana en la definición de planes de gestión integrales de las aguas de lluvia.
Contaminación movilizada en tiempos de lluvia	Fuentes de contaminación	Conocer las posibilidades de reutilización de las aguas de lluvia así como de la escorrentía superficial para distintos usos.
	Calidad de las aguas de lluvia	
	Cargas de contaminación de la escorrentía superficial	
	Cargas de contaminación de los reboses de los sistemas unitarios de saneamiento	Diagnosticar el impacto de los desbordamientos de los sistemas de saneamiento en los medios receptores.
	Cargas de contaminación de los vertidos de los sistemas separativos	

Fuente: Elaboración propia.

2. Indicadores de sostenibilidad de la cuenca urbana

Al integrar en Cuenca Urbana los aspectos institucionales, jurídicos y sociales, la mayoría de los indicadores de cuenca urbana son tipo "Respuesta". En ciudades en las que no existen planes de actuación para la gestión integral de las aguas de lluvia dichos indicadores serán de utilidad para constatar los avances necesarios en estas materias, y sólo cumplirán su función de seguimiento de los avances de las políticas una vez éstas se implementen.

Las siguientes tablas recogen la propuesta de indicadores institucionales, administrativos, sociales y de Ordenación del Territorio relativos a la cuenca urbana.

Tabla 19.- Indicadores de Presión de la cuenca urbana relacionados con la Ordenación del Territorio y la movilidad urbana.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Proceso de urbanización de la cuenca urbana	Determinar el impacto sobre el sistema de drenaje natural y el grado de artificialización del drenaje urbano	U1. Porcentaje de las superficies artificiales en relación con las superficies naturales	P	Disminución	%	Quinquenal
	Determinar el grado de impermeabilización de la cuenca urbana	U2. Porcentaje de zonas ajardinadas y sectores residenciales	P	Aumento	%	Quinquenal
		U3. Porcentaje de zonas verdes de la Estructura Urbana Compacta	P	Aumento	% superficies artificiales	Quinquenal
	Determinar la presión por contaminantes peligrosos por actividades industriales y transportes	U4. Porcentaje de zonas industriales, vías de comunicación y transportes	P	Optimización	%	Quinquenal
Movilidad urbana sostenible (MU)	Definir el orden de magnitud de la aportación a las cargas de contaminación de la escorrentía urbana por tipología de movilidad	MU1. % de desplazamientos en transporte público, bicicleta y a pie	P	Aumento	%	Anual

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20.- Indicadores de Estado de la cuenca urbana relacionados con la Ordenación del Territorio.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Gestión del riesgo de inundaciones (RI)	Definir el grado de vulnerabilidad de la cuenca urbana en relación en relación con los eventos de lluvia	RI1. Periodo de retorno de las inundaciones de la cuenca urbana debidas a la falta de capacidad del sistema de saneamiento en tiempos de lluvia	E	Aumento	Años	Quinquenal
	Identificar impactos económicos de la gestión actual de las aguas de lluvia	RI2. Impacto económico por inundaciones en la cuenca urbana debidas a la falta de capacidad del sistema de saneamiento en tiempos de lluvia	E	Disminución	€/año	Quinquenal
	Definir el grado de vulnerabilidad del sistema de saneamiento en relación con los eventos de lluvia	RI3. Periodo de retorno de las inundaciones con afección (total o parcial) al funcionamiento del sistemas de saneamiento.	E	Aumentoº	Años	Quinquenal

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21.- Indicadores de Respuesta de la cuenca urbana relacionados con el Marco Institucional.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Marco institucional en el ámbito de la gestión de las aguas de lluvia (MI)	Coordinación e integración de las actuaciones para una gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos	MI1. Número de reuniones de coordinación intersectorial e intercompetencial	R	Aumento/Optimización	Número de reuniones	Anual
		MI2. Diversidad de perfiles de los trabajadores de las entidades competentes	R	Aumento/Optimización	%	Anual
		MI3. Número de entidades involucradas en el proceso de definición del plan de actuaciones para una gestión integral de las aguas de lluvia	R	Aumento/Optimización	Número de entidades	Anual
		MI4. Programas vigentes con presupuesto asignado para la gestión integral de las aguas de lluvia	R	Aumento/Optimización	Número de programas	Anual

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22.- Indicadores de Respuesta de la cuenca urbana relacionados con el Marco Normativo.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Marco normativo de la gestión de las aguas de lluvia en las ciudades	Integración de la gestión de las aguas de lluvia en el marco normativo	MN1. Número de ordenanzas municipales relacionadas con la gestión de las aguas de lluvia	R	Aumento	Número de ordenanzas	Quinquenal
	Integración en el marco normativo de las medidas necesarias para el aumento de la capacidad de almacenamiento del sistema de	MN2. Número de criterios hidráulicos para la definición de la capacidad de almacenamiento necesaria	R	Aumento/Optimización	Número de criterios	Quinquenal
	Integración en el marco normativo de la Implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible	MN3. Número de criterios para la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	R	Aumento/Optimización	Número de criterios	Quinquenal
	Integración en marco normativo de medidas para la reutilización de las aguas de lluvia	MN4. Número de criterios para la reutilización de aguas de lluvia	R	Aumento/Optimización	Número de criterios	Quinquenal
	Integración en el marco normativo del enfoque integral y la gestión intersectorial de la gestión de las aguas de lluvia	MN5. Número de criterios de ordenación del territorio, urbanísticos, arquitectónicos, constructivos, medioambientales y sociales	R	Aumento/Optimización	Número de criterios	Quinquenal

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23.- Indicadores de Respuesta de la cuenca urbana relacionados con las Herramientas Económicas.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Herramientas económicas en la gestión de las aguas de lluvia (HE)	Integrar medidas de incentivación de buenas prácticas en la gestión de las aguas de lluvia	HE1. Número de Herramientas económicas vigentes para la gestión de las aguas de lluvia	R	Aumento/Optimización	Número de medidas	Anual
	Conocer la aportación por habitante al sostenimiento de los gastos y comparación con lo destinado a la gestión de las aguas de lluvia	HE2. Gasto municipal en gestión de las aguas de lluvia en la ciudad en relacíon a la carga tributaria por habitante	R	Optimización	%	Anual
	Poner en valor la gestión de las aguas de lluvia como economía verde generadora de empleos	HE3. Número de empleos relacionados con la gestión de las aguas de lluvia generados al año	R	Aumento	Número de empleos	Anual

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24.- Indicadores de Respuesta de la cuenca urbana relacionados con la Participación Ciudadana.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Participación ciudadana en la gestión de las aguas de lluvia en la ciudad (PC)	Sensibilización, formación y capacitación ciudadana en la gestión de las aguas de lluvia	PC1. Número de personas que participan en programas ambientales relacionados con la gestión de las aguas de lluvia	R	Aumento	Número de personas	Anual
	Mejorar la participación ciudadana en la gestión de las aguas de lluvia	PC2. Oportunidades de participación ciudadana en la gestión de las aguas de lluvia en la ciudad	R	Aumento	% de personas satisfechas	Anual
	Integrar de manera efectiva la participación ciudadana en el proceso de toma de decisiones	PC3. Número de normas a nivel municipal, autonómico y estatal que recogen la obligatoriedad de la participación ciudadana.	R	Aumento	Número de normas	Quinquenal
		PC4. Número de medidas propuestas en procesos de participación ciudadana que se ponen en marcha	R	Aumento	Número de medidas	Anual
	Conocer el grado de satisfacción del ciudadano y sus necesidades en relación a la gestión del sistema de saneamiento	PC5. Satisfacción del ciudadano en relación con los servicios de saneamiento de la ciudad	R	Aumento	Porcentaje de satisfacción	Quinquenal

Fuente: Elaboración propia.

5. El Sistema de Saneamiento

1. Caracterización del sistema de saneamiento

El sistema de saneamiento comprende las cuencas vertientes, la red de alcantarillado, los colectores principales, los puntos de alivio, los tanques de tormenta y las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. La caracterización de los distintos elementos se ordena de la escala macro a la micro, comenzando así por las Estaciones depuradoras de aguas residuales, para continuar con la caracterización de las cuencas vertientes y los elementos que la componen.

Se denomina cuenca vertiente a la totalidad de superficie de la cuenca urbana cuyas aguas residuales y pluviales se recogen en un sistema de alcantarillado que desemboca en un único colector principal. Este concepto asimila el funcionamiento de la red de saneamiento al funcionamiento natural de las cuencas hidrológicas, asimilando así la red de alcantarillado a la ramificación arborescente de los ríos de menor entidad que desembocan en el río principal, que en el caso de las cuencas vertientes del sistema de saneamiento son los colectores principales.

Los tanques de tormenta y los depósitos de laminación son las infraestructuras encargadas de laminar las puntas de caudal del sistema en tiempos de lluvia. Entran en funcionamiento cuando el sistema no tiene capacidad para conducir por la red todo el caudal aportado por las cuencas vertientes minorando los caudales que se alivian por los puntos de alivio del sistema. Son por tanto las infraestructuras más relevantes en relación al objeto de este estudio ya que muestran la capacidad del sistema de saneamiento de regular los caudales de entrada y/o reducir la cantidad de contaminación movilizada hacia el medio receptor.

Finalmente es importante conocer cómo afectan las inundaciones a los sistemas de saneamiento, tanto en la capacidad de evacuación de sus puntos de vertido, como los dispositivos de los que dispone el sistema para evitar entrada de caudales externos (clapetas antiretorno) como la posible afección de las inundaciones a la operatividad de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.

La Tabla 25 recopila la información necesaria para una caracterización del sistema de saneamiento, especificando los datos necesarios y el objetivo de los mismos.

Tabla 25.- Caracterización del sistema de saneamiento.

Elemento	Datos necesarios para la caracterización	Objetivo
Estaciones Depuradoras de Aguas residuales	Localización (Coordenadas UTM)	Diagnóstico del funcionamiento de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales en tiempos de lluvia.
	Zona servida	
	Habitantes equivalentes	
	Caudales de entrada (m3/día)	
	Capacidad de tratamiento (m^3/día)	
	Bypass a líneas de tratamiento de caudales en exceso - Descargas directas	
	Capacidad de Depósitos de retención de caudales en exceso (m3)	
	Rendimiento eliminación SST, DBO_5, DQO, Ptotal en tiempo seco y en tiempo de lluvia	
	Consumo energético (Kw/h)	
	Coste depuración (€/m^3)	
Cuencas vertientes	Denominación	Diagnóstico del funcionamiento de los colectores de cada cuenca vertiente y detección de condiciones de descarga de los sistemas de saneamiento en tiempo de lluvia .
	Localización	
	Población de hecho	
	Población estacional	
	Superficie bruta drenada (ha)	
	Superficie impermeable (ha)	
	Coeficiente de escorentía medio	
	Número de puntos de vertido desbordamiento	
	Colector principal de procedencia	
	Caudal máximo de diseño (l/s)	
	Caudal máximo en tiempo seco (l/s)	
	Carga contaminante de diseño (h-e)	

Tabla 25. (continuación). Caracterización del sistema de saneamiento.

Elemento	Datos necesarios para la caracterización	Objetivo
Red de alcantarillado	Tipología: Unitaria, separativa	Diagnóstico del funcionamiento de la red de alcantarillado y detección de cuellos de botella en sistema de saneamiento en tiempo de lluvia .
	Longitud total	
	Red de colectores principales del sistema: Diámetro, longitud, pendiente, velocidad de recorrido, capacidad hidráulica.	
	Régimen de mantenimiento	
Puntos de desbordamiento	Denominación	Localización de puntos de desbordamiento y detección de condiciones de vertidos y cargas contaminantes.
	Localización	
	Nombre del medio receptor	
	Habitantes equivalentes	
	Tipología punto de vertido: Infraestructura de regulación	
	Tipología de punto de vertido sin infraestructura de regulación: directo, clapeta simple, pico de pato, clapeta con rejilla	
Tanques de Tormenta y Depósitos de laminación	Localización	Diagnóstico del volumen de almacenamiento del sistema de saneamiento.
	Volumen de retención (m^3)	
	Tiempo de retención (h)	
	Caudal máximo de entrada (l/s)	
	Caudal máximo de salida (l/s)	
	Velocidad máxima de salida (m/s)	
	Equipamiento - autómatas	
	Criterios de dimensionamiento	

Fuente: Elaboración propia.

2. Indicadores de sostenibilidad del sistema de saneamiento

Se proponen como indicadores de Presión aquellos relacionados con las partes del sistema de saneamiento que provocan las cargas de contaminación y los reboses del sistema. Así por una parte se incluyen indicadores relacionados con la red de alcantarillado, los puntos de alivio de la misma y la capacidad de almacenamiento del sistema.

Por otra parte se consideran indicadores de Estado aquellos que responden a la presión ejercida por el sistema en episodios de lluvia, véase las descargas del sistema tanto en escala global como a nivel de cuenca vertiente así como indicadores relacionados con el funcionamiento de las Estaciones Depuradoras. Entre otros se incluye un indicador para analizar la afección de los episodios de lluvia a las líneas de tratamiento de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), realizando un análisis comparativo de los rendimientos de cada línea de tratamiento en tiempo seco y en episodios de lluvia, en series históricas lo más amplias posibles. Dicho análisis se completará con un análisis de los costes económicos y energéticos resultantes del tratamiento en las EDAR de los caudales punta en episodios de lluvia, que permitirá contrastar de manera integral opciones alternativas de gestión de las aguas de lluvia. Por otra parte, los indicadores pormenorizados a nivel de cuenca vertiente tienen por objeto la priorización de actuaciones en cada cuenca vertiente dentro de la cuenca urbana.

Finalmente se definen como indicadores de Respuesta aquellos relacionados con la incorporación de sistemas de drenaje sostenible en el sistema de saneamiento, con el control de caudales en origen y su relación en la mejora del funcionamiento global del ciclo integral del agua.

La Tabla 26 recoge los indicadores relacionados con el sistema de saneamiento.

Tabla 26.- Indicadores de Presión relacionados con el sistema de saneamiento.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Sistema de saneamiento (SS)	Caracterización de la red principal de colectores	RC1. Km de red separativa en relación al global	P	Aumento/Optimización	%	Quinquenal
		RC2. Porcentaje de la red de colectores principales con diámetros inferiores a 180 cm	P	Aumento/Optimización	%	Quinquenal
		RC3. Porcentaje de la red de colectores principales con pendiente media menor a 5m/km	P	Disminución/ Optimización	%	Quinquenal
		RC4. Número de limpiezas anuales de mantenimiento	P	Optimización	N	Anual

Tabla 26 (Continuación). Indicadores de Presión relacionados con el sistema de saneamiento.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Sistema de saneamiento (SS)	Caracterización de los puntos de alivio de la red de alcantarillado del sistema	PA1. Número de puntos de alivio en relación a la longitud total del sistema de alcantarillado	P	Disminución/ Optimización	N/Km	Anual
		PA2. Porcentaje de puntos de alivio directo en relación al total de puntos de alivio	P	Disminución	%	Anual
		PA3. Porcentaje de puntos de alivio con sistema pico de pato en relación al total de puntos de alivio	P	Aumento	%	Anual
		PA4. Porcentaje de puntos de alivio con clapetas simples en relación al total de puntos de alivio	P	Optimización	%	Anual
		PA5. Porcentaje de puntos de alivio con rejillas de desbaste en relación al total de puntos de alivio	P	Aumento	%	Anual
		PA6. Número de puntos de alivio en relación al caudal máximo anual del medio receptor	P	Disminución	N/m3/s	Anual
	Caracterización y diagnóstico sobre la Capacidad de Almacenamiento del Sistema de Saneamiento	CA1. Capacidad de almacenamiento global del sistema de saneamiento por hectárea neta total	P	Aumento/Optimización	m3/ha neta	Quinquenal
		CA2. Capacidad de almacenamiento del sistema unitario por hectárea neta	P	Aumento/Optimización	m3/ha neta	Quinquenal

Tabla 27. Indicadores de Estado relacionados con el sistema de saneamiento.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Sistema de Saneamiento	Caracterización y Diagnóstico del funcionamiento de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR)	EDAR1. Ratio entre la capacidad de tratamiento y los caudales máximos en tiempos de lluvia	E	Aumento	%	Anual
		EDAR2. Consumo energético	E	Disminución/ Optimización	KWh/m^3	Anual
		EDAR3. Coste depuración	E	Disminución/ Optimización	$€/m^3$	Anual
		EDAR4. Autosuficiencia Energética	E	Aumento/Optimización	%	Anual
		EDAR5. Rendimiento comparativo de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales en tiempo seco y en episodios de lluvia	E	Optimización	%	Anual

Tabla 27 (continuación). Indicadores de Estado relacionados con el sistema de saneamiento.

Elemento	Objetivo	Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Sistema de Saneamiento	Diagnóstico hidráulico del funcionamiento global del sistema de saneamiento en episodios de lluvia	SS1. Frecuencia de descargas del sistema de saneamiento	E	Disminución	Número de descargas	Anual
		SS2. Caudales reales descargados por el sistema de saneamiento	E	Disminución	m^3	Anual
		SS3. Ratio entre Caudales descargados por el sistema de saneamiento con lluvia crítica de diseño y la superficie neta total	E	Disminución	m^3/s/ha neta	Anual
		SS4. Relación entre Capacidad hidráulica global del sistema y Caudales máximos con lluvia crítica de diseño	E	Aumento	%	Anual
Cuencas vertientes (CV)	Discretizar por cuenca vertiente el funcionamiento del sistema de saneamiento en tiempo de lluvia	CV1. Porcentaje de alivios directos en la cuenca vertiente en relación al total de alivios directos del sistema	E	Disminución	%	Anual
		CV2. Número de puntos de alivio por superficie impermeabilizada de la cuenca vertiente	E	Disminución	N/ha neta	Anual
		CV3. Descarga del sistema de saneamiento por superficie impermeabilizada de la cuenca vertiente	E	Disminución	m3/s y ha neta	Anual
		CV4. Descarga del sistema de saneamiento por habitante en la cuenca vertiente	E	Disminución	m3/s y Hab	Anual
		CV5. Descarga del sistema de saneamiento de la cuenca vertiente en relación a las descargas globales del sistema	E	Disminución	%	Anual

Tabla 28.- Indicadores de Respuesta relacionados con el sistema de saneamiento.

Elemento	Objetivo	Indicador		Tendencia deseada	Unidad de medida	Periodicidad
Sistema de Saneamiento	Incorporación de sistemas de drenaje urbano sostenible en el sistema de saneamiento	SS5. Número de sistemas de drenaje urbano sostenible integrados en el sistema de	R	Aumento	Número DSU	Quinquenal
	Cuantificación de la efectividad de las medidas de control de caudales en origen	SS6. Caudales incorporados a la red de alcantarillado	R	Disminución	dam3/año	Anual
	Detección de los caudales incorporados en la red que reciben tratamiento	SS7. Caudales incorporados a EDAR a través de red de colectores	R	Aumento	dam3/año	Anual
Ciclo integral del agua (CC)	Cuantificar la mejora en la eficiencia energética del ciclo integral del agua por la gestión integral de las aguas de lluvia.	CC1. Consumo energético en el ciclo integral del agua (bombeos, tratamiento y depuración)	R	Disminución	kW/año	Anual
	Cuantificar la aportación de la gestión de las aguas de lluvia a las políticas de adaptación al cambio climático.	CC2. Emisiones gases de efecto invernadero por aplicación SUDS	R	Disminución	Kg CO2/año	Anual
	Cuantificar la reducción del consumo de agua potable por reutilización de aguas de lluvia	CC3. Consumo de agua potable	R	Disminución	hm3/año	Anual

Fuente: Elaboración propia.

En relación a los indicadores relacionados con la capacidad de almacenamiento, la Tabla 29 recoge una comparativa de las distintas normativas estatales e internacionales para el cálculo del volumen de almacenamiento específico. Aplicando los valores de las distintas normativas a cada cuenca urbana se obtendrá un diagnóstico preliminar sobre la capacidad de almacenamiento de dicho sistema.

Tabla 29.- Volumen de almacenamiento específico necesario en las cuencas urbanas según distintas normativas nacionales e internacionales.

Normativa	Criterios de diseño en relación a la protección del medio receptor	Criterios de diseño en relación a la protección de los procesos de tratamiento de las EDAR	Volumen de almacenamiento específico (m3/ha neta)
Normativa Alemana ATV-A128	% de captura de un contaminante: Máxima DQO vertida por DSU = DQO vertida por sistema separativo. Volúmenes de almacenamiento a lo largo de la red	Criterio de Dilución: Qmax de entrada = Qmax de tratamiento de sus líneas (2 ó 3 veces el caudal medio en tiempo seco)	Desde 5-10 m^3/ha neta hasta 30-40 m^3/ha neta
Normativa Gran Bretaña BS:8005	Límite máximo de DSU/año. Los volumenes de almacenamiento se disponen al final de la red y cuentan con tratamiento equivalente al primario. Se siguen metodologías para asegurar los objetivos de calidad en el medio receptor (Urban Pollution Management, FWR, 1998)	Criterio de Dilución: Qmax entrada = 6 o 7 veces Caudal residual medio en tiempo seco	
Normativa de diseño de colectores UNE-EN-752	Capacidad de retención según el grado de protección requerida. Señala la necesidad de incoporar un almacenamiento o tratamiento parcial del caudal generado que puede situarse en la EDAR o dentro del sistema de alcantarillado. Los aliviaderos deben tener filtros o tamices para reducción de la descarga de flotantes	Criterio de Dilución: Vertido de caudales permitido de 5 a 8 veces el caudal residual medio en tiempo seco	10 a 30 l/s.ha neta drenada sin especificar duración de la lluvia
Recomendaciones federales de 1977, Suiza	Volumen calculado en función de un índice de sensibilidad del medio receptor natural	Criterio de Dilución: Qmax de entrada = 5 ó 6 veces el caudal medio en tiempo seco (superior al caudal máximo de tratamiento de la EDAR)	13 m3/ha neta
Normativa Austriaca ÖWWW Regebatt 19	Lluvia crítica de 15l/(s.ha) neta o de 30l/(s.ha) si el medio es muy sensible.		Mínimo de 15m3/ha neta: en medios vulnerables 20 a 26 m3/ha para depósitos fuera de línea y 45m3/ha para depósitos en línea. Mínimo de almacenamiento total: 50 - 100 m3
Normativa Francesa F.N.D.A.E. nº6	Retener el 90% de la DBO movilizada en tiempo de lluvia a través de la retención de la lluvia crítica definida en base a un análisis regional de la contaminación movilizada.	Criterio de Dilución: Qmax entrada = 3 o 4 veces el caudal medio en tiempo seco	20-30 m3/ha neta

Tabla 28 (continuación). Volumen de almacenamiento específico necesario en las cuencas urbanas según distintas normativas nacionales e internacionales.

Normativa	Criterios de diseño en relación a la protección del medio receptor	Criterios de diseño en relación a la protección de los procesos de tratamiento de las EDAR	Volumen de almacenamiento específico (m3/ha neta)
Prescripciones Holandesas - Ábaco de Kuiper	Entre 7 y 10 descargas anuales variando en función de la naturaleza del medio receptor. Volumen de almacenamiento específico, que inlcuye la capacidad de almacenamiento de la red y los depósitos, es calculado en función del caudal de vaciado del depósito y del número de reboses permitidos		Mínimo de 20 m3/ha neta. Valor habitual: 70m3/ha neta de almacenamiento y 0,7 mm/h de caudal de vaciado
Prescripciones técnicas de Galicia ITOHG	Asegurar al menos uno de los dos criterios siguientes: limitar el número de DSU al medio receptor en el año medio a un valor entre 15 y 20. Limitar el porcentaje de agua vertida a un 10-15% del volumen total de lluvia neta de la cuenca.	Criterio de Dilución: Qmax de entrada = caudal máximo de tratamiento (3 veces el caudal medio residual en tiempo seco). No se permiten alivios con tratamiento primario simple - construcción de líneas auxiliaries de retención o tratamiento en la EDAR	60-110 m3/ha neta
Normas para redes de saneamiento del Canal de Isabel II	DSUs permitidos cuando el caudal sea superior a 5 veces el caudal punta de aguas resudiales en tiempo seco de forma provisional y mediante autorización expresa de la Confederación Hidrográfica del Tajo	Criterio de Dilución: Qmax entrada de 9 veces el caudal medio para un coeficiente punta de 1,9	Para una duracíon de la lluvia de 20 - 30 minutos: 15 - 21 m3/ha
Antigua Confederación Hidrográfica del Norte (1995)	Evitar vertido para lluvia de 10l/(s.ha) y 20 minutos de duración.	Criterio de Dilución: Q max EDAR = 6,7 veces el caudal medio en tiempo seco, exigiendo un sobredimensionamiento del pretratamiento y tratamiento primario.	4m3/ha en zonas de población densa y 9m3/ha en zonas de población dispersa. Con modelización numérica: entre 20 y 40 m3/ha neta.
OMECGIA - Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua	Tanques de tormenta: volumen mínimo correspondiente a una lluvia de 20 minutos con intensidad de 15l/s.ha impermeable. (18m3/ha neta) Depósitos de laminación: Según método de cálculo del Servicio del Ciclo Integral del Agua con periodo de retorno de 50 años.		

Fuente: Elaboración propia basada en (Puertas Agudo et al., 2008).

6. Metodología para el cálculo de los indicadores hidráulicos.

Para realizar el diagnóstico hidráulico del funcionamiento del sistema de saneamiento se propone una metodología inspirada en la normativa vigente en Estados Unidos, desarrollada en 1999 por la Agencia de Protección Ambiental, EPA por sus siglas en inglés (Environmental Protection Agency). Así, en el capítulo 3 de la citada guía, denominado "Caracterización inicial del sistema, análisis de los datos existentes y trabajo de campo" plantea como objetivos prioritarios la determinación del nivel actual de conocimiento y comprensión del sistema de saneamiento, de los medios receptores y de las condiciones de operación del sistema de saneamiento, así como la identificación de los impactos de las descargas de los sistemas unitarios de saneamiento y de los datos necesarios para la definición de un programa de actuación. Dichos objetivos coinciden con la delimitación del alcance del presente estudio.

El objetivo es la obtención de un balance básico de flujos del sistema de colectores principales del sistema. Dicho diagrama permitirá realizar de manera sencilla un diagnóstico preliminar del funcionamiento del sistema de saneamiento en tiempos de lluvia. Dicho diagnóstico preliminar deberá se validado con una posterior modelización matemática del sistema de saneamiento y una calibración con datos medidos en muestreo para poder obtener la información necesaria para un diseño en detalle de las infraestructuras.

Para ello se divide la superficie total del sistema de saneamiento en cuencas vertientes en las que se caracterizan el colector, los distintos usos del suelo, los medios receptores y otros parámetros que necesarios para conocer el funcionamiento del sistema de saneamiento de manera simplificada.

Una vez definidas las cuencas vertientes se calculan en cada una de ellas las descargas del sistema unitario, como diferencia entre el caudal máximo aportado por la cuenca vertiente al sistema de saneamiento en tiempo de lluvia y la capacidad hidráulica del sistema para conducir dicho caudal máximo a la EDAR:

$DSU = Q_{max} - Q_{red}$

Donde:

DSU (m^3/s) es la descarga del sistema unitario en una cuenca vertiente

$Q_{max}(m^3/s)$ es el caudal máximo aportado por la cuenca vertiente en tiempo de lluvia

$Q_{red}(m^3/s)$ es la capacidad hidráulica del colector principal de la cuenca vertiente

De esta forma se van realizando los cálculos en cada cuenca vertiente de manera acumulativa de aguas arriba a aguas abajo, de los colectores de menor capacidad a los colectores principales terminando en la Estación depuradora que sirve a dichas cuencas vertientes. El Anejo 1 detalla la metodología de cálculo así como las hipótesis asumidas para la estimación de las descargas de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia.

Los resultados obtenidos se plasman en un diagrama básico de flujos para cada zona servida. Dicho diagrama ofrece un orden de magnitud de las descargas de los sistemas de saneamiento unitarios, identificando las cuencas vertientes más problemáticas del sistema que deberán recibir atención prioritaria en los planes de actuación.

Finalmente, los indicadores desarrollados a nivel de cuenca vertiente permiten establecer una jeraquía de cuencas vertientes dentro de una misma cuenca urbana por prioridad de intervención. Por una parte, en relación a los puntos de alivio, se calcula el porcentaje de alivios directos por cuenca vertiente (CV1) así como el número de puntos de alivio por superficie neta impermeabilizada (CV2). Por otra parte, se analiza la relación entre el caudal vertido y la superficie total impermeabilizada de la cuenca vertiente (CV3) para detectar las cuencas en las que las medidas de permeabilización serían más recomendables. Asimismo se analiza la relación entre los caudales vertidos por cada cuenca y la cantidad de habitantes (CV4) como medida de la presión que ejerce la población de dicha cuenca al sistema. Finalmente se estudia el porcentaje de descarga de cada cuenca en relación con las descargas totales del sistema (CV5) focalizando la atención en las cuencas vertientes con un problema cuantitativo de mayor relevancia.

El cálculo de estos indicadores permite realizar un análisis del funcionamiento en tiempo de lluvia de cada cuenca vertiente del sistema de saneamiento, asignando una puntuación global a cada una. Esta jerarquización en relación a unos indicadores objetivos abre la posibilidad de catalogación de las cuencas vertientes que componen el sistema de saneamiento en base a la sostenibilidad de la gestión del sistema de saneamiento en tiempo de lluvia y el consecuente impacto de cada cuenca en los ecosistemas acuáticos receptores.

Así, se crea una matriz multicriterio de apoyo en la toma de decisiones, con el objetivo de priorizar las cuencas en las que resulta más efectivo y eficaz implementar intervenciones de mejora de la gestión de las aguas pluviales. Para ello se puntúa cada cuenca vertiente del 0 al 10, estableciendo una mayor puntuación a un peor resultado en el indicador de acuerdo con la siguiente relación lineal:

$$Puntuación\,indicador = \frac{Valor\ indicador\ en\ la\ cuenca * 10}{Valor\ máximo\ total\ del\ indicador}$$

Una vez homogeneizados en una misma escala cada indicador de cada cuenca se otorga un peso a cada indicador obteniendo una puntuación final en cada cuenca vertiente como suma de las puntuaciones ponderadas de cada indicador según la fórmula:

$$Puntuación\ global = \sum Peso\ ponderado\ Indicador * Puntuación\ Indicador$$

7. Conclusiones

Basándose en el estado del arte, en este capítulo se expone una propuesta metodológica para la definición de un sistema de indicadores siguiendo un análisis Presión-Estado-Respuesta bajo un enfoque integral que considera la gestión de las aguas de lluvia en el marco de las complejas interacciones del sistema urbano.

Como resultado del análisis se proponen77 indicadores urbanosde carácter matricial organizados siguiendo las distintas componentes del sistema urbano (Medio Receptor (20 indicadores), Cuenca Urbana (25 indicadores) y Sistema de Saneamiento (32 indicadores)). Se define para cada indicador la tipología (Presión, Estado, Respuesta), el objetivo específico, la unidad de medición, la tendencia deseada de evolución y la periodicidad de seguimiento recomendada.

Se concluye que la metodología propuesta permite la definición de un sistema de indicadores que rebasa el propio sistema de saneamiento, incorporando elementos normativos, sociales, urbanísticos y económicos para la realización de un diagnóstico integral sobre el que definir un plan de actuaciones que resuelva la problemática de la gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos de una manera eficaz.

En el siguiente capítulo se realiza un estudio de caso calculando los indicadores propuestos y definiendo coherentemente un plan de actuaciones para la gestión integral de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza.

4. APLICACIÓN DE LOS INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD EN LA CUENCA URBANA DE ZARAGOZA.

1. Introducción.

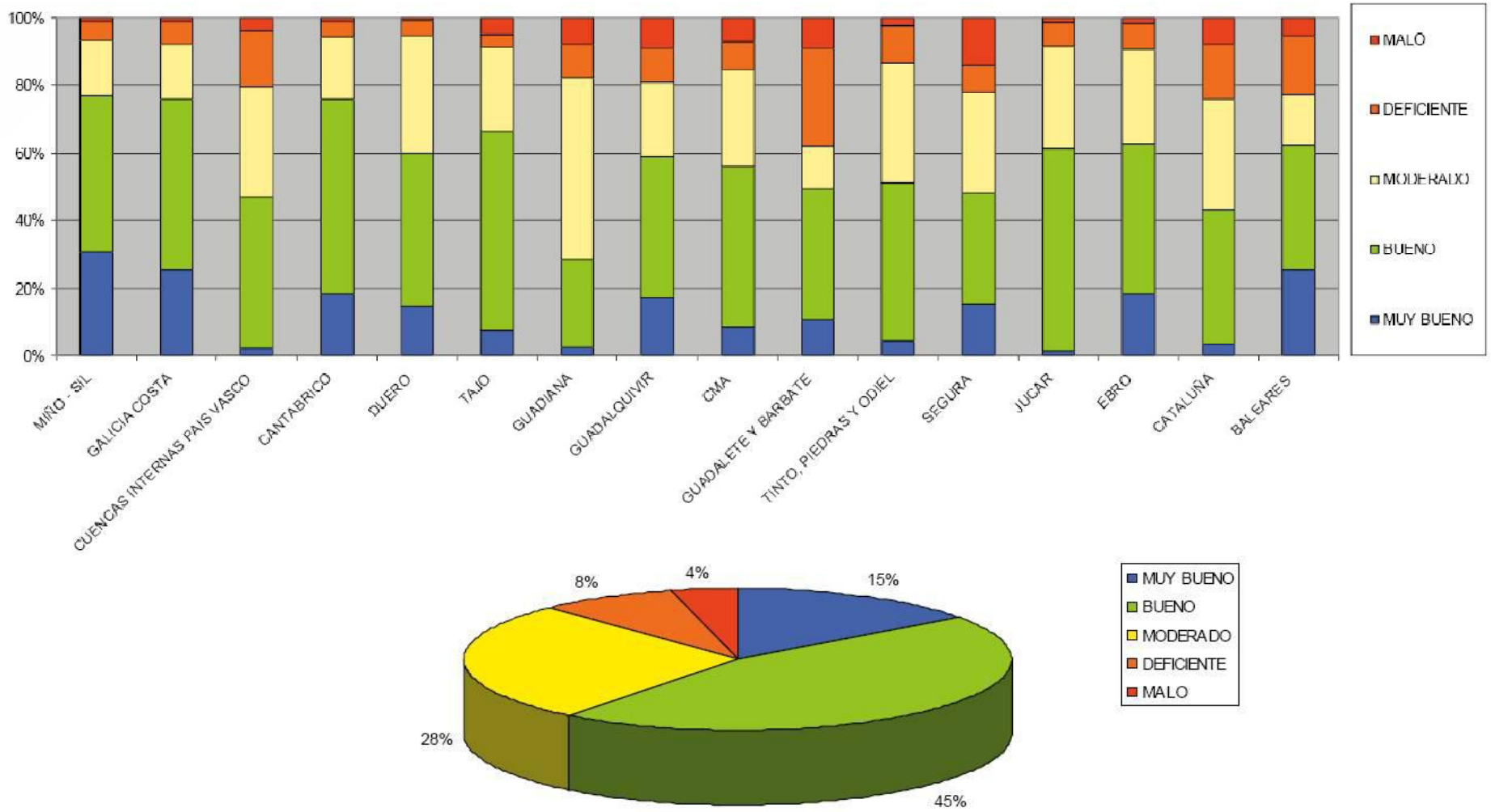
En España, el régimen pluviométrico es muy variable, pasando de estados de sequía a fuertes precipitaciones que en pocas horas alcanzan valores superiores al promedio. La gran desproporción entre los caudales ordinarios y extraordinarios de algunos ríos, en un breve plazo de tiempo, y los graves daños que estos producen, hace que el problema de las inundaciones constituya el fenómeno natural con mayor impacto económico y social en España. Aunque, en su origen, las crecidas son un fenómeno natural eminentemente físico e hidrológico (respuesta de caudales altos a las fuertes tormentas), en su desarrollo sobre zonas donde hay actividades humanas se convierten en un problema territorial, con amplias repercusiones socioeconómicas ("Evaluación de inundaciones. Proteccíon civil," 2015).

Los daños por inundaciones se estiman en total en una media de 800 millones de euros anuales (Consorcio de Compensación de Seguros, 2013). A modo de ejemplo, cabe destacar que sólo en bienes asegurados, en el período 1971-2012, según las estadísticas del Consorcio, el 42,9% de los expedientes tramitados han sido debidos a daños por inundaciones, que han supuesto el 60,3% del total de las indemnizaciones, las cuales, de media, suponen más de 130 millones de euros cada año.

