

# Diseño urbano sensible al agua, una apuesta por la sostenibilidad urbana de Granada

## Autores/as:

M. Isabel Rodríguez-Rojas<sup>1</sup>  
Begoña Moreno Escobar<sup>2</sup>  
Germán Martínez Montes<sup>3</sup>  
Alejandro Muñoz Ubiña<sup>4</sup>

**RESUMEN:** El cambio climático es probablemente el mayor reto al que nos enfrentamos hoy en día, por su carácter global y sus implicaciones ambientales y socioeconómicas. El aumento de las temperaturas y la intensificación de los fenómenos meteorológicos están generando graves problemas en todo el mundo. Este fenómeno se está viendo agravado por el proceso continuo de impermeabilización urbana que comenzó en la segunda mitad del siglo XX y que sigue vigente hoy en día. El denominado 'sellado del suelo' está ocasionando un aumento de la frecuencia e intensidad de las inundaciones así como de la temperatura en la ciudad (efecto 'isla de calor'), lo que ha puesto de manifiesto la necesidad de desarrollar un nuevo modelo urbanístico que revierta el proceso de impermeabilización urbana y que convierta a nuestras ciudades en lugares más resilientes frente al cambio climático. En este sentido, el movimiento de las llamadas 'Ciudades Sensibles al Agua' han surgido como respuesta para reclamar entornos urbanos más naturales, resilientes y sostenibles, utilizando los Sistemas de Drenaje Sostenible y los espacios verdes como vector fundamental en el proyecto de la ciudad. En Granada se está realizando una apuesta de futuro en esta línea de la mano de EMASAGRA y de investigadores de la Universidad de Granada. En este artículo se presenta un resumen de los principales proyectos que ambos agentes vienen desarrollando desde el año 2012 y que están suponiendo un cambio en el modelo urbano de la ciudad de Granada.

Palabras claves: Resiliencia, Cambio climático, Sistemas de Drenaje Sostenible, Diseño Urbano Sensible al Agua, Ciudades Sensibles al Agua.

<sup>1</sup> Dep. de Urbanística y Ordenación del Territorio. Universidad de Granada. [mabel@ugr.es](mailto:mabel@ugr.es)

<sup>2</sup> Dep. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería. Universidad de Granada. [bgmoreno@ugr.es](mailto:bgmoreno@ugr.es)

<sup>3</sup> Dep. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería. Universidad de Granada. [gmmontes@ugr.es](mailto:gmmontes@ugr.es)

<sup>4</sup> Director de Planificación, Proyectos y Obras. EMASAGRA. [amunozu@emasagra.es](mailto:amunozu@emasagra.es)

## 1. ANTECEDENTES

Los impactos ambientales generados por el cambio climático y el continuo proceso de impermeabilización de los entornos urbanos son cada vez mayores. El denominado 'sellado del suelo' está generando numerosas afecciones, en muchos casos irreversibles, como la degradación de los suelos, la reducción de la biodiversidad, el incremento de la temperatura en la ciudad -efecto 'isla de calor'-, el aumento de la escorrentía urbana y de las inundaciones, los vertidos de agua contaminada y el colapso en las redes de saneamiento (EEA, 2006).

En este sentido, desde los años 90 numerosas ciudades están desarrollando acciones dirigidas a paliar los efectos generados por este proceso continuo de impermeabilización. Estas acciones han sido denominadas bajo diferentes terminologías en inglés: SuDS (Sustainable Drainage Systems) es el término más utilizado en Europa, BMP's (Best Management Practices) y LID's (Low Impact Developments) son muy utilizados en Asia y EE.UU. y Blue-Green Cities

(BGC's) y NbS (Nature-Based Solutions) son términos recientes usados con un carácter más general (Rodríguez-Rojas et al., 2017b). Todos ellos tienen en común el objetivo de recuperar la relación urbana con el agua y los espacios naturales ayudando a mitigar los efectos del cambio climático y a mejorar la calidad ambiental de las ciudades. Están diseñados para recuperar, en la medida de lo posible, el ciclo hidrológico natural del agua alterado por el sellado del suelo, infiltrando, reteniendo y reutilizando el agua pluvial en la ciudad. Constituyen un enfoque más sostenible de la gestión de la escorrentía, más allá del tradicional que trata de recoger y conducir el agua pluvial a las redes de saneamiento lo antes posible, eliminándola por completo de la superficie de las calles (CIRIA, 2007).

La implementación de estos sistemas ha tenido consecuencias muy positivas como herramienta para paliar los efectos de la impermeabilización urbana. Sin embargo, ha quedado patente la necesidad de llevar a cabo un cambio integral en el paradigma del diseño urbano que genere un nuevo modelo

urbanístico más sostenible. Es urgente revertir el proceso de impermeabilización urbana revegetando y renaturalizando la ciudad como medida para luchar contra los efectos del cambio climático (SWD, (2012). Esta aproximación a un urbanismo más acorde con los procesos naturales asociados al ciclo hidrológico del agua se ha ido concretando en los últimos años en el denominado 'Diseño Urbano Sensible al Agua' (en inglés 'Water Sensitive Urban Design'), el cual se define como la integración del planeamiento urbano en la gestión, protección y conservación del ciclo del agua, de forma que se asegure una gestión del agua sensible a los procesos hidrológicos y ecológicos (SUSDRAIN, 2014). Su aplicación en la lucha contra el cambio climático se ha convertido en los últimos diez años en una prioridad mundial, dando origen a un movimiento global denominado 'Ciudades Sensibles al Agua' (en inglés 'Water Sensitive Cities') (CRC, 2021) cuyo objetivo principal es hacer de nuestras ciudades lugares más habitables, resilientes y sostenibles, recuperando una relación entre el agua y la ciudad más natural.

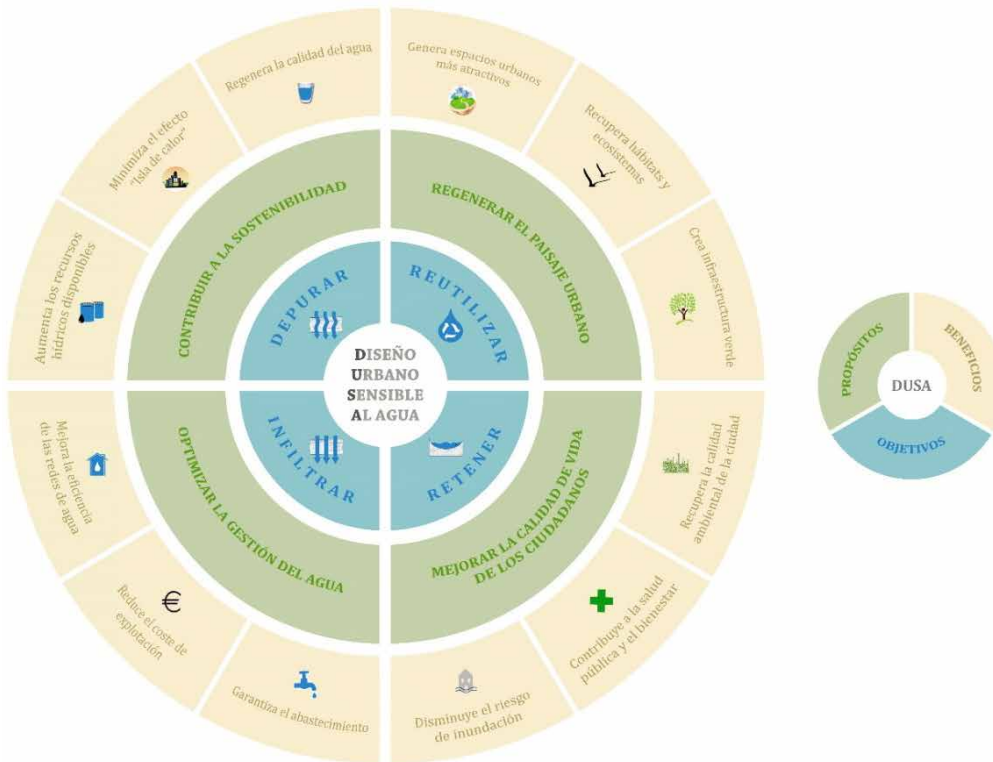


Figura 1. Objetivos y beneficios de los SuDS y el Diseño Urbano Sensible al Agua (Rodríguez-Rojas et al., 2017a)

## 2. SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLE Y DISEÑO URBANO SENSIBLE AL AGUA: OBJETIVOS, BENEFICIOS Y TIPOLOGÍAS

