

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA SOSTENIBLE

TRABAJO FIN DE MASTER

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESPUESTA HIDRÁULICA DE VARIAS SECCIONES DE PAVIMENTO PERMEABLE IMPLANTADAS EN LA ZONA PILOTO DE TXOMIN-ENEA EN SAN SEBASTIÁN



Estudiante: Fernández Salgado, Maider

Directora: Goikoetxea Miranda, Estibalitz



Resumen

La zona de pavimento permeable ubicada en el renovado barrio de Txomin-Enea en San Sebastián, monitorizada para analizar el caudal de evacuación a la red de saneamiento, permite comparar las ventajas de su uso frente al acabado tradicional impermeable. A través de este trabajo, se persigue poner en valor la apuesta realizada con su implantación, resaltando las ventajas que tiene, por un lado, la permeabilización del suelo y, por otro, el seguimiento real de un caso de estudio. Mediante una configuración de capas permeables, el agua pluvial se infiltra al terreno, reteniendo y ralentizando su evacuación, lo cual minimiza considerablemente la carga en la red de drenaje. La implementación de esta técnica recogida entre los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en calzadas donde usualmente se opta por suelo impermeable cobra más importancia con el aumento e intensidad de los fenómenos hidrológicos. Las evidencias obtenidas gracias a la monitorización permiten concluir que gestionan eficientemente el agua pluvial tanto en tormentas leves como intensas mitigando la aparición de balsas, escorrentías y sobrecargas en la red de alcantarillado municipal. La inversión en esta infraestructura, aparentemente invisible para el ciudadano, adapta el entorno urbano al ciclo natural del agua y lo protege dando lugar a una ciudad que aumenta su resiliencia a estos eventos endurecidos a consecuencia del cambio climático.

Palabras clave: pavimento permeable, sistemas urbanos de drenaje sostenible, tormenta, escorrentía, drenaje pluvial.



Laburpena

Donostiako Txomin-Enea auzo berrituan dagoen zoladura iragazkorreko zonak, saneamendu-sarera husteko emaria aztertzeko monitorizatua, erabileraren abantailak ohiko akabera iragazgaitzarekin alderatzeko aukera ematen du. Lan honen bidez, haren ezarpenarekin egindako apustuari balioa eman nahi zaio, lurzoruaren iragazkortasunak alde batetik dituen abantailak azpimarratuz eta, bestetik, azterketa-kasu baten benetako jarraipena eginez. Geruza iragazkorren konfigurazioaren bidez, euri-ura lurrera infiltratzen da eta haren hustuketa geldiarazi eta moteldu egiten da, drainatze-sareko karga nabarmenki gutxituz. Drainatze jasangarriko hiri-sistemen artean jasotako teknika hau normalean lurzoru iragazgaitza aukeratzen den galtzadetan ezartzeak garrantzi handiagoa hartzen du fenomeno hidrológicoen gorakadarekin eta intentsitatearekin. Monitorizazioari esker lortutako ebidentziei esker, ondoriozta daiteke modu eraginkorrean kudeatzen dutela euri-ura, bai ekaitz arinetan, bai bortitzetan, putzuen, isurketen eta udal-estolderiako sareko kargen agerpena arinduz. Itxuraz herritarrentzat ikusezina den azpiegitura horretan inbertitzeak hiri-ingurunea uraren ziklo naturalera egokitzen du eta babestu egiten du, klima-aldaketaren ondorioz gogortutako gertaera horien erresilientzia handitzen duen hiria sortuz.

Hitz-gakoak: zoladura iragazkorra, drainatze-sistema jasangarri motak, ekaitza, isurketa, euri-drainatzea.