El riesgo de inundaciones afecta prácticamente a toda la geografía española, aunque el territorio más castigado se centra en las costas mediterráneas y cantábricas y en los espacios fluviales de los grandes ríos peninsulares.

Por otra parte, como muestra la Figura nº 10, el 40% de las masas de agua superficiales de España tienen un estado ecológico inferior a bueno. Además el 31% de las masas de agua subterráneas están en mal estado químico (*Informe de actividades del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente,* 2010).

Figura nº 10.- Estado de las masas de agua superficiales en España.



Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2010).

Para la consecución del buen estado de todas las masas de agua, objetivo último de la Directiva Marco del Agua 60/2000/CEE, serán necesarias medidas que minimicen las presiones sobre los ecosistemas acuáticos entre otras, las debidas a las descargas directas de los sistemas de saneamiento en episodios de lluvia.

En este sentido la iniciativa puesta en marcha por el MAGRAMA a través del Formulario 5' que se revisa en el Capítulo 2limita la información que debe entregar cada entidad competente a la caracterización del sistema de saneamiento, excluyendo la información relativa a las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales así como la relativa a los mapas de inundación. No se incluye tampoco, o al menos de una manera explícita, ninguna información relativa a la cuenca urbana ni al medio receptor en la caracterización de la problemática.

Así, una línea de trabajo pertinente y necesaria en España es la realización de un diagnóstico basado en indicadores que consideren las interrelaciones entre la cuenca urbana, el sistema de saneamiento y el medio receptor, lo que supone un avance hacia la consecución de una gestión integral de las aguas de lluvia en España.

La ciudad de Zaragozase localiza en el espacio fluvial de uno de los grandes ríos peninsulares, el río Ebro. Se enfrenta por tanto a un gran reto tanto en la gestión de inundaciones como en la consecución del buen estado de sus masas de agua. Además tiene un tamaño medio dentro de las ciudades de España. Se considera por tanto pertinente la realización del estudio de caso en la ciudad de Zaragoza, del que se podrán inducir algunas líneas generales de actuación para la consecución de una gestión integral de las aguas de lluvia en España.

Siguiendo la metodología propuesta en el capítulo 3, se definen a continuación los indicadores de sostenibilidad del Medio Receptor, la Cuenca Urbana y el Sistema de Saneamiento de la ciudad de Zaragoza. En base a dichos indicadores se realizará un diagnóstico integral de la gestión de las aguas de lluvia y la consecuente definición de unas líneas de actuación estratégicas para la resolución de la problemática en la cuenca urbana de Zaragoza.

2. Fuente de datos

Se realiza a continuación un mapeo de las fuentes de información consultadas para la caracterización de la problemática de gestión de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza. La Tabla 30 recoge las entidades de las que se ha obtenido la información necesaria para la caracterización y diagnóstico que se detalla en el presente capítulo. Dichas entidades están ordenadas por el nivel en el que desarrollan su ámbito competencial (municipal, autonómico o Estatal). En el caso de la Confederación Hidrográfica del Ebro, ésta desarrolla sus funciones a nivel de demarcación hidrográfica. No obstante, dado que depende directamente del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) se clasifica como entidad de ámbito estatal. En caso de que se hayan mantenido reuniones con dichas entidades para contrastar o aclarar información, se recoge el número de reuniones mantenidas.

La mayoría de las reuniones se mantuvieron con organismos con competencias directas o indirectas en la gestión del sistema de saneamiento y no así de la cuenca urbana y del medio receptor. Dado que, como se verá más adelante, la gestión de las aguas de lluvia no está integrada dentro de las políticas municipales de la ciudad de Zaragoza, el esfuerzo realizado para la definición del diagnóstico se concentra en conocer el funcionamiento del sistema de saneamiento.

Tabla 30.- Fuente de datos para la caracterización de la gestión de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza

Nivel	Entidad	Área	Departamento	Nº Reuniones
MUNICIPAL	Ayuntamiento de Zaragoza	Urbanismo, infraestructuras, equipamientos y vivienda	Conservación y explotación de redes e infraestructuras	7
			Planificación y Desarrollo de Infraestructuras	0
			Ciclo integral del Agua	2
			Planificación y Diseño urbano - Servicio de Ingeniería de Desarrollo Urbano	4
		Cultura, Educación y Medio Ambiente	Agencia de Medio Ambiente y Sostenibilidad	1
			Parques y jardines	0
		Agencia Municipal Tributaria	Tasas y Precios Públicos del Servicio de Gestión Tributaria	3
		Asesoría Jurídica Municipal	Servicios jurídicos	0
		Economía y Hacienda	Organización Municipal, Eficiencia Administrativa y Relaciones con los Ciudadanos	0
		Ciencia y Tecnología	Ciudad inteligente	0
		Servicios públicos y movilidad	Movilidad urbana	0
		Participación ciudadana y régimen interior		0

Tabla 29 (continuación). Fuente de datos para la caracterización de la gestión de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza.

Nivel	Entidad	Departamento	Nº Reuniones
MUNICIPAL	Ecociudad Zaragoza	Empresa pública con competencias de gestión del Sistema de saneamiento	2
	ZINAEE - Cluster Urbano para el uso eficiente del agua en la ciudad	Plataforma público-privada	2
	Zeta Amaltea	Empresa privada	2
	Ebronautas	Empresa privada - uso recreativo	2
	Red de Agua Pública de Aragón (RAPA)	Asociación sin ánimo de lucro	2
AUTONÓMICO	Instituto Aragonés del Agua		0
ESTATAL	Confederación Hidrográfica del Ebro	Calidad del Agua	2
	Instituto Geológico y Minero de España	Delegación Aragón	2

Fuente: Elaboración propia.

3. Área de estudio

La ciudad de Zaragoza se sitúa a una cota de 217 m.s.n.m. en el centro de la depresión del Ebro coincidiendo con la desembocadura en este río de dos de sus afluentes: los ríos Gállego y Huerva. En referencia a España, como muestra la Figura nº 11la ciudad se encuentra en el interior del cuadrante nororiental de la península, delimitado por cuatro de las más importantes ciudades del país: Madrid, Bilbao, Barcelona y Valencia, todas ellas prácticamente equidistantes de Zaragoza a una distancia de 300 – 320 km.

Figura nº 11.- Mapa de situación de Zaragoza

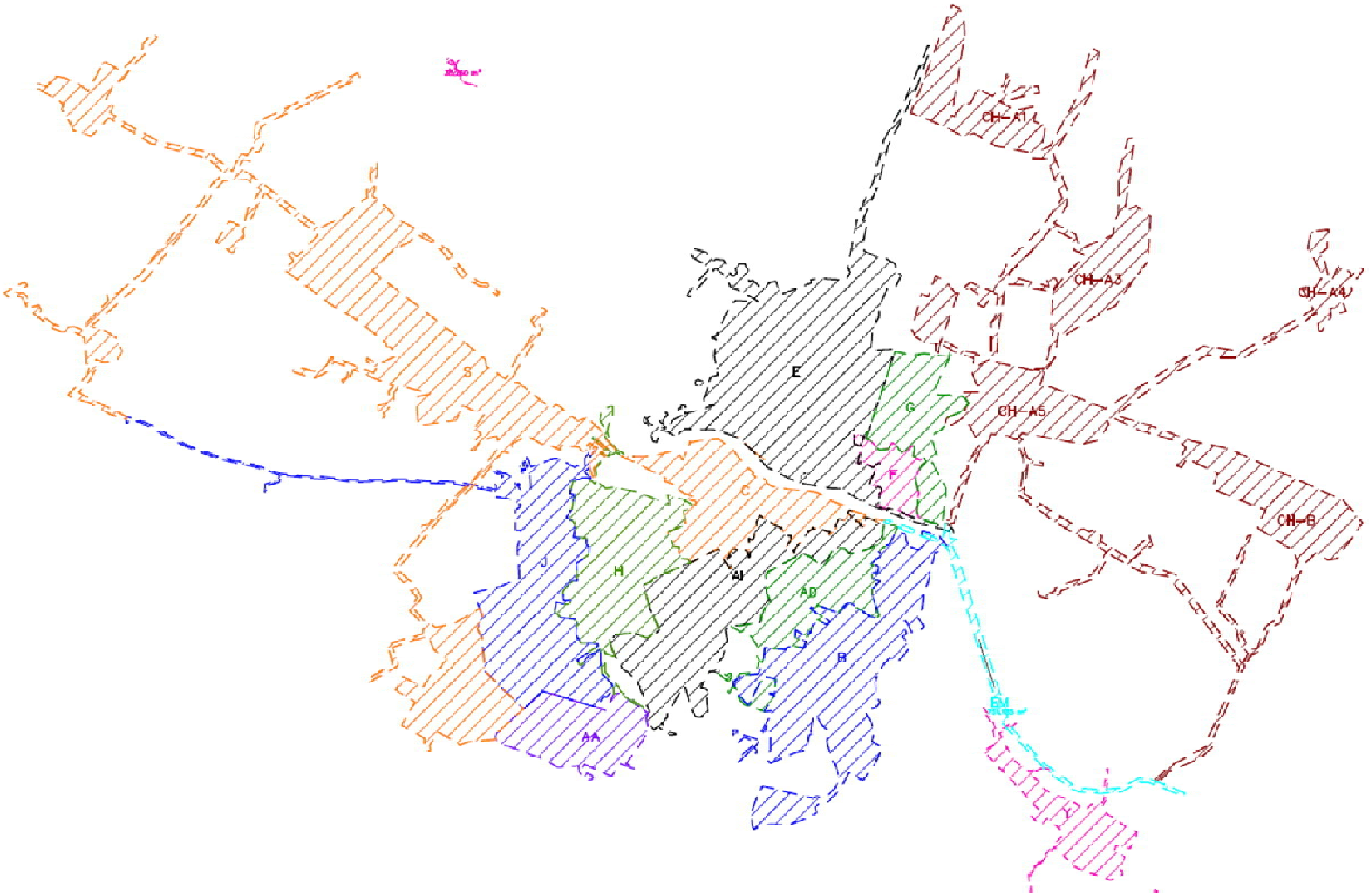
Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza (2009).

La caracterización y propuestas de actuación que se detallan a continuación utilizan como unidades de referencia espacial las cuencas vertientes del sistema de saneamiento. Así, el análisis y caracterización de los distintos elementos (medio receptor, cuenca urbana y sistema de saneamiento) se concreta en las cuencas vertientes que son las unidades físicas sobre las que se implementarán las propuestas de actuación. La Figura nº 12 muestra las cuencas vertientes del sistema de saneamiento dentro del área de estudio.

Cabe destacar que en la ciudad de Zaragoza no se ha puesto en marcha ningún plan de actuaciones para la gestión integral de las aguas de lluvia. Por tanto, los indicadores de respuesta, que miden los esfuerzos en términos de políticas ambientales y de recursos naturales para la resolución de la problemática, no son de aplicación en el presente dia-

gnóstico. Así, se determinarán únicamente los indicadores de presión y estado, mientras que para aquellos ámbitos definidos por indicadores de respuesta (Marco Institucional, Marco Normativo, Herramientas económicas y Participación Ciudadana) se definirán las líneas de actuación basadas en la caracterización.

Figura nº 12.- Cuencas vertientes del sistema de saneamiento de la ciudad de Zaragoza incluidas dentro del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia basada en datos del Departamento de Explotación de redes del Ayuntamiento de Zaragoza.

4. Indicadores de sostenibilidad del medio receptor de la ciudad de Zaragoza.

A continuación se detalla la caracterización del medio receptor y se calculan los indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza.

Para conocer tanto el Estado como las Presiones e Impactos se sigue la metodología establecida por la DMA 60/2000/CEE. Los artículos 5, 6 y 7, recogidos en la Instrucción de Planificación Hidrológica, detallan la metodología de estudio de presiones e impactos sobre cada masa de agua, con el fin de definir el riesgo de incumplimiento de los objetivos marcados. Los resultados de aplicación de esta metodología se recogen en el documento IMPRESS, que se publica en todas las Confederaciones Hidrográficas de España. Así, el análisis de las presiones ejercidas sobre cada masa de agua es la base para la definición de un Plan de Gestión de la cuenca enfocado a disminuir dichas presiones como forma de mejorar el estado de las masas de agua.

Cabe destacar el diferente grado de definición de las presiones a la hora de aplicar la metodología establecida por la DMA 60/200/CEE. La Tabla 31muestra las presiones analizadas en la definición del informe IMPRESS en las cuencas internas de Cataluña, cuyo organismo competente es la Agencia Catalana del Agua de manera comparativa con las analizadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro, que abarca las cuencas internas de Cataluña.

Como se ve, en relación a las presiones debidas a fuentes de contaminación puntual, la Agencia Catalana del Agua (ACA) desglosa las mismas incluyendo los vertidos de descargas de los sistemas unitarios (DSU) y distinguiéndolos de los vertidos biodegradables con sistema de saneamiento (EDAR). De igual manera desglosa las presiones por fuentes de contaminación difusa de los usos urbanos. Así, en el análisis de presiones del informe IMPRESS 2005 publicado por ACA se afirma que “las presiones que comprometen más seriamente el cumplimiento de los objetivos de la Directiva son las derivaciones por minicentrales, el efecto conjunto de los vertidos biodegradables y las descargas de sistemas unitarios” y cita que “las DSU provocan un riesgo alto de incumplimiento de los objetivos de la Directiva Marco del Agua en el 11% de las masas de agua”. Basándose en este diagnóstico, y con el objeto de alcanzar los objetivos de la

DMA, la Agencia Catalana del agua redactó un Plan de control anti-DSU para minimizar los efectos de los vertidos de los sistemas de saneamiento en tiempos de lluvia.

Tabla 31.- Presiones analizadas en la definición del informe IMPRESS por la Agencia Catalana del Agua y la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Fuentes de contaminación	CHE	ACA
Puntuales	Vertidos biodegradables urbanos e industriales	Vertidos biodegradables con sistema de saneamiento (EDARs)
		Vertidos biodegradables industriales
	Vertidos de núcleos no saneados	Vertidos biodegradables no saneados
		Vertidos de descargas de sistemas unitarios (DSUs)
		Vertidos industriales no biodegradables
	Por autorización de sustancias peligrosas	
	Por autorización Ambiental Integrada (IPCC)	
Difusas	Usos urbanos	Vertederos de residuos sólidos urbanos
		Vertederos de residuos sólidos mixtos (industriales y urbanos)
		Usos del suelo urbanos
		Vertidos de lodos de las estaciones depuradoras de aguas residuales
		Suelos contaminados o potencialmente contaminados
	Vías de comunicación	Vías de comunicación
	Zonas mineras	Zonas mineras
	Usos ganaderos	Deyecciones ganaderas
	Usos agrícolas	Excedentes de nitrógeno de la agricultura y ganadería
		Usos del suelo agrícolas
		Escombros salinos

Fuente: Elaboración propia basada en datos de la Agencia Catalana del Agua.

Como se ve, el análisis pormenorizado de las presiones realizado por la ACA facilita un diagnóstico de base sólido sobre el que definir un plan de medidas más efectivo, con unos objetivos claros de reducción de las presiones e impactos.

1. Las masas de agua superficiales de la ciudad de Zaragoza

1. Presión sobre las masas de agua superficiales por la descarga de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia.

En la ciudad de Zaragoza no se ha llevado a cabo ningún programa de muestreo por lo que se desconocen las cargas de contaminación de los reboses de los sistemas unitarios (indicadores de Presiones sobre medio receptor EE1 y EE2). Se toman de referencia los datos resultantes del Programa nacional para la medida de la calidad de las descargas de sistemas de alcantarillado unitario a los medios receptores (PROMEDSU) que ofrece los resultados más precisos sobre caracterización de las descargas de sistemas unitarios

en las ciudades españolas. Con el fin de analizar la posibilidad de extrapolar dichos datos a la cuenca urbana de Zaragoza, la Tabla 32 muestra las principales características de dichas cuencas urbanas en comparación con la cuenca urbana de Zaragoza.

Tabla 32.- Comparación características cuencas urbana de Zaragoza con cuencas urbanas PROMEDSU

	Sevilla	**Madrid**	**Barcelona**	**Vitoria**	**Valencia**	**Zaragoza**
Precipitación media anual (mm)	534	436	640	779	454	318
Días de lluvia	52	63	65	103	44	50
Días de tormenta	8	16	22	21	17	21
Número de Habitantes	700000	3207247	1611822	241386	792303	698933
Superficie urbana (Km^2)	1466,62	4124,29	1505,96	1068,06	1134,66	2289,64

Fuente: Elaboración propia basada en datos proyecto AUDES (2012).

Como muestra la Tabla 32 las características principales en la determinación de los reboses del sistema de saneamiento unitarios de la cuenca urbana de Zaragoza se encuentran dentro del rango estudiado en las cuencas urbanas incluidas en el PROMEDSU. Así se tomarán como válidas, en una primera aproximación, las mediciones de las cargas de contaminación resultantes de dicho programa que, de acuerdo el sistema de indicadores establecido, constituirán en indicador denominado EE3. La Tabla 33 muestra las cargas de contaminación típicas de las aguas residuales urbanas, las aguas de escorrentía superficial, los reboses de alcantarillados unitarios, el efluente de la Estación Depuradora de Aguas residuales y los valores límite marcados por la Normativa 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Tabla 33.- Resultado de la aplicación a la ciudad de Zaragoza del indicador EE1 cargas de contaminación de los reboses de los sistemas unitarios de saneamiento.

Parámetro	Agua residual urbana (mg/l) CEDEX	Agua residual urbana (mg/l) - Zaragoza	Escorrentía superficial(mg/l) CEDEX	Rebose alcantarillado unitario PROMEDSU (mg/l)	Efluente EDAR(mg/l) CEDEX	Efluente EDARs (mg/l) - Zaragoza	Normativa 91/271/CEE (mg/l)
SS	220	293	190	505	35	20	35
DBO5	220	261	11	270	25	11,2	25
DQO	500	562,8	85	582	125	81,5	125
N Amoniacal	25		1,45	12			
N Total	40		3,2	32	10-15		10
P total	8	6,37	0,34	7		1,47	2
Pb	0,11		0,21	0,12			
Zn	0,43		0,3	0,35			
Aceites	100		0,4				
CF	10^6-10^7/100ml		6430/100 ml				

Fuente: Elaboración propia basada en datos de (Puertas Agudo et al., 2008), Programa PROMEDSU, Web del MAGRAMA y datos del Departamento del Ciclo Integral del Ayuntamiento de Zaragoza.

Como se ve en la Tabla 33las cargas de contaminación de las aguas residuales, medidas a la entrada de las Estaciones Depuradoras, son ligeramente superiores a las cargas medias del estudio seleccionado (Puertas Agudo et al., 2008). No obstante, las concentraciones de SS, DBO5, DQO y P de los efluentes de las EDAR de la ciudad de Zaragoza son menores que las concentraciones típicas caracterizadas, cumpliendo además la normativa de vertidos 91/271/CEE sobre tratamiento de las aguas residuales. Este dato apunta a unas cargas de contaminación de las aguas residuales elevadas que aumentarán en los reboses del sistema unitario, mayoritario en la ciudad de Zaragoza, por el proceso de contaminación de las aguas por lavado de la cuenca (escorrentía superficial) unido al fenómeno de la resuspensión de sedimentos. Además, el mantenimiento del sistema se ha reducido de 2 veces al año a una vez al año por lo que cabe esperar una mayor cantidad de sedimentos depositados en la red y, por tanto, una mayor contaminación. Esto supondrá una presión significativa sobre los medios receptores. No obstante, al no tener datos de medición en la ciudad de Zaragoza, se tomarán como referencia las mediciones resultantes del programa PROMEDSU que apuntan a unas cargas muy elevadas de contaminación en los reboses, superiores a las cargas de entrada en las Estaciones Depuradoras y a los valores de vertido permitidos por la normativa vigente.

Por otra parte, para determinar el indicador EE3 Presión sobre masas de agua receptoras por vertidos de descargas de sistemas unitarios y EE8 Impacto sobre masas de agua receptoras por vertidos de descargas de sistemas unitarios se analiza el documento IMPRESS de la Confederación Hidrográfica del Ebro que analiza las presiones e impactos sobre cada masa de agua de la Demarcación Hidrográfica del Ebro. Así, la Tabla 34 resume el análisis de presiones de las masas de agua de la cuenca urbana de Zaragoza recogido en el informe IMPRESS 2012, el último realizado por la Confederación Hidrográfica del Ebro a la fecha de redacción de la presente tesis.

Tabla 34.- Resultado de la aplicación en la ciudad de Zaragoza del indicador EE3 Presión y el indicador EE8 Impacto sobre las masas de agua superficiales.

PRESIONES	115 - Huerva	452 - Ebro del Jalón al Huerva	453 - Ebro del Huerva al Gállego	454 - Ebro del Gállego hasta Ginel	426 -Gállego
Fuentes puntuales de contaminación	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Vertidos biodegradables urbanos e industriales	Nula	Alta	Alta	Alta	Alta
Vertidos de núcleos no saneados	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Por autorización de sustancias peligrosas	Nula	Alta	Nula	Nula	Nula
Por autorización Ambiental Integrada (IPCC)	Nula	Alta	Nula	Alta	Alta
Fuentes difusas de contaminación	NULA	NULA	ALTA	NULA	BAJA
Usos agrícolas	Nula	Nula	Nula	Nula	Baja
Usos ganaderos	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula
Usos urbanos	Nula	Nula	Alta	Nula	Nula
Zonas mineras	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula
Vías de comunicación	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula
Alteración morfológica	BAJA	NULA	MEDIA	ALTA	MEDIA
Longitudinal (Encauzamientos, canalizaciones)	Baja	Nula	Nula	Alta	Media
Transversal (presas, azudes)	Baja	Nula	Media	Nula	Nula
Alteración del régimen de caudales	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Extracciones de agua	Alta	Nula	Nula	Nula	Nula
Regulación por Embalse	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Uso del suelo en márgenes	NULA	NULA	NULA	NULA	NULA
IMPACTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	ALTO	MEDIO

Fuente: Elaboración propia basada en datos del Informe IMPRESS (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2012).

Como se ve en la Tabla 34, las fuentes de contaminación puntual suponen una presión alta en todas las masas de agua superficiales de la cuenca urbana de Zaragoza. Por una parte, una de las fuentes de contaminación puntual es la ejercida por los vertidos de núcleos no saneados.

La cobertura de las Estaciones Depuradoras del área que abarcan estas masas de agua es prácticamente total (del 98%) quedando muy pocos núcleos sin conexión al sistema de saneamiento. Así, una presión alta por los vertidos de núcleos no saneados que, como hemos visto anteriormente, incluye las descargas de los sistemas unitarios (DSU) muestra como, incluso en masas de agua con grandes caudales como es el río Ebro, al que se le presupone una alta capacidad de dilución de los vertidos y de autodepuración, los impactos por las descargas directas de los sistemas unitarios de saneamiento, que contienen altas cargas de contaminación, son muy importantes.

Además la presión por vertidos biodegradables urbanos e industriales también resulta Alta en todas las masas excepto el Huerva. Esta presión que incluye los vertidos y los bypass de las Estaciones depuradoras en tiempos de lluvia, es determinante en el río Ebro, que recibe los efluentes de las Estaciones depuradoras y en el río Gállego, en el que se concentra el desarrollo industrial de la cuenca. En relación a las fuentes de contaminación difusa la Tabla 34 muestra que la masa de agua 453 Río Ebro del río Huerva al río Gállego, que representa el tramo más extenso del río Ebro a su paso por la ciudad de Zaragoza, la presión de la contaminación difusa por usos urbanos es también ALTA.

En resumen, el diagnóstico realizado por el informe IMPRESS muestra como las masas de agua en la cuenca urbana de Zaragoza soportan una presión ALTA por fuentes puntuales de contaminación debidas, en gran parte, a vertidos no saneados como son las descargas directas de los sistemas unitarios de saneamiento, que conlleva un riesgo ALTO de incumplimiento de los objetivos de la Directiva Marco de Aguas.

2. Estado de las masas de agua superficiales de la ciudad de Zaragoza

En relación al estado de las masas de agua superficiales, la Tabla 35 recoge las masas de agua superficiales en la cuenca urbana de Zaragoza, su tipología y estado. De acuerdo con la nomenclatura establecida en el capítulo 3, el Estado ecológico de las masas de agua se corresponde con el indicador EE5.

Tabla 35.- Resultado de aplicación en la ciudad de Zaragoza del indicador EE5 de Estado de las masas de agua superficiales.

Código	Nombre	Tipología	Riesgo Incumplimiento objetivos DMA	Estado ecológico según condiciones			
				Biológicas	Físico-Químicas	Hidromorfológicas	Estado ecológico final
452	Río Ebro del río Jalón al río Huerva		Medio	Moderado	Moderado	Bueno	Moderado
453	Río Ebro del río Huerva al río Gállego	Gran eje en ambiente mediterráneo	Alto	Moderado	Moderado	Bueno	Moderado
454	Río Ebro del río Gállego al Río Ginel		Alto	Moderado	Moderado	Bueno	Moderado
426	Río Gállego desde el río Sotón hasta su desembocadura en el río Ebro	Eje mediterráneo continental poco mineralizados	Alto	Moderado	Muy Bueno	Muy Bueno	Moderado
115	Río Huerva desde la Presa de Mezalocha hasta su desembocadura en el río Ebro	Río mineralizado de baja montaña mediterránea	Alto	Deficiente	Moderado	Bueno	Deficiente

Fuente: Elaboración propia basada en datos del informe CEMAS 2013 (Confederación Hidrográfica del Ebro)

Como se ve en la Tabla 35 en la cuenca urbana de Zaragoza se encuentran cinco masas de agua superficial de distinta tipología, todas ellas con un estado inferior a bueno y con un riesgo Alto de incumplimiento de los objetivos de la Directiva Marco de Aguas (DMA 60/2000/CEE), excepto la masa de agua 452 Río Ebro entre el Río Jalón y el río Huerva cuyo riesgo de incumplimiento es Medio.

En relación al indicador EE6 Caudal mínimo en estiaje de los medios receptores, la Tabla 36 muestra los caudales medios de los tres ríos.

Tabla 36.- Aplicación a la ciudad de Zaragoza del indicador EE6 Caudal mínimo de los medios receptores en época de estiaje.

Datos series analizadas	**Ebro**	**Gállego**	**Huerva**
Años hidrológicos completos	96	14	34
Año inicio serie	1912	1973	1976
Año fin serie	2011	2006	2011
Caudal Medio Anual (m^3/s)	**Ebro**	**Gállego**	**Huerva**
Mínimo	72,38	2,73	1,18
Medio	229,428	12,345	3,155
Máximo	483,44	26,82	5,98
Caudal medio mensual (m3/s)			
Julio	63,67	4,27	1,08
Agosto	42,77	3,34	1,1
Septiembre	57,4	4,21	2,16

Fuente: Elaboración propia basada en datos del Anuario de Aforos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Como se ve en la Tabla 36 el caudal del Ebro es entre veinte y ochenta veces mayor que el caudal de los ríos Gállego y Huerva, que presentan caudales especialmente bajos en época de estiaje (meses de Julio, Agosto y Septiembre), en la que el río Gállego no superan los 5 m^3/s, quedando el río Huerva por debajo de los 2 m^3/s. Esto ofrece una estimación del grado de vulnerabilidad de ambos medios receptores, Gállego y Huerva, ante las descargas de los sistemas unitarios de saneamiento en tiempo de lluvia. En época de estiaje los caudales circulantes en ambos ríos son extremadamente bajos, siendo el impacto previsible de las descargas de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia alto.

3. Impacto sobre las masas de agua superficiales de la descarga de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia.

Con el objeto de profundizar en el diagnóstico general de impacto por vertidos del informe IMPRESS, se expone a continuación un análisis comparativo de indicadores de calidad en tiempo seco y en tiempo de lluvia aplicado a los medios receptores de la ciudad de Zaragoza. Este análisis complementaría la información que recogen los indicadores EE8 y EE9 relativos a la caracterización del impacto sobre el medio receptor, información no disponible en la actualidad. Por su parte, los indicadores EE10 y EE11 no son de aplicación a la ciudad de Zaragoza al no contar con zona costera.

La fuente de datos es el Sistema Automático de Información de la Calidad Ambiental (SAICA) y el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Ebro. La Tabla 37 muestra las estaciones de control de referencia para la obtención de datos.

Tabla 37.- Estaciones de control de los Sistemas Automáticos de Información y variables analizadas.

SAICA		Localizacion
909	Ebro en Almozara	Aguas arriba cuenca urbana de Zaragoza
905	Ebro en presa de Pina	Aguas abajo cuenca urbana de Zaragoza
919	Gallego en Villanueva	Aguas arriba cuenca urbana de Zaragoza
SAIH		
A011	Ebro en Zaragoza	Cuenca urbana de Zaragoza
A089	Pluviometro Gállego en Zaragoza	Gallego en su desembocadura en el Ebro

Fuente: Elaboración propia

Así, se dispone de datos del SAICA en dos puntos de medición: 909 – Ebro en Almozara, aguas arriba de la ciudad de Zaragoza, en la salida de la Estación Depuradora de La Almozara (Fuera de servicio desde el 8 de Abril de 2013), y 905 – Ebro en presa de Pina (en servicio), aguas abajo de la ciudad de Zaragoza. De los indicadores de calidad aportados por esta red se seleccionan la concentración de Oxígeno Disuelto (mg/l) y la concentración de Amonio total (mg/l), indicadores habitualmente utilizados en el análisis de los impactos de las descargas de los sistemas unitarios en los medios receptores.

Por último se dispone de datos de caudal medio diario y caudal quinceminutal ofrecidos por la estación de control A011 Ebro en Zaragoza. Ni el SAICA ni el SAIH dispone de estaciones en los tramos urbanos del río Gállego y del río Huerva, aportando únicamente datos de calidad del río Gállego en Villanueva, aguas arriba de la ciudad de Zaragoza. Para estudiar el impacto de las descargas en los medios receptores de la cuenca urbana de Zaragoza lo idóneo sería analizar, de manera preferente, el impacto en el río Huerva que es el de menor caudal o, de manera alternativa en el río Gállego y no así del río Ebro que presenta altos caudales y, por tanto, una mayor capacidad de dilución de los vertidos.

No disponer de datos en continuo en el tramo urbano del río Gállego y del río Huerva supone, por tanto, una limitación importante dado que el impacto por las descargas en estos ríos será previsiblemente mayor y, por tanto, más fácilmente identificable.

Por otra parte, la Tabla 38 resume las variables utilizadas para el análisis.

Tabla 38.- Variables utilizadas para el diagnóstico cualitativo

Variable	Unidad	Tipo de dato	Fuente	Estación de control
Precipitación	l/m^2	Precipitación acumulada diaria	SAIH	A089 Gállego en Zaragoza
Caudal	m^3/s	Caudal mínimo diario	SAIH	A011 Ebro en Zaragoza
Amonio	mg/l	Diferencia de Concentración máxima diaria aguas arriba y aguas abajo de Zaragoza	SAICA	909 Ebro en la Almozara y 905 Ebro en presa Pina
Oxígeno Disuelto	mg/l	Diferencia de Concentración mínima diaria aguas arriba y aguas abajo de Zaragoza	SAICA	909 Ebro en la Almozara y 905 Ebro en presa Pina

Fuente: Elaboración propia.

El diagnóstico preliminar trata de contrastar la hipótesis de la existencia de una relación positiva entre la precipitación y la variación de indicadores de calidad del medio receptor. Los indicadores seleccionados son la concentración de amonio y la concentración de oxígeno disuelto. En la actualidad en España el Reglamento de Dominio Público Hidráulico no incorpora estándares intermitentes de emisión. Así, los valores de referencia para medir los impactos son los umbrales en continuo. Aunque estos estándares no son los adecuados para medir los impactos las descargas de los sistemas unitarios de

saneamiento al ser los únicos disponibles en España serán los que se aplicarán en este estudio para diagnosticar el impacto de las descargas de los sistemas de saneamiento unitarios.

La Tabla 39 recoge los indicadores fisico-químicos utilizados por la Directiva Marco de Aguas para el diagnóstico del estado de las masas de agua del ámbito de estudio.

Tabla 39.- Umbrales para el diagnóstico del estado de las masas de agua según indicadores físico-químicos.

Parámetro (mg/l)	Cálculo	Límite Muy Bueno-Bueno	Límite Bueno-Moderado
Nitrato	Promedio anual	10	20
Fosfato	Promedio anual	0,15	0,3
Fósforo total	Promedio anual	0,06	0,12
Oxígeno disuelto	Mínimo anual	>7	>5
Amonio Total	Promedio anual	0,25	0,4
Nitrito	Promedio anual	0,1	0,15
DQO	Promedio anual	10	15

Fuente: Elaboración propia basada en datos del informe de la Control del Estado de las Masas de Agua Superficiales (CEMAS 2013, Confederación Hidrográfica del Ebro).

Tabla 40.- Concentraciones máximas permitidas de Cobre y Zinc en relación a la dureza del agua.

Sustancias preferentes (µg/l)		Dureza del agua (mg/l $CaCo_3$)			
		<10	10-50	50-100	>100
Cobre	Promedio anual	5	22	40	120
Zinc	Promedio anual	30	200	300	500

Fuente: Elaboración propia basada en datos del informe de la Control del Estado de las Masas de Agua Superficiales (CEMAS 2013, Confederación Hidrográfica del Ebro).

Como se ve en la Tabla 40, la DMA fija unos indicadores fisico-químicos para determinar los límites entre el estado muy bueno – bueno – moderado para cada tipo de agua.

Como se explica en el capítulo 3, el oxígeno disuelto es una variable resultante de complejas interacciones de procesos ecológicos/químicos/físicos por lo que se dará mayor peso en la interpretación al parámetro de amonio total, más representativo de los procesos vinculados a las descargas de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia.

Para detectar la variación de dichos indicadores, dadas las bajas aportaciones de la precipitación en relación al caudal circulante por el río Ebro, el estudio se acota al periodo de estiaje, establecido por las condiciones climatológicas de la cuenca entre los meses de Julio y Septiembre, en los que el río Ebro registra sus menores caudales. Se trata por tanto de detectar el efecto denominado en la literatura "estiaje húmedo" (Puertas Agudo et al., 2008).

Descripción de la muestra:

La serie histórica se acota a los años 2002 – 2012. El margen inferior de la serie se establece en relación a la disponibilidad de registros de precipitación en el área de estudio a partir del 25 de Enero de 2002. El límite superior se fija por los datos del SAICA en la estación 909 aguas arriba de Zaragoza sólo disponibles hasta el 8 de Abril de 2013, momento en que la estación entró fuera de servicio.

La Tabla 41 resume las características básicas de la muestra utilizada en el análisis de frecuencias.

Tabla 41.- Descripción de la muestra utilizada en el análisis de frecuencias en la definición del impacto de las descargas de los sistemas unitarios en los medios receptores en la ciudad de Zaragoza.

En todo el periodo de estudio	**Promedio**	**Valor máximo**	**Valor mínimo**	**Desviación típica**
Qmed	49,19	687,75	14	32,83
NH4 max medio 909	0,08	0,98	0	0,08
NH4 max medio 905	0,50	6,81	0,06	0,48
NH4 905-909 media	0,42	6,76	-0,25	0,47
OD min 909	5,13	10	2,4	1,19
OD min 905	4,25	12,2	0,1	1,80
OD 909-905 media	0,89	5,8	-7,5	1,82
Días sin lluvia	**Promedio**	**Valor máximo**	**Valor mínimo**	**Desviación típica**
Qmed	48,24	687,75	14	32,39
NH4 max medio 909	0,08	0,98	0,04	0,08
NH4 max medio 905	0,49	6,81	0,06	0,47
NH4 905-909 media	0,40	6,76	-0,25	0,46
OD min 909	5,16	9,7	2,4	1,17
OD min 905	4,34	12,2	0,1	1,76
OD 909-905 media	0,83	5,6	-7,5	1,79
Días con lluvia	**Promedio**	**Valor máximo**	**Valor mínimo**	**Desviación típica**
Qmed	54,99	317	16,2	34,96
NH4 max medio 909	0,07	0,23	0,02	0,04
NH4 max medio 905	0,56	4,79	0,07	0,54
NH4 905-909 media	0,49	4,72	0	0,54
OD min medio 909	4,94	10	2,6	1,26
OD min medio 905	3,70	10,6	0,1	1,91
OD 909-905 media	1,24	5,8	-5,9	1,93

Fuente: Elaboración propia basada en datos de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Como se ve en la Tabla 41se considera en el análisis la variación de las concentraciones aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Zaragoza, como manera de eliminar posibles variaciones en las concentraciones de amonio y de oxígeno disuelto aguas arriba de la cuenca urbana y por tanto no atribuibles a los vertidos que se producen en el tramo del río Ebro a su paso por la ciudad de Zaragoza.