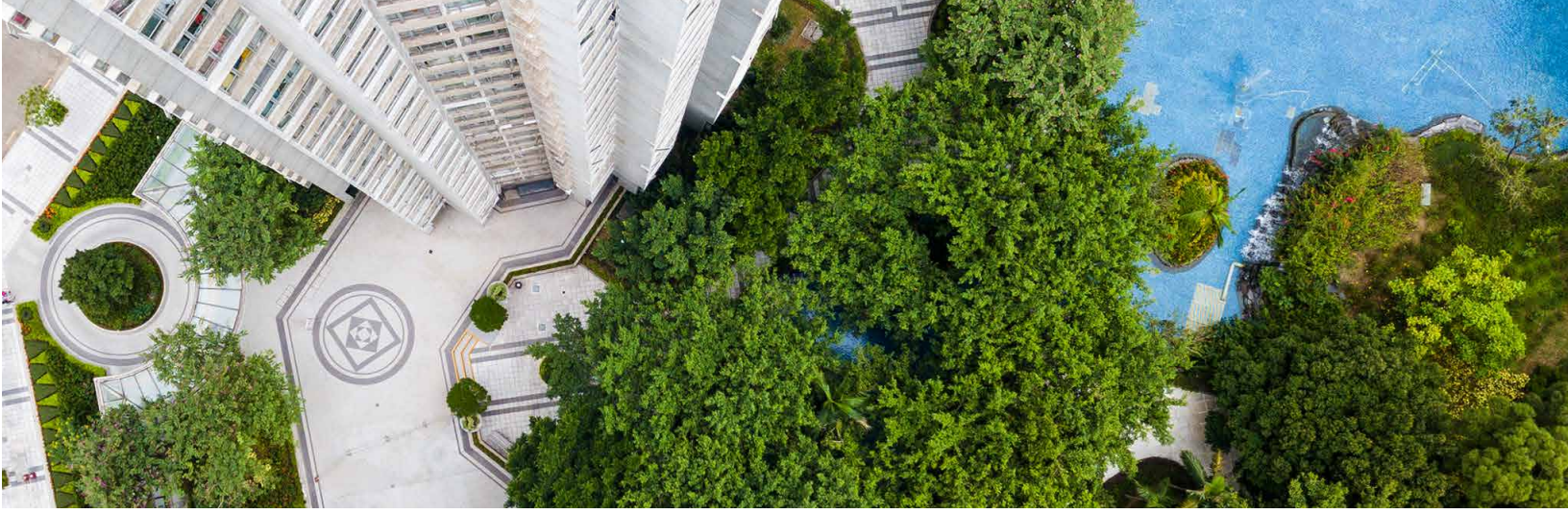
Los 'Sistemas de Drenaje Sostenible' (SuDS) son una pieza esencial en la planificación de 'Ciudades Sensibles al Agua'. Estos sistemas tienen por objetivo principal paliar los efectos generados por el sellado del suelo de nuestras ciudades (inundaciones, aumento de la temperatura, contaminación...) que se ven acentuados por el cambio climático (lluvias y períodos de sequía más intensos). Sus efectos hacen de las ciudades lugares más resilientes ante el calentamiento global y generan beneficios muy numerosos que se ponen de manifiesto en el ámbito de la sostenibilidad, la gestión del agua, el paisaje urbano y la calidad de vida de los ciudadanos (Fig. 1).

El proceso de diseño e integración de los SuDS en la ciudad debe cumplir tres principios básicos fundamentales para contribuir a los objetivos del 'Diseño Urbano Sensible al Agua':

- ◆ Proyectar superficies urbanas que potencien al máximo la INFILTRACIÓN del agua pluvial. Cuanto mayor es la infiltración, menor es el volumen de agua que llega a las redes de saneamiento, disminuyendo la probabilidad de saturación de las mismas y aumentando la recarga de los acuíferos.

- ◆ Favorecer la RETENCIÓN y el TRANSPORTE de la escorrentía en aquellos lugares donde sea posible, diseñando nuevos espacios para tal efecto. Cuanto mayor es la retención del agua pluvial, mayor será la capacidad de las redes de saneamiento para laminar avenidas disminuyendo así la probabilidad de inundación y permitiendo el almacenaje del agua pluvial y su posterior reutilización en usos no consuntivos.
- ◆ Buscar y crear oportunidades para la REUTILIZACIÓN del agua infiltrada y/o retenida. Cuanto mayor es la reutilización del agua pluvial mayor es la cantidad de recursos hídricos disponibles y menor la presión sobre el uso del agua potable.

Estos principios definen las 3 tipologías principales de SuDS que suelen implementarse en los proyectos urbanos. Cada uno de estos sistemas puede utilizarse en diferentes espacios urbanos (aceras, estacionamientos, espacios públicos, edificaciones...). En la publicación 'Guía para la Integración de los SuDS en el Proyecto Urbano' pueden consultarse con más detalle los tipos y características de los SuDS así como cuáles son más adecuados según el proyecto urbano en el que vayan a integrarse (Rodríguez-Rojas et al., 2017a).



◆ SuDS de INFILTRACIÓN. El objetivo principal de estos SuDS es aumentar la infiltración del agua pluvial en el suelo. Los pavimentos modulares y porosos, los jardines de lluvia, las zanjas, drenes y pozos filtrantes son algunos de los SuDS de esta tipología (Fig. 2).



Figura 2. SuDS de Infiltración (SUSDRAIN, 2014)

◆ SuDS de TRANSPORTE. El objetivo principal de estos SuDS es aumentar el tiempo de circulación del agua pluvial por la calle. Las cuentas verdes, las acequias urbanas y las áreas de bioretención son algunos de los SuDS de esta tipología (Fig. 3).



Figura 3. SuDS de Retención (SUSDRAIN, 2014)

◆ SuDS de REUTILIZACIÓN. El objetivo principal de estos SuDS es reutilizar el agua pluvial en usos no consuntivos. Las cubiertas vegetadas, los depósitos domésticos y los estanques de retención, son algunos de los SuDS de esta tipología (Fig. 4).

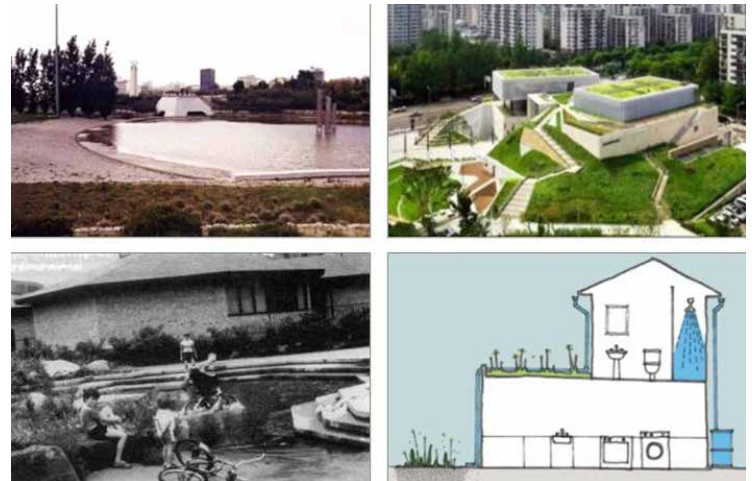
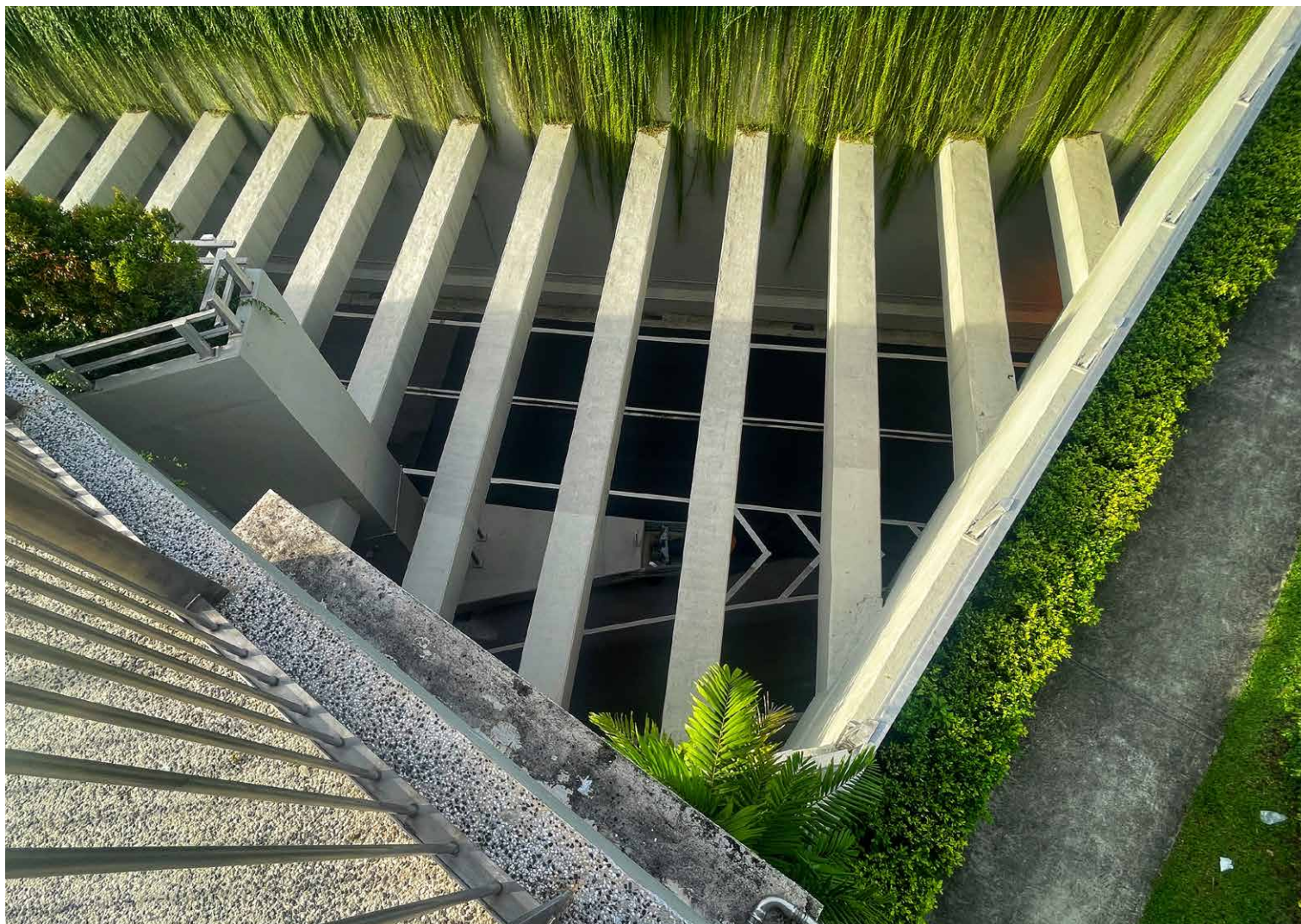