Abstract

The permeable pavement area in the renovated district of Txomin-Enea in Donostia-San Sebastián, monitored to analyze the evacuation flow to the sanitation network, makes it possible to compare the advantages of its use with the traditional waterproof finish. The aim of this work is to give value to the investment made with its establishment, emphasizing, on the one hand, the advantages of soil permeability, and, on the other hand, the real follow-up of a case study. By configuring permeable layers, rainwater infiltrates the ground and its emptying stops and slows down, significantly reducing the load of the drainage network. The introduction of this technique, included among sustainable urban drainage systems, on roads where waterproof soil is normally chosen, becomes more important with the increase and intensity of hydrological phenomena. From the evidence obtained through monitoring, it can be concluded that they effectively manage rainwater in both mild and violent storms, mitigating the emergence of wells, runoff and loads in the municipal sewerage network. Investing in this seemingly invisible infrastructure for citizens adapts the urban environment to the natural cycle of water and protects it, creating a city that increases the resilience of these events hardened by climate change.

Key words: permeable pavement, pervious pavement, SUDS, rainwater, runoff, drainage.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
CONTEXTO	11
Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).....	13
Pavimento permeable	17
ESTADO DEL ARTE	20
OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO	22
BENEFICIOS QUE APORTA EL PROYECTO.....	22
Beneficios técnicos	22
Beneficios sociales	22
METODOLOGÍA.....	23
Descripción de la zona de investigación en Txomin-Enea.....	23
Descripción de la configuración	23
Recogida de datos y parámetros a analizar	27
RESULTADOS	31
a. Caudal de salida.....	32
b. Volumen de salida	35
c. Monitorización de la instalación: buenas prácticas	37
BIBLIOGRAFÍA	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global. Fuente: Chow, 1993..	8
Figura 2. Impacto anual promedio por servicios inadecuados de agua potable y saneamiento, desastres relacionados con el agua, epidemias, sismos y conflictos. Fuente: UNESCO, 2019.....	10
Figura 3. Acumulación de agua en varios tipos de suelos impermeables en Vitoria-Gasteiz. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 4. Diagrama de la influencia de la ocupación del suelo sobre el ciclo hidrológico. Fuente: Comisión Europea, 2012.	13
Figura 5. Ejemplos de SUDS. Fuente adaptada: MITECO, 2019; RedSUDS 2022.....	17
Figura 6. Pavimentos permeables de naturaleza porosa (izq.) y por junta (dcha.). Fuente: Elaboración propia	18
Figura 7. Secciones tipo de sistema de pavimento permeable y posibles destinos del agua captada: A) el agua se infiltra en el terreno; B) parte se infiltra en el terreno y parte se evacua mediante tuberías drenantes; C) el agua se evacua a las EDAR para su tratamiento, almacenamiento o infiltración. Fuente adaptada: Ballard et al., 2015.....	19
Figura 8. Localización de la zona piloto Txomin-Enea en Donostia. Fuente: Google Earth.....	24
Figura 9. Zona piloto Txomin-Enea. Fuente: Google Earth	24
Figura 10. Distribución en planta de la zona piloto. Fuente: elaboración propia	25
Figura 11. Zona de investigación en Txomin-Enea. Fuente: elaboración propia	25
Figura 12. De izquierda a derecha: baldosa hexagonal, adoquín permeable Z1 y adoquín permeable Z2. Fuente: elaboración propia	27
Figura 13. Pavimento acabado convencional y poroso. Fuente: Elaboración propia	27
Figura 14. Esquema de la zona permeable. Fuente: Madrazo-Uribeetxebarria et al., 2022.	28
Figura 15. Las seis arquetas que recogen el agua en la zona piloto. La individual recoge Rimp; la triple Rperv, Da y Dp; la doble Dacell y Dpcell.....	29
Figura 16. Ellenex PLS2-L Standard Level Sensor	29
Figura 17. Medición del nivel de agua que fluye por el vertedero. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 18. Visualización de los datos medidos por los sensores entre 05-07-2021 y 01-12-2021 en la plataforma Grafana.	31
Figura 19. Visualización de los datos medidos por los sensores el 03-10-2021 en la plataforma Grafana.	32
Figura 20. Respuesta hidrológica de los pavimentos el 15/09/2021.	33
Figura 21. Respuesta hidrológica de los pavimentos permeables el 15/09/2021.	33
Figura 22. Respuesta hidrológica de los pavimentos el 03/10/2021.	34
Figura 23. Respuesta hidrológica de los pavimentos permeables el 03/10/2021.	34
Figura 24. Respuesta hidrológica de los pavimentos el 15/11/2021.	35
Figura 25. Volumen de salida de los pavimentos el 15/09/2021.	36
Figura 26. Volumen de salida de los pavimentos el 03/10/2021.	36
Figura 27. Volumen de salida de los pavimentos el 15/11/2021.	37
Figura 28. Instantáneas tomadas en julio de 2023 de la zona permeable donde están ubicados los bancos	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Secciones de pavimentos en la zona impermeable Z0 (zona de control).....	26
Tabla 2. Secciones de pavimentos en las zonas permeables Z1 y Z2	26