Análisis de frecuencias de los sucesos

Se opta por realizar un análisis de frecuencias para la detección del fenómeno de estiaje húmedo. Este tipo de análisis busca la frecuencia, en cada tipología de suceso, con la

que la diferencia de concentración tanto de amonio como de oxígeno disuelto aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Zaragoza supera la diferencia entre dichas concentraciones en tiempo seco.

La Tabla 42recoge la tipología de suceso establecida en el análisis que adopta los rangos aplicados por la Dirección General de Protección civil y emergencias del Ministerio del Interior.

Tabla 42.- Tipología de suceso para el análisis de frecuencias

Tipología de suceso	Rango	Número de muestras
Sin lluvia	p=0	869
Débil	P<2	95
Moderada	2<P<15	41
Fuerte	15<P<30	5
Muy fuerte	P>30	2
	Total muestra:	1012

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, la Tabla 43 muestra el resultado del análisis de frecuencias relativas de la variación de la diferencia de concentración de amonio y oxígeno disuelto aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Zaragoza según la tipología de suceso establecida.

Tabla 43.- Resultado del análisis de frecuencias de variación de concentraciones de oxígeno disuelto y amonio aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Zaragoza.

	No llueve	Débil	Moderada	Fuerte	Muy Fuerte
NH4 (905-909)<0,40	63,98	54,74	53,66	40	0
NH4 (905-909)>0,40	36,02	45,26	46,34	60	100
TOTALES:	100	100	100	100	100

	No llueve	Débil	Moderada	Fuerte	Muy Fuerte
OD (909-905)<0,83	43,61	41,05	29,27	0	0
OD (909-905)>0,83	56,39	58,95	70,73	100	100
TOTALES:	100	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

Como se ve en la Tabla 43, en época de estiaje, de Julio a Septiembre, en la que el río Ebro cuenta con caudales medios por debajo de 50 m^3/s, el porcentaje de variación de concentración tanto de amonio como de oxígeno disuelto aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Zaragoza que supera dicha variación de concentraciones en tiempo seco aumenta de manera gradual según aumenta la intensidad de lluvia, haciéndose mayor

dicho porcentaje a partir de sucesos de precipitaciones acumuladas diarias mayores de 15 l/m^2. Así, en episodios de lluvia fuerte en época de estiaje, incluso en ríos con elevado caudal como es el río Ebro, se detecta una tendencia al aumento de la concentración relativa de amonio total y una disminución de la concentración relativa de oxígeno disuelto aguas arriba y aguas abajo de la ciudad.

Se realiza un segundo análisis de frecuencias, esta vez analizando la frecuencia con la que concentración de los dos indicadores aguas abajo de la ciudad superan los límites para la consecución de un buen estado ecológico.

Para ello se consideran los umbrales definidos en la Tabla 44, que expresan la concentración máxima de Amonio y la concentración mínima de Oxígeno Disuelto para los distintos estados ecológicos.

Tabla 44.- Umbrales de concentraciones de Amonio y Oxígeno Disuelto por Estado Ecológico.

	Umbral concentraciones (mg/l) por Estado Ecológico		
Variable	**Muy bueno - Bueno**	**Bueno-Moderado**	**Malo**
NH4 Máximo	<0,25	0,25-0,4	>0,4
OD mínimo	>7	5-7	>5

Fuente: Elaboración propia basada en datos de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Aplicando estos umbrales se obtienen los resultados del análisis de frecuencias que se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45.- Resultados del análisis de frecuencias de concentración de amonio y oxígeno disuelto aguas abajo de la ciudad de Zaragoza.

	No llueve	Débil	Moderada	Fuerte	Muy Fuerte
NH4<0,25	23,71	23,16	12,20	0	0
0,25<NH4<0,4	28,77	26,32	29,27	40	0
NH4>0,4	47,53	50,53	58,54	60	100
Totales	100,00	100,00	100,00	100	100

	No llueve	Débil	Moderada	Fuerte	Muy Fuerte
OD>7	6,33	5,26	4,88	0	0
5<OD<7	23,71	15,79	12,20	0	0
OD<5	69,97	78,95	82,93	100	100
Totales	100,00	100,00	100,00	100	100

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis de frecuencias muestran como a medida que aumentan las precipitaciones existe una tendencia al aumento de la concentración de amonio y a la disminución de la concentración de oxígeno disuelto aguas abajo de la ciudad, siendo esta tendencia más marcada a partir de precipitaciones fuertes, superiores a 15 l/m^2.

Así, tras el análisis de los datos en continuo del río Ebro se concluye que en época de estiaje con caudales menores de 50 m^3/s y precipitaciones diarias acumuladas superiores a 15 l/m^2 (lluvia fuerte) existe una tendencia a aumentar la concentración de amonio y disminuir la concentración de oxígeno disuelto a su paso por la cuenca urbana. Dichos impactos previsiblemente se producirán por las descargas de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia y por el lavado de la superficie urbana, variables que podrían explicar los cambios asociados en el estado del río vinculados a la precipitación. Además, dichos indicadores aguas abajo de la ciudad superan los límites establecidos para la consecución de un buen estado ecológico por lo que se requiere de actuaciones para minimizarlos.

4. Respuesta: Análisis de medidas existentes en la ciudad de Zaragoza para reducir las presiones e impactos sobre las masas de agua superficiales por la descarga de los sistemas unitarios en tiempos de lluvia.

Se procede a continuación a analizar las medidas impulsadas para la mejora del estado de las masas de agua receptoras, véase las Respuestas. La Tabla 46 muestra las medidas relacionadas con la gestión de las aguas de lluvia incluidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro 2010-2015 actualmente en vigor. En el momento de redacción del presente documento está en marcha el período de consulta pública la propuesta de Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro 2015-2021 que, dado el solapamiento de fechas por los retrasos en la aprobación del anterior plan no se espera cambie de manera considerable sus contenidos con respecto al actual plan.

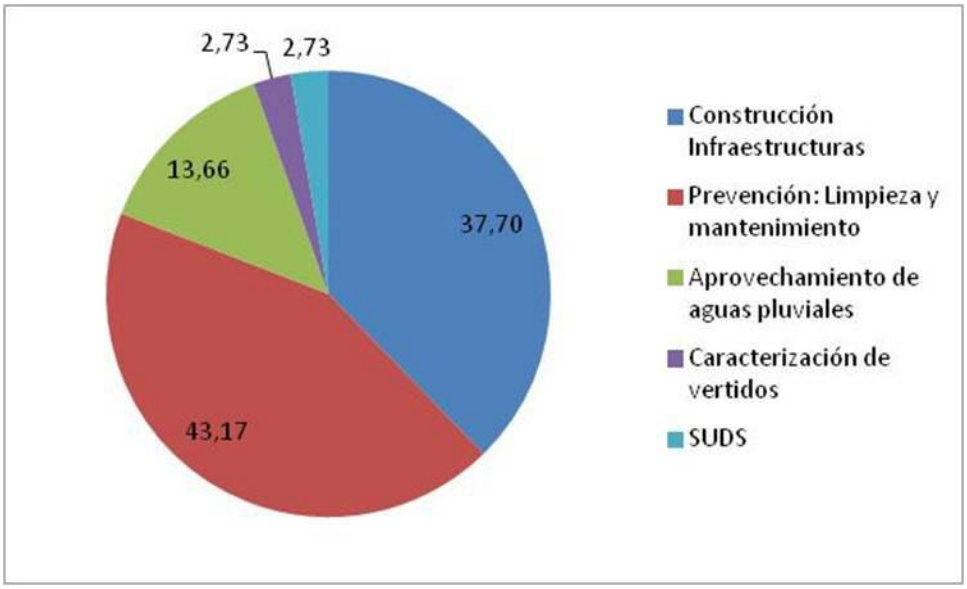
Tabla 46.- Medidas relativas a la gestión de las aguas de lluvia incluidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro.

Cantidad	Medidas	Comentarios
22	Desdoblamiento red unitaria en red separativa	
79	Fomento de las actuaciones municipales de limpieza de redes de alcantarillado, cauces y redes viarias antes de los episodios de tormentas	
42	Instalación de Tanques de Tormenta en sistema de saneamiento para la gestión de pluviales	
25	Aprovechamiento de aguas pluviales	
5	Caracterización de vertidos pluviales en zonas urbanas de entidad y zonas industriales.	Las 5 masas de agua que incorporan esta medida corresponden al río Ega, cuyo recorrido discurre casi íntegramente en la Comunidad Autónoma de Navarra
5	Implantación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como exigencia dentro de la planificación urbanística, utilizando técnicas de gestión en origen (infiltración y/o retención, y manteniendo en lo posible de las condiciones hidrológicas previas al proceso de urbanización).	
5	En Zaragoza, la eliminación total, a lo largo de todo el tramo urbano hasta La Cartuja, de todos los colectores de aguas residuales urbanas e industriales, así como solucionar implementar tanques para agua de tormenta.	Programa A01. Solicitud: Agentes sociales. Presupuesto 0 €
TODA LA CUENCA	Estudio de tratamiento de las aguas pluviales en los núcleos urbanos para evitar que se mezclen con las aguas residuales, se contaminen y limiten la capacidad de depuración de las EDAR	Programa A22.1. Solicitud: Agentes sociales y Alcaldes. Vinculado al Plan de Actuaciones I+D+i.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Confederación Hidrográfica del Ebro

Como se ve en la Tabla 46, 182 medidas están directamente vinculadas con masas de agua de la cuenca del río Ebro, y una es una medida general para todas las masas de agua de la cuenca. El primer análisis que se realiza es de las 182 medidas a nivel de masa de agua. Así, laFigura nº 13 muestra el peso relativo de cada tipo de medida.

Figura nº 13.- Tipos de medidas en las masas de agua relativas a la gestión de las aguas pluviales incluidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro.



Fuente: Elaboración propia

Como muestra la Figura nº 13el 37.7% de las medidas son medidas estructurales bien para la instalación de redes separativas, bien para la construcción de tanques de tormenta, mientras que el 43.17% son medidas preventivas basadas en la limpieza de las calles y de la red de alcantarillado. Destaca igualmente que más del 10% de las medidas buscan el aprovechamiento de las aguas pluviales, mientras que únicamente un total del 5 % de las medidas van encaminadas por una parte, a la caracterización de los vertidos de las aguas de lluvia y por otra a la implementación de Sistemas de Drenaje Sostenible. De este análisis cabe concluir primero que, pese a que la gestión de las aguas de lluvia no es competencia directa de la Confederación Hidrográfica del Ebro, ésta, en coherencia con el cumplimiento del objetivo del buen estado de las masas de agua que rige sus actuaciones, incluye medidas en el Plan de cuenca del Ebro con el objetivo de minimizar los impactos en el medio receptor. Este tipo de medidas requerirán de una buena coordinación con los entes municipales competentes en esta materia. Por otra parte, cabe destacar la diversidad de medidas propuestas. Aunque existe un peso importante en

las actuaciones encaminadas a la construcción de infraestructuras, el peso predominante lo toma la prevención, con la limpieza de superficies y el mantenimiento de la red.

Por otra parte, aunque con un peso muy bajo, se muestra la incipiente inclusión de los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) como una medida a considerar para la consecución del buen estado de las masas de agua. Como se ve en la Tabla 46, tanto las medidas relacionadas con la implementación de SUDS como las medidas encaminadas a caracterizar los vertidos se proponen en 5 masas de agua correspondientes al río Ega, que discurre casi íntegramente por la Comunidad Autónoma de Navarra. En dicha comunidad autónoma se ha desarrollado un marco normativo que incluye la obligatoriedad del uso de SUDS de manera prioritaria. Por tanto esto muestra cómo, a través del marco normativo se pueden coordinar e impulsar actuaciones para la consecución de una gestión más sostenible de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

Por otra parte, relativo a las masas de agua de la cuenca urbana de Zaragoza (452, 453, 454, 426 y 115), éstas cuentan con dos medidas relativas a la gestión de las aguas pluviales. Una medida específica de las citadas masas de agua,propuesta por los agentes sociales, se centra en la eliminación total de todos los colectores de aguas residuales urbanas e industriales en todo el tramo urbano del Ebro hasta La Cartuja, así como implementación de tanques de tormenta. Esta medida, aunque incluida en el Plan de medidas (Medida A01), no cuenta con dotación presupuestaria por lo que se entiende que su ejecución no está garantizada. Más allá de la implementación de los tanques de tormenta, la eliminación total de todos los colectores de aguas residuales del tramo urbano no es viable. Se entiende que se hace referencia a la eliminación total de los vertidos directos de los colectores al Ebro.

Finalmente, se recoge la necesidad de realizar un estudio de tratamiento de las aguas pluviales en los núcleos urbanos para evitar que se mezclen con las aguas residuales, se contaminen y limiten la capacidad de depuración de las EDAR. Esta medida, junto a aquellos estudios relativos a la caracterización de vertidos y la adecuación de redes separativas, se incluyen en el Plan de Actuaciones de Investigación, Desarrollo e Innovación relacionadas con el cumplimiento de los objetivos ambientales en el Periodo 2010-2015. Este plan incluye 650 estudios y medidas específicas en materia de investigación, desarrollo e innovación con el objetivo último de reducir el porcentaje de masas de agua, tanto superficiales como subterráneas, que incumplen los objetivos ambientales en

la cuenca del Ebro. No obstante en el último Plan de Actuación de la Confederación Hidrográfica del Ebro, presentado el 30 de Diciembre de 2014, no se contemplan las actuaciones de investigación anteriormente comentadas, quedando el Plan de Actuaciones de Investigación sin presupuesto asignado y, por tanto, sin aplicación.

A modo de resumen, la Tabla 47 recoge los resultados de la aplicación de los indicadores de respuesta para la disminución de las presiones sobre el medio receptor, recogiendo el número de medidas planteadas en la Confederación Hidrográfica del Ebro para la disminución de las presiones e impactos en los medios receptores por la descarga directa de los sistemas de saneamiento en tiempos de lluvia así como la tipología de las mismas y la viabilidad de su implementación.

Tabla 47.- Resultados de aplicación a la ciudad de Zaragoza de los indicadores de respuesta para la disminución de las presiones sobre el medio receptor.

Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Zaragoza
EE15. Número de medidas relacionadas con la gestión de las aguas de lluvia incluidas en el Plan Hidrológico de cuenca	R	Aumento/Optimización	N	182
EE16. Tipología de medidas relacionadas con la gestión de las aguas de lluvia del Plan Hidrológico de cuenca				
EE16.1 Medidas Estructurales	R	Optimización	%	37,7
EE16.2. Medidas Preventivas	R	Optimización	%	43,17
EE16.3. Aprovechamiento de Pluviales	R	Optimización	%	10
EE.16.4. Caracterización vertidos de las aguas de lluvia e implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible	R	Optimización	%	5
EE17. Número de programas de coordinación entre organismos de cuenca y entidades gestoras del sistema de saneamiento para la mejora de la gestión de las aguas de lluvia con presupuesto asignado.	R	Optimización	N	0

Fuente: Elaboración propia.

2. Las masas de agua subterráneas de la ciudad de Zaragoza.

Se analiza a continuación las masas de aguas subterráneas de la ciudad de Zaragoza siguiendo el mismo esquema Presión-Estado-Impacto-Respuesta aplicado para la caracterización y diagnóstico de las masas de agua superficiales.

Entre las presiones que afectan a las masas de agua subterráneas se analizan la contaminación difusa. Por otra parte, y también relacionado con los aspectos cualitativos, se considera la presión ejercida por los sistemas de refrigeración que, si bien no consumen agua, si tienen un impacto térmico en los acuíferos cuyos efectos deben ser considerados. Se realiza además un análisis cuantitativo, centrado en la explotación de los acuíferos y el balance hídrico del mismo.

Por su parte, el Estado de las masas de agua subterránea, según la Directiva Marco de Aguas, es el estado químico, no siendo aplicables las variables de estado biológico e hidromorfológico de las masas de agua superficiales.

En relación al impacto se analizan los incumplimientos en los valores umbral para el buen estado de las masas de agua subterráneas.

1. Presiones e Impactos sobre las masas de agua subterráneas de la ciudad de Zaragoza.

Una de las presiones principales de las masas de agua subterráneas es debida al nivel de explotación de las mismas. La Tabla 48recoge el balance hídrico de la masa de agua subterránea 058 Aluvial del Ebro – Zaragoza.

Tabla 48.- Balance hídrico de la masa de agua subterránea 058 Aluvial del Ebro - Zaragoza

Componentes	Entradas (hm^3/año)	Salidas (hm3/año)
Transferencia subterránea aguas arriba de la ciudad (Ebro-Gállego)	28	
Transferencia subterránea aguas debajo de la ciudad (Ebro-Gállego)		5,25
Extracciones por bombeos (totales)		7,5
Recarga areal en la ciudad	2	
Infiltración desde el Canal Imperial de Aragón	2,5	
Infitración de la escorrentía lateral	0,25	
Descargas al río Ebro		27
Descargas al río Gállego		3
Otros	10	
Total	42,75	42,75

Fuente: IGME

Además de la alteración de los mecanismos de recarga naturales, existen extracciones significativas para distintos usos que, como vemos en la Tabla 48sitúan la explotación total del acuífero urbano en 7,5 hm^3/año, que resulta poco significativa en relación a los recursos medios de esta masa de agua subterránea valorados en unos 250 hm^3/año. La Tabla 49desglosa las extracciones totales por bombeo.

Tabla 49.- Resumen de extracciones totales por bombeo de la masa de agua subterránea 058 Aluvial del Ebro-Zaragoza.

Uso	hm^3/año
Abastecimiento	0,009
Industrial	6,675
Recreativo	0,25
Agrario	0,556
Total usos	7,49

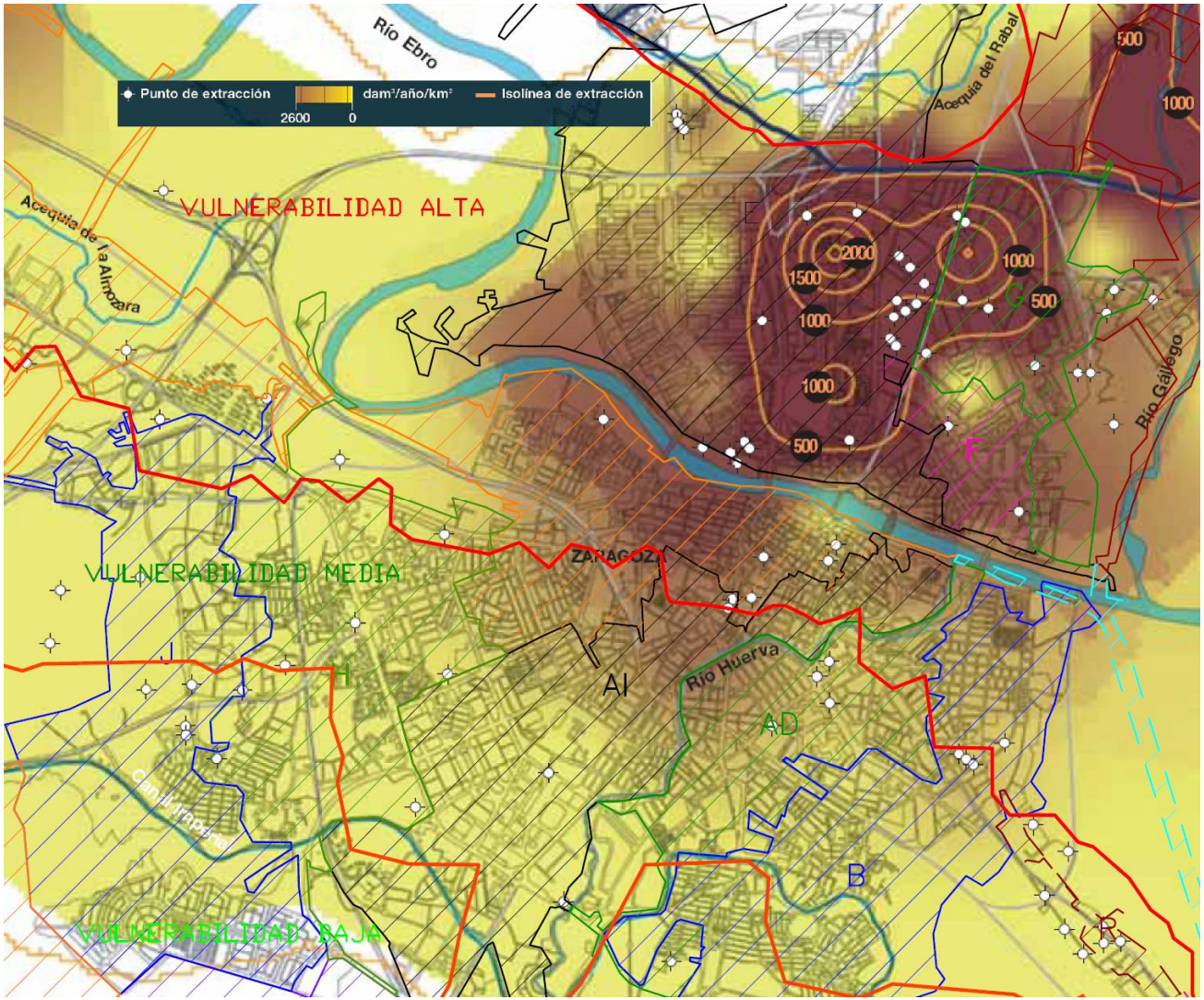
Fuente: Elaboración propia basada en datos del IGME.

Como se ve en la Tabla 49 las extracciones más importantes están destinadas al uso industrial, siendo el uso para abastecimiento urbano insignificante.

Dados los bajos e intermitentes caudales de aguas de lluvia en comparación con los aportados por otras actividades como el riego, no se espera que las medidas encaminadas a la permeabilización de la cuenca urbana tengan un impacto relevante a nivel cuantitativo en el acuífero que además, como se ha visto, no sufre impactos por sobreexplotación. No obstante, uno de los beneficios indirectos de los SUDS es la recarga de acuíferos y, por tanto, es deseable tener en cuenta en la localización de los SUDS las zonas en las que la infiltración ayudará a la restauración del ciclo hidrológico natural de manera más efectiva.

Para ello, la Figura nº 14 cruza la información sobre la explotación del acuífero, las cuencas vertientes del sistema de saneamiento y las zonas de vulnerabilidad.

Figura nº 14.- Presión sobre las masas de agua subterráneas de la cuenca urbana de Zaragoza debida a las extracciones.



Fuente: Elaboración propia basada en datos del Ayuntamiento de Zaragoza y del Instituto Geológico y Minero de España.

Como se ve, la explotación se concentra en las cuencas de la margen izquierda del Ebro, de manera predominante en la cuenca E, aunque también en la G, F y CH. En la margen derecha únicamente la cuenca C presenta una explotación pronunciada del acuífero, presentando el resto de cuencas vertientes unas bajas o nulas presiones por extracción. Se ve también como los límites de las presiones por extracción son coherentes con los límites de vulnerabilidad del acuífero, resultado de compartir como factor determinante en ambos casos la profundidad del acuífero.

De la figura se concluye que, en relación con la recarga efectiva del acuífero, la infiltración se promoverá de manera prioritaria en las cuencas vertientes E, G, F, CH de la margen izquierda y C de la margen derecha, considerando en todo momento las medidas necesarias para reducir la contaminación en aras a evitar impactos en la calidad de las masas de agua subterráneas de la cuenca urbana.

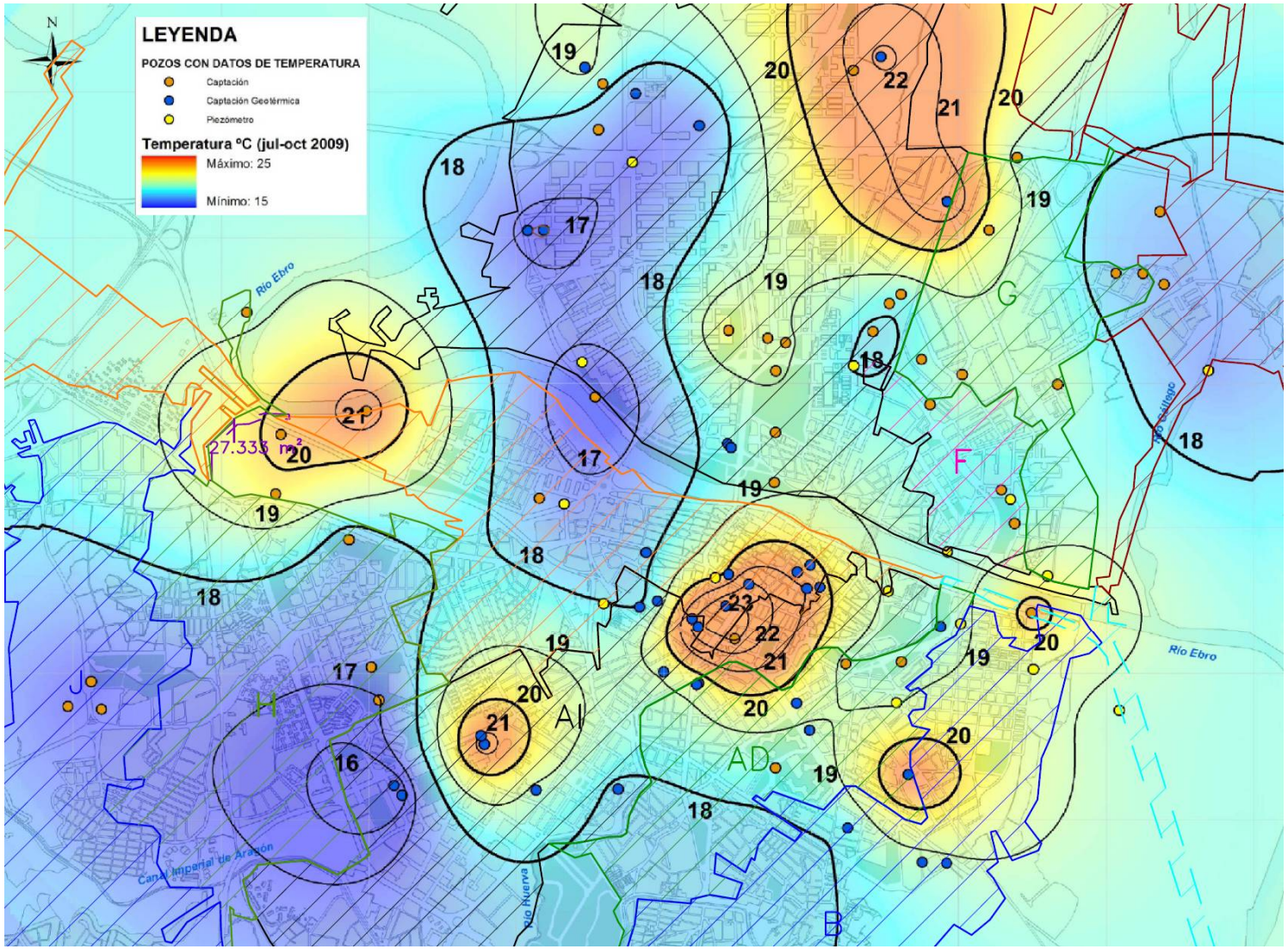
Otra presión relevante en el acuífero de la cuenca urbana de Zaragoza es la ejercida por la alimentación de los sistemas de refrigeración, actividad que está en auge en los últimos años. Dicho proceso devuelve al acuífero prácticamente la totalidad del agua extraída por lo que los 13.2 hm^3 anuales estimados demandados a este fin no suponen una presión a nivel cuantitativo. No obstante, a nivel cualitativo la explotación e inyección prolongada del calor residual en el acuífero aluvial urbano provoca unas plumas de contaminación térmica de efectos todavía desconocidos y que son objeto de estudio en la actualidad. Estas captaciones generan un impacto térmico cuyas consecuencias se centran fundamentalmente en la transferencia y el movimiento de las plumas de calor por el acuífero, pero también en la hidrogeoquímica debido a la introducción de un agua que posee características fisicoquímicas modificadas respecto a las que identifican originalmente la calidad del agua, que afecta a la solubilidad de las especies en disolución y de los minerales que conforman la estructura del acuífero y del sustrato impermeable. Con ello, a largo plazo, estos impactos pueden poner en riesgo la sostenibilidad de los propios aprovechamientos geotérmicos o de otras captaciones de aguas subterráneas de su entorno.

Dada la necesidad de profundizar en el alcance de los impactos ocasionados por la inyección térmica y los mecanismos que los generan la Confederación Hidrográfica del Ebro, del entonces Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (hoy Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), y el Instituto Geológico y Mine-

ro de España, también del entonces Ministerio de Ciencia e Innovación (hoy Ministerio de Economía y Competitividad) suscribieron el 11 de mayo de 2009 un Convenio Específico de Colaboración para el "Análisis del impacto térmico generado por los pozos de climatización en las aguas subterráneas de Zaragoza" para desarrollar un estudio sobre el impacto térmico en las aguas subterráneas y los efectos causados al acuífero aluvial del Ebro bajo la ciudad de Zaragoza derivado del aprovechamiento del acuífero en procesos de climatización de edificios(Garrido Schneider, 2014).

Una de las medidas propuestas por el mencionado estudio para minimizar las plumas de contaminación térmica es la recarga de los acuíferos con caudales de mayor temperatura. Así, la permeabilización de la cuenca complementaría los esfuerzos realizados en la paliación de la contaminación térmica. Así, la Figura nº 15cruza la información sobre las plumas de contaminación térmica del acuífero de Zaragoza con las cuencas vertientes del sistema de saneamiento.

Figura nº 15.- Plumas de contaminación térmica y cuencas vertientes del sistema de saneamiento.



Fuente: Elaboración propia basada en información del Instituto Geológico y Minero de España.

Como muestra la Figura nº 15 existen cinco focos en los que se concentran las plumas de contaminación térmica. La más pronunciada se localiza en la margen izquierda del Ebro, en cuenca E que vuelve a aparecer como cuenca prioritaria para la implementación de técnicas de infiltración. Por su parte, en la margen derecha del Ebro aparecen cuatro focos en las cuencas S, C, AI y B. C. Excepto en la cuenca S en la que, como se verá en la caracterización, existe una peligrosidad alta de aparición de dolinas, en el resto de las cuencas vertientes se priorizará SUDS que promuevan la infiltración de las aguas de lluvia como complemento a las estrategias que se pongan en marcha para frenar las plumas de contaminación del acuífero.

2. Estado de las masas de agua subterráneas de la ciudad de Zaragoza.

La Tabla 50 muestra el estado químico de las masas de agua subterráneas de la cuenca urbana de Zaragoza.

Tabla 50.- Estado químico de las masas de agua subterránea 057 Aluvial del Gállego y 058 Aluvial del Ebro

Masa de Agua Subterránea	**057 Aluvial del Gállego**
Contaminación puntual	NO
Contaminación difusa	SI. Esta masa presenta aguas afectadas por NO3 de origen agrario que ocupan el 57%de la superficie total de la masa
Valores umbral	Cloruros: 390 mg/l; Sulfatos: 930 mg/l
Evaluación del estado actual	**MAL ESTADO** **Contaminación difusa e Incumplimientos en Abastecimientos debidos a concentraciones de** nitratos y plaguicidas de origen agrario.
Masa de Agua Subterránea	**058 Aluvial del Ebro - Zaragoza**
Contaminación puntual	Parámetros responsables: • As, Cd, Cu, Fe, Pb, Ni, Ba • Tricloroetileno, percloroetileno • Hidrocarburos
Contaminación difusa	SI. Parámetros responsables: As, Cd, Cu, Fe, Pb, Ni, Ba; Tricloroetileno, percloroetileno; Hidrocarburos; BTEX SI. Esta masa presenta aguas afectadas por NO3 de origen agrario que ocupan el 35% de la superficie total de la masa.
Valores umbral	• Amonio total: 0,5 mg/l • Arsénico disuelto: 0,01 mg/l • Cadmio disuelto: 0,005 mg/l • Cloruros: 2550 mg/l • Cobre disuelto: 2 mg/l • Hierro disuelto: 0,2 mg/l • Nitritos: 0,1 mg/l • Plomo total: 0,025 mg/l • Sulfatos: 1490 mg/l • Tetracloroeteno: 0,01 mg/l • Tricloroeteno: 0,01 mg/l
Evaluación del estado actual	**MAL ESTADO** **Contaminación difusa:** Todos los puntos presentan concentraciones de NO3 superiores a los 50 mg/l se encuentran dentro de la envolvente de aguas afectadas. La superficie afectada se considera significativa en relación a la superficie total de la masa de agua (≥ 20%). Como consecuencia de esta problemática es posible que se vea afectada de manera directa la masa de agua superficial n.º 115 (Río Huerva desde la presa de Mezalocha hasta su desembocadura en el río Ebro). En el año 2013 dos de los puntos de control de esta masa de agua superficial han superado los 20 mg/l de concentración de nitratos. **En estudios futuros se intentará averiguar si la disminución significativa de la calidad química de esta masa de agua superficial es producida por la transferencia de nitratos procedentes de la masa de agua subterránea o por una posible influencia de las aguas residuales urbanas que se vierten al río.**

Fuente: Informe CEMAS 2013, Confederación Hidrográfica del Ebro.

En relación a la masa de agua subterránea Aluvial del Gállego, su estado es malo. El informe CEMAS de la Confederación Hidrográfica del Ebro apunta hacia un mal estado debido a la actividad agraria de la zona, que aporta un exceso de nutrientes y plaguicidas. Estas presiones rebasan el ámbito del presente estudio. Sin embargo, los resultados del muestreo realizado por la Confederación Hidrográfica del Ebro apuntan hacia la necesidad de establecer si las concentraciones de Nitratos en la masa de agua superficial 115 río Huerva se deben a la transferencia de nitratos desde la masa de agua subterránea Aluvial del Ebro – Zaragoza o si la causa podría ser debida a los vertidos de aguas residuales al río. Esto es coherente con lo apuntando hasta el momento sobre el impacto de las Descargas de los sistemas unitarios en el río Huerva que, al recibir las descargas de 58 puntos de alivio del sistema unitario y contar con un escaso caudal sufre un alto impacto en tiempo de lluvia.

De acuerdo con el estudio de hidrogeología urbana de Zaragoza realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (Moreno Merino, Garrido Schneider, Azcón Gonzálex de Aguilar, & Durán Valsero, 2008), la calidad química del agua subterránea de un gran sector de la ciudad de Zaragoza viene impuesta principalmente por las características de las aguas que recargan al acuífero aluvial del Ebro, sobre el que se asienta la urbe, pero también por el acuífero aluvial del río Gállego, que parcialmente deja su impronta de calidad en las aguas subterráneas de la margen izquierda del Ebro. Los materiales que forman parte del entorno geológico de los aluviales del Ebro y Gállego determinan en gran medida la composición química del agua subterránea de Zaragoza. Las sales evaporíticas muy solubles, entre otras: yesos, cloruros de calcio y cloruros de sodio, dan lugar a aguas de elevada mineralización y pobre calidad en general, que la acción humana en este entorno difícilmente llega a modificar, excepto por una intensa actividad agropecuaria en el extrarradio o una inadecuada práctica de ciertas industrias potencialmente contaminantes, que se sitúan tanto en polígonos del entorno como inmersas en la ciudad.

En lo relativo a la posible contaminación de las masas de agua subterráneas por contaminantes característicos de las aguas de escorrentía urbana, el Instituto Geológico y Minero de España realizó un estudio sobre la afección de los acuíferos de Zaragoza por metales pesados (Mata, Belén, Merino, & González, 2014), detectando el número de metales que se hallan sobre los valores de referencia marcados por la reglamentación

técnico sanitaria para aguas de consumo (RTS,B.O.E., 1990). En la Tabla 51 se desglosan los distintos elementos muestreados en el estudio.

Tabla 51.- Aplicación a la ciudad de Zaragoza del Indicador EE9 Número de incumplimientos de los valores umbral para el buen estado ecológico de las masa de agua subterráneas.