Figura 4. SuDS de Reutilización (SUSDRAIN, 2014)

### 3. LA EXPERIENCIA DE GRANADA COMO CIUDAD SENSIBLE AL AGUA. COLABORACIÓN EMASAGRA – UNIVERSIDAD DE GRANADA

Son muchas las ciudades de todo el mundo, sobre todo en países como Francia, Reino Unido, EE.UU. y Australia, que en los últimos 25 años están tomando medidas para reducir los efectos del sellado del suelo en zonas urbanas y aumentar su resiliencia ante el cambio climático. Para ello, se están llevando a cabo acciones de renaturalización y permeabilización de las superficies de la ciudad mediante la integración de SuDS. Estos sistemas tienen como principal objetivo recuperar, en la medida de lo posible, las condiciones hidrológicas del suelo previas a su urbanización, reteniendo, infiltrando y reutilizando la escorrentía urbana para reducir la temperatura del suelo y evitar la saturación de las redes de alcantarillado. La integración de estos sistemas tiene importantes beneficios medioambientales, sociales y económicos; reducción de inundaciones, disminución de la contaminación de la escorrentía urbana, mejora de la gestión de las redes de saneamiento, aumento de los recursos hídricos disponibles, disminución de la contaminación atmosférica, reducción de la temperatura ambiente, generación de entornos más saludables y en general, mejora de la salud y el bienestar humanos, haciendo de nuestras ciudades mejores lugares donde vivir.

En España, en los últimos 15 años las principales ciudades de nuestro



país han comenzado a integrar de forma más generalizada estos sistemas en los entornos construidos (como medida paliativa para resolver los problemas generados por la impermeabilización del suelo) y más recientemente en nuevos desarrollos urbanos, replanteando un modelo urbanístico altamente insostenible. De la mano de las universidades y de las empresas gestoras del agua, ciudades como Barcelona, Valencia, Madrid, Santander, Vitoria, A Coruña o Gijón entre otras, llevan años trabajando en un cambio de modelo urbanístico que haga más consciente a quienes tienen el desempeño de 'hacer ciudad', de la necesaria relación que deben tener el diseño urbano y el ciclo natural del agua, en un contexto de emergencia climática como el que estamos viviendo desde hace no mucho tiempo.

Granada es una más de estas ciudades, que lleva años preocupada por adaptarse a unas circunstancias cada vez más duras en relación a la intensificación de las lluvias y al aumento de la temperatura en la ciudad. Su elevada impermeabilización y su escasa disponibilidad de áreas verdes hacen de esta ciudad un lugar donde es urgente llevar a cabo medidas de permeabilización y renaturalización urbanas.

Por ello, la Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Granada 'EMASAGRA' y un grupo de investigadores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada, llevan colaborando desde el año 2012 desarrollando proyectos que promueven la integración de SuDS en la ciudad y la divulgación entre los técnicos de un nuevo modelo urbanístico más próximo al agua y a los espacios verdes. A continuación, se muestran los diferentes proyectos de colaboración que han desarrollado ambas instituciones, sus principales resultados y conclusiones, así como las futuras líneas de investigación.

### 3.1. Desarrollo de Instrucción Técnica para el proyecto, construcción y explotación de SuDS.

Este contrato de investigación, suscrito en 2012 entre EMASAGRA, Construcciones Otero y la Universidad de Granada, fue coordinado por el director de Planificación, Proyectos y Obras de EMASAGRA Alejandro Muñoz y dirigido por el profesor del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería, Germán Martínez junto con los investigadores Begoña Moreno, Mabel Rodríguez y Leonardo Nanía. Fue el primer contacto entre EMASAGRA y la Universidad de Granada para el estudio de los SuDS y su implementación en la ciudad de Granada y supuso el inicio de una colaboración que se ha prolongado durante más de diez años y sigue vigente a día de hoy.

Con una duración de 10 meses, el principal objetivo del trabajo era la redacción de una primera instrucción técnica para el diseño, proyecto, construcción y explotación de sistemas urbanos sostenibles. Para ello, se llevó a cabo una revisión de casos ejemplares de SuDS que se estaban desarrollando en España y países de todo el mundo, así como de los manuales técnicos existentes para el diseño, proyecto, construcción de estos sistemas. De este análisis se concluyó que en España existía en ese momento una presencia muy escasa de proyectos de este tipo (sobre todo en Andalucía donde eran casi inexistentes) y que los manuales de diseño eran muy escasos y todavía muy genéricos. De esta carencia surgieron los proyectos que han sido desarrollados después y que han consolidado la relación entre EMASAGRA y el equipo de investigadores durante estos más de 10 años.

Por otro lado, el proyecto llevó a cabo la caracterización hidrológica de la ciudad de Granada como base a la futura implementación de SuDS, concluyendo que dada la naturaleza del

régimen de precipitaciones en Granada y de los volúmenes de aguas de escorrentía generados, se hacía necesario llevar a cabo un diseño urbano que minimizara el impacto de los episodios de lluvia. Para ello, se incorporaron recomendaciones y directrices generales para la implementación de SuDS en la ciudad de Granada.

En conclusión, puede decirse que este proyecto puso de manifiesto las necesidades existentes en relación al desarrollo de proyectos piloto de SuDS en nuestra región así como a la redacción de un manual técnico que promoviera un modelo urbanístico más próximo al agua y a los espacios verdes en línea con los principios del 'Diseño Urbano Sensible al Agua'.



Figura 5. Desarrollo de Instrucción Técnica para el proyecto, construcción y explotación de SuDS