Tabla 3. Características de los eventos pluviales analizados..... 32

ABREVIATURAS

EDAR	Estación Depuradora de Aguas Residuales
ETAP	Estación de Tratamiento de Agua Potable
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
RAE	Real Academia Española
SUDS	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible Sustainable Urban Drainage Systems
SWMM	Storm Water Management Model



INTRODUCCIÓN

La definición que la Real Academia Española (RAE) aporta sobre agua (del latín *aqua*) es: “*Líquido transparente, incoloro, inodoro e insípido en estado puro, cuyas moléculas están formadas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, y que constituye el componente más abundante de la superficie terrestre y el mayoritario de todos los organismos vivos. (Fórmula H_2O).*” (RAE, 2022). El cálculo de la cantidad de agua existente en la Tierra ha sido materia de estudio desde la segunda mitad del siglo XIX. La información cuantitativa resulta compleja de estimar; no obstante, se tasa que el 71% de la Tierra está cubierta por agua, de manera que los océanos contienen alrededor del 96,5% del agua disponible. Es decir, tan solo el 3,5% restante es agua potable, de la cual el 68% está en forma de hielo y glaciares. Se estima que el volumen total de agua en la Tierra es de 1.386 millones de km^3 .

El ciclo hidrológico, comúnmente conocido como ciclo del agua, es la sucesión de etapas que atraviesa el agua al transferirse de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra. El ciclo no tiene principio ni fin, y sus procesos ocurren de forma simultánea y continua, mientras que el volumen total de agua que se mueve dentro del mismo es finito. Se trata de un ciclo biogeoquímico constante mediante el que el agua cambia de estado físico. Es un proceso complejo que comienza así: el agua líquida de la superficie oceánica y terrestre se evapora a la atmósfera en vapor de agua por la energía en forma de calor, se condensa para formar nubes y se precipita de nuevo a la superficie terrestre en estado líquido o sólido en forma de lluvia, nieve o granizo por el cambio de temperatura o presión. Aproximadamente el 90% del agua evaporada de los océanos regresa de nuevo al océano en forma de precipitación. Parte de la precipitación que llega a la superficie de la tierra es interceptada por las plantas, una parte se evapora, otra se infiltra en el suelo y el resto se escurre superficialmente hasta alcanzar un curso de agua.

La infiltración se refiere al proceso por el cual el agua penetra en el suelo. Una parte se queda en la zona más superficial y es aprovechada por la naturaleza y los seres vivos. Otra parte se mueve a través de los poros hasta alcanzar las capas freáticas o acuíferos subterráneos. Este proceso resulta esencial para recargar los acuíferos y mantener la calidad del agua subterránea.

La escorrentía es el desplazamiento del agua sobre la superficie del suelo, la porción de lluvia que no es infiltrada, interceptada o evaporada. Este proceso se produce cuando la cantidad de agua que cae en una zona es mayor que la cantidad de absorción del suelo, lo que provoca que el exceso de agua fluya hacia ríos, arroyos y lagos. Por un lado, se percibe la escorrentía superficial o directa que circula por la superficie del suelo y que alimenta la mayor parte del agua contenida en ríos. La escorrentía subterránea indirecta, por otro lado, es el agua que circula por debajo del suelo.