ELEMENTO	MÁXIMO ADMISIBLE (µg/l)	% de puntos de muestreo que superan valor máximo admisible
Bario	100	0
Selenio	10	90
Mercurio	1	6,7
Manganeso	50	8,9
Cobre	100	0,0
Plomo	50	0,0
Antimonio	10	0,0
Plata	10	0,0
Aluminio	200	8,9
Niquel	50	4,4
Cromo	50	0,0
Cadmio	5	11,1
Arsénico	10	13,3
Cobalto	20	0,0
Talio	3	0,0
Uranio	30	0,0

Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (Mata et al., 2014).

Destaca el elevado porcentaje de incumplimiento por concentración selenio, que proviene de las formaciones evaporíticas terciarias que rodean las terrazas aluviales. En relación al Arsénico, puede estar relacionado con la utilización de herbicidas, pesticidas y fertilizantes (Mata et al., 2014). En relación al objeto del presente estudio, el Cadmio es uno de los metales pesados relacionados directamente con la contaminación de la escorrentía urbana. El origen del Cadmio está en el deterioro de vehículos y los productos industriales por lavado de la superficie que es arrastrado por la escorrentía en tiempos de lluvia.

Las conclusiones de dicho estudio indican que, pese a tratarse de un acuífero libre con un nivel freático relativamente alto, lo que le hace especialmente vulnerable a los agentes contaminantes externos, se aprecia un impacto muy bajo de las actividades poten-

cialmente contaminantes. No obstante alertan de que el efecto de una acumulación excesiva de metales pesados puede detectarse con el paso del tiempo aunque haya cesado el origen de la contaminación. Concluye además que la mayor presencia de metales pesados se concentra sobre la margen izquierda del rio Ebro, que es la que soporta una mayor presión industrial, lo que parece indicar un origen industrial y la fuerte influencia de la infiltración del agua de los ríos. Finalmente indica que existe la posibilidad de que parte de los elementos detectados procedan de las filtraciones y pérdidas de los colectores de vertido de polígonos industriales del extrarradio o de otros potenciales focos externos al casco urbano de Zaragoza que, tras incorporarse al flujo subterráneo, son captados posteriormente en los puntos de muestreo lejos de su lugar de origen. Así los resultados de este estudio apuntan hacia la necesidad de un mayor control de los vertidos de los polígonos industriales para evitar afecciones a las masas de agua no sólo superficiales sino también de las masas de agua subterráneas, reforzando la necesidad de actuaciones en el control de vertidos que son objeto de la presente tesis doctoral.

Como resultado de la caracterización y diagnóstico de las masas de agua de la cuenca urbana de Zaragoza se concluye que todas las masas de agua superficial de la cuenca urbana de Zaragoza tienen un estado final inferior a bueno.

En el río Ebro se detecta el efecto del denominado “estiaje húmedo”, con una tendencia a incremento de la concentración de amonio y una disminución del oxígeno disuelto cuando el caudal es menor de $50 m^3/s$ y las lluvias mayores de $15 l/m^2$.

Además, el estado químico de las masas de agua subterránea es malo, con una acumulación excesiva de metales pesados especialmente en la margen izquierda del río Ebro que soporta una mayor presión industrial.

Las presiones e impactos debidos a las descargas de los sistemas de saneamiento unitario en tiempos de lluvia se califican de Altas. Para conseguir un buen estado de las masas de agua es ineludible abordar la problemática de gestión de las aguas de lluvia. A continuación se realiza un diagnóstico integral de la cuenca urbana y del sistema de saneamiento y se definen las principales líneas estratégicas de actuación para la consecución de una gestión integral de las aguas de lluvia.

5. Indicadores de sostenibilidad de la cuenca urbana de Zaragoza.

La caracterización de la cuenca urbana de Zaragoza incorpora el marco físico (topografía, geología, hidrogeología, hidrografía, y climatología), el marco institucional (organización administrativa y competencial), el marco normativo, socioeconómico y urbanístico. En el Anejo 2 se encuentra toda la información necesaria para la caracterización de la cuenca urbana, la definición de los indicadores urbanos y las líneas de actuación que se detallan a continuación.

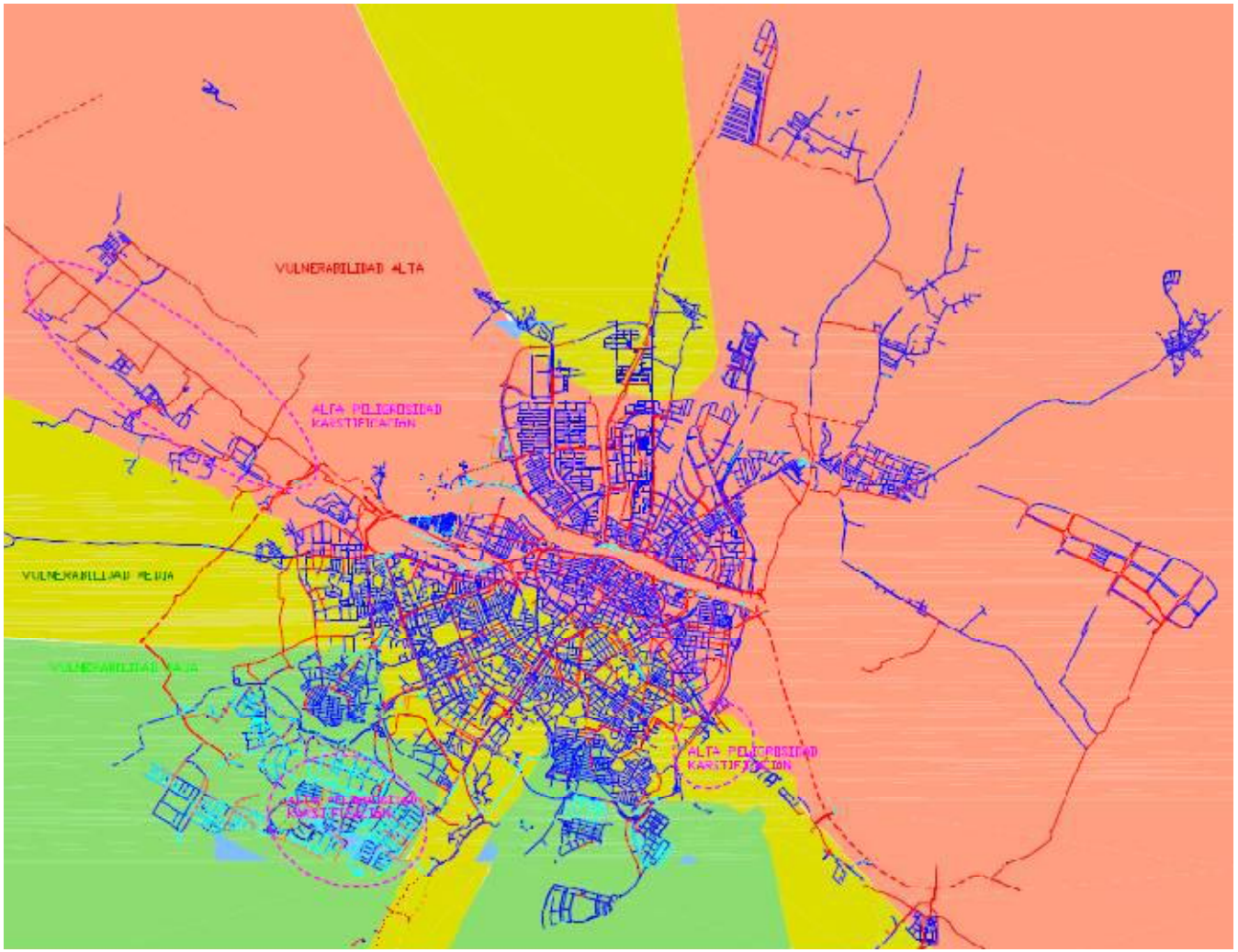
1. Marco Físico

La caracterización del marco físico determina la potencialidad y las limitaciones de la cuenca urbana para la implementación de los Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS). Así, se analiza la permeabilidad del terreno, los riesgos de formación de dolinas, la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y la existencia de suelos contaminados por usos industriales presentes o pasados para la implementación de aquellos SUDS que requieran infiltración.

Como resultado de dicha caracterización se obtienen los planos que se muestran a continuación. La información obtenida en cada uno de los aspectos analizados en cada cuenca vertiente se incorporará en la matriz de ayuda al proceso de toma de decisiones resultante que se muestra al final de este capítulo.

Dada la geología de la cuenca urbana, se cumplen en términos generales los criterios de permeabilidad del suelo y profundidad del acuífero necesarios en aquellos SUDS que conllevan infiltración de aguas de lluvia. Por tanto, las limitaciones para su implementación responderán a dos factores: Los riesgos de aparición de dolinas y la vulnerabilidad del acuífero, entendida como la susceptibilidad que presenta el acuífero a la contaminación del agua subterránea debido a las actividades humanas. La Figura nº 16 cruza el sistema de saneamiento con la zonificación de riesgo de dolinas y la vulnerabilidad.

Figura nº 16.- Red de alcantarillado de Zaragoza y zonificación de peligrosidad de karstificación y vulnerabilidad del acuífero a la contaminación por infiltración de aguas de escorrentía.



Fuente: Elaboración propia con datos del Ayuntamiento de Zaragoza y del Instituto Geológico y Minero de España.

De acuerdo con la Figura nº 16las técnicas de infiltración de las aguas de lluvia estarán restringidas en la zona comprendida entre Zaragoza y Casetas, en la depresión de Valdespartera y en la Orla Sudeste sujetas a una peligrosidad en general elevada de hundimiento o subsidencia por karst cubierto. En el resto de la cuenca urbana, considerando la poca relevancia de los caudales de las aguas de lluvia en relación a los caudales infiltrados por otras actividades antrópicas, tales como extracción de aguas subterráneas, fugas de conducciones y, sobre todo, el riego agrícola, se podrá contemplarla implementación de estrategias de permeabilización de la cuenca urbana como medida de control en origen de la escorrentía urbana previo estudio en detalle de la geología de la zona.

Por otra parte, la figura muestra como el acuífero en gran parte de la margen izquierda del Ebro es altamente vulnerable a las actividades humanas, mientras que en la margen derecha del Ebro la vulnerabilidad es media o baja. Esto conlleva dos implicaciones. Los vertidos resultantes de las actividades industriales que se concentran en la margen izquierda suponen una presión importante para el buen estado ecológico de las masas de agua subterráneas, disminuyendo dicho riesgo según aumenta la distancia al Ebro. Por tanto, en caso de que en la margen izquierda se opte por implementar técnicas para el control de caudales en origen que requieran infiltración, habrá que seleccionar SUDS con rendimientos altos en la eliminación de contaminantes para evitar la afección a acuífero.

2. **Desarrollo urbanístico**

La ciudad de Zaragoza ha seguido un modelo de ciudad compacta. Aunque en la última década se ha producido una importante expansión, los nuevos planes de desarrollo impulsan políticas de concentración de la población y moderación del crecimiento de la ciudad. Actualmente el 41% de la superficie urbana está ocupada por entramado urbano continuo, que muestra el alto grado de impermeabilización típico del desarrollo urbano de las ciudades españolas del siglo XX.

La Tabla 52 muestra los indicadores relacionados con el proceso de urbanización de la cuenca:

Tabla 52.- Indicadores del proceso de urbanización en la ciudad de Zaragoza.

Indicadores	Tipo	Tendencia deseada	Udad	Zaragoza
U1. Porcentaje de las superficies artificiales en relación con las superficies naturales	P	Disminución	%	91,3
U2. Porcentaje de zonas ajardinadas y sectores residenciales	P	Aumento	%	3,5
U3. Porcentaje de zonas verdes de la Estructura Urbana Compacta	P	Aumento	%	2,5
U4. Porcentaje de zonas industriales, vías de comunicación y transportes	P	Optimización	%	25

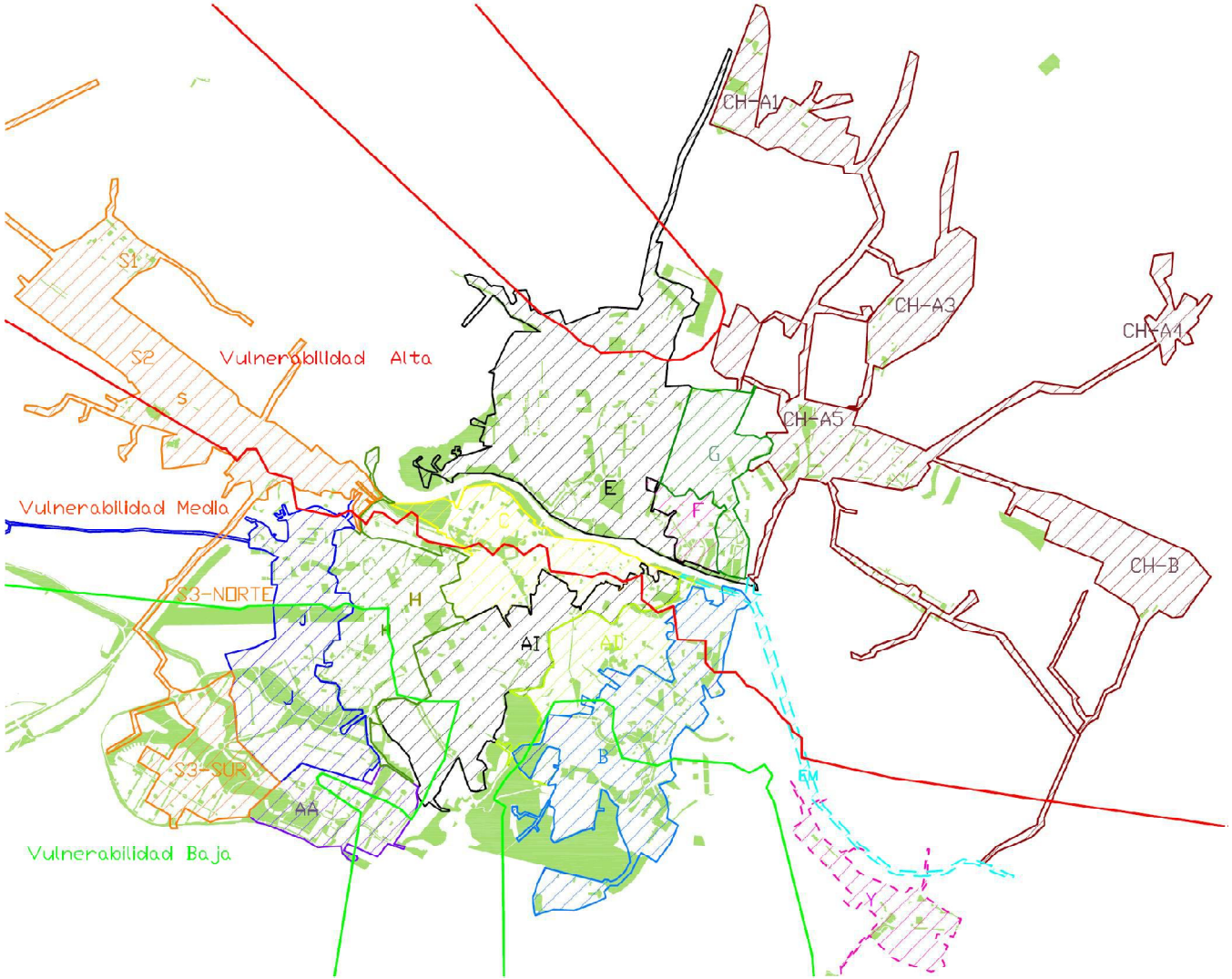
Fuente: Elaboración propia basada en datos Instituto Geográfico Nacional.

Los valores recogidos en la Tabla 52 muestran una modificación importante del ciclo natural del agua en el espacio urbano de Zaragoza que, consecuentemente, ofrece una baja capacidad de infiltración natural de la escorrentía y de recarga de los acuíferos que la sustentan. El 91.3% de la superficie de la cuenca es artificial, contando únicamente con un 3.5% de zonas ajardinadas y sectores residenciales. Tan sólo el 2.5% de la estructura urbana compacta está destinada a zonas verdes. Estos datos apuntan a la necesidad de permeabilizar el núcleo urbano consolidado a través de la ampliación de zonas verdes y de la integración de SUDS en el entramado urbano. Esta medida tendría, como efectos positivos, la recarga natural de los acuíferos, la reducción de las plumas de contaminación térmica y la reducción de caudales de entrada en el sistema de saneamiento.

Se pasan a detallar a continuación la priorización de la implementación de SUDS en relación a los usos del suelo de la cuenca urbana.

En relación con la ampliación de las zonas verdes, la Figura nº 17 muestra las zonas verdes existentes en la actualidad y su localización en las cuencas vertientes.

Figura nº 17.- Localización de Zonas verdes en las cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza.



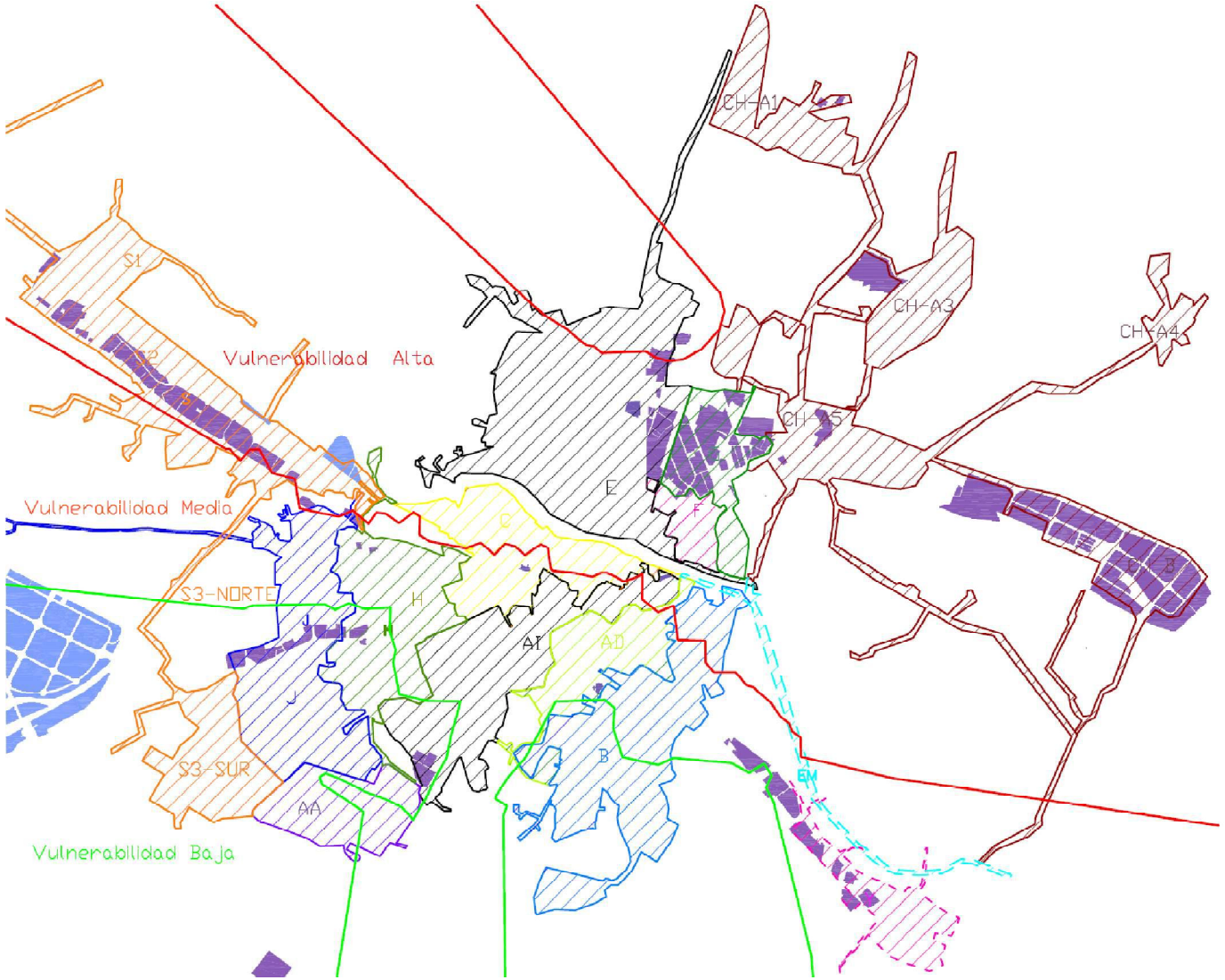
Fuente: Elaboración propia basada en datos del Ayuntamiento de Zaragoza.

Como se ve en la Figura nº 17, las zonas verdes se concentran en las cuencas S3-SUR, AA y la zona Sur de la cuenca J zonas que corresponden a las áreas de nueva urbanización (Arcosur, Montecanal, Rosales del Canal y Valdespartera). Destaca sin embargo un déficit de zonas verdes en el resto de la cuenca urbana. En estructura urbana compacta de la margen derecha del Ebro destacan las cuencas AI y AD (margen izquierda y derecha del río Huerva), en las que está especialmente indicado el aumento de la permeabilización dado que se encuentra en zona de vulnerabilidad media-baja de afección al acuífero y sin riesgo de karstificación, no así la cuenca S en la que, dada la peligrosidad de karstificación, no se debe contemplar ninguna medida tendente a aumentar la infiltración.

En la margen izquierda del río Ebro destaca la cuenca E, con una densidad de edificación media-baja que permitiría aumentar las zonas verdes y la cuenca G.

Por su parte, la Figura nº 18 muestra la localización de los usos industriales, productivos, de transporte y logística en relación a las cuencas vertientes, para localizar aquellas cuencas en las que se debe tener especial precaución en la infiltración de la escorrentía que arrastrará altas cargas de contaminación.

Figura nº 18.- Localización de usos industriales productivos, transporte y logística en las cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza.

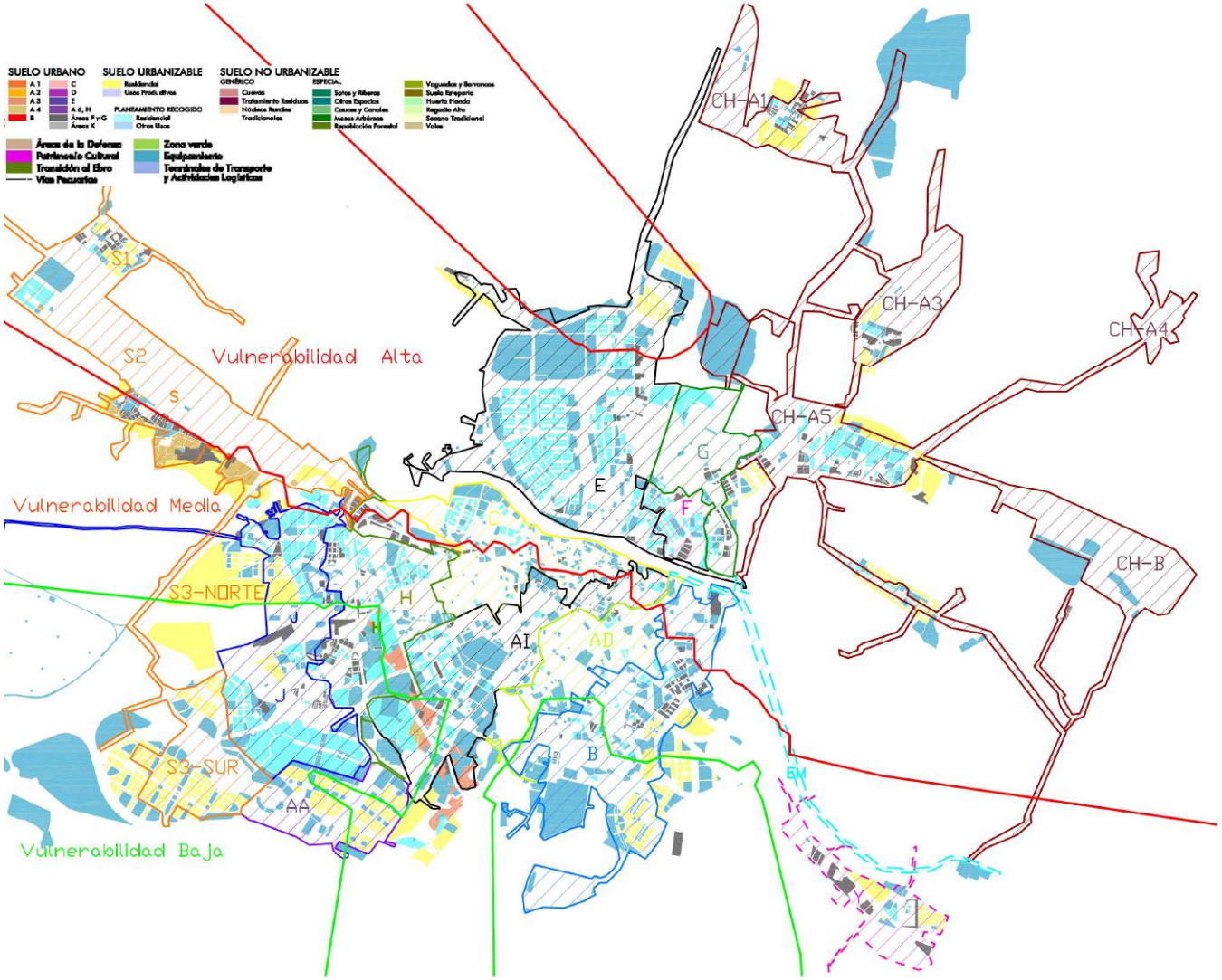


Fuente: Elaboración propia basada en datos del Ayuntamiento de Zaragoza.

Como se ve en la Figura nº 18 la mayor parte de las actividades que conllevan altas cargas de contaminación en la escorrentía se localizan en zonas de vulnerabilidad alta del acuífero. Esto supone un riesgo importante para el buen estado del mismo. Por ello se dará prioridad a las actuaciones para la gestión sostenible de la escorrentía urbana en las cuencas CH-B, CH-A, E y G de la margen derecha del río Ebro, así como a la cuenca S de la margen izquierda, optando por SUDS que no requieran infiltración o, en su caso, cuyo rendimiento en la eliminación de contaminantes sea muy elevado.

Finalmente, la Figura nº 19 muestra las zonas con alto potencial para la implementación de SUDS respondiendo a dos criterios. Por una parte, se seleccionan los equipamientos municipales. Estos suelos albergan usos, entre otros, administrativos, escolares, sociales, culturales y deportivos. Los proyectos piloto desarrollados en España hasta el momento concluyen la idoneidad de implementar SUDS en este tipo de suelos por su alto carácter demostrativo y pedagógico. Por otra parte, las zonas con densidad de edificación media-baja y las zonas de nueva urbanización de carácter residencial en las que la disponibilidad de espacio facilita de manera determinante su implementación.

Figura nº 19.- Localización de equipamientos y densidad de edificación media y baja en las cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza.

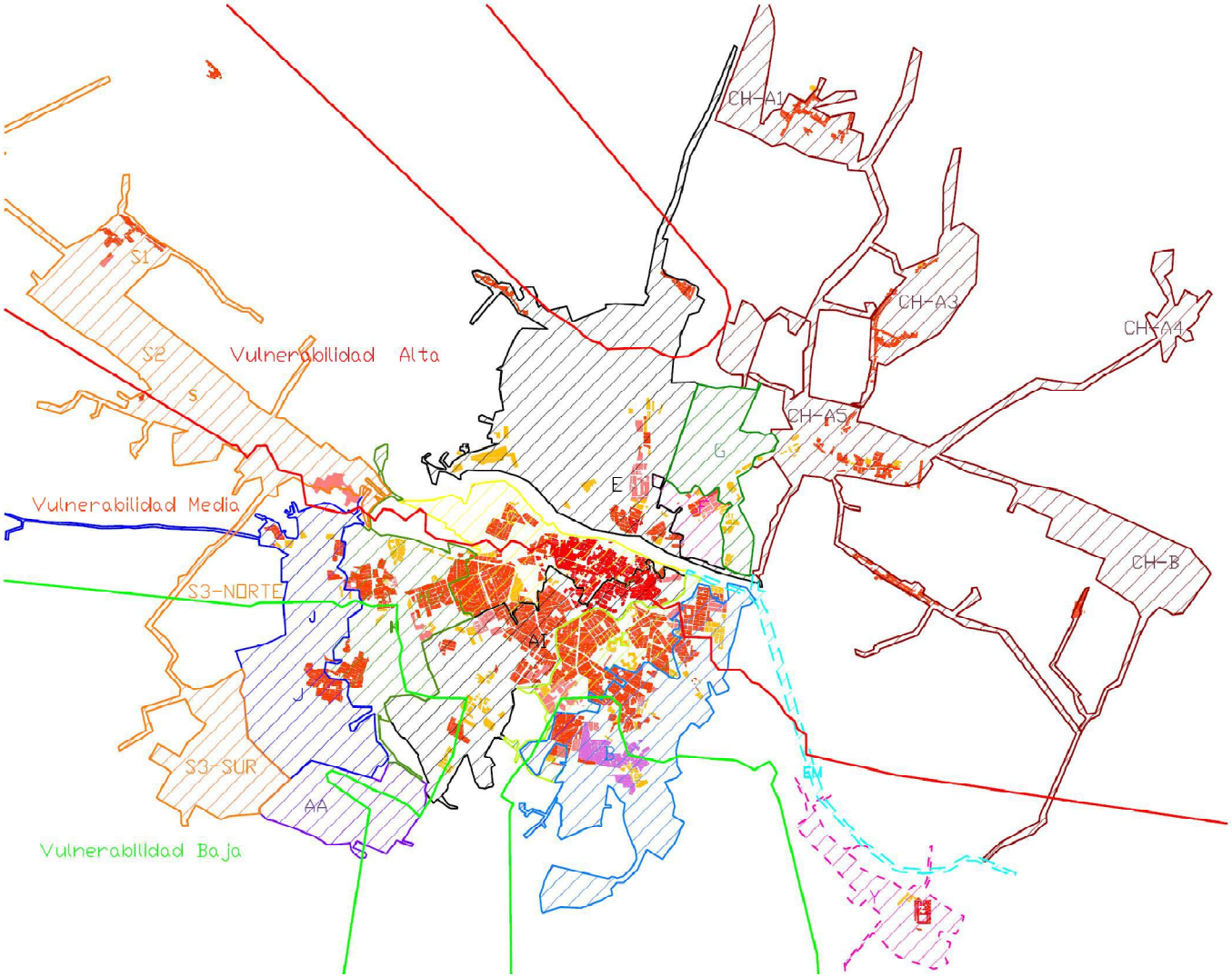


Fuente: Elaboración propia con datos del Ayuntamiento de Zaragoza.

Como se ve en la Figura nº 19 las cuencas CH-A, CH-B e Y cuentan con pocos equipamientos. No obstante incorporan zonas de nueva urbanización con baja densidad lo que supone una oportunidad para la implementación de SUDS, siempre considerando a la hora de seleccionar técnicas de infiltración que dichas cuencas albergan una intensa actividad industrial y se localizan en una zona de alta vulnerabilidad del acuífero. Por su parte, las cuencas AI y E cuentan con la mayor concentración de equipamientos públicos y serían las idóneas para acoger proyectos piloto demostrativos. Finalmente las cuencas AD y C, que se localizan en zona de alta densidad de edificación pero con un nivel medio de equipamientos podrían incorporar SUDS que requieran poco espacio como las cubiertas vegetadas.

En la Figura nº 20 se muestra la distribución de suelo urbano consolidado que ofrece una panorámica de las cuencas vertientes en las que la disponibilidad de espacio es un hándicap a la hora de seleccionar los SUDS.

Figura nº 20.- Localización de suelo urbano consolidado y alta densidad de edificación en las cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza.



Fuente: Elaboración propia basada en datos del Ayuntamiento de Zaragoza

Finalmente, en relación a las políticas de fomento de la movilidad sostenible en la ciudad de Zaragoza, a través del impulso al transporte en bicicleta y al uso del transporte público, ayudan a la disminución de la contaminación en origen y, por tanto, a la reducción del impacto de las descargas en los medios receptores. El informe de actualización de indicadores del Ayuntamiento de Zaragoza (Zaragoza, 2013) recoge el indicador que se muestra en la Tabla 53.

Tabla 53.- Indicador de movilidad urbana en la ciudad de Zaragoza.

Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Udad	Zaragoza
MU1. % de desplazamientos en transporte público, bicicleta y a pie	R	Aumento	%	58,8

Fuente: Elaboración propia basada en datos del Ayuntamiento de Zaragoza.

El indicador muestra un alto grado de uso del transporte sostenible, conseguido, entre otras políticas, gracias a la implantación del tranvía, a la pacificación de calzadas y a la extensión e interconexión de los carriles bici. La ciudad de Zaragoza ha implementado así un programa exitoso y ejemplar de fomento de la movilidad urbana sostenible que, como resultado indirecto, facilitará la mejora de la salud de los ecosistemas acuáticos. No resulta por tanto necesaria ninguna línea de actuación adicional en este sentido.

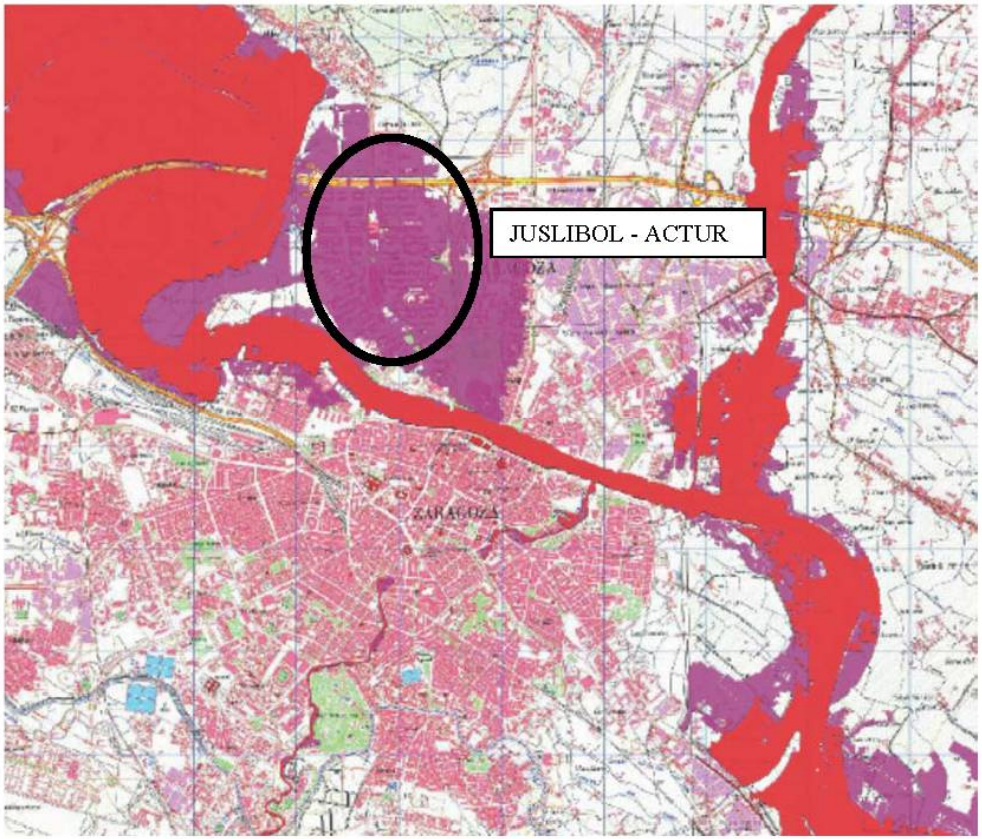
3. Ordenación del Territorio y Gestión del riesgo de inundaciones.

En relación a la ordenación territorial, el desarrollo de la ciudad de Zaragoza se limita por sus tres ejes principales de drenaje: El río Ebro, el río Huerva y el río Gállego. Estos tres ríos marcarán igualmente el desarrollo de la red de saneamiento que a día de hoy alinea el trazado de los colectores principales a la red de drenaje natural que le proporciona la posibilidad de aliviar caudales sobrantes en tiempos de lluvia.