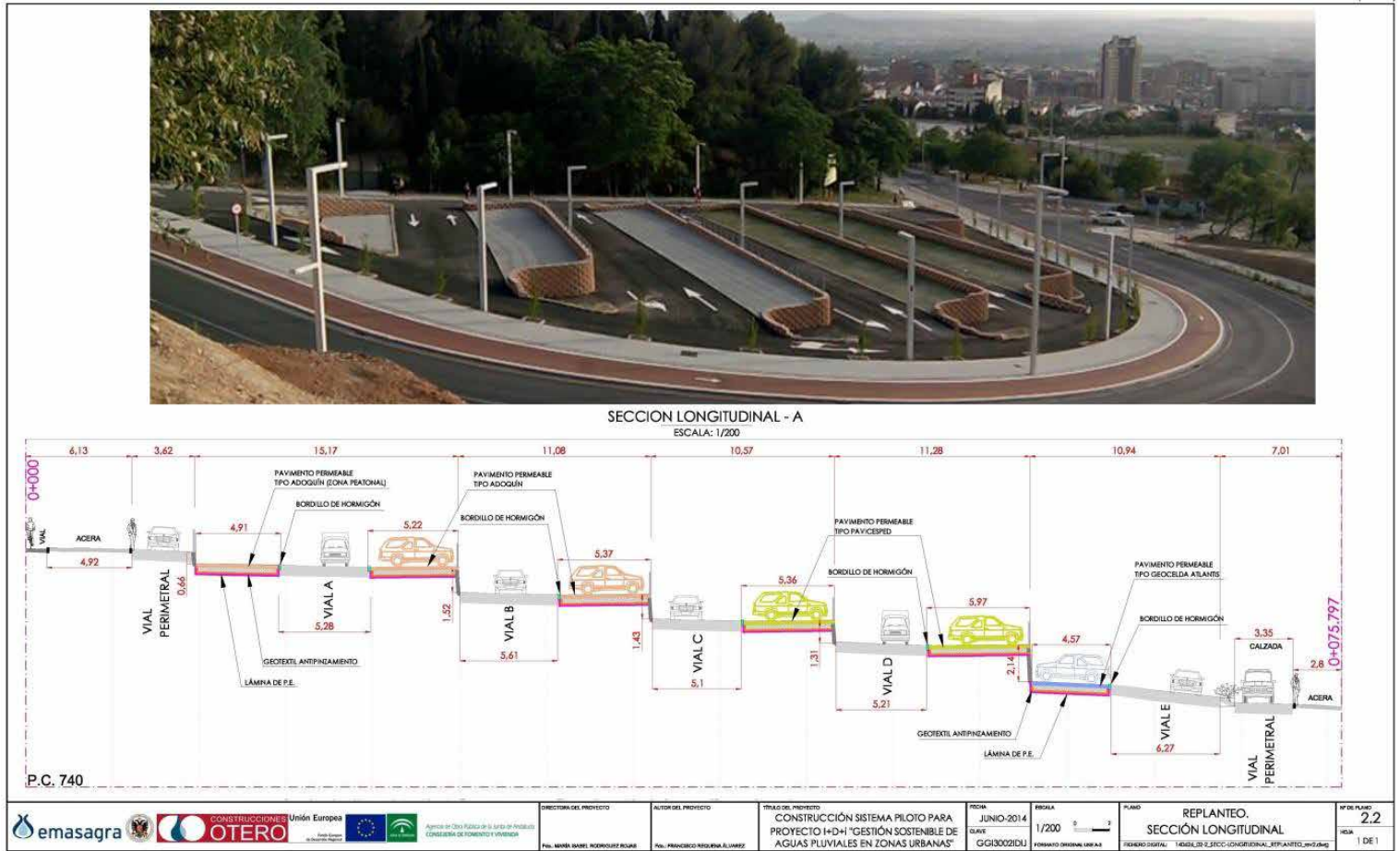


Figura 6. Sección y vista general de la Planta piloto

### 3.2. Proyecto piloto para la integración de SuDS en la ciudad de Granada.

Fruto de la necesidad detectada en el contrato de investigación realizado en 2012 de llevar a cabo proyectos piloto que testaran el funcionamiento, la eficiencia y la aplicabilidad de los SuDS en Andalucía, a finales de 2012 el equipo de investigadores de la Universidad de Granada y las empresas 'EMASAGRA' y 'Construcciones Otero' presentaron una propuesta de investigación a la convocatoria pública de proyectos I+D+i de la Junta de Andalucía 2012-2014, financiada con fondos europeos FEDER. La propuesta fue seleccionada y dotada con un presupuesto de 276.086,04 € para la realización del proyecto, construcción y monitorización de una planta experimental de SuDS en la ciudad de Granada. El proyecto fue liderado por la profesora Mabel Rodríguez del Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, junto con los profesores Germán Martínez y Begoña Moreno y el investigador Francisco Huertas, y la colaboración del Director de Planificación de EMASAGRA Alejandro Muñoz y los responsables de Construcciones Otero. Tuvo una duración de 2 años y tenía como principal objetivo obtener información in situ del funcionamiento y rendimiento de los pavimentos permeables en Granada. Se eligió este tipo de SuDS dada su elevada aplicabilidad en la ciudad, fácil integración en una gran tipología de espacios, capacidad para la regeneración urbana y alto potencial para disminuir la frecuencia e intensidad de las inundaciones. Esta experiencia piloto se planteó además de para aumentar el conocimiento técnico de estos sistemas en climatologías propias del Sur de España, para servir de referencia a otros proyectos que se desarrollaran después en la región.

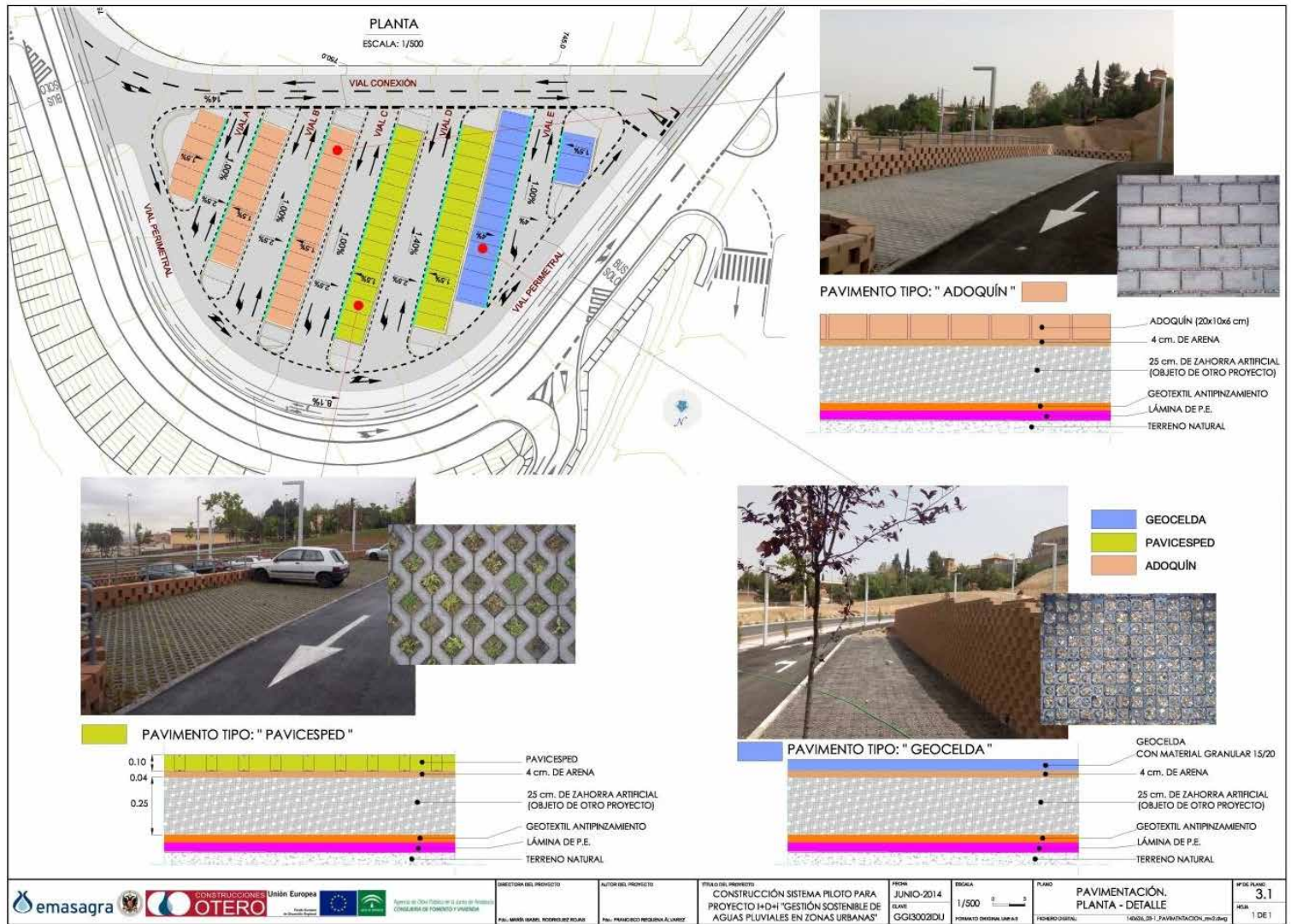


Figura 7. Tipologías de pavimentos ensayados y secciones constructivas

El proyecto piloto consistió en el diseño y construcción de un aparcamiento monitorizado en el Campus Universitario de Cartuja, en Granada (Fig. 6). Se implementaron 3 pavimentos permeables diferentes con el objetivo de comparar sus rendimientos y determinar cuál o cuáles podían ser más eficientes en esta ciudad (Fig. 7). Los pavimentos eran, un adoquín con llaga que podía utilizarse en zonas peatonales o de circulación lenta, un pavimento modular o pavicésped que se adaptaba a zonas recreativas, de uso mixto y/o estacionamientos y un pavimento de geocelda relleno con grava que permitía su utilización en espacios abiertos y/o multifuncionales. La sección constructiva de dichos pavimentos fue común, con el objetivo de conocer el funcionamiento de cada uno de ellos ante episodios de lluvia de distinta intensidad, e integró una lámina impermeabilizante en la parte inferior que permitió recoger y medir los volúmenes de agua infiltrada y retenida por dichos pavimentos. Se implementó un sistema de monitorización compuesto por un pluviómetro que proporcionaba datos del volumen de lluvia precipitada, un caudalímetro instalado en cada superficie de pavimento que registraba el caudal de agua drenado y un 'data logger' que almacenaba todos los datos en un servidor.

El procesamiento y análisis de los datos proporcionados por el sistema de monitorización y el uso del modelo hidrológico STORM WATER MANAGEMENT MODEL, SWMM (seleccionado por su aplicabilidad a cuencas urbanas), proporcionó información sobre las siguientes variables: el tiempo de drenado del pavimento, el caudal punta generado y el volumen de agua drenado. Los primeros datos obtenidos de estas tres variables mostraban resultados muy satisfactorios en el funcionamiento de los 3 pavimentos (Fig. 8); aumentos del tiempo de drenado, reducciones de caudales punta prácticamente a 0 y elevados volúmenes de agua infiltrada en los pavimentos.

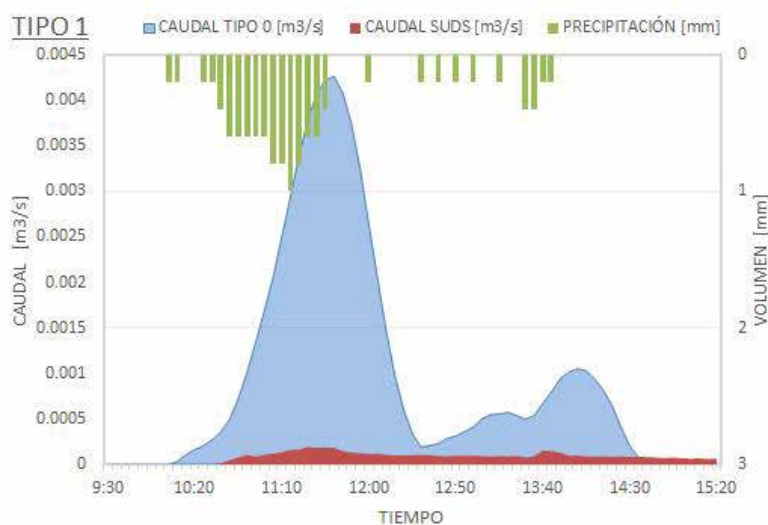


Figura 8. Hidrograma comparativo Pavimento Tipo 1/Pavimento Tipo 0 (Rodríguez-Rojas et al., 2018)

Definidas las variables de estudio, para cuantificar la mejora hidrológica generada por los pavimentos ensayados se definieron 3 eficiencias: eficiencia de tiempo (aumento del tiempo de drenado generado por el pavimento permeable respecto a un pavimento convencional), eficiencia de caudal (reducción del caudal punta respecto a un pavimento convencional) y eficiencia de volumen (aumento del volumen drenado respecto a un pavimento convencional). Así, los resultados obtenidos durante el primer año de explotación indicaban un aumento del tiempo de drenado entre el 72 y el 77%, un incremento de volumen de agua infiltrado en el terreno entre el 75 y el 89% y una disminución del caudal punta por encima del 90%. Estos valores mostraban el enorme potencial que tenían estos pavimentos para mejorar el funcionamiento de las redes de saneamiento, disminuir la cantidad de agua a depurar durante los episodios de lluvia, reducir las inundaciones en la ciudad y aumentar los recursos hídricos disponibles en el subsuelo entre otros beneficios. El comportamiento de los 3 pavimentos fue muy similar con variaciones menores al 15%, siendo el pavimento de pavicésped el que presentó valores mayores de eficiencia medios. Destacó que sólo el 13% de los eventos analizados generaron escorrentía superficial en los pavimentos permeables, lo cual demostró la alta capacidad de absorción y retención de agua de estos sistemas, haciéndolos especialmente adecuados en climas como el mediterráneo, donde la elevada intensidad de las lluvias genera problemas de servicio en las calles.

Los resultados obtenidos en este proyecto pusieron de manifiesto el enorme potencial de los pavimentos permeables para la disminución de la intensidad y frecuencia de las inundaciones, mejorando el funcionamiento de las redes de saneamiento y aumentando los recursos hídricos subterráneos. Quedó demostrada la conveniencia y viabilidad de estos sistemas en Granada como herramienta para aumentar la resiliencia urbana. Esta experiencia tuvo un carácter innovador y muy relevante en el ámbito científico y técnico pues supuso un avance muy importante en el conocimiento del comportamiento de los SuDS en la ciudad (Rodríguez-Rojas et al., 2018, 2020).

### 3.3. Análisis y Diagnóstico de la Eficiencia de los Pavimentos Permeables en Granada.

Dado que el proyecto de investigación de la planta piloto sólo tuvo una duración de 2 años (el primero de ellos consistió en la construcción de la planta y el segundo se dedicó al registro y procesamiento de datos), se contaba con una información muy limitada sobre las eficiencias de los pavimentos, por lo que era necesario ampliar el tiempo de análisis de datos para obtener resultados más consistentes acerca del funcionamiento de estos sistemas en años hidrológicos diferentes. Por ello, el mismo equipo de investigadores de la Universidad de Granada firmó un contrato de I+D+i con EMASAGRA quien financió los trabajos de análisis y procesamiento de datos de la planta durante los años 2017-2019. El objetivo principal de este contrato fue determinar la eficiencia de los pavimentos permeables en situaciones hi-

drológicas diferentes y analizar la posible disminución de las eficiencias de dichos pavimentos con el transcurso del tiempo. Así mismo, se planteó el objetivo de calcular el ahorro que los pavimentos permeables podían suponer en depuración de aguas en la ciudad de Granada, con objeto de disponer de una cuantificación de la relación coste-beneficio de estos sistemas.

Para ello, se analizaron y compararon los datos hidrológicos generados por la planta piloto desde que empezó a funcionar el sistema de monitorización en Octubre de 2014 hasta que finalizó este contrato en Octubre de 2019. Este período de tiempo (5 años) permitió obtener conclusiones no sólo del funcionamiento de los pavimentos en el momento de su construcción sino también de su comportamiento ante eventos de carácter diferente y a la posible colmatación de los mismos a medio plazo. Para obtener datos sobre este último efecto, no se realizaron labores de mantenimiento del pavimento durante este tiempo, con el fin de conocer la peor de las situaciones posibles en cuanto a la explotación y mantenimiento de estos sistemas.

Una vez analizados los datos correspondientes a los 5 años de explotación pudo constatar que el rendimiento de los pavimentos fue muy similar durante este tiempo. Las ligeras variaciones detectadas fueron analizadas y se vio que tenían una relación directa con la saturación inicial del suelo. Así, estados iniciales de más humedad del pavimento asociados a lluvias recientes proporcionaban eficiencias ligeramente inferiores en relación a situaciones iniciales más secas cuando hacía más tiempo que no se producía ningún evento.

Por otro lado, se analizó la variabilidad de las eficiencias de los 3 pavimentos para conocer la posible saturación de los suelos y la disminución de su eficacia (Fig. 9). Se vio que las variaciones de eficiencias no superaban el 15% y que no se producía una disminución de las mismas con el tiempo. Estas variaciones respondían a la variabilidad climatológica de cada año de muestreo y no a la colmatación de los pavimentos. Por tanto, podía asegurarse que a los 5 años de explotación, sin mantenimiento, aún no se había producido la colmatación de los pavimentos drenantes ensayados.