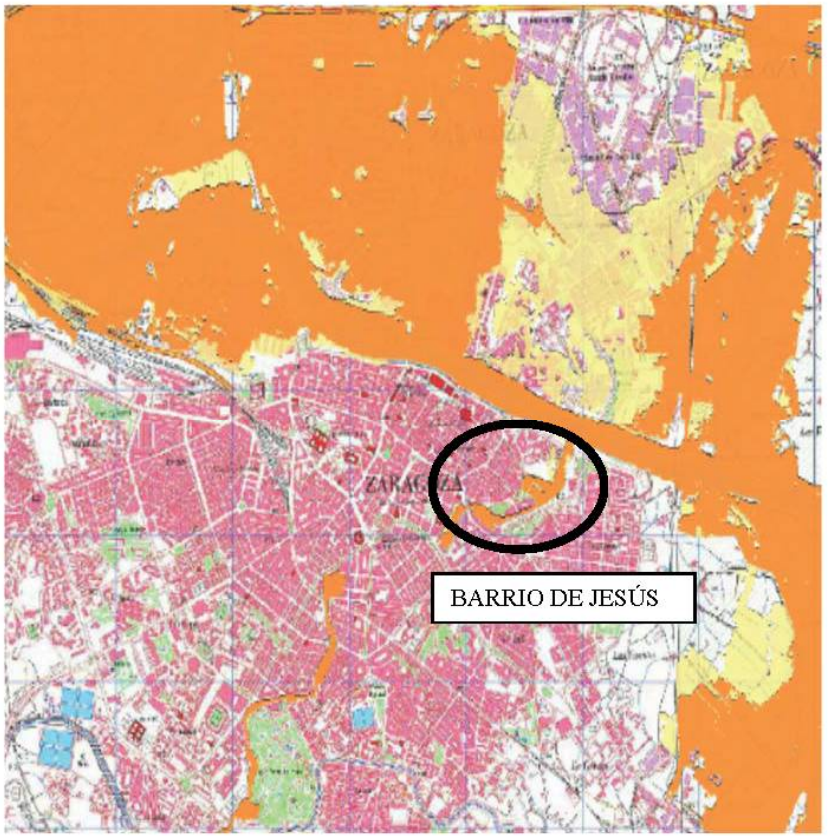
Gracias a la aprobación de la Directiva de Inundaciones 2007/60/CE, la Confederación Hidrográfica del Ebro cuenta con un Plan de gestión del riesgo de inundación que está en fase de información pública en el momento de redacción de la presente tesis doctoral. En la cartografía desarrollada en el citado plan se incorporan los planos que se muestran en la Figura nº 21.

Figura nº 21.- Mapa de zonas inundables

Periodo de retorno de 10 y 50 años



Periodo de retorno de 100 y 500 años



Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro (SITEbro).

En la Figura nº 21se ve como gran parte de la margen izquierda de la ciudad está asentada sobre zona inundable con un periodo de retorno de 50 años. Resulta de interés comprobar que la delimitación de la zona inundable correspondiente al Periodo de Retorno de 100 años coincide con la delimitación de los límites de expansión primitivos de la ciudad. Históricamente la ciudad de Zaragoza se desarrolló en la margen derecha del río Ebro, con la excepción del actual barrio del Arrabal, comunicado por el Puente Romano, única zona de la margen izquierda que no está catalogada como zona inundable y que sólo sufre una ligera afección bajo un periodo de retorno de 500 años. Esta delimitación de los asentamientos humanos sólo se rebasó a partir de la segunda mitad del siglo XX, momento en el que se produjo la expansión de la ciudad para acoger a la población rural atraída por la capital.

Por otra parte la Figura nº 22muestra el riesgo de afección a las actividades económicas por inundaciones.

Figura nº 22.- Mapa de riesgo de afección a las actividades económicas por inundación en periodo de retorno de 100 años.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro (SITEbro).

En la Figura nº 22 se señala en color azul la afección a las infraestructuras hidráulicas sanitarias. Los mapas de afección a actividades económicas no muestran afección en los colectores principales del sistema de saneamiento. Se entiende que esto no significa que la red de colectores no vaya a sufrir ningún impacto por la inundación sino que el estudio no ha llegado a ese nivel de detalle. De hecho, como se verá más adelante la configuración de los colectores principales del sistema de saneamiento siguen el curso de los ríos que configuran la red de drenaje natural de la ciudad (ríos Ebro, Huerva y Gállego), por lo que las crecidas de los mismos afectarán a los puntos de alivio de los colectores principales al menos en periodo de retorno de 10 años. Además, desde el departamento de Explotación de redes del Ayuntamiento de Zaragoza se reportan casos anuales de inundación en algunas zonas de la margen derecha, en la desembocadura del río Huerva y el río Gállego (Barrio de Jesús) así como en la confluencia de los barrios del Actur y Juslibol, marcados en el mapa.

En relación a las Estaciones Depuradoras de la EDAR La Almozara y EDAR La Cartuja, éstas se ven afectadas por las inundaciones en un periodo de retorno de 100 años. No obstante se reportan paradas anuales de las líneas de tratamiento de las EDAR con caudales del Ebro superiores a 1000m^3/s, situación que ocurre anualmente. Por tanto se entiende que los periodos de retorno de los mapas de inundación no reflejan la realidad que se quiere estudiar, focalizando la información en las inundaciones físicas de las infraestructuras y no en la afección de las mismas a las líneas de tratamiento.

Por tanto, no se pueden definir en la cuenca urbana de Zaragoza los indicadores de gestión del riesgo de inundaciones propuestos en la metodología con la información existente.

Una línea de actuación será el estudio en profundidad de la relación entre las inundaciones y la gestión de los sistemas de saneamiento en entornos urbanos. Por una parte se estudiará la afección, con periodos de retorno de 5 años y 25 años, de las inundaciones del Ebro al funcionamiento de la EDAR La Almozara y la EDAR La Cartuja así como a los colectores principales a ambas márgenes del río Ebro y a sus puntos de alivio. Se deberá incluir además en el estudio de riesgos de inundación en entornos urbanos la falta de capacidad del sistema de saneamiento caracterizando los sucesos y sus impactos. Específicamente en Zaragoza se estudiarán las cuencas vertientes E (Actur), CHA-1 (Ciudad del Transporte-San Juan de Mozarrifar) y AD (Barrio de Jesús). Una vez carac-

terizados ambos fenómenos podrán definirse líneas de actuación para minimizar los riesgos de inundación en la ciudad de Zaragoza.

Las medidas propuestas en el Proyecto de Plan de Gestión de Inundaciones de la Cuenca del Ebro destaca la necesidad de emplazar las infraestructuras de depuración de nueva construcción en zonas no inundables siguiendo la cartografía desarrollada a tal fin así como la mejora de la capacidad de drenaje artificial y promoción de los sistemas de drenaje urbano sostenibles como intervenciones físicas recomendadas en los entornos urbanos para disminuir las inundaciones por aguas superficiales, con la consecuente adaptación normativa y redacción de manuales técnicos para su implementación. Así, bajo un enfoque de gestión de las inundaciones, se detecta la necesidad y oportunidad de intensificar la implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) como medida para disminuir la vulnerabilidad de los entornos urbanos, lo que refuerza la idoneidad del presente estudio.

4. **Marco socioeconómico.**

El desarrollo industrial supone el 29% de la actividad productiva de la ciudad de Zaragoza y el 31.1% de la actividad de Aragón. Las políticas económicas respaldan una continuidad e intensificación de dicha actividad. Actualmente el 25% de la cuenca urbana está ocupado por suelos de uso industrial y vías de comunicación y transporte, con una tendencia esperada de aumento. Dado que el desarrollo industrial a medio plazo tiende a la consolidación y al crecimiento y considerando que en los suelos industriales se desarrollan actividades que concentran los focos con mayor potencial contaminantes, se detecta la necesidad de priorizar la implementación de SUDS en las zonas industriales. Para ello habrá que considerar en todo momento que las actividades industriales conllevan un mayor riesgo de contaminación de suelos, factor limitante para la implantación de técnicas de infiltración que podrían poner en riesgo el buen estado del acuífero.

5. **Marco normativo.**

La prestación del servicio de saneamiento se rige por la Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua (OMECGIA) aprobada de manera definitiva por el pleno del Ayuntamiento de Zaragoza el 29 de Noviembre de 2013. En el Anejo 3 se realiza un análisis detallado de la Ordenanza. A continuación se resumen los contenidos más relevantes en relación con la gestión de las aguas de lluvia.

La ordenanza tiene una clara vocación de protección del medio por lo que, como marco general, converge con los objetivos estratégicos de la gestión integral de las aguas de lluvia. En el momento de su diseño y aprobación existía ya un amplio consenso científico sobre los importantes impactos que los procesos de urbanización están generando sobre los ecosistemas acuáticos y sobre la necesidad de abordar la gestión de las aguas de lluvia para conseguir, por una parte, minimizar las inundaciones en las cuencas urbanas y, por otra, minimizar los impactos en los ecosistemas acuáticos receptores de las descargas de los sistemas de saneamiento en episodios de lluvia. No obstante esta problemática no está explícitamente recogida en el texto.

En relación a la evacuación de las aguas de lluvia (Artículo 14), la filosofía de la OMECGIA es la de evacuar la totalidad de las aguas pluviales lo más rápidamente posible. Esto es diametralmente opuesto a la filosofía de la gestión sostenible de las aguas de lluvia en los entornos urbanos basada en dos principios básicos. Por una parte, siempre que las condiciones del suelo lo permitan, restaurar el ciclo natural del agua a través de la permeabilización de la cuenca urbana y consecuente infiltración de las aguas de lluvia, lo que permitirá a su vez una reducción de los caudales de entrada a la red. Y, por otra parte, implementar mecanismos que permitan retrasar la evacuación de las aguas de lluvia para reducir así las puntas de caudal. Véase, cuanto menos caudal de aguas de lluvia y más lento entre dicho caudal al sistema mejor.

En resumen, la falta de identificación de la gestión integral de las aguas de lluvia como elemento clave en la conservación del recurso se traduce en el diseño de un articulado en el que las pocas medidas existentes relativas a la gestión de las aguas de lluvia (criterios de diseño de tanques de tormenta, instalación de redes separativas, reutilización de aguas de lluvia) aparecen incompletas y/o con un alto grado de arbitrariedad.

Con el fin de solventar las carencias detectadas en la Ordenanza Municipal para una gestión integral de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza se realizan a continuación varias propuestas de modificación del articulado existente y la incorporación de nuevos elementos.

Por una parte, se propone incluir en el Plan Marco de la gestión sostenible del agua un Programa Sectorial para la Gestión Integral de las Aguas de Lluvia, que incluya una propuesta de actuaciones coordinadas en diversos ámbitos (ciclo integral del agua, ur-

banismo, movilidad, económico, social), con el objetivo de tender hacia la sostenibilidad en la gestión de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza.

En relación al articulado de la normativa vigente, se propone modificar el "Artículo 12. Criterios para el alcantarillado", para establecer con carácter obligatorio en los proyectos de urbanización un estudio sobre la aportación de las pluviales en cada cuenca efluente así una propuesta de aplicación de SUDS. Para ello se deberá facilitar una metodología municipal que unifique criterios y resultados de los estudios. En relación a los criterios de diseño de los tanques de tormenta y depósitos de laminación del Anexo III de la normativa, y en línea con las normativas europeas (Alemania, Gran Bretaña, Suiza, Austria, Francia, Holanda, etc.), se propone redefinir los criterios de diseño de los tanques de tormenta incluyendo criterios de protección del medio (concentraciones máximas de DQO de las descargas directas, frecuencias máximas de descarga, índices de sensibilidad, etc.). Se deberá avanzar igualmente, en coordinación con la Confederación Hidrográfica del Ebro, en la definición de unos estándares intermitentes de emisión específicos para cada masa de agua superficial, para el dimensionamiento de las infraestructuras.

Igualmente, se propone modificar el artículo 14 para incorporar la filosofía de la gestión sostenible de las aguas de lluvia en los entornos urbanos, que puede resumirse en que cuanto menos caudal de aguas de lluvia se incorpore al sistema de saneamiento y más lentamente se produzca la entrada de dicho caudal al sistema mejor.

Por otra parte, la OMECGIA respalda en el Artículo 69 la instalación de redes separativas en zonas de nueva urbanización así como la reutilización de las aguas de lluvia para riego, limpieza e infiltración como medidas de ahorro y eficiencia en el ciclo integral del agua. No obstante estas medidas no se establecen con carácter obligatorio. La decisión queda supeditada a un informe justificativo. Se propone elaborar un manual técnico de referencia con indicadores claros, minimizando la arbitrariedad de la actual ordenanza para determinar, de manera inequívoca las condiciones que justifiquen la excepcionalidad en el uso de las redes separativas y en la reutilización del agua de lluvia para infiltración y/o riego de parques y jardines.

Además, se propone modificar los artículos 67, 79, 80 y 84 relativos la reutilización, incluyendo la reutilización y/o infiltración de aguas de lluvia como medidas prioritarias al menos en las instalaciones públicas y en el riego de parques y jardines. Para ello será necesaria una caracterización de las cargas de contaminación de las aguas de lluvia y la

escorrentía urbana en la ciudad de Zaragoza y la inclusión en la ordenanza de los umbrales de contaminación de las aguas de lluvia y de escorrentía admisibles clasificados usos. Dichos umbrales deberán cumplir el Real Decreto 1620/2007, aprobado el 7 de diciembre de 2007, por el que se regula el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Así, para la definición de los distintos usos la Tabla 54 muestra una comparativa de los usos contemplados en el Real Decreto 1620/2007 vigente en España, los usos contemplados por la Organización Mundial de la Salud (2006) y los contemplados por la Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos (2004), normativas vigentes en el momento de redacción de la presente tesis doctoral.

Tabla 54.- Comparación de los usos contemplados en la normativa de reutilización según Real Decreto 1620/2007, Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) y Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos (USEPA, 2004).

España RD 1620/2007	**OMS 2006**	**USEPA 2004**
Existen 13 usos separados en 5 grupos	Usos Agrícolas:	Existen 6 grupos de usos
Urbanos	Riego sin restricciones	Urbanos
Agrícolas	Riego con restricciones	Agrícolas
Industriales	Riego localizado	Industriales
Recreativos		Ambientales-recreativos
Ambientales		Recarga de acuíferos
		Aumento de suministro de agua potable

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino ((Marm, 2010)

En relación a los umbrales de los parámetros a considerar para la reutilización según los usos, la Tabla 55 muestra una comparativa de los criterios de calidad del RD 1620/2007, de la Organización Mundial de la Salud (2006) y de la Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos (USEPA, 2004) con los valores estándar en agua de lluvia y en escorrentía urbana, valores que servirán de base para la definición de los umbrales a aplicar en la ciudad de Zaragoza.

Tabla 55.- Comparación de umbrales de parámetros a contemplar para la reutilización según usos del RD 1670/2007, OMS y USEPA con valores característicos de las aguas de lluvia y las aguas de escorrentía urbana (Puertas Agudo et al., 2008).

Parámetro	España RD 1620/2007	OMS 2006	USEPA 2004	Agua Lluvia	Escorrentía urbana
Huevos de nemátodos intestinales (Huevos/10 l)	En distintos usos como norma general <1	Riego con o sin restricciones <=10 redicodp a <=1 cuando hay niños menores de 15 años expuestos Riego localizado: no hay recomendación	No hay recomendaciones	No hay datos	No hay datos
Escherichia coli (UFC/100ml)	Usos agrícolas: Entre 100 y 10.000	Riego sin restricciones<1000 (aumentada a 10.000 cuando la cosecha de raiz no haya crecido)	Usos agrícolas: cultivos comestibles que no se procesan industrialmente: no detectable	0	6430
	Usos urbanos: Entre 0 y 200	Riego con restricciones<100.000 en conjunción con ´tecnicas de control de la exposición humana.	Cultivos comestibles que se procesan comercialmente y cultivos no comestibles <200		
	Usos industriales: Entre 0 y 10.000	Riego localizado sin recomendaciones	Riego en áreas de acceso restringido, construcción, uso industrial y uso ambiental<200		
	Usos recreativos: Entre 200 y 10.000		Usos urbanos, masas de agua recreativas, agua potable: no detectable		
	Usos ambientales: Entre 0 y 10.000				
Sólidos en suspensión (mg/l)	Usos urbanos: Entre 10 y 20 Usos agrícolas: Entre 20 y 35 Usos industriales: Entre 20 y 35 Usos ambientales: Entre 10 y 35	No hay recomendaciones	Riego de áreas de acceso restringido, de cultivos que se procesan comercialmente, de cultivos comestibles, estanques de jardines, construcción, uso industrial, uso ambiental: entre 5 y	Entre 2 y 10	190

Tabla 54 (continuación). Comparación de umbrales de parámetros a contemplar para la reutilización según usos del RD 1670/2007, OMS y USEPA con valores característicos de las aguas de lluvia y las aguas de escorrentía urbana (Puertas Agudo et al..2008).

Parámetro	España RD 1620/2007	OMS 2006	USEPA 2004	Agua Lluvia	Escorrentía urbana
Turbidez (UNT)	Usos urbanos: Entre 2 y 10 Usos agrícolas: Entre 0 y 10 Usos industriales: Entre 1 y Usos ambientales: A estudiar	No hay recomendaciones	Uso urbano; uso agrícuola(cultivos comestibles no procesados); Estanques recreativos; uso potable; recarga de acuíferos de agua potale por inyección<=2	Entre 4 y 7	No hay datos
Legionella spp (UFC/l)	Usos urbanos con riesgo de aerosolización<100 Usos agrícolas<1000 Usos industriales<100 Usos recreativos <1000	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	No hay datos	No hay datos
T.saginata/T.solium /huevos/l)	Usos agrícolas<1	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	No hay datos	No hay datos
Fósforo total (mg/l)	Usos recreativos<20	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	0,01-0,05	0,34
Nitrógeno total (mg/l)	Usos ambientales<10	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	0,29-0,84	3,2
NO_3 (mg/l)	Usos ambientales<25	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	0,12-0,73	No hay datos
Enterovirus, Giardia,Cryptosporidium	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	No hay datos	No hay datos
Cl_2 residual	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	1 mg/l (mínimo) - No se mide para recarga de acuíferos por percolación	0	0
Carbono Orgánico Total (mg/l)	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	Reutilización para agua potable (recarga de acuíferos por inyección)<=3	Entre 1 y 3	No hay datos
Haluros Orgánicos Total (TOX) (mg/l)	No hay recomendaciones	No hay recomendaciones	Reutilización para agua potable (recarga de acuíferos por inyección)<=0,2	No hay datos	No hay datos

Fuente: Elaboración propia basada en datos del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Marino y Rural (Marm, 2010)

A la espera de una caracterización exhaustiva de las cargas de contaminación de las aguas de lluvia y de la escorrentía urbana de la ciudad de Zaragoza que ratifiquen los valores estándar adoptados, las tablas anteriores muestran un gran potencial en el uso de las aguas de lluvia que cumplen los umbrales marcados por las distintas normativas para diversos usos.

En relación con la escorrentía urbana, uno de los obstáculos más importantes a la hora de proceder con la reutilización planificada es la alta carga de contaminación en metales pesados. En relación con las concentraciones máximas de metales pesados recomendadas para la reutilización de las aguas de lluvia, la ordenanza municipal recoge en el Anexo XIX del Artículo 84 las concentraciones máximas instantáneas permitidas para las infiltraciones e inyecciones al subsuelo. La Tabla 56 compara dichas concentraciones con los valores característicos de las aguas de escorrentía urbana.

Como se ve en la Tabla 56 sería necesario un tratamiento previo a la reutilización de las aguas de escorrentía para la infiltración en el acuífero. La Tabla 57 muestra los rendimientos de eliminación de distintos contaminantes proporcionados por algunos de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible.

Como muestra la Tabla 57, los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible realizan tratamientos sencillos de las aguas de escorrentía, disminuyendo la contaminación de los metales pesados con una alta eficacia. Así, la incorporación de los SUDS para la gestión de las aguas de lluvia posibilita el aprovechamiento de las aguas de escorrentía, avanzando en la línea marcada por la OMECGIA de eficiencia en el uso de los recursos hídricos y contribuyendo no sólo a reducir la presión sobre los medios a través de la incorporación de nuevos recursos, sino también a la recarga de los acuíferos contribuyendo así a restaurar el ciclo hidrológico natural de la cuenca urbana.

En relación al aprovechamiento del agua de lluvia se propone la promoción de la captación de aguas de lluvia en azoteas de edificios para reutilización en cisternas, sistemas de lucha contra incendios riego de jardinería y cualquier otro uso con un grado similar de exposición y acceso del público al agua. Además, la infiltración de las aguas de lluvia y de la escorrentía urbana supondría un apoyo adicional a las actuaciones para el control de las plumas de contaminación térmica que afectan a las masas de agua subterráneas de la ciudad de Zaragoza.

Tabla 56.- Comparación de las concentraciones máximas para infiltración e inyección de la OMECGIA y los valores típicos de la escorrentía urbana.

Parámetro	Unidad	Concentración máxima instantanea para infiltración e inyección - OMECGIA	Escorrentía Urbana
pH	-	6-9	3-6
Temperatura	ºC	25	--
Conductividad	ps/cm	3000	--
DBO_5	mg/l	30	11
DQO	mg/l	100	85
Aceites y grasas	mg/l	1	--
Fenoles	mg/l	0,1	--
Cianuros libres	mg/l	0,5	--
Hierro	mg/l	5	1,36-7,62 kg/km cuneta/día
Cobre	mg/l	2	0,03-0,015 kg/km cuneta/día
Cinc	mg/l	5	0,06-0,070 kg/km cuneta/día
Manganeso	mg/l	1	0,026-0,134 kg/km cuneta/día
Cadmio	mg/l	0,1	--
Cromo	mg/l	0,5	0,003-0,015 kg/km cuneta/día
Niquel	mg/l	2	0,002-0,038 kg/km cuneta/día
Estaño	mg/l	2	--
Selenio	mg/l	0,5	--
Plomo	mg/l	0,1	0,006-0,178 kg/km cuneta/día
Antimonio	mg/l	0,1	--
Mercurio	mg/l	0,01	0,020609 kg/km cuneta/día
Arsénico	mg/l	0,5	--

Fuente: Elaboración propia basada en datos del Ayuntamiento de Zaragoza y de Mattraw 1997).

Tabla 57.- Rendimiento de eliminación de contaminantes de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible.

	Pavimentos Porosos para distintas lluvias % Medio anual de eliminación					Zanjas de infiltración para distintas lluvias							Franja de tierra filtrante		
Parámetro	**31.4 mm/ha imp.**	**62.9 mm/ha imp.**	**Tormenta de diseño (2 años)**	**Depósito de percolación (%)**	**Depósito de infiltración (%)**	**31.4 mm/ha imp.**	**62.9 mm/ha imp.**	**Tormenta de diseño (2 años)**	**Depósito de filtración tipo "Austin"**	**Filtros de arena**	**Filtro de arena y turba**	**Canales de drenaje con cubierta vegetada**	**6 m de ancho con césped**	**30 m de ancho arbustos y distribuidor flujo**	**Estanque húmedo**
SST	60 – 80	80 - 100	80 - 100	99	0 – 99	60-80	80-100	80-100	75 – 95	60 - 80	80 - 100	60 – 80	20 – 40	80 – 100	54
P total	40 - 60	40 - 60	60 – 80	65 – 75	0 – 75	40-60	40-60	60-80	30 – 60	20 - 40	60 - 80	20 – 40	0 - 20	40 – 60	
N total	40 - 60	40 - 60	60 – 80	60 – 70	0 – 70	40-60	40-60	60-80	30 - 50	20 - 40	40 - 60	20 – 40	0 - 20	40 – 60	
NTK									40 – 60						
COT									40 – 60						
Zn				95 – 99	0 – 99										70
Pb				-	0 – 99								0 - 20	60 – 80	70
DBO	60 – 80	60–80	80 - 100	90	0 – 90	60-80	60-80	60-80	30 – 50	60 - 80	80 - 100	20 – 40	0 - 20	80 - 100	
Bacterias	60 – 80	60–80	80 - 100	98	75 - 98	60-80	60-80	80-100	40 – 80 (según metal)	40 - 60	40 - 60				
Metales	40 - 60	60 – 80	80 - 100			60-80	60-80	80-100	40 - 70	60 - 80	80-100	60 - 80			

Fuente: Elaboración propia basada en datos del informe CIRIA (Kellagher et al., 2007).

Como se ha comentado, para una aplicación de estas propuestas, habrá que realizar una campaña de muestreo exhaustiva, caracterizando las aguas de lluvia y de escorrentía, y realizando ensayos de laboratorio para comprobar el grado de eficacia de las distintas técnicas disponibles, con el fin de evitar cualquier riesgo de salud pública debido a la reutilización de aguas de baja calidad.

En relación al aprovechamiento de aguas pluviales por parte de particulares se propone incluir un artículo similar a la Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid (ANM 2006_50), en la que se promueve esta opción, quedando restringido al riego de zonas verdes, estando expresamente prohibido el riego por aspersión. En esta línea varias ordenanzas municipales en Navarra (Aranguren, Ayegui, Lekumberri, Castejón, etc.) incorporan la obligatoriedad de un sistema de aprovechamiento de las aguas de lluvia en las viviendas unifamiliares (CRANA, 2010) siguiendo las recomendaciones sobre las nuevas prácticas en la gestión de las aguas de lluvia incorporadas en el Plan de Ordenación Territorial (Gobierno de Navarra, 2011). Para ello se ofrecen unas normas técnicas municipales para el diseño y dimensionamiento de las instalaciones y se promueve la implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible tanto en sus ordenanzas municipales como en sus planes de urbanísticos.

En relación a la gestión sostenible de las aguas de lluvia en el planeamiento urbanístico, se propone incluir un articulado similar al de la Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid (ANM 2006_50) que promueva la utilización de recursos hídricos alternativos estableciendo sistemas de captación, almacenamiento y tratamiento de las aguas de lluvia en los edificios, en vías urbanas y aparcamientos y en campos y pistas deportivas. Se deberá además incluir en todas las actuaciones de urbanización la obligatoriedad del uso de superficies permeables, minimizándose la cuantía de pavimentación u ocupación impermeable a aquellas superficies en las que sea estrictamente necesario. Esta medida es de aplicación en todos los espacios libres. Así, en la citada normativa, se especifica que los proyectos de urbanización deberán indicar el porcentaje de acabados permeables de la red de espacios libres del suelo a urbanizar, estableciendo los siguientes mínimos:

a. en las aceras de ancho superior a 1,5 m: 20 % como mínimo de superficie permeable.

b. para bulevares y medianas: 50 % como mínimo de superficie permeable.

c. para las plazas y zonas verdes urbanas: 35 % como mínimo de superficie permeable.

Los proyectos de urbanización deberán indicar el porcentaje de acabados permeables de la red de espacios libres del suelo a urbanizar.

En relación a los grandes consumidores, se propone incluir la obligatoriedad de disponer de un plan de gestión sostenible del agua para todos los establecimientos industriales, comerciales o de servicios que incluya el aprovechamiento de aguas pluviales y las medidas de eficiencia a aplicar, en el que se especifiquen las metas de conservación y el cronograma de actuaciones previsto.

6. **Instrumentos económicos.**

Los ciudadanos de Zaragoza contribuyen a través de tres instrumentos económicos a la financiación directa o indirecta de servicios relacionados con la gestión de las aguas de lluvia.

A nivel Estatal, el canon de vertido, gestionado por la Confederación Hidrográfica del Ebro, es una tasa que grava todos los vertidos al dominio público hidráulico (estén o no autorizados), siendo el sujeto pasivo quien lleve a cabo el vertido, en este caso el Ayuntamiento de Zaragoza, y el hecho imponible la realización del vertido. Su finalidad es financiar actuaciones de estudio, control, protección y mejora de sus medios receptores, siendo independiente de los cánones o tasas que puedan establecer las Comunidades Autónomas o las Corporaciones Locales para financiar obras de saneamiento y depuración.

A nivel autonómico, el Impuesto sobre la contaminación de las aguas (ICA) es un impuesto de finalidad ecológica que tiene la naturaleza de recurso tributario de la Comunidad Autónoma de Aragón y que se encuentra afectado a la financiación de las actividades de prevención de la contaminación, saneamiento y depuración previstas en la Ley 10/2014, de 27 de noviembre, de de Aguas y Ríos de Aragón. Es importante remarcar su condición de impuesto, que grava la contaminación del agua que se realiza por su uso, no una tasa destinada a la prestación del servicio de depuración. Fue creado por la Ley 6/2001, de 17 de mayo, con la denominación inicial de «canon de saneamiento», que se cambió por la actual de «impuesto sobre la contaminación de las aguas» por la Ley 2/2014, de 23 de enero, de Medidas Fiscales y Administrativas de la Comunidad

Autónoma de Aragón, y actualmente se regula en la Ley 10/2014, de 27 de noviembre. Este tributo autonómico está destinado a financiar las obras de saneamiento y depuración, de acuerdo con el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales Urbanas, el cual contenía la obligación de que las Comunidades Autónomas aplicasen un Canon de Saneamiento para hacer frente a los objetivos marcados por la Directiva 91/271/CEE, sobre Tratamiento de las Aguas residuales Urbanas.

A nivel municipal el tercer instrumento económico es la tarifa de saneamiento, incluida en la Factura del Agua. Esta factura, gestionada por el Ayuntamiento de Zaragoza, incluye el servicio de abastecimiento y la gestión de las basuras, servicios con competencia directa del Ayuntamiento de Zaragoza, y el servicio de saneamiento, competencia de Ecociudad Zaragoza S.A.U. En el Anejo 3 se analiza la ordenanza reguladora de las tarifas por la prestación de servicios vinculados al saneamiento y depuración de aguas del Ayuntamiento de Zaragoza. A continuación se resumen los aspectos clave de la misma.

El plan de medidas para reducir el impacto de los desbordamientos de los sistemas de saneamiento en episodios de lluvia incorporará actuaciones que se contemplan entre los fines los tres mecanismos recaudatorios. Por una parte, a través del canon de vertido la Confederación Hidrográfica del Ebro podría asumir el necesario programa de muestreo para la caracterización de la contaminación de las descargas y su impacto sobre el estado ecológico del medio receptor. Además, en coherencia con la aplicación de la Directiva de Inundaciones, lideraría las actuaciones encaminadas a profundizar en el conocimiento de la afección al sistema de saneamiento de las inundaciones del Ebro. Por su parte, el Impuesto sobre la Contaminación de las Aguas contemplaría la construcción de las infraestructuras necesarias para el correcto funcionamiento de las obras de saneamiento y depuración (por ejemplo los tanques de retención en la entrada de las EDAR y la incorporación de mecanismos para disminuir los impactos de los caudales punta en tiempo de lluvia sobre las líneas de tratamiento). Finalmente, a través de la tarifa por el servicio de saneamiento y depuración se podrían financiar las actuaciones relativas a la mejora del sistema de saneamiento (aumento de la capacidad de almacenamiento, mejora de puntos de alivio, mantenimiento de la red, gestión avanzada del sistema) así como de implementación de sistemas de drenaje urbano sostenibles.

Dado que la base imponible (volumen de agua residual generada inducido del volumen de agua consumida) de estos tres instrumentos económicos no está relacionada con el origen del problema de la gestión de las aguas de lluvia, que es la impermeabilización de la cuenca urbana, la utilización de las herramientas económicas vigentes se limita a la financiación y no así a la incentivación de buenas prácticas en la gestión de las aguas de lluvia, para la que deberán contemplarse nuevas herramientas económicas.

Se propone por tanto la aplicación de una nueva herramienta económica de incentivación de buenas prácticas en la gestión de las aguas de lluvia. En coherencia con las experiencias analizadas en el capítulo 2 se denominará a esta herramienta Tasa de Lluvia. Para el diseño la tasa de lluvia los principios contemplados en la OMECGIA sobre los que se fundamentan las actuales tarifas por los servicios de abastecimiento y saneamiento de Zaragoza, así como la estructura de tipos de hogar, exenciones y el cálculo de tarifas progresivas resultan adecuados. En cumplimiento del principio de sencillez en su aplicación se establecería un cobro anual. Así la tasa de lluvia podría aprovechar la estructura tarifaria existente (binómica y progresiva) pero utilizar como base imponible para los cálculos la unidad de superficie impermeabilizada.

La tasa de lluvia deberá ir acompañada de la implantación de herramientas económicas para la promoción de medidas de control en origen para la gestión de aguas pluviales en la línea de lo contemplado en el capítulo 2. Así se ofrecerán líneas de subvención de la inversión de instalaciones, reducción del impuesto sobre la renta y/o la reducción de la tasa de lluvia para la promoción de los sistemas urbanos de drenaje urbano sostenible. Además, siguiendo la exitosa experiencia de Estados Unidos y Australia, se propone la realización de un estudio de viabilidad de mercados de permeabilización como herramienta económica para una ordenación del territorio que integre la gestión sostenible de las aguas de lluvia como una componente esencial en los planes de urbanización y expansión de la ciudad de Zaragoza.

7. **Participación ciudadana.**

Los resultados del barómetro del Centro de Estudios Sociológicos (CIS, Septiembre 2012) muestran que el tema ambiental que más preocupa a los españoles es la contaminación provocada por el hombre de los ríos, lagos, arroyos y aguas subterráneas. De la población que reconoce tener muy poco interés o preocupación por los problemas del medio ambiente (32%), la mayoría (70%) cree que se debe a la falta de educación o

información sobre estos temas. Esta situación de partida invita a reflexionar sobre la necesidad de involucrar de manera activa a la ciudadanía en la resolución de los problemas medioambientales, sobre los que existe una alta sensibilidad.

La puesta en marcha de un plan integral de gestión del agua de lluvia en la ciudad de Zaragoza requiere del diseño y puesta en marcha de mecanismos de participación que faciliten la coordinación intercompetencial (Confederación Hidrográfica del Ebro, Instituto Aragonés del Agua, Ayuntamiento de Zaragoza y Ecociudad Zaragoza), intersectorial (ciclo integral del agua, urbanismo, ámbito normativo, económico y social) e interdisciplinar, incorporando en su diseño, al menos, a especialistas en ingeniería, hidrología, hidrogeología, biología, urbanismo, movilidad, economía, marco normativo y participación ciudadana de los distintos ámbitos de competencia.

En relación a la participación ciudadana la OMECGIA incluye la reglamentación necesaria para garantizar el acceso a la información, la formación y educación ambiental así como la participación ciudadana para la consecución de una gestión integral del ciclo del agua.

En el Anejo 4 se realiza un análisis de los procesos de participación ciudadana llevados a cabo en la ciudad de Zaragoza. Los resultados muestran que existe una sensibilidad social hacia la problemática de la gestión de las aguas de lluvia en el entorno urbano de Zaragoza. Así, los agentes sociales no sólo perciben los impactos en la calidad del agua del río Ebro en tiempos de lluvia, sino que proponen medidas encaminadas a la resolución del problema, no sólo técnicas, sino también ambientales, institucionales (coordinación), normativas (homogenización de criterios), económicas (canon de vertido) y sociales (educación ambiental) . Se cuenta por tanto con una situación de partida favorable para involucrar a los agentes sociales en la definición de un plan de medidas integrado y participativo para la resolución de la problemática de gestión de las aguas de lluvia en Zaragoza.

Las campañas promovidas por el Ayuntamiento de Zaragoza se han estructurado alrededor de un eje de trabajo para la reducción de los consumos domésticos, bajo el lema “Zaragoza, ciudad ahorradora de agua” consiguiendo notables éxitos. No obstante no ha existido hasta el momento de redacción del presente estudio ninguna campaña para acercar a la ciudadanía a la problemática asociada al modelo actual de desarrollo de la ciudad, altamente impermeabilizada y con altos impactos sobre los ecosistemas acuáti-

cos. Parece por tanto necesario incluir estos contenidos en las líneas de acción del ayuntamiento para fomentar la información y formación de la ciudadanía permitiendo una necesaria participación e involucración ciudadana en la resolución del problema. La estrategia de participación ciudadana deberá ponerse en marcha previo establecimiento de las herramientas económicas a implementar, definiendo las mismas en un proceso participativo que garantice la máxima aceptabilidad de las medidas a poner en marcha para la gestión sostenible e integral de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza.

6. Indicadores de sostenibilidad del Sistema de Saneamiento

En el Anejo 5 se recoge la información relativa a las cuencas vertientes, la red de alcantarillado, la red principal de colectores, los puntos de alivio, los tanques de tormenta y depósitos de laminación y las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). En base a la exhaustiva caracterización del sistema de saneamiento se determinan los indicadores que se exponen a continuación.

1. Red de Alcantarillado y Colectores principales

La Tabla 58recoge los resultados de la aplicación en la ciudad de Zaragoza de los indicadores propuestos para el diagnóstico de la red de alcantarillado y los colectores principales.

Tabla 58.- Resultados de aplicación de los indicadores de la red de colectores a la ciudad de Zaragoza.

Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Zaragoza
RC1. Km de red separativa en relación al global	P	Aumento/Optimización	%	13,5
RC1. Porcentaje de la red de colectores principales con diámetros inferiores a 180 cm	P	Aumento/Optimización	%	55
RC2. Porcentaje de la red de colectores principales con pendiente media menor a 5m/km	P	Disminución/ Optimización	%	75
RC3. Número de limpiezas anuales de mantenimiento	P	Optimización	N	1

Fuente: Elaboración propia.