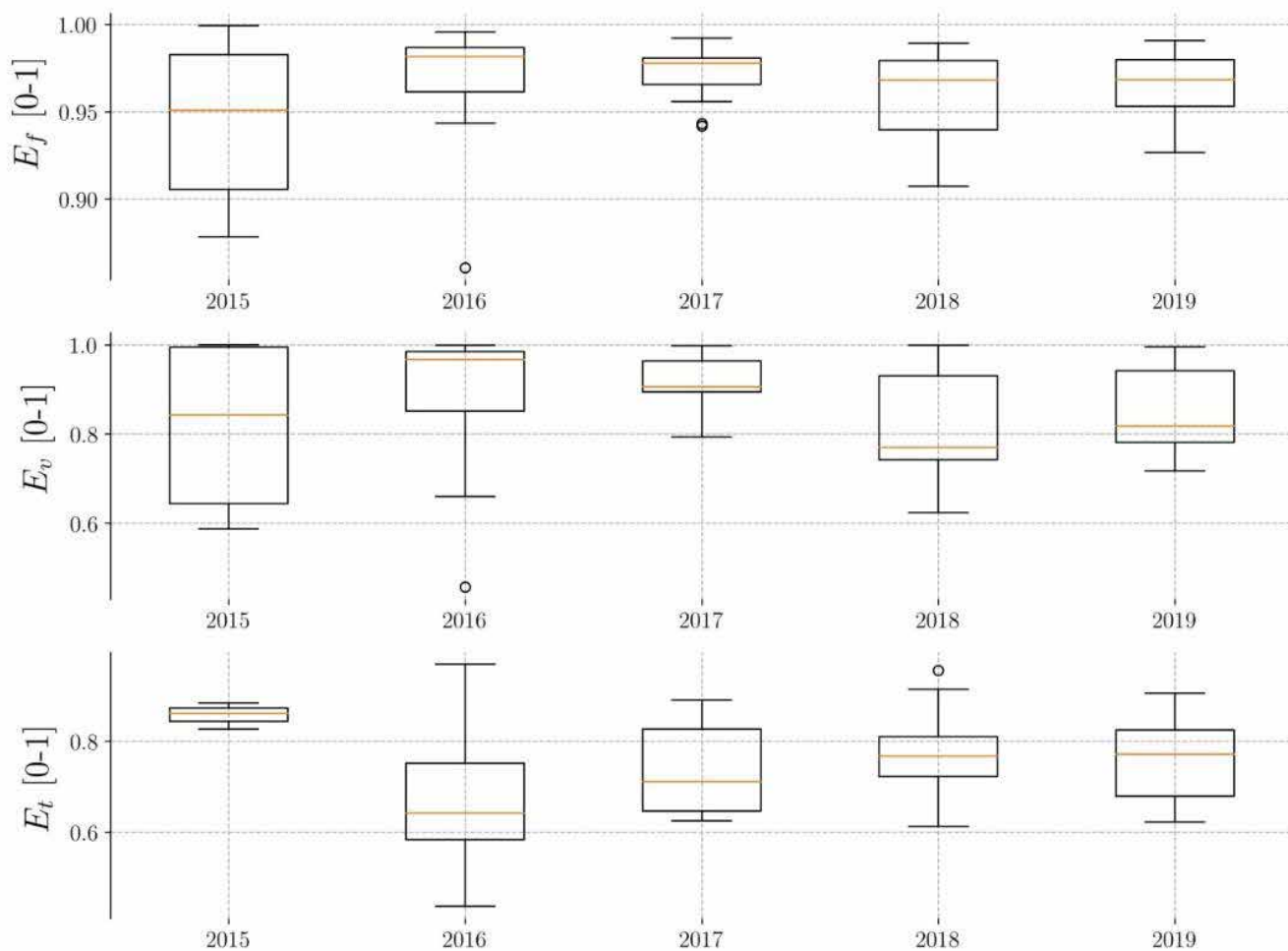


Figura 9. Evolución de las eficiencias de tiempo ( $E_t$ ), volumen ( $E_v$ ) y caudal punta ( $E_f$ ), (Rodríguez-Rojas et al., 2020)

Por último, con los datos procesados durante los 5 años, se cuantificó la reducción de coste que podía generarse con la utilización de estos pavimentos en entornos urbanos, en concreto en la ciudad de Granada, en los sistemas de depuración de aguas residuales y se concluyó que, por cada m<sup>2</sup> de superficie y m<sup>3</sup> de agua precipitada, se podrían generar reducciones de costes de hasta 0,7 céntimos de €. Se realizó un gráfico que relacionaba la precipitación producida y el ahorro generado, con objeto de que se disponga de la relación coste-beneficio de estos sistemas (Fig. 10). Con todo ello, se proporcionó una información mucho más detallada de la capacidad de adaptación de estos pavimentos a diferentes situaciones pluviométricas y al paso del tiempo.

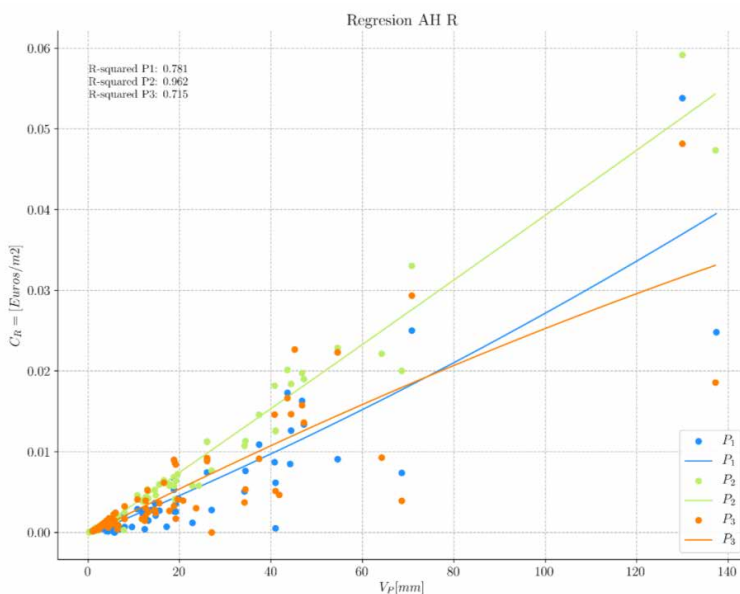


Figura 10. Relación Volumen precipitado - Ahorro generado (Rodríguez-Rojas et al., 2020)

### 3.4. Guía para la implantación de los SuDS en el proyecto urbano.

Tal y como se indicó al comienzo de este artículo, el primer proyecto desarrollado con EMASAGRA en materia de SuDS en 2012 detectó dos grandes carencias en esta materia; la escasez de experiencias piloto (principal motivo por el que se llevaron a cabo el proyecto de la Junta de Andalucía 2013-2015 y el contrato de investigación con EMASAGRA 2017-2029) y la inexistencia de manuales de diseño que promovieran la integración de estos sistemas en los proyectos urbanos. Para cubrir esta carencia, el equipo de investigadores presentó la propuesta de investigación 'Guía para la implantación de los SuDS en el proyecto urbano' a la III Convocatoria de Microproyectos de I+D+i del CEI BIOTIC de la Universidad de Granada de la mano de EMASAGRA como empresa agregada.

Esta propuesta fue seleccionada, tuvo una duración de 1 año y fue dirigida por la profesora Mabel Rodríguez junto a los profesores Begoña Moreno y Germán Martínez y la investigadora M<sup>a</sup> del Mar Cuevas, junto a la colaboración del Director de Planificación de EMASAGRA Alejandro Muñoz. Tenía como principal objetivo la elaboración de un manual para el diseño de SuDS y estaba dirigida a los técnicos con responsabilidades en la planificación y proyecto de la ciudad. Pretendía divulgar y difundir la información necesaria para la correcta integración de los SUDS en los proyectos urbanos, promoviendo así su mejora urbanística en su relación con el agua y suponiendo un avance en el Diseño Urbano Sensible al Agua de las ciudades.

La guía fue publicada por la Editorial de la Universidad de Granada en 2017 (Rodríguez-Rojas et al., 2017a) y puede adquirirse a través del servicio de publicaciones de esta Universidad (Fig. 11). Su estructura y contenido presentan de forma sencilla el proceso de selección, integración y diseño de los diferentes SuDS en los proyectos urbanos. Para la selección de SuDS se establecen unas recomendaciones en función del lugar donde se va a intervenir (aceras, calzadas, aparcamientos, edificios, espacios libres,...) y se definen los principales beneficios generados (Fig. 12). De esta forma, el proyectista cuenta con información que le permite valorar la viabilidad de integración de los SuDS en el proyecto que va a realizar. Una vez seleccionado el SuDS a implementar, la guía conduce al lector a una ficha donde se responde a una serie de preguntas (¿qué son?, ¿qué objetivos persiguen?, ¿por qué se utilizan?, ¿dónde se integran?, ¿cuáles son sus condicionantes? Y ¿cómo se diseñan? (Fig. 13)), finalizando con una serie de ejemplos de cada tipo de SuDS y la bibliografía específica donde se puede encontrar más información sobre ellos. Así, tomando como base las particularidades de cada lugar, el planificador puede conocer qué SuDS es el necesario para eliminar los problemas detectados y/o previsible y para potenciar las cualidades del espacio de intervención, sabiendo cómo y dónde deberá integrarlo para obtener los mejores resultados.



## Guía para la Integración de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en el Proyecto Urbano

Figura 11. Guía para la implantación de los SuDS en el proyecto urbano (Rodríguez-Rojas et al., 2017a)

USO	SUDS	DESCRIPCIÓN Y BENEFICIOS	EJEMPLO	OBJETIVOS	FICHA	PÁGINA
Calzada	Drenes	-Zanjas de material granular (pueden estar recubiertas por geotextiles), que depuran e infiltran el agua de escorrentía procedente de zonas impermeables. -Aumentan los recursos subterráneos y disminuyen el riesgo de inundación.			IFR 4	69-71
	Pavimentos de geoceldas	-Superficies que retienen e infiltran el agua de escorrentía a través del espacio existente entre piezas. -Disminuyen la temperatura del suelo y el riesgo de inundación.			PAV 2	87-89
Estacionamiento	Zanjas filtrantes	-Suelos de granulometría mixta con vegetación que retienen e infiltran el agua de escorrentía procedente de superficies impermeables. -Aumentan los recursos subterráneos y disminuyen el riesgo de inundación.			IFR 3	65-67
	Cunetas verdes	-Canales vegetados anchos y poco profundos que infiltran y transportan el agua de escorrentía hasta las zonas de infiltración. -Regeneran el paisaje, aumentan los recursos subterráneos y disminuyen el riesgo de inundación.			IFR 5	73-75
Espacio libre	Estanques de retención	-Embalses superficiales que retienen, infiltran y depuran el agua de escorrentía procedente de otras zonas. -Regeneran el paisaje, aumentan los recursos subterráneos y disminuyen el riesgo de inundación.			BIO 1	101-103
	Humedales	-Estanques superficiales con una reserva permanente de agua que retienen, infiltran y depuran el agua de escorrentía procedente de otras zonas. -Regeneran el paisaje, aumentan los recursos subterráneos y mejoran la calidad del agua.			BIO 2	105-107
	Depósitos de infiltración	-Estructuras que infiltran, retienen y reutilizan el agua de escorrentía. -Aumentan los recursos subterráneos, recargan los acuíferos y disminuyen el riesgo de inundación.			DEP 2	47-49



Figura 12. Criterios para la selección de SuDS en los espacios urbanos (Rodríguez-Rojas et al., 2017a)

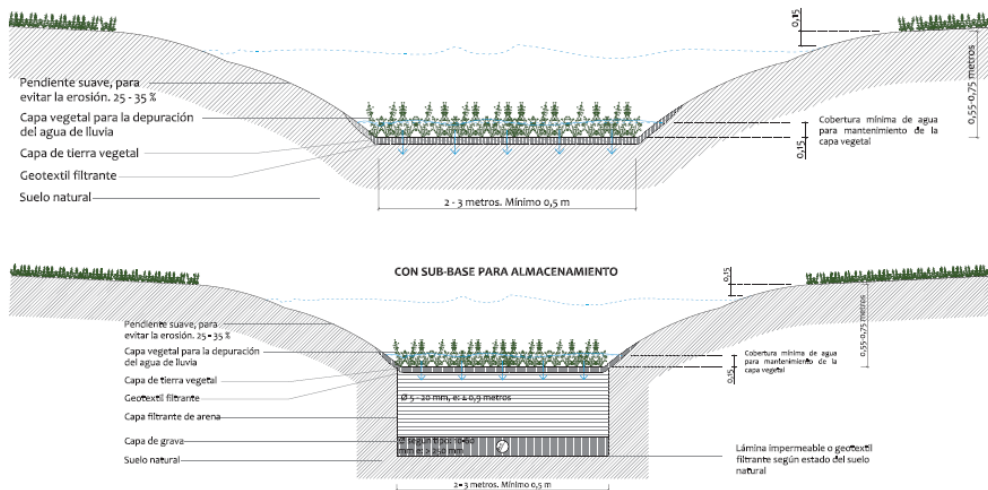


Figura 13. Recomendaciones de diseño para los SuDS (Rodríguez-Rojas et al., 2017a)

La publicación de esta guía tuvo una gran aceptación en el ámbito de los SuDS en toda España. Muestra de ello fue la publicación de guías muy similares por parte de los ayuntamientos de Madrid en 2018 (Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres) y de Valencia en 2021 (Guía Básica para el Diseño de SuDS en la Ciudad de València).

### 3.5. Plan para la implantación de SuDS en la Ciudad de Granada.

Finalizados los proyectos anteriores que respondían al desarrollo de una planta experimental y a la elaboración de un manual de diseño de SuDS, el equipo de trabajo de la Universidad de Granada planteó a EMASAGRA la posibilidad de avanzar un paso más en el objetivo de convertir a Granada en una 'Ciudad Sensible al Agua'. Para ello, era necesario abordar la fase de la planificación urbana como herramienta fundamental para mejorar la resiliencia de esta ciudad ante los efectos del cambio climático.

Las consecuencias del sellado del suelo son fruto de un modelo urbanístico insostenible que ha generado que el 60% del área urbana de urbana de Granada haya sido impermeabilizada desde el año 1985 y apenas un 3% de la superficie total de la ciudad se haya mantenido como zona verde (tal y como se verá más adelante en los resultados obtenidos en este proyecto). Esto ha generado una situación de degradación ambiental que se está viendo agravada por las consecuencias del calentamiento global. Por todo ello, se hace necesaria una intervención urgente en Granada de revegetación e integración de SuDS tanto en las zonas construidas como en aquellas que están pendientes de ser desarrolladas urbanísticamente.

Así, en 2022 los investigadores de la Universidad de Granada propusieron a EMASAGRA la realización de un contrato de I+D+i denominado 'Plan para la implantación de SuDS en la Ciudad de Granada' cuyo objetivo principal era desarrollar un plan de intervenciones que sirviera a los agentes planificadores (EMASAGRA, Ayuntamiento de Granada y Diputación de Granada) en la toma de decisiones sobre la implementación generalizada de SuDS en Granada. Así, este plan contribuiría a transformar la ciudad en una ciudad resiliente y sostenible, haciendo frente al aumento de las temperaturas y de la intensidad de los fenómenos meteorológicos.

Con una duración de dos años (2022-2024), el proyecto está siendo coordinado por el Director de Planificación de EMASAGRA Alejandro Muñoz y dirigido por la profesora Mabel Rodríguez y los profesores Begoña Moreno y Germán Martínez, contando en este caso con la colaboración de la Spin-off de la Universidad de Granada 'Gis4Tech'. Los trabajos se están desarrollando en tres fases principales: una primera de 'Análisis' donde se están llevando a cabo los estudios necesarios sobre planeamiento, impermeabilización, condiciones físicas del espacio y vulnerabilidad ante la acumulación de escorrentía urbana, una segunda fase de elaboración de 'Criterios de intervención para la integración de SuDS' en la ciudad y una última fase de 'Propuestas de áreas urbanas para la implantación de SuDS' en las áreas urbanas de Granada.

En la fase de análisis se han estudiado el planeamiento urbano, la impermeabilidad de los suelos, por su importancia para el drenaje urbano y la vulnerabilidad de los espacios ante la acumulación de aguas de escorrentía, por tratarse de una de las principales variables que define la priorización de la implantación de SuDS. Respecto al proceso de impermeabilización de los suelos se ha estudiado la evolución del coeficiente de escorrentía 'C' entre 1985 y la actualidad. Este análisis ha arrojado datos tan significativos como que el porcentaje de super-

ficie urbana con un coeficiente de escorrentía menor a 0,25 (áreas altamente permeables) se ha reducido drásticamente en estos años (un 71,54%) y que las áreas más impermeables (coeficiente de escorrentía mayor de 0,75) suponen actualmente el 36% de la superficie total, lo cual muestra una tendencia generalizada a la impermeabilización de la ciudad en los últimos años (Fig. 14). Por otro lado, se ha llevado a cabo también un análisis espacial cualitativo de la vulnerabilidad a la acumulación de aguas de escorrentía con objeto de tener información sobre aquellas zonas donde es más urgente intervenir implementando SuDS (Fig. 15). Esta información resulta muy útil para establecer una priorización en la realización de proyectos de intervención en la ciudad de Granada.