Como muestra la Tabla 58, la orografía de la cuenca urbana, predominantemente plana, da lugar a una red con un 75% de las conducciones con una pendiente media menor a

5m/km. Esto provoca una velocidad de recorrido baja (<1m/s) que coadyuva al fenómeno de sedimentación de los sólidos en suspensión de la red. Esto, unido a la climatología de la cuenca con una distribución pluviométrica de lluvias poco frecuentes pero intensas y a que el 86.5% de la red es de tipo unitario, provoca un aumento de los impactos de las descargas de los sistemas de alcantarillado en tiempos de lluvia dado que, a la contaminación propia de la escorrentía por el lavado de la cuenca urbana y a la contaminación de las aguas residuales se le suma la contaminación por lavado de los sedimentos acumulados en cuenca urbana y en la red de saneamiento. Resulta por tanto de especial interés como medida preventiva el baldeo de la cuenca urbana y la limpieza rutinaria de las redes de alcantarillado, aumentando la frecuencia acordada en contrato municipal vigente de mantenimiento que redujo las labores de limpieza a una limpieza anual.

Finalmente, la red cuenta con el 55% de los colectores principales con diámetros inferiores a 180 cm, lo que representa una limitada capacidad hidráulica para transportar los caudales punta en tiempo de lluvia hasta las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.

2. **Capacidad de almacenamiento.**

La Tabla 59 muestra estos resultados de acuerdo con la propuesta de indicadores de la capacidad de almacenamiento que se proponen en la metodología desarrollada en el capítulo 3.En el Anejo 5 se puede consultar el inventario, la localización y las características de los tanques de tormenta y los depósitos de laminación del sistema.

Tabla 59.- Resultados aplicación de indicadores de capacidad de almacenamiento a la ciudad de Zaragoza.

Indicador		Tendencia deseada	Unidad de medida	Zaragoza
CA1. Capacidad de almacenamiento global del sistema de saneamiento por hectárea neta total	P	Aumento/Optimización	m3/ha neta	46,17
CA2. Capacidad de almacenamiento del sistema uniñtario por hectárea neta	P	Aumento/Optimización	m3/ha neta	4,81

Fuente: Elaboración propia.

El sistema de saneamiento de Zaragoza cuenta con un total de 122.200 m^3 de almacenamiento, de los que 32.200m^3 provienen del almacenamiento aportado por 14 tanques

de tormenta. Únicamente 3 de los 14 tanques de tormenta (TT007, TT008 y TT011), se localizan en cuencas vertientes con sistemas unitarios. El resto de tanques de tormenta así como todos los depósitos de laminación se localizan bien en cuencas vertientes en zonas de nueva urbanización que cuentan con redes separativas (AA y S3-Sur), bien en poblaciones fuera del área de estudio (Garrapinillos). Por tanto la capacidad de almacenamiento de los caudales gestionados en el sistema unitario se ve reducida a 11.000 m^3 aportados por los tres tanques de tormenta localizados todos ellos en la cuenca vertiente E, en la margen izquierda del río Ebro, perteneciente a la zona servida por la EDAR La Cartuja.

Por otra parte, la Tabla 60 muestra la comparación de los volúmenes específicos de almacenamiento necesarios según las normativas analizadas en ambos supuestos, considerando el sistema global de saneamiento (red separativa y red unitaria) y considerando únicamente la zona servida por sistema unitario.

Tabla 60.- Comparación del volumen de almacenamiento específico necesario en la cuenca urbana de Zaragoza según distintas normativas.

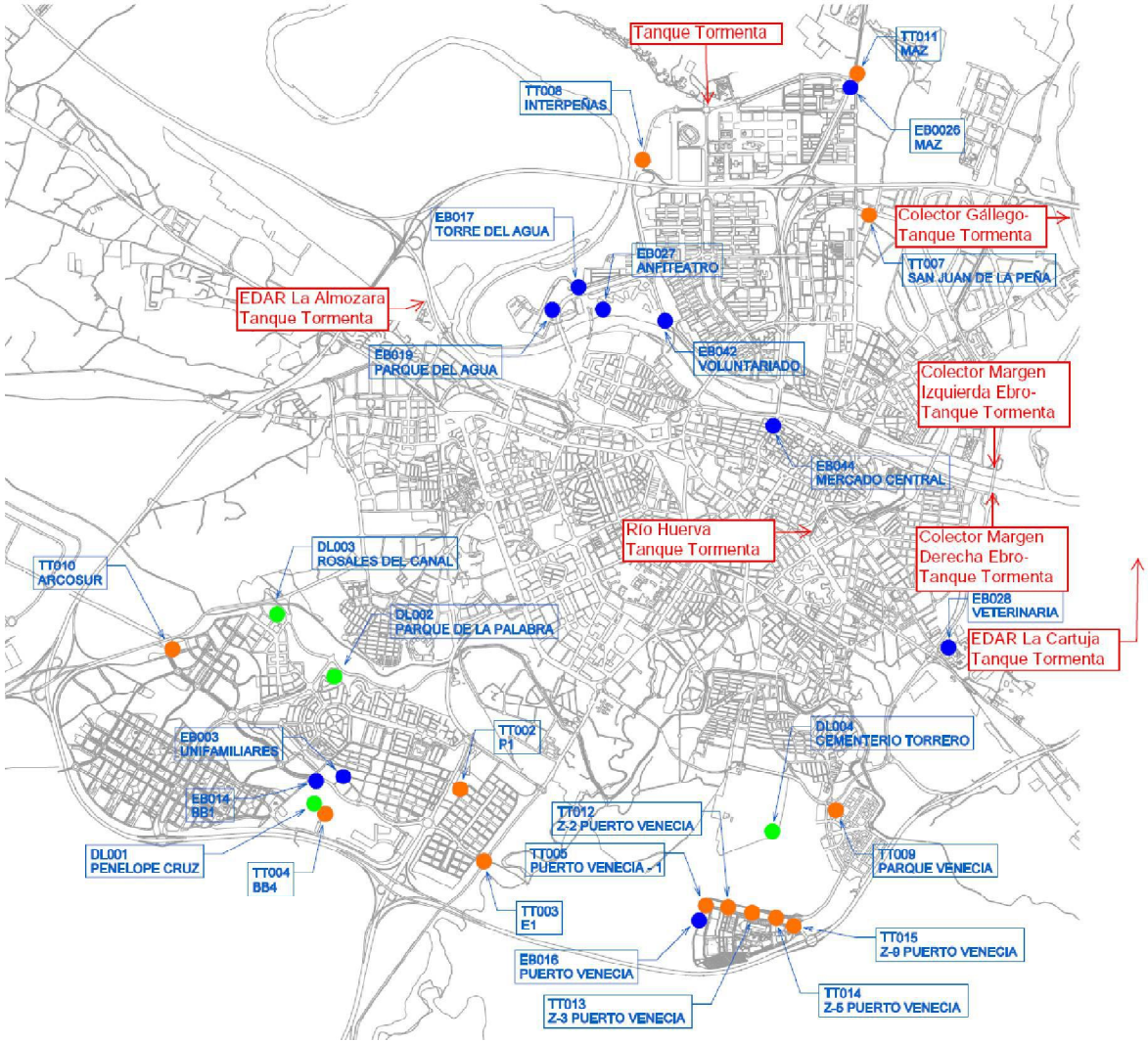
Normativa	Total cuenca urbana de Zaragoza	Total cuenca con sistema unitario
Normativa Alemana ATV-A128	13210 m^3 - 105685 m^3	11418 m^3 - 91345 m^3
Recomendaciones federales de 1977, Suiza	34350 m^3	29687 m^3
Normativa Austriaca ÖWWW Regebatt 19	De 39632 m3 a 118895 m3	De 34255 m3 a 102763 m3
Normativa Francesa F.N.D.A.E. nº6	De 52843 m^3 a 79264 m^3	De 45673 m^3 a 68509 m^3
Prescripciones Holandesas - Ábaco de Kuiper	De 52843 m^3 a 184950 m^3	De 45673 m^3 a 159855 m^3
Prescripciones técnicas de Galicia ITOHG	De 158530 m^3 a 290635 m^3	De 137018 m^3 a 251200 m^3
Normas para redes de saneamiento del Canal de Isabel II	De 39632 m^3 a 55485 m^3	De 34255 m^3 a 47957 m^3
Antigua Confederación Hidrográfica del Norte (1995)	De 10570 m^3 a 23780 m^3 (De 52850 m3 a 105685 m3 con modelización)	De 9135 m^3 a 20553 m^3 (De 45672 m3 a 91345 m3 con modelización)
OMECGIA - Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua	47560 m^3	41105 m^3

Fuente: Elaboración propia.

Como muestra la Tabla 60el volumen de almacenamiento global del que debería disponer el sistema de saneamiento de Zaragoza para la protección tanto del medio receptor como de los procesos de tratamiento de las estaciones depuradoras varían, según las distintas normativas analizadas, desde un mínimo de 13.200 m^3 para sistemas unitarios marcada por la normativa alemana ATV-A128 hasta máximos de 290.635 m^3marcados por las Prescripciones técnicas de Galicia ITOHG, resultando un valor promedio del volumen de almacenamiento de 81.500m^3. Por otra parte, centrando el análisis en el sistema unitario de saneamiento, objeto de la presente tesis, se ve como el volumen mínimo necesario oscila entre los 11.418 m^3y los 251.200 m^3, haciendo un promedio de 70.412m^3de volumen de almacenamiento específico. Como se ha visto, el volumen global de almacenamiento del sistema de saneamiento del área de estudio es de 122.200 m^3, aportando 111.200m^3 de capacidad de almacenamiento en las cuencas con sistema separativo y reduciéndose el volumen de almacenamiento disponible en el sistema unitario a los 11.000 m^3 aportados por tres tanques de tormenta en la cuenca vertiente E. Cabe por tanto concluir que, las cuencas con sistema separativo están dotadas de una capacidad de almacenamiento suficiente para realizar una buena gestión del sistema en tiempos de lluvia. No obstante en el sistema unitario, cuyos impactos tanto en el medio receptor como en el funcionamiento de las estaciones depuradoras es mucho mayor que los provocados por los sistemas separativos, existe un importante déficit de almacenamiento. Cabe destacar que con los volúmenes actuales de almacenamiento no se cumple la normativa municipal marcada por la Ordenanza para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua (OMECGIA) que exige al menos triplicar los volúmenes disponibles para realizar una gestión sostenible del sistema de saneamiento unitario en sucesos de lluvia.

Así se ve necesario aumentar la capacidad de almacenamiento del sistema de saneamiento en al menos 42.000m^3 adicionales para el cumplimiento de la Ordenanza municipal. La Figura nº 23 muestra los tanques de tormenta y depósitos de laminación existentes en la actualidad y se marca en rojo la propuesta de construcción de nuevos tanques de tormenta para la mejora de la gestión de las aguas de lluvia.

Figura nº 23.- Localización de tanques de tormenta y propuesta de nuevos tanques en el sistema de saneamiento de Zaragoza.



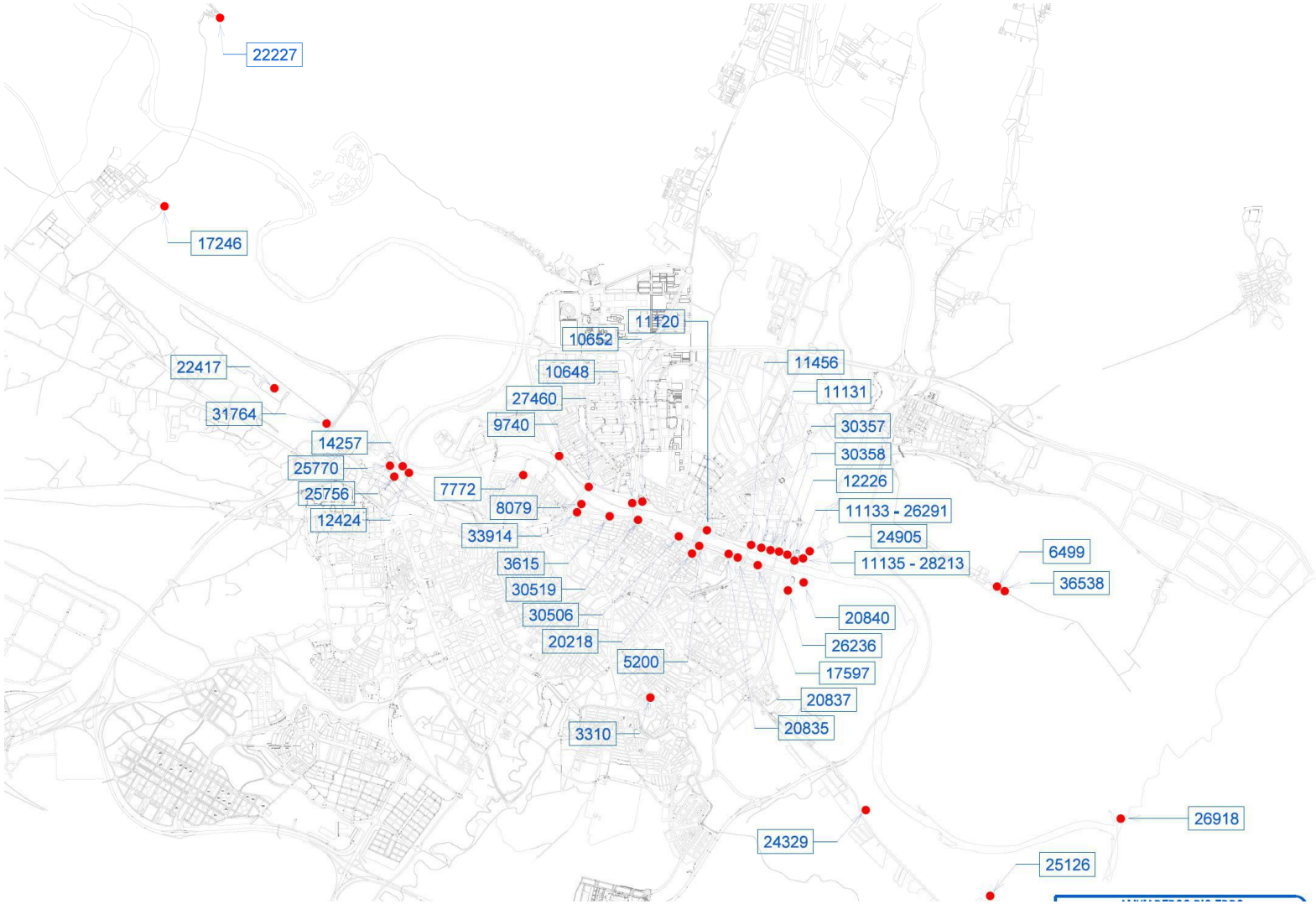
Fuente: Elaboración propia basada en datos del Departamento de Explotación de redes del Ayuntamiento de Zaragoza.

Como se ve en la Figura nº 23 los nuevos tanques de tormenta se localizarían en los puntos débiles detectados en el diagnóstico hidráulico. El dimensionamiento de los mismos queda pendiente de los resultados de la modelización hidráulica del sistema y un estudio en detalle de las aportaciones de cada cuenca vertiente.

3. **Puntos de alivio.**

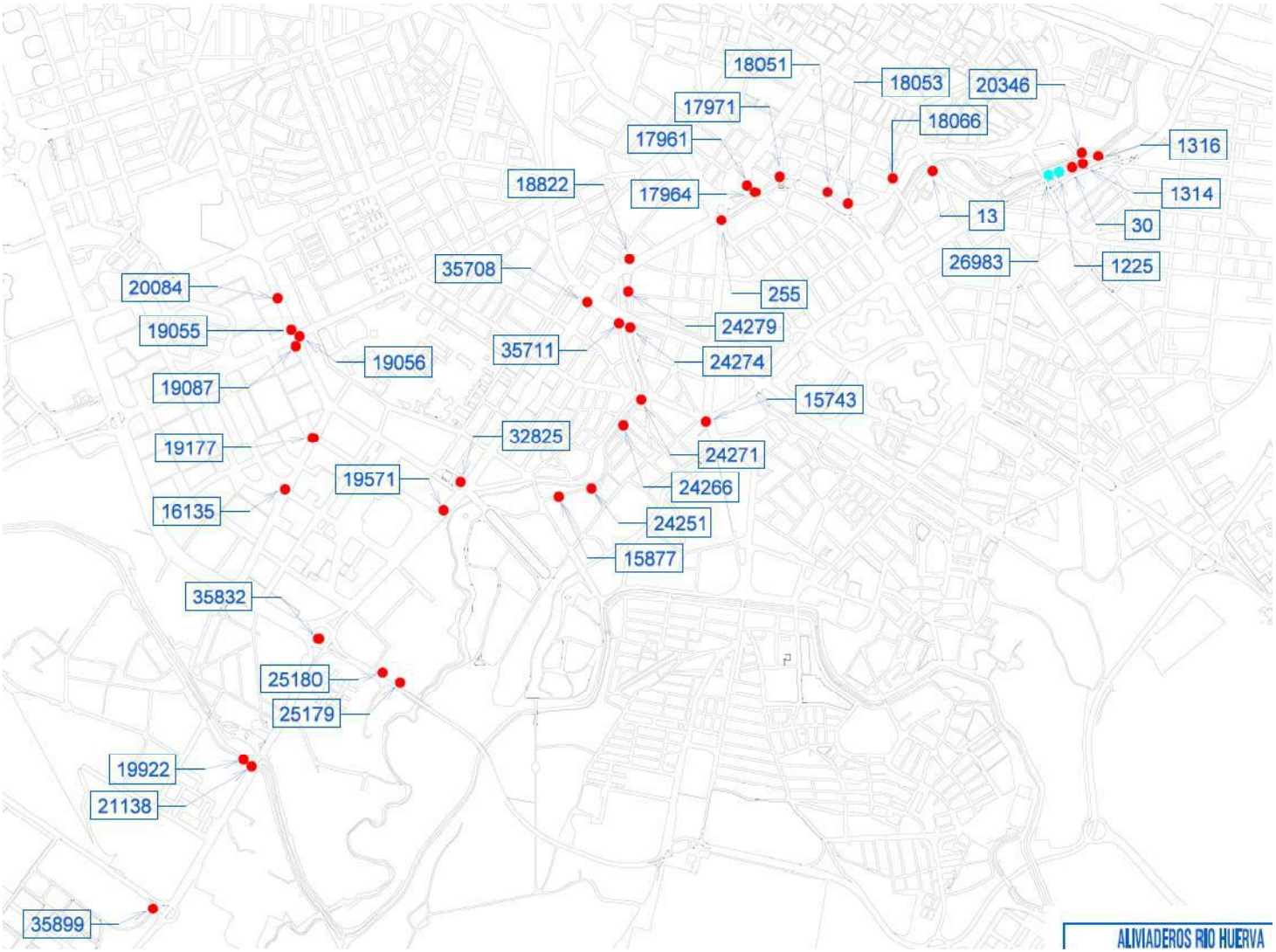
Como consecuencia de la reducida capacidad hidráulica del sistema, la red alivia las puntas de caudal a través de 142 alivios directos al río. La Figura nº 24 muestra los puntos de alivio a los tres ejes principales de drenaje del sistema de saneamiento de Zaragoza.

Figura nº 24.- Puntos de alivio al río Ebro del sistema de saneamiento de Zaragoza.



Fuente: Servicio de Explotación de Redes del Ayuntamiento de Zaragoza.

Figura nº 25.- Puntos de alivio al río Huerva del sistema de saneamiento de Zaragoza.



Fuente: Servicio de Explotación de Redes del Ayuntamiento de Zaragoza.

Figura nº 26.- Puntos de alivio al río Gállego del sistema de saneamiento de Zaragoza.

Fuente: Servicio de Explotación de Redes del Ayuntamiento de Zaragoza.

En el Anejo 5 se realiza un inventario de puntos de alivio por tipología, cuenca vertiente y medio receptor al que evacúan. De dicho inventario se obtiene la información que se muestra en la Tabla 61, en la que se resumen los resultados de aplicación de los indicadores propuestos para la caracterización de los puntos de alivio de la red de alcantarillado.

Tabla 61.- Resultado de aplicación de los indicadores relacionados con los puntos de alivio a la ciudad de Zaragoza.

Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	Zaragoza
PA1. Número de puntos de alivio en relación a la longitud total del sistema de alcantarillado	P	Disminución/ Optimización	N/Km	8
PA2. Porcentaje de puntos de alivio directo en relación al total de puntos de alivio	P	Disminución	%	60
PA3. Porcentaje de puntos de alivio con sistema pico de pato en relación al total de puntos de alivio	P	Aumento	%	16
PA4. Porcentaje de puntos de alivio con clapetas simples en relación al total de puntos de alivio	P	Optimización	%	21,1
PA5. Porcentaje de puntos de alivio con rejillas de desbaste en relación al total de puntos de alivio	P	Aumento	%	2,1
PA6. Número de puntos de alivio en relación al caudal máximo anual del medio receptor	P	Disminución	N/m3/s	Ebro: 0,15 Gállego: 0,45 Huerva: 9,70 Media: 0,28

Fuente: Elaboración propia

Como se ve en la Tabla 61, el 60% de los puntos de alivio no cuentan con dispositivos de retención de sólidos en suspensión o de decantación de los primeros caudales de mayor contaminación que permitirían una minimización del impacto al medio receptor. Además, menos del 40% de las salidas al río disponen de clapetas y/o dispositivos de pico de pato, que evitan entrada de caudales de los medios receptores al sistema de saneamiento en las crecidas de los ríos. Por otra parte, el análisis pormenorizado de la localización de los puntos de alivio muestra una alta concentración de alivios directos en las cuencas de la margen derecha e izquierda del río Huerva, que es un río con un

bajo caudal y por tanto con una baja capacidad de dilución de la contaminación aportada por las descargas del sistema unitario.

Se concluye por tanto la necesidad de actuaciones para la mejora de los puntos de alivio, dotándolos de mecanismos antirretorno y de un pretratamiento para la eliminación, al menos, de los sólidos en suspensión. Estas actuaciones se priorizarán en los colectores principales que vierten sobre el río Huerva. Esta línea de actuación ya está contemplada en la Ordenanza Municipal vigente en Zaragoza (OMECGIA) que establece con carácter obligatorio la instalación de clapetas antiretorno en todos los aliviaderos del sistema de saneamiento.

4. Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.

De la información aportada en el Anejo 5se extraen los indicadores que se muestran en la Tabla 62.

La capacidad de tratamiento de las EDARs, dimensionada bajo unos criterios óptimos en relación al tratamiento de las aguas residuales de la población servida, se ve ampliamente superada en eventos de lluvia, en los que únicamente un 0.63% de los caudales punta son tratados. En base a los resultados obtenidos se concluye que la línea de actuación más efectiva y eficaz para la reducción de los impactos por las descargas de los sistemas unitarios es dotar de tanques de almacenamiento a la entrada de las EDAR que laminen las puntas de caudal en tiempos de lluvia. Dichos caudales podrán ser dirigidos posteriormente a las líneas de tratamiento de las EDAR o, al menos, recibirán un pretratamiento y tratamiento primario previo a su alivio al medio receptor.

En relación a la afección de los caudales punta en las líneas de tratamiento de las EDAR, los principales impactos detectados en el presente estudio son económicos y energéticos pero no se detecta impacto en los rendimientos de depuración. No obstante, para obtener conclusiones concluyentes en este tema será necesario un análisis pormenorizado del rendimiento de las líneas de tratamiento de cada EDAR en tiempos de lluvia con series de datos largas para detectar posibles impactos y definir formas de gestión para minimizarlos.

Tabla 62.- Resultados de la aplicación de los indicadores de funcionamiento de las EDAR a la ciudad de Zaragoza.

Indicador	Tipo	Tendencia deseada	Unidad de medida	EDAR	Zaragoza
EDAR1. Ratio entre la capacidad de tratamiento y los caudales máximos en tiempos de lluvia	P	Aumento	%	EDAR La Almozara	2,77
				EDAR La Cartuja	0,65
				Media EDARs	0,63
EDAR2. Consumo energético	P	Disminución/ Optimización	KWh/m^3	EDAR La Almozara	0,21
				EDAR La Cartuja	0,54
				Media EDARs	0,375
EDAR3. Coste depuración	P	Disminución/ Optimización	$€/m^3$	EDAR La Almozara	0,09
				EDAR La Cartuja	0,18
				Media EDARs	0,135
EDAR4. Autosuficiencia Energética	P	Aumento/ Optimización	%	EDAR La Almozara	70
				EDAR La Cartuja	12
				Media EDARs	41
EDAR5. Rendimiento comparativo de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales en tiempo de lluvia y en tiempo seco	P	Aumento/ Optimización	%	EDAR La Cartuja SST	1,01
				EDAR La Cartuja DBO5	0,99
				EDAR La Cartuja DQO	1,01
				EDAR La Cartuja Ptotal	0,96

Fuente: Elaboración propia

5. Diagnóstico hidráulico del funcionamiento del sistema de saneamiento

A continuación se aplica la metodología expuesta en el capítulo 3 para la estimación de las descargas unitarias del sistema de saneamiento de la ciudad de Zaragoza en tiempos de lluvia. En el Anejo 6 se pueden consultar los cálculos hidráulicos de cada cuenca vertiente en el que se ofrece un croquis de situación para cada cuenca, así como los datos de cálculo y resultados pormenorizados.

Los resultados se analizan en dos niveles. A nivel de sistema global de saneamiento, se realiza por una parte un análisis comparativo de las dos zonas servidas con el objeto de identificar cual de los dos subsistemas, el servido por la EDAR La Almozara y el servido por la EDAR la Cartuja arroja mejores resultados en relación a la gestión de las aguas pluviales. Por otra parte, se analiza el esquema hidráulico de cada zona servida, identificando los puntos débiles de la red principal de colectores.

A nivel de cuenca vertiente, por una parte se realiza un análisis de los resultados a nivel de zona servida, interpretando de manera independiente las descargas de los sistemas unitarios en cada cuenca vertiente y mostrando en cada zona servida la prioridad de actuación por cuenca vertiente. Por otra parte, se realiza un análisis global de todos los indicadores propuestos para las cuencas vertientes, tanto los relacionados con los puntos de alivio de cada cuenca (CV1:% de alivios directos en relación al total de alivios directos del sistema y CV2: Número de puntos de alivio/superficie impermeabilizada), como los relacionados con las descargas de los sistemas unitarios en cada cuenca vertiente (CV3: Descarga por superficie impermeabilizada, CV4: Descarga por habitante y CV5:% de descarga en relación a las descargas totales del sistema).

1. Análisis de los resultados globales

Los resultados en relación al funcionamiento global del sistema de saneamiento en tiempos de lluvia se analizan por una parte a través de una comparación de las descargas globales de la zona servida por la EDAR La Almozara y de la zona servida por la EDAR La Cartuja y, por otra parte, a través del esquema hidráulico de flujos de los principales colectores del sistema.

Así, en la Tabla 63 se comparan los resultados de las descargas obtenidos para ambas zonas servidas.

Tabla 63.- Comparación de las descargas globales por zona servida

ZONA SERVIDA	Área (Ha)	Habitantes (Hab)	DSU (m3/s)	% Población servida	CV3	CV4	CV5
La Almozara	3078,35	268160	41,74	32,69	1,36	1,56	24,83
La Cartuja	5728,76	552173	126,38	67,31	2,21	2,29	75,17
Totales	8807,11	820334	168,12	100,00	1,91	2,05	100,00

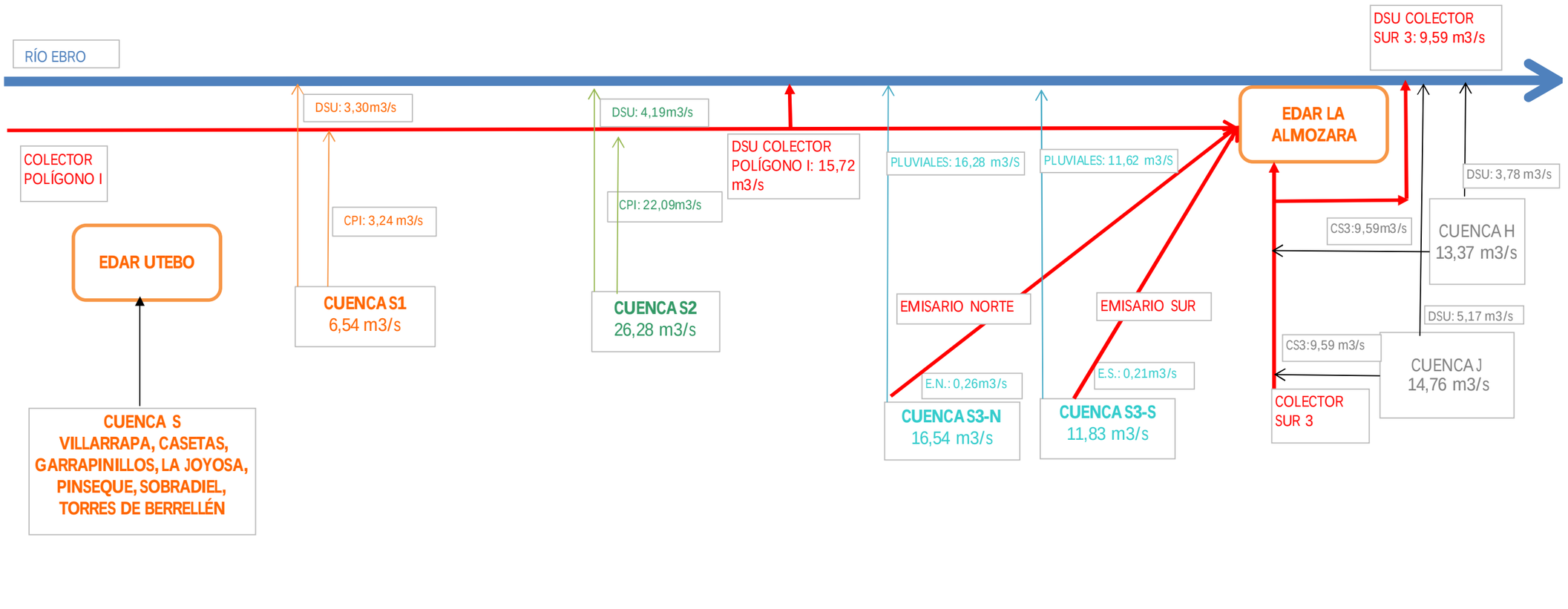
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 63muestra que para un 32.69% de la población total de la ciudad, la zona servida por la EDAR La Almozara realiza un 24.83% de las descargas totales, ofreciendo además unos menores indicadores de descarga por superficie y habitante. En coherencia con el análisis previo parece por tanto que el sistema de saneamiento de la zona servida por la EDAR La Cartuja tiene a nivel relativo un peor comportamiento en tiempo de lluvia que la zona servida por la EDAR La Almozara.

Por otra parte, en las siguientes ilustraciones se muestran los esquemas hidráulicos de flujos de las zonas servidas de la EDAR La Almozara y la EDAR La Cartuja.

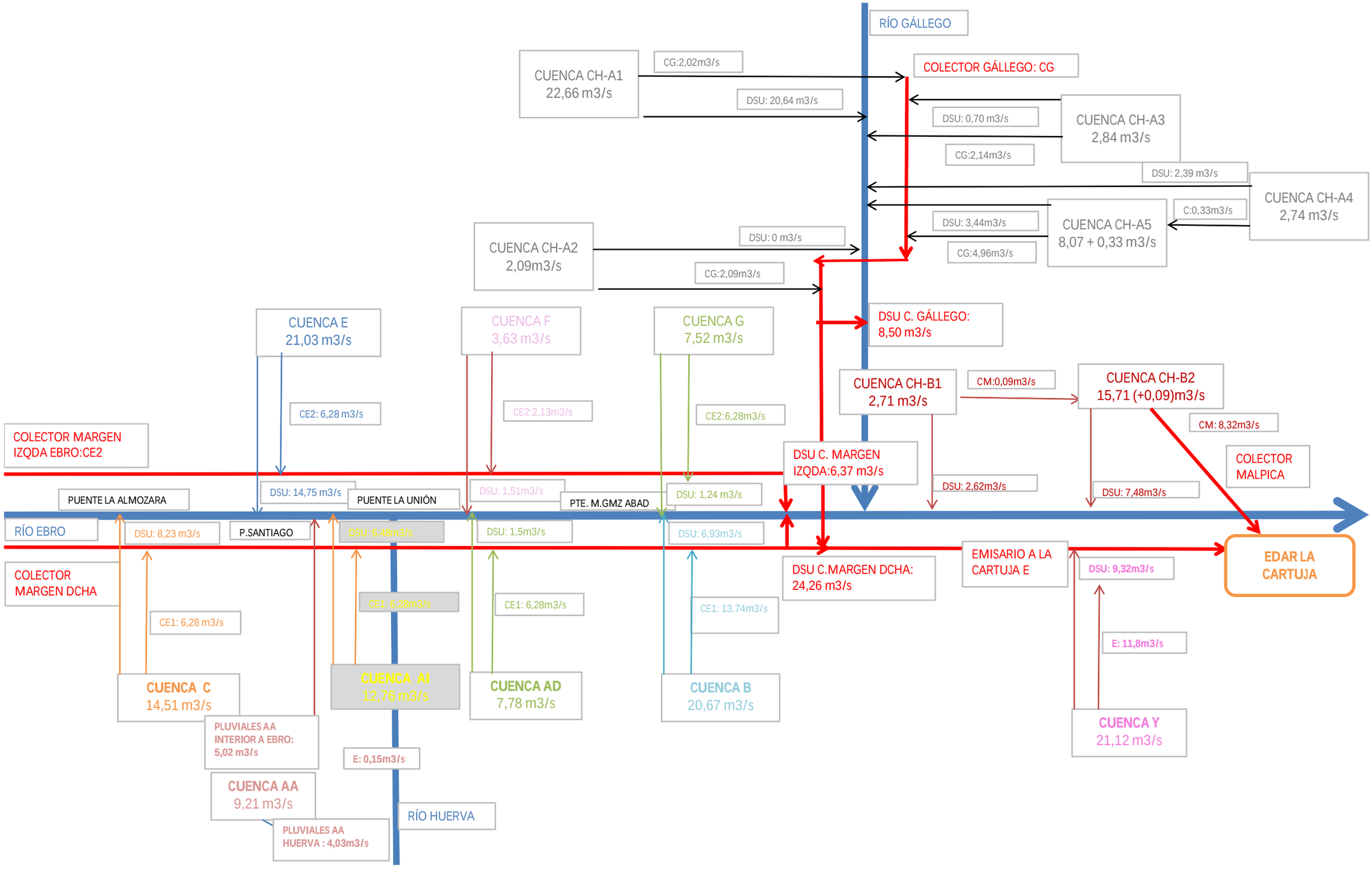
Los esquemas hidráulicos que se muestra en la Figura nº 27y en la Figura nº 28muestran un zoom más amplio que el adoptado para el estudio de cada cuenca vertiente, con el objetivo de localizar los puntos débiles de la red. Este diagrama básico de balance de caudales esquematiza las correspondientes descargas de los sistemas unitarios en cada cuenca, los caudales dirigidos hacia los principales colectores y las principales descargas de cada colector principal.

Figura nº 27.- Esquema hidráulico de flujos de la zona servida por la EDAR La Almozara



Fuente: Elaboración propia.

Figura nº 28.- Esquema hidráulico de flujos de la zona servida por la EDAR La Cartuja.



En relación al esquema hidráulico de la zona servida por la EDAR La Almozara la ilustración muestra como las descargas más importantes se producen a través de los dos colectores principales, el colector del Polígono 1 y el Colector Sur 3. Es destacable que los resultados en esta zona servida muestran un funcionamiento óptimo del sistema de saneamiento en tiempos de lluvia. No obstante parece necesario recalcar que los resultados obtenidos son muy conservadores ya que, por una parte, se considera desconectada la zona de la cuenca S aguas arriba del barrio de Monzalbarba por la existencia de la EDAR de Utebo, que actualmente no se encuentra en funcionamiento. Se considera además que en las zonas de nueva urbanización se contará con sistemas separativos.

Por su parte, en el esquema hidráulico de la zona servida por la EDAR La Cartuja se localiza un primer nodo de confluencia en el Puente de La Unión, en la desembocadura al Ebro del río Huerva, en el que confluyen los colectores principales de las cuencas vertientes AI, AD y AA (emisario de pluviales de Valdespartera) en la margen derecha y la cuenca vertiente F de la margen izquierda.