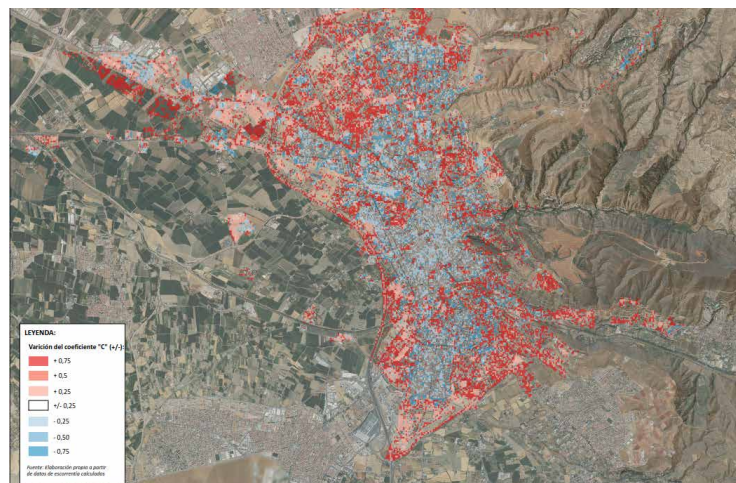


Figura 14. Crecimiento de la impermeabilización del suelo entre 1985 y 2022

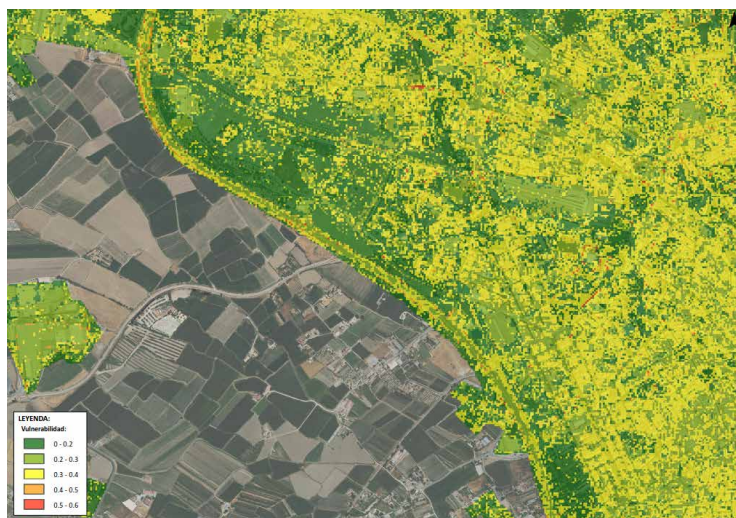


Figura 15. Vulnerabilidad a la acumulación de aguas de escorrentía

Finalizada la fase de análisis se han definido los criterios de intervención para la implantación de SuDS en base a tres índices que han sido desarrollados expresamente para la realización de este estudio. Dichos índices tienen como objetivo cualificar los espacios urbanos para ser intervenidos mediante SuDS:

- ◆ Índice de oportunidad. Este índice mide la oportunidad que existe en un espacio urbano para la implantación de SuDS en base a su estado de desarrollo urbanístico y al tipo de uso de dicho suelo (Fig. 16).
- ◆ Índice de prioridad. Este índice mide la prioridad de intervención en un espacio urbano para la implantación de SuDS en base a sus problemas de acumulación de escorrentía, su estado de degradación y su densidad de población (Fig. 17).
- ◆ Índice de viabilidad. Este índice analiza la viabilidad existente en un espacio urbano para la implantación de cada tipo de SuDS en base los requerimientos espaciales de los diferentes sistemas (Fig. 18).



Figura 17. Índice de prioridad

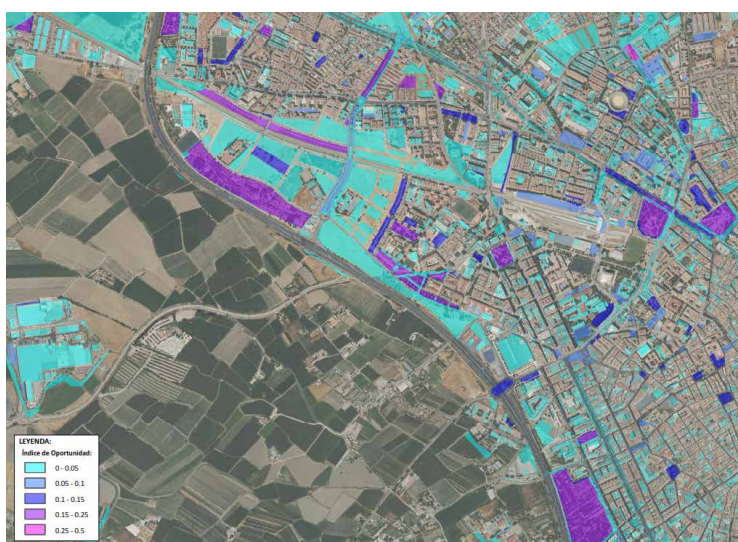


Figura 16. Índice de oportunidad



Figura 18. Índice de viabilidad

En la última fase del trabajo, utilizando los índices definidos anteriormente, se han concretado las áreas urbanas propuestas para la implantación de SuDS estableciendo un orden de intervención en dichas áreas (Fig. 19), con el objeto de que los agentes decisores (EMASAGRA, Ayuntamiento de Granada, Diputación de Granada,...) cuenten con la información necesaria para valorar la posibilidad de implementar SuDS en Granada en base a la dotación presupuestaria existente en cada momento y el grado de prioridad de dicha intervención. De esta forma, este Plan permitirá que se vayan definiendo las áreas de proyecto en función de las posibilidades económicas de cada momento.

En resumen, puede decirse que este Plan contribuirá a una planificación más sostenible en la ciudad de Granada, aumentando su resiliencia, ayudando a optimizar las inversiones y a anticiparse a los problemas de acumulación de aguas de escorrentía en la ciudad. Esto generará unos importantes beneficios sociales ambientales y económicos para la ciudad a medio y largo plazo, lo que rentabiliza cualquier inversión que se realice en Sistemas de Drenaje Sostenible.



Figura 19. Áreas propuestas para la integración de SuDS y orden de intervención

### 3.6. Futuras líneas de investigación

Con la realización de este último trabajo se ha puesto de manifiesto la necesidad de cruzar los datos conseguidos con la opinión de expertos que permitan calibrar los resultados obtenidos y bajar de escala para tener una información más precisa sobre las intervenciones de SuDS necesarias. La información generada en el Plan junto con la valoración de estos técnicos podría implementarse en un modelo predictivo, basado en 'Inteligencia Artificial' y 'Machine Learning', que podría predecir con más detalle las localizaciones vulnerables ante los eventos de lluvia. Este modelo podría ir perfeccionándose y calibrándose con su aplicación en más ciudades, generando una herramienta predictiva muy potente que se convertiría en una referencia en España. De este modo se podrían generar datos más precisos y a menor escala sobre las áreas donde integrar los SuDS dotando de más detalle a las propuestas. Esta será previsiblemente la futura línea de investigación que dará continuidad a todos estos trabajos y que supondrá un paso más hacia una ciudad de Granada más resiliente, sostenible y amable con sus ciudadanos.

### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha mostrado cómo ha sido la cooperación entre la Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Granada 'EMASAGRA' y un grupo de investigadores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada en materia de SuDS, desde el año 2012 hasta la actualidad. 2 proyectos de investigación obtenidos en convocatorias públicas y 3 Contratos de investigación ponen de manifiesto la prolífica relación entre ambas instituciones, siendo los resultados obtenidos de gran interés en materia de SuDS y Diseño Urbano Sensible al Agua en Andalucía y en España. Estos trabajos convierten a Granada en una ciudad pionera en este nuevo modelo urbano más sostenible y resiliente, al lado de ciudades como Barcelona, Madrid, Valencia, Santander o Vitoria. La colaboración Universidad-Empresa genera sin duda un valor añadido a las investigaciones realizadas en el mundo académico que permite asegurar la transferencia de los resultados obtenidos y que se traduce en este caso en una mejora ambiental real de la ciudad de Granada.

### 5. REFERENCIAS

- CIRIA C697 (2007): The SUDS Manual. CIRIA, London.
- CRC (2021). Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities Ltd. <https://watersensitivecities.org.au/>
- EEA, (2006): Urban sprawl in Europe – The ignored challenge. European Environment Agency, Report No 10/2006. Copenhagen.
- RODRÍGUEZ-ROJAS, M.I., HUERTAS-FERNÁNDEZ, F., MORENO, B., MARTÍNEZ, G. (2020). Middle Term Evolution of Efficiency in Permeable Pavements: a Real Case Study in a Mediterranean climate. *Int. Journal of Environm. Research and Public Health*, 17(21), 7774.
- RODRÍGUEZ-ROJAS, M.I., HUERTAS-FERNÁNDEZ F., MARTÍNEZ G., MORENO B., GRINDLAY A. (2018). A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities: a case study in the south of Spain. *Journal of Environmental Management*, 205, 151-162.
- RODRÍGUEZ-ROJAS, M.I., CUEVAS M.M, MORENO B., MARTÍNEZ G. MUÑOZ UBIÑA, A. (2017a). Guía para la Integración de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en el Proyecto Urbano. Ed. Universidad de Granada.
- RODRÍGUEZ-ROJAS, M.I., CUEVAS M.M, MORENO B., MARTÍNEZ G. (2017b). El cambio de paradigma de la gestión del drenaje urbano desde la perspectiva del planeamiento. Una propuesta metodológica. *BAGE*, 75, pp. 75-84.
- SUSDRAIN (2014):[www.susdrain.org](http://www.susdrain.org)
- SWD 101, (2012): Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing. Commission Staff Working Document.