Aguas abajo, en el puente de Jiménez Abad, desembocadura del río Gállego en la margen izquierda del Ebro, encontramos el segundo nodo problemático, en el que confluyen los colectores principales de la cuenca B en la margen derecha, así como el colector de la cuenca G y el colector del Gállego en la margen izquierda.

Finalmente, en la Tabla 64 se muestran las descargas que se producen en los principales colectores de la red, que se extraen de los cálculos anteriores desglosados por cuencas vertientes, para considerar una última descarga del sistema, el que se produce a la entrada de las estaciones depuradoras.

Tabla 64.- Descargas desde colectores principales en ambas zonas servidas

	COLECTORES PRINCIPALES	CAPACIDAD (m3/s)	DSU (m3/s)
EDAR LA ALMOZARA	COLECTOR POLÍGONO I	9,61	15,72
	EMISARIO S3 ZONA NORTE	9,42	0
	EMISARIO S3 ZONA SUR	9,42	0
	COLECTOR SUR 3	9,59	9,59
	TOTAL DSU COLECTORES PRINCIPALES ANTES DE ENTRADA A EDAR		25,31
	TOTAL CAUDAL DE ENTRADA A EDAR	38,04	
	CAPACIDAD EDAR	0,4	37,64
EDAR LA CARTUJA	COL.MARGEN DCHA EBRO	8,32	24,26
	COL.MARGEN IZQDA EBRO:	8,32	6,37
	COLECTOR GÁLLEGO	2,13	8,50
	COLECTOR MALPICA	8,32	7,48
	EMISARIO LA CARTUJA	43	0,00
	TOTAL DSU COLECTORES PRINCIPALES ANTES DE ENTRADA A EDAR		46,61
	TOTAL CAUDAL DE ENTRADA A EDAR	67,06	
	CAPACIDAD EDAR	3	64,06
	TOTALES	108,5	71,92

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran como en tiempos de lluvia los caudales de entrada a ambas estaciones depuradoras desbordan ampliamente su capacidad de tratamiento. Ante un caudal de entrada de 38.04 m^3/s, la EDAR de La Almozara presenta una capacidad de tratamiento de 0,4 m^3/s. Por su parte, la EDAR de La Cartuja cuenta con una capacidad mayor, de 3 m^3/s que sigue siendo insuficiente para tratar los 67,06 m^3/s que transportan los colectores principales de acceso en tiempos de lluvia. Se hace por tanto inevitable realizar una última descarga del sistema previo a la entrada a las líneas de tratamiento. Estas descargas, de 37.64 m^3/s en el caso de la EDAR de La Almozara y de 64.06 m^3/s en la EDAR de La Cartuja se calculan únicamente en términos sus capacidades de tratamiento. Es previsible esperar descargas mayores a las calculadas para evitar la entrada de caudales punta que conllevan unas sobrecargas hidráulicas y unas variaciones de las cargas de contaminación. Éstas producirían perturbaciones importantes en las líneas de tratamiento, afectando a los rendimientos de la misma (Gutiérrez, 1995), consistiendo en una práctica habitual en la gestión de las estaciones depuradoras el realizar un bypass de los caudales punta en momentos de lluvia.

En la Tabla 65 se recogen los resultados globales por zona servida incluyendo las descargas que se realizan en la entrada a las estaciones depuradoras:

Tabla 65.- Resumen descargas globales del sistema de saneamiento.

	Elemento	Área (ha)	Habitantes (Hab)	DSU (m3/s)	% Población servida	CV2	CV3	CV5
EDAR LA ALMOZARA	Cuencas vertientes			16,43				8,30
	Colectores principales			32,43				16,39
	EDAR			37,64				19,02
	Subtotal	3078,35	268160	54,07	32,69	2,02	1,76	27,32
EDAR LA CARTUJA	Cuencas vertientes			79,77				40,31
	Colectores principales			46,61				23,55
	EDAR			64,06				32,37
	Subtotal	5728,76	552173	143,83	67,31	2,60	2,51	72,68
	TOTAL	8807,11	820334	197,90	100,00	2,41	2,25	100,00

Fuente: Elaboración propia

Se comprueba que las descargas a la entrada de las estaciones depuradoras son cuantitativamente muy importantes en relación con las descargas que se producen a lo largo de toda la red de colectores, suponiendo entre el 30 y el 40% de las descargas totales que se producen en las cuencas vertientes de cada zona servida. Igualmente se observa como

las descargas producidas en los colectores principales de cada subsistema aportan el 40% de las descargas globales del sistema.

Para finalizar el análisis global del sistema, la Tabla 66 recoge los resultados de la aplicación de los indicadores propuestos en relación al funcionamiento global del sistema de saneamiento de Zaragoza.

Tabla 66.- Resultados de aplicación a la ciudad de Zaragoza de los indicadores de funcionamiento global del sistema de saneamiento.

Indicador		Tendencia deseada	Unidad de medida	Zaragoza
SS3. Ratio entre Caudales descargados por el sistema de saneamiento con lluvia crítica de diseño y la superficie neta total	E	Disminución	$m^3/s/ha$ neta	$6,36*10^{-2}$
SS4. Relación entre Capacidad hidráulica global del sistema y Caudales máximos con lluvia crítica de diseño	E	Aumento	%	27,1

Fuente: Elaboración propia.

En relación a estos indicadores, cabe destacar que, dado que no se cuenta con un sistema de saneamiento modelizado y calibrado no se han podido aplicar algunos de los indicadores propuestos en la metodología. Queda entonces pendiente para una futura línea de investigación el desarrollar dichos indicadores de funcionamiento global del sistema.

De acuerdo con el diagnóstico obtenido, las líneas estratégicas de actuación apuntan hacia una intervención prioritaria en la zona servida por la EDAR La Cartuja, que arroja los peores resultados en términos cuantitativos y cualitativos. No obstante, se previene en este estudio que los mejores resultados obtenidos por la zona servida por la EDAR La Almozara se derivan del hecho de considerar un área de estudio menor de la que actualmente sirve y de considerar que todas las zonas de nueva urbanización que deberá servir la EDAR La Almozara, una vez se ejecute el Plan General de Ordenación Urbana, contarán con un sistema separativo. En caso de que estos dos supuestos no se cumplieran, se estima que el funcionamiento del sistema de saneamiento en esta zona servida en tiempos de lluvia empeoraría considerablemente dada la extensión considerable de las zonas de nueva urbanización a incorporar y la reducida capacidad de la EDAR La Almozara.

En la zona servida por la EDAR La Cartuja los puntos débiles de la red principal de colectores aparecen en el Puente de la Unión (desembocadura del río Huerva en el Ebro), en el Puente de Jiménez Abad (Desembocadura del Gállego en el Ebro) y a lo largo de los colectores del río Gállego y el río Huerva, emplazamientos inicialmente idóneos para la instalación de tanques de tormenta.

2. Análisis de resultados a nivel de cuenca vertiente

Como se ha comentado, el primer análisis de los resultados de las descargas del sistema unitario en cada cuenca vertiente se realiza a nivel de zona servida. Así, la Tabla 67 recoge las descargas en la zona servida por la EDAR La Almozara.

Tabla 67.- Resumen descargas sistemas unitarios de las cuencas vertientes en la zona servida por la EDAR La Almozara

Cuenca	Subcuenca	Área (ha)	Habitantes (Hab)	DSU (m^3/s)	% Población servida	CV3 (DSU/ha)	CV4 (DSU/Hab)	CV5 (% DSU Total)
S	S1	94,03	7052	3,30	2,63	3,51	4,68	7,90
	S2	1049,75	54605	4,19	20,36	0,40	0,77	10,03
	Colector polígono I			15,72				37,66
	Datos acumulados	1143,78	61658	23,20	22,99	2,03	3,76	55,59
	S3 - Norte	500,00	37500	0,00	13,98	0,00	0,00	0,00
	S3 - Sur	405,00	30375	0,00	11,33	0,00	0,00	0,00
	J	587,67	39200	5,17	14,62	0,88	1,32	12,38
H	H	441,90	99428	3,78	37,08	0,86	0,38	9,06
	Colector SUR 3			9,59				22,97
	Datos acumulados	1934,57	206503	18,54	77,01	0,96	0,90	44,41
	TOTALES:	3078,35	268160	41,74	100,00			100,00

Fuente: Elaboración propia.

Como muestra la Tabla 67 las subcuencas vertientes S1 y S2[1], con tan sólo el 23% de la población de la zona servida, aportan más del 55% de las descargas totales del subsistema, arrojando igualmente los peores resultados en relación las descargas por unidad de área. Esta situación está provocada por las altas descargas del colector del Polígono I, con una capacidad hidráulica insuficiente para los caudales que debe transportar a la EDAR de La Almozara, lo que provoca una descarga previa a la misma de 15.72m^3/s. Destaca además que en la subcuenca S1 el indicador de descargas por habitante y el indicador de descargas por hectárea neta impermeabilizada resulta superior al doble de la media de la zona servida, mostrando que la presión que se ejerce por habitante y hectárea en esta subcuenca es muy elevada.

El resto de las descargas de la zona servida se producen en las cuencas J y H derivadas por el colector Sur2. Estas dos cuencas aglutinan el 51.7% de la población de la zona servida aportando el 44% de las descargas lo que se interpreta como un mejor funcionamiento del sistema en tiempos de lluvia. Esto se ve reflejado en los indicadores de descarga por habitante y por hectárea neta impermeabilizada que se sitúan por debajo la media de la zona servida. Esto se explica porque una parte de la población comprendida en las cuencas J y H se encuentra en zonas de nueva urbanización[2] que cuentan con una red separativa para la gestión de pluviales lo que reduce las descargas de los sistemas unitarios en relación a las cuencas anteriormente analizadas.

Por último, como se expuso en la caracterización del sistema de saneamiento, se considera que la subcuenca S3 que abarca zonas de nueva urbanización cuenta con un sistema separativo dotado de una cadena de lagunas de laminación para la gestión de las aguas de lluvia, por lo que las descargas de sistema unitario objeto de este estudio resultan nulas.

En relación a la zona servida por la EDAR La Cartuja, la Tabla 68 muestra los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta.

[1]Las subcuencas vertientes S1 y S2 están ubicadas en las zonas urbanizadas desarrolladas en torno a la carretera de Logroño. El área de estudio excluye las aportaciones aguas arriba de Monzalbarba que se consideran derivadas a la futura EDAR de Utebo Por tanto los resultados obtenidos son más conservadores que los realmente esperados en la situación real.

[2]Barrios de Montecanal y Rosales del Canal

Tabla 68.- Resumen descargas sistemas unitarios de las cuencas vertientes en la zona servida por la EDAR La Cartuja

Cuenca	Subcuenca	Área (ha)	Habitantes	DSU (m3/s)	% Población servida	CV3 (DSU/ha)	CV4 (DSU/Hab)	CV5 (% DSU Total)
C		367,84	68970	8,23	12,49	2,24	1,19	6,51
AI		552,36	103568	6,48	18,76	1,17	0,63	5,13
AD		269,92	60732	1,50	11,00	0,56	0,25	1,19
	B1	675,47	75990	6,93	13,76			
B	B2	241,72	22386	0,00	4,05	0,76	0,7	5,48
COLECTOR MARGEN DERECHA EBRO				24,26				19,20
Datos acumulados					60,06			37,51
E		1042,71	78203	14,75	14,16	1,41	1,89	11,67
F		91,5	20588	1,51	3,73	1,65	0,73	1,19
G		234,8	52830	1,24	9,57	0,53	0,24	0,98
COLECTOR MARGEN IZQUIERDA EBRO:				6,37				5,04
Datos acumulados					27,46			18,88
CH - A	CH-A1	921,82	8669	20,64	1,57	2,24	23,81	16,33
	CH-A2	26,20	4402	0,00	0,80	0,00	0	0,00
	CH-A3	54,91	4118	0,70	0,75	1,27	1,69	0,55
	CH - A4	98,29	6577	2,39	1,19	2,43	3,64	1,89
	CH - A5	132,5	14906	3,46	2,70	2,61	2,32	2,74
COLECTOR GÁLLEGO				8,50				6,73
Datos acumulados					7,00			28,24
CH-B	CH-B1	50,41	3781	2,62				
	CH-B2	322,35	0	7,48	0,68	2,71	26,71	7,99
AA		290	21750	0,00	3,94	0,00	0	0,00
Y		355,96	4704	9,32	0,85	2,62	19,81	7,37
EMISARIO A EDAR LA CARTUJA								0,00
Datos acumulados					5,48			15,37
	TOTALES:	**5728,76**	**552173**	126,38	100,00			100,00

Fuente: Elaboración propia.

Lo primero que llama la atención en los resultados obtenidos son las altas descargas de los sistemas unitarios en el corredor del río Gállego, correspondiente a las cuencas vertientes CH-A y CH-B.

En relación a la cuenca CH-A, destaca que con tan solo el 7% de la población total servida aporta el 28,24% de las descargas totales del sistema. Hay que considerar además que la situación de estudio es más conservadora que la situación real existente, ya que, como se vio anteriormente, se considera en funcionamiento la EDAR de Peñaflor, por lo que las poblaciones aguas arriba de San Juan de Mozarrifar no se consideran conectadas al sistema. Un análisis pormenorizado de la cuenca CH-A muestra, por una parte, que la subcuenca CH-A1, que sirve a la población de San Juan de Mozarrifar y la gran superficie impermeable correspondiente a la Ciudad del Transporte, aporta el 16.33% de las descargas del total del sistema. Esto es debido a que la subcuenca, al tener una escasa población servida, cuenta con una red de saneamiento de pequeño diámetro, sin capacidad para incorporar o laminar los grandes caudales provenientes de la extensa zona impermeabilizada conectada al núcleo urbano. Por tanto en tiempo de lluvia prácticamente todo el caudal es vertido directamente al río Gállego sin tratamiento previo alguno a través de un emisario. Es importante destacar que es previsible un gran impacto a los ecosistemas acuáticos receptores de este vertido ya que la escorrentía limpia grandes superficies pavimentadas de la Ciudad del Transporte, con gran concentración de vehículos por lo que es esperable una carga contaminante alta (grasas, combustibles, etc.).

Además, el área de estudio que cubre la subcuenca CH-A1no incluye la aportación de pluviales de la zona aledaña de22 km^2 situada al Noroeste de CH-A1. Dicha cuenca natural no cuenta con redes de saneamiento y por tanto no se incluye en el inventario de cuencas vertientes del Ayuntamiento de Zaragoza. No obstante, para el objeto del presente estudio es importante tener en cuenta las aportaciones de escorrentía de esta cuenca natural ya que, dada su orografía, drena por superficie parte de sus aguas pluviales a la subcuenca CH-A1, y parte a la cuenca E de la margen izquierda del Ebro, provocando inundaciones reportadas por los técnicos responsables de la explotación de la red tanto en la ciudad del transporte (Subcuenca CH-A1) como en la conexión del barrio ACTUR con el barrio de Juslibol (cuenca E, rotonda al final de la calle Luciano Gracia). Considerando las mismas hipótesis y método de cálculo aplicado para el resto de las cuencas vertientes pero con un coeficiente de escorrentía menor por ser zona verde natural

(c=0.10), se calcula que esta cuenca natural aporta, 25,71 m^3/s. La divisoria de la cuenca divide la superficie total de la misma en dos superficies aproximadamente de igual magnitud por lo que asignamos un caudal extraordinario de pluviales en cada cuenca vertiente (CH-A1 y B) de 18,8 m^3/s. Considerando que las descargas totales de la cuenca CH-A1 son de 20.64 m^3/s, parece relevante la consideración de las aportaciones de la cuenca natural aledaña, que casi duplican las descargas de dicha subcuencavertiente. Se observa además un elevado impacto de DSU por habitante, muy superior a la media de la zona servida, por lo que se un aumento de la densidad de población en esta subcuenca sin acometer importantes actuaciones tanto para reducir los caudales de entrada a la red como para ampliar la capacidad de la red existente supondría unos impactos muy elevados en el río Gállego en relación a las descargas de los sistemas unitarios.

Para finalizar con el análisis de los resultados aplicados a la cuenca CH-A, cabe destacar que la gestión de las aguas residuales y pluviales de la Fábrica de papel La Montañanesa, perteneciente a la subcuenca CH-A3, no son consideradas en estos cálculos al contar dicha industria con un sistema propio de gestión de aguas residuales. No obstante, debe ser tenido en cuenta que el desarrollo de la actividad industrial papelera en la margen del río Gállego supone una presión adicional para la salud del ecosistema. Por otra parte, en relación a la subcuenca CH-A4, ésta se conecta con la subcuenca CH-A5 a través deun emisario de pequeña capacidad. Dicha capacidad es coherente con el reducido número de habitantes del núcleo CH-A4, presenta un cuello de botella para la derivación de los caudales al colector del Gállego resultando unas descargas muy elevadas en relación a la población servida.

En relación a la cuenca CH-B, destaca igualmente el indicador de descargas por habitante aunque en este caso el resultado se explica por conformarse la mayoría de la cuenca por el polígono industrial de Malpica. No obstante esta cuenca aporta casi el 8% de las descargas totales, indicador elevado a ser considerado en el diagnóstico final.

Por su parte la cuenca Y arroja un porcentaje elevado de las descargas totales así como el tercer mayor índice de DSU/Hab. Es importante considerar que esta cuenca se compone de una ocupación elevada de usos industriales. Además, esta cuenca recibe caudales de agua de lluvia no recogidos en los cálculos por lo que se espera que las descargas reales de esta cuenca sean significativamente mayores. Por una parte, la cuenca localizada al sur no está urbanizada y cuenta con altas pendientes, por lo que su escorrentía

natural discurre libremente hasta llegar a la zona industrial de la Cartuja Baja. Además, es previsible que la cuenca vertiente Y recoja parte de las aguas pluviales provenientes del Barranco de la Muerte y el Escorredero de la Filla.

En cuanto a las cuencas vertientes de la margen derecha (C, AD, AI y B) y la margen izquierda del río Ebro (E, F y G), destacar que en todos los casos dichas cuencas vertientes corresponden a barrios en el núcleo urbano consolidado, con altas densidades de población, por lo que en términos generales el indicador de DSU por población es menor que en las cuencas analizadas anteriormente.

Los resultados indican que, en relación a las descarga de los sistemas unitarios, en términos relativos se encuentran sensiblemente en peor situación las cuencas vertientes situadas en la margen izquierda (E, F y G) que las situadas en la margen derecha(C, AD, AI y B). Aunque la diferencia no es significativa éste resultado no es evidente dado que el casco histórico de la ciudad se encuentra en la margen derecha y por tanto sería previsible que las infraestructuras de saneamiento se encontraran en peores condiciones para afrontar la gestión de las aguas de lluvia. Al contrario, el desarrollo urbanístico de las cuencas vertientes de la margen izquierda del río Ebro es más reciente (barrios del ACTUR, Arrabal, La Jota, etc.) por lo que en principio se esperaría un dimensionamiento de las redes más adaptado a los actuales retos de gestión.

En relación a la margen izquierda del río Ebro, las descargas más significativas son las aportadas por la cuenca E. Como se mencionó en el análisis de las descargas de la subcuenca CH-A1, cabría esperar descargas adicionales estimadas en 18.8 m^3/s m^3/s debido al drenaje natural de la cuenca norte aledaña al barrio de Juslibol (mencionada anteriormente como causa de las inundaciones al final de la calle Luciano Gracia). Estos resultados son coherentes al hecho de que los tres únicos tanques de tormenta construidos en el núcleo urbano consolidado (TT007, TT008 y TT011) se encuentren en la cuenca vertiente E.

En relación a las cuencas vertientes de la margen derecha del río Ebro (C, AD, AI y B), en términos cuantitativos son las que mayores descargas aportan (37,51%), respondiendo a que acogen a la mayor cantidad de población de la ciudad (60% de los habitantes totales de la zona servida).

Para finalizar el análisis a nivel de cuenca vertiente, en la matriz multicriterio de apoyo en la toma de decisiones, en el sistema de ponderación se da un peso relativo mayor a los tres indicadores que ofrecen un diagnóstico que se aproxima mejor a la realidad de las cuencas vertientes. Por una parte, a nivel cualitativo, el número de alivios por superficie neta (CV2) se toma como indicador prioritario de los impactos al medio receptor por cada cuenca, con un peso del 30%. A nivel cuantitativo, se toma como indicador prioritario con un peso del 30% el indicador CV5 que mide los caudales de desbordamiento del sistema unitario de cada cuenca vertiente en relación con las descargas totales del sistema. Finalmente el indicador CV3 que mide las descargas por hectárea neta impermeabilizada ofrece un dato relevante en relación a las intervenciones de permeabilización de la cuenca urbana, por lo que se le dota de un peso del 30%.Dado que el sistema de saneamiento no cuenta en ningún punto de alivio con dispositivos que reduzcan la contaminación de los desbordamientos del sistema unitario, la tipología de alivio que se mide con el indicador % Alivios directos no ofrece una información determinante a la hora de comparar el funcionamiento de las cuencas vertientes, por lo que se dota a dicho indicador con un peso bajo, del 5%.

Finalmente, el indicador de la cantidad de descargas por habitante (CV4) no arroja información determinante a la hora de comparar las cuencas vertientes por lo que se le dota de un peso relativo bajo del 5%. De esta manera se obtiene la Tabla 69.

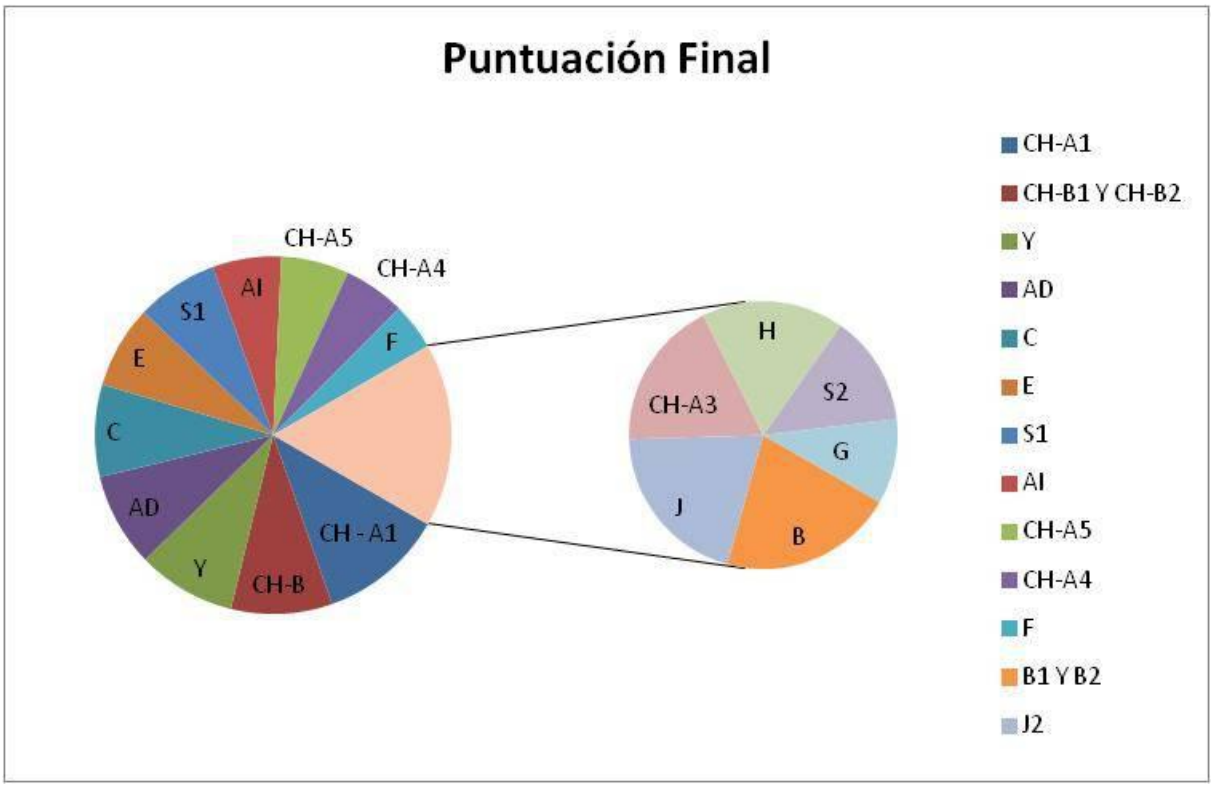
Tabla 69.- Matriz multicriterio de indicadores de cuencas vertientes del sistema de saneamiento de Zaragoza.

Cuenca	Subcuenca	CV1	CV2	CV3	CV4	CV5	Puntuación Final	% Puntuación final
Factor de Ponderación		0,05	0,3	0,3	0,05	0,3	1	
CH -A	CH-A1	1,21	0,69	6,38	8,92	10	5,63	11,36
CH-B	CH-B1 Y CH-B2	0,3	0,82	7,72	10	4,89	4,54	9,17
Y	Y	0	1,52	7,46	7,42	4,51	4,42	8,92
AD	AD	10	10	1,59	0,09	0,73	4,20	8,48
C	C	2,42	2,94	6,38	0,45	3,99	4,14	8,35
E	E	2,42	1,48	3,19	0,71	7,14	3,70	7,47
S	S1	1,51	0,17	10	1,75	1,6	3,69	7,46
AI	AI	5,76	2,79	3,34	0,23	3,14	3,08	6,22
CH-A	CH-A5	1,21	0,69	7,45	0,87	1,68	3,05	6,16
CH-A	CH-A4	1,21	0,69	6,93	1,36	1,16	2,76	5,58
F	F	0	2,53	3,71	0,27	0,73	2,10	4,25
B	B1 Y B2	0,3	0,17	2,15	0,26	3,36	1,73	3,50
J	J2	1,51	0,17	2,51	0,49	2,5	1,65	3,34
CH-A	CH-A3	1,21	0,69	3,61	0,63	0,34	1,48	3,00
H	H	1,51	0,17	2,44	0,14	1,83	1,41	2,86
S	S2	1,51	0,17	1,14	0,29	2,03	1,09	2,20
G	G	0	0,99	1,19	0,09	0,6	0,84	1,69

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 69 recoge así la jerarquía de actuaciones por cuenca vertiente que se muestra de manera gráfica en la Figura nº 29, en la que las cuencas con mayor puntuación resultan las prioritarias en la necesidad de intervención.

Figura nº 29.- Puntuaciones obtenidas en cada cuenca según matriz multicriterio.



Fuente: Elaboración propia.

En coherencia con el análisis pormenorizado realizado anteriormente, las cuencas que acumulan más del 50% de la puntuación y en las que resulta por tanto prioritaria la ejecución de actuaciones para la mejora del funcionamiento del sistema de saneamiento en tiempo de lluvia son cuencas vertientes de la zona servida por la EDAR La Cartuja (CH-A1, CH-B, Y, AD, C y E). En la séptima posición aparece una cuenca la primera cuenca de la zona servida por la EDAR La Almozara, la subcuenca S1 perteneciente a la cuenca vertiente S.

Destaca de manera predominante la necesidad de intervención en la cuenca CH-A1. Como se ha visto, dicha cuenca cuenta con un sistema de saneamiento unitario de reducida capacidad hidráulica, realizando de manera habitual descargas directas del sistema al río Gállego. Además esta cuenca cuenta con dos problemáticas adicionales. Por una parte, la necesidad de drenaje de los caudales de lluvia que provienen de la cuenca natu-

ral de San Gregorio, aledaña a la cuenca CH-A1. Dicha escorrentía natural limpia las grandes superficies impermeabilizadas de la ciudad del transporte lo que dota de especial relevancia a su correcta evacuación para evitar impactos importantes en el medio receptor. Para finalizar, en la cuenca CH-A1, en la que se encuentra la población de San Juan de Mozarrifar, se contempla una importante ampliación tanto del suelo productivo como del suelo urbano. La Tabla 70 recoge la ampliación de los distintos usos del suelo establecida en el Plan General de Ordenación Urbana vigente en la ciudad de Zaragoza en el momento de redacción de la presente tesis.

Tabla 70.- Modificación de los tipos de suelo en la cuenca vertiente CH-A1.

Tipos de suelo	Existente (ha)	Planificado (ha)
Terminales transporte y actividades logísticas	66,11	356,08
Urbano residencial	28,23	167,03
Urbano industrial	6	199,09
Equipamiento	4,37	22,08
Verde	50,62	32,58
Total:	155,33	776,86

Fuente: Elaboración propia basada en datos del Plan General de Ordenación Urbana de la ciudad de Zaragoza.

Previo desarrollo de los planes de urbanización, que como se ve en la Tabla 70 prevén quintuplicar el área impermeabilizada de la cuenca vertiente, sería necesario solucionar el drenaje de la cuenca que, de acuerdo con los resultados obtenidos, arroja unos indicadores de gestión del sistema de saneamiento en tiempos de lluvia deficientes.

Por su parte, las cuencas CH-B e Y, que ocupan los siguientes puestos de la matriz multicriterio, están conformadas por un porcentaje elevado de uso industrial por lo que las actuaciones encaminadas a la gestión sostenible del sistema de saneamiento deben considerar de manera determinante la reducción de la contaminación de las aguas de escorrentía que, en estas cuencas, será previsiblemente mayor.

En relación a la cuenca AD, su elevada puntuación se debe, de manera determinante, al elevado número de puntos de alivio por superficie neta impermeabilizada que se concentran en esta cuenca y vierten sobre el río Huerva. Así, aunque como se verá más adelante, no se ha podido realizar un diagnóstico cualitativo de los impactos de las descar-

gas de los sistemas unitarios sobre el río Huerva por falta de datos en continuo, el indicador CV2 de número de puntos de alivio por hectárea neta impermeabilizada ayuda a que dicho factor, determinante para el diagnóstico del funcionamiento del sistema de saneamiento en tiempo de lluvia, se considere en el análisis multicriterio, resultando la cuenca AD prioritaria para la resolución de la problemática.

En quinta posición aparece la cuenca C, al igual que la cuenca AD, corresponde a zona urbana consolidada. Esto permite un menor margen de maniobra para las actuaciones de control en origen dentro de la cuenca, por lo que las actuaciones deberán ir encaminadas a una estrategia de control de los puntos de alivio y aumento de la capacidad de las infraestructuras existentes.

Por otra parte, tanto en la cuenca E como en la cuenca CH-A1, deberán considerarse las aportaciones de escorrentía de la cuenca natural aledaña a las mismas, que aumentarán de manera determinante las descargas de los sistemas unitarios de saneamiento calculadas en el presente estudio.

En relación a la subcuenca S1, en el séptimo puesto del ranking, cabe destacar que los resultados aquí obtenidos son conservadores en relación a la situación real en la actualidad, hasta que entre en marcha la EDAR de Utebo.

Finalmente, el elevado número de puntos de alivio de la cuenca AI de la margen izquierda del río Huerva hacen que esta cuenca se incorpore en el octavo puesto del ranking, ocupando los puestos noveno y décimo las cuencas CH-A5 y CH-A4 correspondientes al corredor del río Gállego que, como se ha visto previamente, aportan elevadas descargas en tiempos de lluvia debido a la escasa capacidad de su red para transportar los caudales punta al colector del río Gállego, lo que obliga a realizar descargas directas, previa incorporación a dicho colector, de los caudales punta en episodios de lluvia.

Además de la priorización de actuaciones acorde con el ranking mostrado se deberá incorporar la escorrentía de aquellas cuencas no incorporadas al sistema de saneamiento, denominadas en este estudio cuencas naturales. En el caso de Zaragoza las cuencas naturales de mayor relevancia son la que afecta a las cuencas vertientes E y CH-A1 (zona militar de San Gregorio) que aporta aproximadamente 25.71 m^3/s y la zona del Barranco de la Muerte y el Escorredero de La Filla, que desembocan de manera no controlada en la cuenca Y aumentando los caudales de entrada al sistema de manera determi-

nante. Por otra parte, como se ha visto en la caracterización de la cuenca urbana, existen otras aportaciones no controladas que contribuyen a aumentar los caudales que discurren por el sistema de saneamiento y por tanto las descargas directas en tiempo de lluvia. Estos caudales se deben prioritariamente a antiguas acequias de la huerta de Zaragoza. Parece por tanto necesario realizar un estudio en detalle de todas las aportaciones al sistema de saneamiento que permita diseñar un programa efectivo de reducción de los caudales de entrada en origen.

Una vez realizada una priorización de las actuaciones por cuenca vertiente se deberá seleccionar la tipología de SUDS a incorporar en cada cuenca vertiente de acuerdo con el diagnóstico de la cuenca urbana. Para ello la Tabla 71 recoge las principales características de cada cuenca vertiente ordenadas de acuerdo con la prioridad de actuación anteriormente expuesta.

Tabla 71.- Resumen del diagnóstico de la cuenca urbana de Zaragoza para la selección de la tipología de Sistemas de Drenaje Sostenible.

	Limitantes SUDS		Beneficios Secundarios Permeabilización		Tipologías de usos del suelo			
Cuenca	**Peligrosidad Karstificación**	**Vulnerabilidad Acuífero**	**Compensar Extracciones Acuífero**	**Reducir Plumas térmicas**	**Zonas Verdes**	**Industria, transporte, logística**	**Equipamientos y densidad baja-media**	**Urbano Consolidado**
CH -A	Baja	Alta	Alta	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja
CH-B	Baja	Alta	Baja	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja
Y	Media	Media	Baja	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja
AD	Baja	Media	Baja	Media	Baja	Baja	Baja	Alto
C	Baja	Alta	Media	Media	Baja	Baja	Alta	Alto
E	Baja	Alta	Alta	Alta	Baja	Media	Alta	Medio
S	Alta	Alta	Baja	Alta	Media	Alta	Baja	Bajo
AI	Baja	Media	Baja	Alta	Baja	Baja	Alta	Medio
F	Baja	Alta	Media	Baja	Media	Baja	Media	Medio
B	Media	Media	Baja	Alta	Media	Baja	Media	Medio
J	Media	Media-Baja	Baja	Baja	Alta	Baja	Alta	Bajo
H	Baja	Media-Baja	Baja	Baja	Media	Baja	Alta	Medio
G	Baja	Alta	Alta	Baja	Baja	Alta	Baja	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 71 muestra las principales características de cada cuenca vertiente a considerar en la selección de los SUDS a implementar. Por una parte las limitaciones de las técnicas de permeabilización de la cuenca como medida de control de los caudales en origen. Así, en las cuencas en las que exista un riesgo alto de karstificación deberá descartarse cualquier intervención que suponga infiltración de las aguas de lluvia y escorrentía en el suelo. Por otra parte, en aquellas cuencas en las que la vulnerabilidad del acuífero sea alta se deberán considerar siempre sistemas que garanticen altos rendimientos en la eliminación de las cargas de contaminación. Estas limitaciones se contrastan con los beneficios de las mismas tanto para compensar las extracciones como para frenar las plumas de contaminación térmica.

Finalmente se cuantifican los distintos usos del suelo en cada cuenca vertiente para considerar elementos clave en la toma de decisión de la tipología de SUDS. Así, se localizan las zonas con altas carga de contaminación de la escorrentía, vinculada a los usos industriales y de transporte, las necesidades de aumento de zonas verdes, la disponibilidad de espacios libres (densidad de edificación media-baja) y la existencia de equipamientos municipales que acojan proyectos piloto para potenciar su replicabilidad y su efecto pedagógico y ejemplarizante.

7. Conclusiones

De la definición del sistema de indicadores de sostenibilidad propuestos en la cuenca urbana de Zaragoza se obtiene el siguiente diagnóstico.

En relación al medio receptor, todas las masas de agua superficial de la cuenca urbana de Zaragoza tienen un estado inferior a bueno. En el río Ebro se detecta el efecto del denominado “estiaje húmedo”, con una tendencia al incremento de la concentración de amonio y una disminución del oxígeno disuelto cuando el caudal es menor de $50 m^3/s$ y las lluvias mayores de 15 l/m^2. Además, el estado químico de las masas de agua subterránea es malo, con una acumulación excesiva de metales pesados especialmente en la margen izquierda del río Ebro que soporta una mayor presión por el desarrollo industrial actividad que supone el 29% del tejido productivo de la ciudad con perspectivas de mantenimiento y expansión.

En relación a la cuenca urbana, la margen izquierda de la ciudad está asentada sobre zona inundable con un periodo de retorno de 50 años. Además configuración de los co-

lectores principales del sistema de saneamiento siguen el curso de los ríos que configuran la red de drenaje natural de la ciudad (ríos Ebro, Huerva y Gállego), por lo que las crecidas de los mismos afectan a los puntos de alivio de los colectores principales al menos en periodo de retorno de 10 años.

En relación al sistema de saneamiento, el 86,5% del sistema es unitario, con un 75% de las conducciones con una pendiente menor de 5 Km/m y el 45% de los colectores principales con diámetros menores de 180cm. La capacidad de almacenamiento del sistema unitario de 11.000 m^3. El diagnóstico hidráulico realizado muestra como en episodios de lluvia la capacidad del sistema de saneamiento actual es insuficiente, aliviando los caudales punta a través de 142 puntos de alivio de los que el 60% son alivios directos.

Finalmente la ciudad de Zaragoza no cuenta con una ordenanza municipal que contemple las soluciones a la problemática, no aplica ningún tipo de instrumentos económicos relacionados con la gestión de las aguas de lluvia ni cuenta con programas de participación ciudadana.

Por tanto, la ciudad de Zaragoza se enfrenta a un reto importante en relación a la gestión integral de las aguas de lluvia para reducir la vulnerabilidad de su población a las inundaciones, garantizar un óptimo servicio del sistema de saneamiento y conseguir un buen estado de sus ecosistemas acuáticos.

De acuerdo con este diagnóstico se definen las siguientes líneas de actuación prioritarias en la ciudad de Zaragoza:

- Estudio en profundidad de la relación entre las inundaciones y el sistema de saneamiento de Zaragoza. Con la información existente no se pueden definir los indicadores de gestión del riesgo de inundaciones propuestos en la metodología. Se hace por tanto necesario un estudio de la afección, con periodos de retorno de 5 años y 25 años, de las inundaciones del río Ebro al funcionamiento de la EDAR La Almozara y la EDAR La Cartuja así como a los colectores principales a ambas márgenes del río Ebro y a sus puntos de alivio. Se deberá incluir además en el estudio de riesgos de inundación en el entorno urbano de Zaragoza la falta de capacidad del sistema de saneamiento en episodios de lluvia, caracterizando los sucesos y sus impactos.

- Implementación de Sistemas de Drenaje Sostenible(SUDS). Esta línea de actuación está recogida en el proceso de definición del Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro como medida necesaria para la mejora del estado de los ecosistemas acuáticos. Está igualmente incluida en el Plan de gestión de inundaciones de la cuenca del Ebro como medida para la reducción de la vulnerabilidad de la población. Para la definción de un plan de incorporación de SUDS en la ciudad se facilita una matriz multicriterio de priorización de actuaciones por cuencas vertientes en base a los indicadores propuestos. Dicha matriz se complementa con una tabla resumen para la selección de la tipología de SUDS en la que se resumen los riesgos asociados a cada cuenca vertiente (karstificación y vulnerabilidad del acuífero), los beneficios secundarios de los SUDS (restauración del ciclo hidrológico natural y freno de plumas térmicas de contaminación) y la tipología de usos del suelo, para evaluar las limitaciones y potencialidades de los SUDS en cada cuenca vertiente.

- Mayor control de vertidos de los polígonos industriales especialmente en la margen izquierda del Ebro.

- Baldeo de la cuenca urbana y limpieza rutinaria de redes de alcantarillado aumentando la frecuencia que contempla el contrato de mantenimiento vigente en la actualidad.

- Aumento de la capacidad de almacenamiento del sistema unitario de saneamiento de Zaragoza en al menos 42.000m^3 adicionales, siguiendo las recomendaciones del Manual Nacional para el diseño de Tanques de Tormentas.

- Mejora de los puntos de alivio del sistema dotándolos de mecanismos antirretorno y de un pretratamiento para la eliminación de sólidos en suspensión, dando prioridad a la mejora de los puntos de alivio sobre el río Huerva.

- Construcción de tanques de almacenamiento en la entrada de las EDAR que laminen y retarden las puntas de caudal en episodios de lluvia.

- Análisis del rendimiento de las líneas de tratamiento de cada EDAR en episodios de lluvia con series de datos largas para detectar posibles impactos y definir formas de gestión para minimizarlos.

- Mejora de la Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la calidad de la Gestión Integral del Agua (OMECGIA) de la ciudad de Zaragoza incluyendo las siguientes medidas:

    - Obligación de un estudio sobre aportación de las pluviales y solución a las mismas en los nuevos proyectos de urbanización.

    - Redefinición de criterios de diseño de los tanques de tormenta incluyendo criterios de protección al medio.

    - Definición coordinada de estándares intermitentes de emisión entre el Ayuntamiento de Zaragoza y la Confederación Hidrográfica del Ebro.

    - Desarrollo de un manual técnico de referencia con indicadores para la determinación inequívoca de las condiciones que justifiquen excepcionalidad en el uso de redes separativas.

    - Definición de estándares de calidad por usos para la promoción de la captación y reutilización del agua de lluvia y de escorrentía urbana (riego, infiltración, cisternas, sistemas de lucha contra incendios, etc.).

    - Promoción del uso de superficies permeables en actuaciones de nueva urbanización, minimizando la cuantía de pavimentación u ocupación impermeable.

- Definición de instrumentos económicos para la financiación de las actuaciones necesarias así como para incentivar buenas prácticas en la gestión de las aguas de lluvia en Zaragoza entre las que se proponen:

    - Canon de vertido: Destinado a la implementación de un programa de muestreo para la caracterización de las cargas de contaminación de las descargas del sistema de saneamiento en episodios de lluvia y el impacto sobre el medio receptor, así como a ampliar el conocimiento de la afección de las inundaciones al sistema de saneamiento de Zaragoza.

    - Impuesto sobre la Contaminación de las Aguas (ICA) destinado a la construcción de tanques de tormenta en la entrada de las EDARs y la implemen-

tación de las medidas necesarias para la reducción del impacto en las líneas de tratamiento de las mismas.

  - Factura del Agua: Destinado al aumento de la capacidad de almacenamiento del sistema, a la mejora de los puntos de alivio, al mantenimiento de la red, a la gestión avanzada del sistema y a la implementación de SUDS.

  - Tasa de lluvia y medidas para la incentivación de buenas prácticas (subvenciones a la inversión en instalaciones, reducción del impuesto sobre la renta, etc.) destinadas a la implementación de SUDS.

- Definición de los mecanismos de coordinación institucional para la definición de un plan de actuación para la gestión integral de las aguas de lluvia bajo un enfoque intersectorial (agua, urbanismo, ordenación del territorio, ámbito normativo, sistema tarifario) e intercompetencial (Confederación Hidrográfica del Ebro, Instituto Aragonés del Agua y Ayuntamiento de Zaragoza).

- Puesta en marcha de una estrategia de participación ciudadana para el diagnóstico, definición e implementación de un plan de gestión integral de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza.

Previamente a la implementación en la ciudad de Zaragoza de las actuaciones propuestas en este capítulo serán necesarios dos estudios en profundidad.

Por una parte es urgente llevar a cabo un programa de muestreo, caracterizando las cargas de contaminación tanto de la escorrentía urbana como de las descargas del sistema de saneamiento, tanto unitario como separativo, así como la frecuencia de las descargas por tipología de suceso. Esto permitirá definir con mayor exactitud el impacto de las descargas en los medios receptores y el alcance de la problemática.

Por otra parte, y en relación con el comportamiento hidráulico del sistema de saneamiento de Zaragoza en episodios de lluvia, es necesaria una modelización, instrumentación y calibración del sistema de saneamiento para verificar el diagnóstico preliminar realizado en el presente estudio. Una vez se cuenten con modelos hidráulicos se podrán diseñar las medidas que se apuntan en las líneas de actuación. Además el control a tiempo real del sistema permitirá una gestión avanzada del sistema racionalizando y optimizando así su funcionamiento.

Se concluye que la aplicación del sistema de indicadores de sostenibilidad propuestos cumple los objetivos previstos, permitiendo la realización de un diagnóstico integral y la definición de unas líneas estratégicas de actuación que, de aplicarse, mejorarían de manera ostensible la gestión de las aguas de lluvia en la ciudad de Zaragoza.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

1. Conclusiones

En un contexto de rápido crecimiento de la población urbana y cambio climático global, la consecución de un modelo de desarrollo sostenible pasa inevitablemente por construir ciudades más sostenibles.

Basado en una intensiva impermeabilización de los suelos, el modelo actual de desarrollo urbano modifica profundamente el ciclo natural del agua en las ciudades. La drástica reducción de la capacidad de infiltración del terreno hace que gran parte de la precipitación se transforme en escorrentía superficial, que se concentra rápidamente originando grandes caudales punta. Por otra parte, el lavado de las superficies urbanas aporta altas cargas de contaminación a la escorrentía que producen importantes impactos en los medios receptores. Finalmente, los escenarios de cambio climático revelan una tendencia al incremento de la frecuencia de eventos extremos como lluvias torrenciales, aumentando la vulnerabilidad de las ciudades en cuatro sectores estratégicos: la energía, el agua, el transporte y la salud pública.

Esta realidad motiva la realización de la presente tesis doctoral cuyo objetivo general es contribuir a la consecución de ciudades sostenibles a través de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos que disminuya la vulnerabilidad de la población a las inundaciones, mejore el funcionamiento del sistema de saneamiento y drenaje urbano y minimice los impactos sobre los medios receptores.

A continuación se exponen las conclusiones que se organizan de acuerdo a los objetivos específicos de la presente tesis doctoral.

Objetivo específico 1: Analizar las experiencias internacionales en la resolución de la problemática e identificar los principales obstáculos para la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

La primera conclusión es que una de las líneas estratégicas para avanzar hacia la gestión integral de las aguas de lluvia es la **definición de un sistema de indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia cuantificables y comparables**

sobre los que realizar un diagnóstico de la situación unificado, definir y dar seguimiento a las líneas de actuación resultantes así como establecer unos valores umbral de sostenibilidad en la gestión de las aguas de lluvia.

Objetivo específico 2: Realizar una propuesta de indicadores de sostenibilidad para la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos que permita superar los obstáculos encontrados.

La segunda conclusión es que **bajo un enfoque integral que considera la gestión de las aguas de lluvia en el marco de las complejas interacciones del sistema urbano, el marco metodológico Presión-Estado-Respuesta permite definir unos indicadores de sostenibilidad de la gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.**

Objetivo específico 3: Comprobar la validez de los indicadores propuestos en un estudio de caso.

La tercera conclusión es que **la determinación de los indicadores de sostenibilidad propuestos en la cuenca urbana de Zaragoza permiten la realización de un diagnóstico basado en indicadores sobre el que definir unas líneas estratégicas de actuación para la gestión integral de las aguas de lluvia que contemplan mejoras no sólo en el sistema de saneamiento y drenaje urbano, sino también en el marco normativo, urbanístico, económico, social y ambiental**.

Objetivo específico 4: Definir las líneas de actuación prioritarias para avanzar hacia la gestión integral de las aguas de lluvia en España.

Del estudio de caso se concluyen las siguientes líneas generales de actuación en España:

Integración de la gestión de las aguas de lluvia en las políticas de ordenación del territorio: Las actuaciones necesarias para la gestión integral de las aguas de lluvia se deben enmarcar en un planeamiento a nivel de cuenca hidrográfica. Por una parte, las descargas de los sistemas de saneamiento deben estar incluidas de manera explícita en el análisis de las presiones sobre las masas de agua de cada cuenca hidrográfica recogidas en el informe IMPRESS. Además es necesario profundizar en el estudio de los riesgos de inundación en su doble sentido: la afección de las inundaciones a los sistemas urbanos (incluidos los sistemas de saneamiento) y la inclusión de los sistemas de saneamiento como elemento de generación de riesgo de inundación, integrando de manera

explícita la gestión de las aguas de lluvia en las ciudades en los planes de gestión de inundaciones. Finalmente, se deben considerar en la gestión de las aguas de lluvia los caudales aportados por las redes de drenaje natural y artificial (barrancos aledaños, conexión de acequias de riego, etc).

Desarrollo de mecanismos de coordinación institucional y participación ciudadana: Para la gestión integral del agua de lluvia en los entornos urbanos es necesario contar con órganos efectivos de coordinación intersectorial (agua, urbanismo, ordenación del territorio, economía, medio receptor, marco normativo), intercompetencial (municipal, autonómico y estatal) e interdisciplinar. Para garantizar la aceptabilidad y la durabilidad de las medidas que se implementen se deben igualmente promover procesos de participación ciudadana activa en el diagnóstico, diseño e implementación de los planes de gestión integral de las aguas de lluvia.

Mejora del marco normativo: Es necesario contar con ordenanzas municipales que incluyan una filosofía y un articulado inequívoco para la promoción de SUDS, definiendo normas técnicas para su estudio y diseño en cada proyecto de nueva urbanización. Además es necesario desarrollar un marco normativo a nivel estatal en el que se definan estándares intermitentes de emisión adaptados a la naturaleza de los vertidos de los sistemas de saneamiento en tiempos de lluvia y a las características de cada medio receptor, así como unas normas técnicas que definan los criterios de diseño de las infraestructuras de saneamiento coherentes con dichos estándares.

Incorporación de instrumentos económicos para la gestión integral de las aguas de lluvia: es necesario profundizar en el estudio y aplicación en España de herramientas económicas que respondan a un triple objetivo: incentivar/penalizar las buenas/malas prácticas en la gestión de las aguas de lluvia, establecer mecanismos de financiación de las actuaciones y fomentar la racionalidad económica el ámbito de la ordenación del territorio y la gestión del agua. Para ello los instrumentos económicos deben contar con una base imponible que relacione el origen del problema, la impermeabilización de la cuenca urbana, con la solución al mismo, la implementación de SUDS.

2. Limitaciones

En la aplicación a la ciudad de Zaragoza de la metodología propuesta en la presente tesis doctoral se han encontrado varias limitaciones.

Falta de datos de caracterización de las cargas de contaminación: En la cuenca urbana de Zaragoza no se ha realizado ningún programa de muestreo que caracterice las cargas de contaminación de la escorrentía urbana y de las descargas del sistema de saneamiento, así como la frecuencia de las descargas por tipología de suceso. Así, en la presente tesis doctoral se han tenido que utilizar referencias bibliográficas que deberán ser corroboradas con los resultados de un programa exhaustivo de muestreo en la cuenca de estudio.

El sistema de saneamiento de Zaragoza no está modelizado ni calibrado. Será necesario por tanto modelizar y calibrar el sistema de saneamiento para contrastar el diagnóstico hidráulico del funcionamiento en episodios de lluvia realizado en la presente tesis doctoral. Esto permitirá a su vez diseñar las medidas concretas que se apuntan en las líneas de actuación resultantes de la aplicación de los indicadores.

El plan de inundación de la cuenca del Ebro no incluye la afección de las mismas al sistema de saneamiento por lo que no se pueden calcular los indicadores de Estado de la cuenca urbana.

No se consiguen datos para que los resultados del análisis del impacto de los episodios de lluvia en las líneas de tratamiento de las Estaciones Depuradoras de Aguas residuales sean concluyentes. Será necesario profundizar en el estudio con series de datos largas y considerando el bypass a las EDAR.

3. Futuras líneas de investigación

Finalmente se identifican espacios en los que resultaría de interés desarrollar futuras líneas de investigación para seguir avanzando hacia una gestión integral de las aguas de lluvia en las ciudades.

Definición de valores umbral de referencia y definición de un sistema de calibraciónpara el establecimiento de estándares de sostenibilidad internacionales en la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos. La aplicación de los indicadores urbanos propuestos en esta tesis doctoral a las principales ciudades españolas permitirá conocer el estado de la cuestión a nivel nacional. Por otra parte, se sugiere su aplicación a nivel internacional, seleccionando aquellas ciudades en las que su aplicación ha sido exitosa, como por ejemplo Dundee (Escocia) o Washington (EEUU). Se deberá además

definir un sistema de intercalibración con el fin de que distintos indicadores ofrezcan resultados comparables sobre los que determinar los valores umbral de referencia para el establecimiento de un sistema unificado internacional de indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos.

Por otra parte sería conveniente el **estudio de la interrelación entre movilidad urbana sostenible, la gestión integral de las aguas de lluvia y salud de los ecosistemas acuáticos,** respaldando así las actuales estrategias de fomento de la movilidad sostenible con datos reales de los beneficios indirectos de éstas en relación a la protección del medio receptor por el control en origen de las fuentes de contaminación difusa de las cuencas urbanas.

6. BIBLIOGRAFÍA

Aalderink, R. H., Lijklema, L., & Ellis, J. B. (1990). Urban Storm Water Quality and Ecological Effects Upon Receiving Waters. In *IAWPRC Conference on Urban Storm Water Quality and Ecological Effects Upon Receiving Waters*. Wageningen: Pergamon.

Agencia Catalana del Agua (2005). Informe IMPRESS de análisis de las presiones sobre las masas de agua en las cuencas internas de Cataluña.

AEAS. (2014). Recomendaciones Técnicas para la Regulación del Servicio de Saneamiento de Agua Urbana.

AEAS-FEMP. (2014). Guía de tarifas de los servicios de abastecimiento y saneamiento del Agua.

Agencia Europea de Medio Ambiente (2003). El agua en Europa : una evaluación basada en indicadores.

AQUAVAL Project (2013).*Demostración de Benaguasil*.www.aquavalproject.eu/

AQUAVAL Project (2013). *Demostración de Xàtiva. www.aquavalproject.eu/*

ATV-A 138 (2002) ATV-*Arbeitsblatt A138: Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser*, Enero 2002.

Auckland City Council (2006). *Summary of Stormwater Asset Management Strategies.*

AUDES (2012). Proyecto de Áreas Urbanas de España. http://alarcos.esi.uclm.es/per/fruiz/audes/.

Ayuntamiento de Madrid (2006). *Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid.* Madrid.

Ayuntamiento de Zaragoza (2009). *Atlas de Zaragoza*.

Ayuntamiento de Zaragoza. (1999). Anejo 6 de Infraestructuras de Saneamiento: Estudio de soluciones básicas para el saneamiento integral de los suelos urbanizables.

Ayuntamiento de Zaragoza (2007). Plan General de Ordenación Urbana.

Ayuntamiento de Zaragoza. (2013). Actualización de los indicadores de sostenibilidad de Zaragoza.

Ayuntamiento de Zaragoza (2013). *Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua de la ciudad de Zaragoza.* Zaragoza.

Ayuntamiento de Zaragoza (2013). *Ordenanza reguladora de las tarifas por la prestación de servicios vinculados al saneamiento y depuración de aguas del Ayuntamiento de Zaragoza*. Zaragoza.

Beneyto González-Baylín, M. (2004). Evaluación de los rendimientos de depósitos de detención-aliviadero en redes de saneamiento unitarios en cuencas de la España húmeda. Universidade da Coruña.

Benito, S. C. (2015). E 2 STORMED PROJECT Report on Energy in the Urban Water Cycle.

Benoit, L. (2012). *Desarrollo sostenible y reforma profunda del derecho urbanístico: ambición y viabilidad*. Retrieved from http://www.iddri.org/Publications/Publications-scientifiques-et-autres/CyTET-168.pdf.

Berwick, N. (2015). E 2 STORMED PROJECT. Report on Management and Decision Assessment Tools.

Bertrand-Krajewski, J. L., Lebrebvre, M., Lefai, B., & Audic, J. M. (1995). Flow and pollutant measurements in a combined sewer system to operate a wastewater treatment plant and its storage tank during storm events. Water, Science & Technology, 31, 1–12.

Burton, G. A., & Pitt, R. E. (2002). Stormwater Effects Handbook: A toolbox for watershed managers, scientists and engineers. Florida: Lewis Publishers, CEC Press Co.

Carta de Aarborg (1994). *Carta de las Ciudades Europeas hacia la Sostenibilidad*. Consejo internacional de iniciativas ambientales locales (ICLEI).

Casal-Campos, a., Jefferies, C., & Perales Momparler, S. (2012). *Selecting SUDS in the Valencia Region of Spain.*Water Practice and Technology, 7(1). http://doi.org/10.2166/wpt.2012.001

CEDEX (1997). Estudio sobre la estabilización de la lámina de agua del rio Ebro a su paso por Zaragoza. (1997).

Cherrered, M., & Chocad, B. (1990). Development of a methodology to determine the pollution discharged by a combined sewer network. Water, Science & Technology, 22, 15–22.

Chocad, B., Cathelain, M., Mares, A., & Mouchel, J. M. (1994). La pollution due aux rejets urbains par temps de pluie, impacts sur les milieux recepteurs. La Houille Blanche, 1, 97–105.

Chouli, E. (2007). Applying storm water management in Greek cities: learning. Desalination, 210, 61–68.

Chouli, E., & Deutsch, J.-C. (2008). Urban Storm Water Management in Europe: *What are the costs and who should pay?* Edinburg, Scotland: 11th International Conference on Urban Drainage. Retrieved from http://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/11th_International_Conference_on_Urban_Drainage_CD/ICUD08/pdfs/162.pdf

Centro de Investigaciones Sociológicas. Barómetro de Septiembre 2012. Estudio nº2954.

CIRIA (2007). *The SUDS Manual*. Publicación C697.

Coffman, L. (1999). *Low-Impact Development Design Strategies, An Integrated Design Approach*. Department of Environmental Resources. Prince George's County, Maryland.

Committee on Reducing Stormwater Discharge (2009a). *Urban Stormwater Management in the United States*. Washington, D.C.

Committee on Reducing Stormwater Discharge (2009b). *Urban Stormwater Management in the United States*. Washington, D.C. Retrieved from http://www.epa.gov/npdes/pubs/nrc_stormwaterreport.pdf

Confederación Hidrográfica del Ebro (2012). *Informe IMPRESS de análisis de las presiones sobre las masas de agua en la Demarcación Hidrográfica del Ebro*.http://www.chebro.es

Confederación Hidrográfica del Ebro (2014). *Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro 2010-2015*. BOE nº52 de sábado 1 de Marzo de 2014. http://www.chebro.es

Confederación Hidrográfica del Ebro (2014). *Plan de actuación2015*. Aprobado el 30 de Diciembre de 2014.http://www.chebro.es

Confederación Hidrográfica del Ebro (2015). Sistema Automático de Información de la Calidad Ambiental (SAICA). http://www.chebro.es

Confederación Hidrográfica del Ebro (2015). Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH). http://www.chebro.es

Consorcio de compensación de seguros (2013). Informe de daños sobrebienes asegurados. http://www.consorseguros.es

CRANA (2010). *Catálogo de buenas prácticas en desarrollo local sostenible*. Centro de Recursos Ambientales de Navarra.

Del Río, H. (2011). Estudio de los flujos de contaminación movilizados en tiempo de lluvia y estrategias de gestión en un sistema de saneamiento y drenaje unitario de una cuenca urbana densa de la España húmeda. Universidade da Coruña.

Desbordes, M., & Hemain, J. C. (1990). *Further research needs for impact estimates of urban storm water pollution*. Water, Science & Technology, 22, 9–14.

Deutsch, J.-C., Revitt, M., & Ellis, J. B. (2003). *Report 5 . 1 . Review of the Use of stormwater BMPs in Europe prepared by Middlesex University in collaboration with Cereve at ENPC , Ingenieurgesellschaft Prof . Dr . Sieker GmbH , Water Pollution Unit at Laboratoire Central des Ponts et Chaussées , Divi. Review Literature And Arts Of The Americas.*

Dirección General de Protección civil y Emergencias (2015). *Evaluación de inundaciones.* http://www.proteccioncivil.es

Directiva 91/271/CE del Parlamento Europeo y del Consejo aprobada el 21 de mayo de 1991, sobre Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas.

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial n° L 327 de 22/12/2000.

*Directiva 2007/60 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relative a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.*Diario official nº 288/27 del 6/11/2007.

English Nature. (2003). *Green roofs: their existing status and potential for conserving biodiversity in urban areas"*. Retrieved from http://www.english-nature.org.uk/news/news_photo/Greenroofs.pdf

Entralgo, J. R. (2011). *Alcance y limitaciones de los sistemas urbanos de saneamiento. Situacion de Zaragoza.* Departamento de Conservación y Explotación de Infraestructuras. Ayuntamiento de Zaragoza.

European Comission (2012). *Overcoming the Challenges of SUDS design.* DG Environment.http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/32si8_en.pdf

E 2 STORMED PROJECT (2015). http://www.e2stormed.eu/

Field, R., & Pitt, R. E. (1990). *Urban storm-induced discharge impacts: US-EPA Research program review.*Water, Science & Technology, 22, 1–7.

Gil, C; Santos, J.A.; Marques, L.A. y Esnaola, J.M. (1995) Mapa Geológico de España. Instituto Tecnológico Geominero de España.

Garrido Schneider, E. A. (2014). Análisis del impacto térmico generado por los pozos de climatización en las aguas subterráneas de la ciudad de Zaragoza. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Gobierno de Navarra (2011). *Decreto Foral 44/2011 de 16 de Mayo, por el que se aprueba el Plan de Ordenación Territorial de la Navarra Atlántica.* Publicado en BON el 21 de Julio de 2011.

Gromaire, M., Garnau, S., Saad, M., & Chebro, G. (2001). Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. Water Research, 35, 521–533.

Gutierrez Fernández, L.A. (1995). La incidencia de las Aguas pluviales en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. *Tecnología Del Agua, 142*, 58–62.

House, M. A., Ellis, J. B., Herricks, E. E., Hvitved-Jacobsen, T., Seager, J., Lijkema, L., Clifforde, I. T. (1993). *Urban drainage - impacts on receiving water quality.* Water, Science & Technology, 27, 117–158.

Informe Brundtland (1987).Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Naciones Unidas. 1987. Nueva York. http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/42/427

IPCC (2015). *Climate Change 2014.* Intergovernmental Panel on Climate Change. United Nations Environmental Program and World Meteorological Organization.

Jefferies, C. (2015). E 2 STORMED PROJECT Report on Ecosystem Services.

Jong, P., & Hobma, F. (2011). Fifth International Conference of the Platform of Experts in Planning Law. In *Water in urban areas and planning law.* Copenhagen.

Kaspersen, J. (2000). The stormwater utility: will it work in your community. *The Journal for Surface Water Quality Proffesionals.* http://www.stormh2o.com/SW/Articles/The_Stormwater_Utility_Will_It_Work_in_Your_Commun_212.aspx

Keefer, T. N., Simons, R. K., & Mc.Quivey, R. S. (1979). *Dissolved Oxygen impact from urban storm sunoff.*Washington D.C.

La Roca, F. (2013). Valores productivos y nuevos enfoques de gestión economica de la Directiva Marco del Agua 60/2000/CEE.

Lee, G. F., & Jones-Lee, A. (1993). Water quality impacts of stormwater associated contaminants. Focus on real problems. Water, Science & Technology, 28, 231–240.

Lijklema, L., Roijackers, R. M., & Cupper, J. G. M. (1989). *Biological assesment of effects of CSOs and Stormwater discharges.* (J. B. Ellis, Ed.). Oxford: Pergamon Press.

López Alonso, R. (Universidad de L. (2001). *Limitaciones al MétodoRacional*. CIMBRA, 342, 4.

Mata, P. D. E. L. a, Belén, A., Merino, M., & González, A. (2014). *Contenido en metales pesados de las aguas subterráneas en la ciudad de Zaragoza*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Mattheiß, V., Le Mat, O., & Strosser, P. (2009). Which role for economic instruments in the management of water resources in Europe ? In search for innovative ideas for application in the Netherlands. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, The Netherlands

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2010). *Guía para la aplicación del R.D. 1620/2007.* http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y_autorizaciones/guia_rd_1620_2007__tcm7-178027.pdf

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2010). *Informe de actividades*. http://www.magrama.gob.es

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2012). *Informe de control del estado de las masas de agua (CEMAS).* http://www.magrama.gob.es

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015).*Anuario de Aforos.* http://www.magrama.gob.es

Ministerio de Fomento (1999). *Máximas lluvias diarias en la España Peninsular.*Dirección General de Carreteras. Monografía.

Ministère de l'ecologie, du développement durable et de l'energie. *Guide sur l'utilisation et la récupération d'eaux de pluie.* 2013. Disponible en:http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-recuperation-de-l-eau-de-pluie.html

MMM 2007. Ministry of Agriculture and Forestry of Finland. Rural Development *Programme for Mainland Finland 2007-2013*. Disponible en: http://www.mmm.fi/en/index/frontpage/rural_development/Rural_development_programmes/strategy_mainland_2007_2013.html

M.O.P.U. (1990): Instrucción de Carreteras 5.2.JC. Drenaje Superficial Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de España.

Moreno Merino, L. (Instituto G. y M. de E., Garrido Schneider, E. A. (Instituto G. y M. de E., Azcón Gonzálex de Aguilar, A. G. y M. de E., & Durán Valsero, J. J. *Hidrogeología urbana de Zaragoza.*Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Morroni, W., & Salamon, A. (2003). Manual para el diseño de planes maestros para la mejora de la infraestructura y la gestión del drenaje urbano.

Mosqueira G., Ibáñez M.P., García, E., Soriano, L.(2012). Análisis crítico de la problemática y las soluciones adoptadas a nivel europeo en la gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos. Posibles aplicaciones en España. Trabajo fin de máster. Máster en gestión fluvial sostenible y gestión integrada de aguas. Universidad de Zaragoza.

Observatorio de la sostenibilidad en España (2008). Agua y sostenibilidad : Funcionalidad de las cuencas.

OCDE (1994). OCDE (1996). Innovative Policies for Sustainable Development -The Ecological City. Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo. París.

Oficina Internacional del Agua (2013). Organización de la gestión del agua en Francia.

Organización Mundial de la Salud (2006). *Directrices para la reutilización del agua.*

Perales Momparler, S., & Doménech, I. A. (2007). *Los Sistemas de Drenaje Sostenible: Una alternativa a la gestión del agua de lluvia.* Sevilla: V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil. "Desarrollo y Sostenibilidad en el marco de la ingeniería." http://www.ciccp.es/biblio_digital/V_Congreso/congreso/pdf/010310.pdf

Philip, R. (2011a). Module 1. Strategic planning. SWITCH Training Kit. Integrated urban water management in the city of the future. Retrieved from http://www.switchtraining.eu/modules/module-1/#c65

Philip, R. (2011b). Module 4. Stormwater- Exploring the options. SWITCH Training Kit. Integrated urban water management in the city of the future. Retrieved from http://www.switchtraining.eu/modules/module-4/#c68

PNCA (2007) Plan Nacional de Calidad de las Aguas. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Policy, C. S. O. C., Nmc, T., & Npdes, T. (n.d.). Chapter 4 *Monitoring and Modeling Plan*, (January 1999).

Pristel, V. (2011). Un marco de cumplimiento alternativo para el manejo de aguas pluviales urbanas en la región costera central de California (pp. 161 – 169). Panamá - República de Panamá.: Simposio Help 2011. UNESCO.

PROMEDSU (2001). *Plan Nacional de Medicion de las Descargas de los Sistemas Unitarios*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Puddephatt, J., & Heslop, V. (2007). What we can learn from overseas. Policy instruments to promote the uptake of low impact urban design and development.

Puertas Agudo, J., Suárez López, J., & Anta Álvarez, J. (2008). *Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano.* Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

Ramón, J., Estudio, D., De, P., & General, D. (2015). Manual nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormentas, 70–77.

Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE nº 294. 8 Diciembre 2007.

*Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.*BOE nº 171.Jueves 15 de julio de 2010. Sec. I. Pág. 61954.

*Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.*BOE nº 227. 20 de septiembre de 2012. Sec. I. Pág. 66167.

Revitt, D.M.; Ellis, J.B. y Scholes, L. (2003) *Review of the Use of Stormwater BMPs in Europe.* Report 5.1. EU 5th Framework DayWater Project. [Accesible: http://daywater.enpc.fr/www.daywater.org/]

Rueda, S. (1999). *Modelos e Indicadores para ciudades más sostenibles Taller sobre Indicadores de Huella*, 40.

Ruza Rodríguez, Javier. Implicaciones legales de la estrategia de control y autorización de vertidos de aguas pluviales. Jornadas sobre Sistemas de Saneamiento. Actualidad y Futuro. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino de España (2011).

Simón. (1998b). *Estudio de Riesgos Naturales en los terrenos de la Orla Sudoeste de suelo urbanizable.* Universidad de Zaragoza.

Simón Gómez, J. L., Soriano Jimenez, M. A., Arlegui Crespo, L., & Caballero Burnano, J. (1998). *Estudio de Riesgos de hundimientos karsticos en el corredor de la carretera de Logroño*. Universidad de Zaragoza.

SOSTAQUA. Desarrollos tecnológicos hacia el ciclo urbano del agua autosostenible. http://www.sostaqua.com/

Suárez, J. (1994). *Modelos de calidad del agua del río Nalón: Aplicación al estudio del estiaje húmedo.* Universidad de Cantabria.

Suárez López, J., & Cagiao Villar, J. (2005). Vertidos de sistemas de saneamiento unitario en tiempo de lluvia: control de impactos sobre los ríos. *Revista Del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos : Ingeniería Y Territorio*, *71*, 23–35.

Suárez, J., Puertas, J., Jácome, A., Anta, J., & Del Río, H. (2009). Contaminación en los sistemas de saneamiento y drenaje en tiempo de lluvia.

Sukhdev, P., Wittmer, H., & Miller, D. (2014). La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad (TEEB): desafíos y respuestas. Nature in the Balance: The Economics of Biodiversity.

SWITCH Project (2006-2011). Sexto Programa Marco de la Unión Europea. UNESCO-IHE (Instituto para la Educación del Agua).

Temprano González, J., Suárez López, J., & Tejero Monzón, I. (1998). Dimensioning criteria for storm water tanks for Santander. *European Water Management*, *1*, 55–60.

The Civic Federation (2007).*Managing Urban Stormwater with Green Infrastructure: Case Studies of Five U.S. Local Governments.*

Urban Climate Change Research Network (2011) *First Assessment Report.*Cambridge University.

UNE-EN 752 (2010). Sistemas de desagües y de alcantarillado exteriores a edificios.AEN/CTN 149 – Comité de Ingeniería del Agua.

UN-DESA (2014). *World Urbanization Prospects*. Department of Economic and Social Affairs. United Nations. New York.

UN-DESA (2015). *World Population Prospects*. Department of Economic and Social Affairs. United Nations. New York.

U.S. Environmental Protection Agency (1986).*Deriving Numerical National Water Quality Criteria.*

U.S. Environmental Protection Agency (1991). Evaluating nonpoint source control projects in an urban watershed. United States Environmental Protection Agency. Estados Unidos. Disponible en: http://water.epa.gov/polwaste/nps/outreach/point4.cfm

U.S. Environmental Protection Agency (1995). Combined Sewer Overflows Guidance For Long-Term Control Plan. Epa, (4204).

U.S.-E.P.A. (1999). Preliminary data summary of urban stormwater best management practices. Washington D.C.

U.S. Environmental Protection Agency (1999). Chapter 3 initial system characterization - existing data analysis and field investigation, (January), 1–19.

U.S. Environmental Protection Agency (2003). Water Quality Trading Policy. United States Envioronmental Protection Agency. Estados Unidos. Disponible en: http://water.epa.gov/type/watersheds/trading/tradingpolicy.cfm.

U.S. Environmental Protection Agency (2004). Guidelines for water reuse. Estados Unidos. http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100FS7K.pdf

U.S. Environmental Protection Agency (2007). Water Quality Trading Toolkit for Permit Writers. United States Environmental Protection Agency. http://water.epa.gov/type/watersheds/trading/WQTToolkit.cfm

U.S. Environmental Protection Agency. (2007). Managing Urban Stormwater with Green Infrastructure: Case Studies of Five U.S. Local Governments.

U.S. Environmental Protection Agency. (2008). A Screening Assessment of the Potential Impacts of Climate Change on Combined Sewer Overflow (CSO) Mitigation in the Great Lakes and New England Regions A Screening Assessment of the Potential Impacts of Climate Change on Combined Sewer Overflow Mitigatio, (February).

Vegetal, R., Fraile, R. M., Fraile, R. M., Ángel, M., Aguerri, F., Aguerri, J. I., … Ramos, M. (2008). Zaragoza1908-2008 Arquitectura y Urbanismo.

W.E.F.-A.S.C.E. (1993). Design and construction of urban stormwater management systems. Virginia.

Whipple, W. et. al. (1989).Stormwater management in urbanising areas, Prentice-Hall

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). The SUDS manual (C697). http://doi.org/London C697.

World Bank (2010a). *Cities and Climate Change. An urgent Agenda*. Washington, DC: The World Bank.

World Bank (2010b). *Development and Climate Change: A Strategic Framework for the World Bank Group, Interim Progress Report*. Washington, DC: The World Bank.