Tanto la escorrentía como la infiltración están influenciadas por factores como el tipo de suelo, la topografía, el clima y la vegetación de una zona determinada.

Los fenómenos hidrológicos son complejos por lo que se representan de forma simplificada a través de un sistema - conjunto de partes conectadas entre sí que forman un todo -. El ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema hidrológico cuyos elementos son precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo.

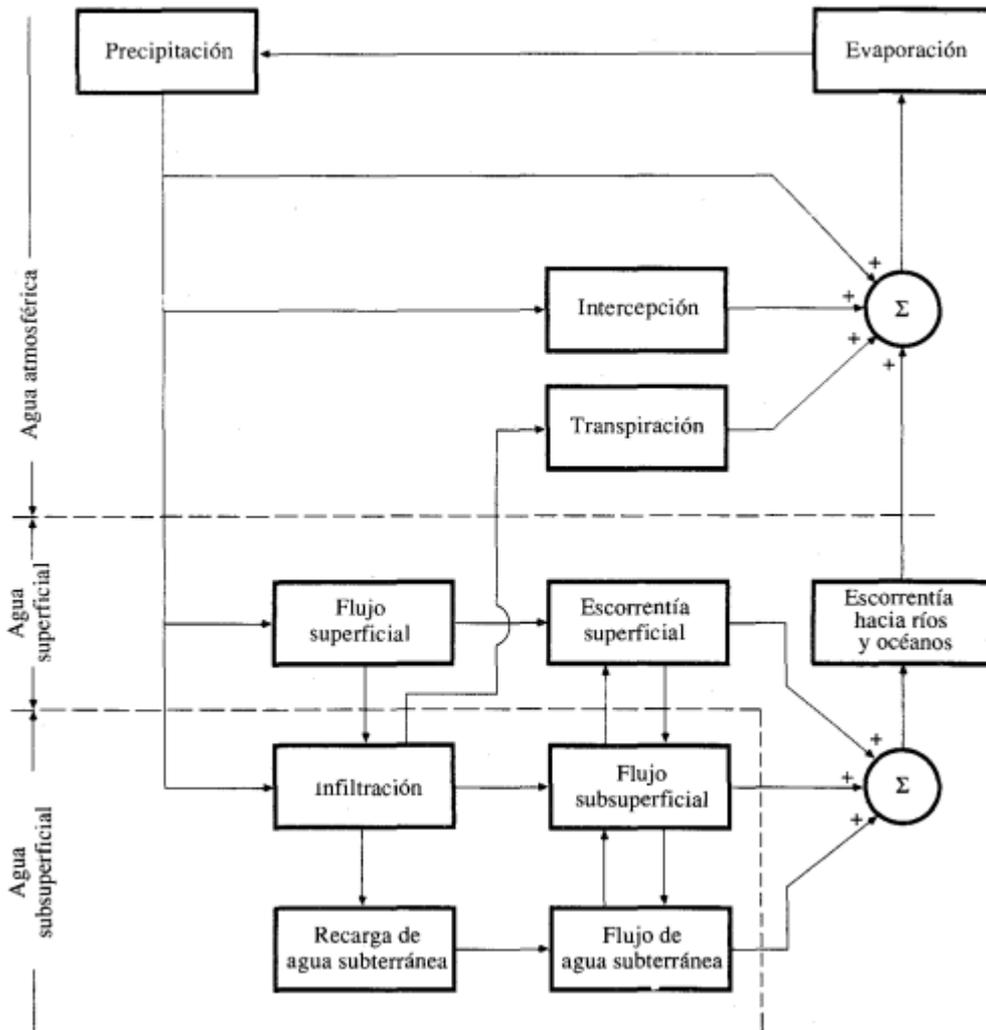


Figura 1. Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global. Fuente: Chow, 1993.

El Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (UNESCO, 2021) recoge que a nivel mundial el uso del agua dulce se ha incrementado por un factor de seis en los últimos 100 años y continúa creciendo a un ritmo de aproximadamente el 1% anual desde la década de 1980. Gran parte de este incremento puede atribuirse a una combinación del aumento de la población, al desarrollo económico y a los cambios en los patrones de consumo. Actualmente, el uso del agua está concentrado mayormente en la agricultura (riego, ganadería y acuicultura) con un 69%, la industria (incluyendo la energía y generación de energía) representa el 19%, mientras que los municipios son responsables del 12% restante.

Aunque la cantidad de agua presente en la Tierra se ha mantenido invariable desde hace 30 a 40 mil años (demostrada por el balance hídrico) la disponibilidad o la calidad se ha visto alterada. Se calcula que los recursos de agua dulce disponibles por persona han disminuido en más de un 20% en las últimas dos décadas y aproximadamente en el mundo más de tres mil millones de personas viven actualmente en áreas agrícolas con una gran escasez de agua y casi la mitad de ellos, 1.200 millones, se enfrentan a graves limitaciones al respecto. Además, cabe destacar que el acceso al agua por persona a nivel mundial es desigual; por ejemplo, la cantidad media de agua dulce por persona en 2017 fue de unos 43.000 metros cúbicos en Oceanía, mientras que apenas alcanzó los 1.000 metros cúbicos en el norte de África y Asia

occidental (Naciones Unidas, 2020). Cuando se habla de disponibilidad del agua, suele venir medida por el estrés hídrico. En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible adoptados por las Naciones Unidas en 2015, el ODS 6: AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO destaca en varias metas e indicadores la importancia de hacer esfuerzos por aumentar el uso eficiente de recursos hídricos. Así, define el estrés hídrico como el nivel de extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles (FAO, 2023). El estrés hídrico, tal y como viene determinado por la disponibilidad del agua, puede variar altamente de una época a otra. Esto se observa en que alrededor de 4.000 millones de habitantes (2/3 de la población mundial) experimentan una grave escasez de agua durante al menos un mes del año. Es sabido que el cambio climático agravará el estrés hídrico en las áreas que ya son de las más afectadas: las áreas secas tenderán a ser más secas y las húmedas más húmedas. Adicionalmente, alrededor de 1,6 mil millones de personas se enfrentan a la escasez "económica" del agua, lo que significa que, aun cuando el agua esté físicamente disponible, carecen de la infraestructura necesaria para recolectar, transportar y tratar el agua con fines humanos (UNESCO, 2019).

La calidad del agua se ha deteriorado como resultado de la contaminación en casi todos los principales ríos de África, Asia y América Latina. A nivel mundial, se estima que el 80% de todas las aguas residuales industriales y municipales son vertidas al medio ambiente sin tratamiento previo alguno, con efectos perjudiciales tanto para la salud humana como para los ecosistemas. Esta proporción aumenta en los países en vías de desarrollo, donde carecen gravemente de instalaciones de saneamiento y tratamiento de aguas residuales domésticas y urbanas. El cólera y la esquistosomiasis son varias enfermedades relacionadas con el agua que aún hoy siguen siendo frecuentes en dichas zonas. Se sabe que, por el contrario, los países que han mejorado los tratamientos de depuración de las aguas residuales han reducido la transmisión de la mayor parte de los patógenos bacterianos.

El agua, siendo el elemento más abundante en la Tierra, ocasiona efectos devastadores y causa el 90% de los desastres naturales empeorados por los efectos del cambio climático (aumenta la frecuencia y la magnitud). Las inundaciones, tormentas y sequías son los tres eventos extremos más destructivos en términos de pérdidas tanto humanas como económicas y se prevé que pongan en riesgo en 2050 a cerca del 20% de la población mundial. La aparición de estos eventos extremos ya ha aumentado en más de 50% en la última década, ocurriendo a un ritmo cuatro veces mayor que en los años 80. Las sequías ocurren en todos los continentes, pero predominantemente en el hemisferio sur. En el periodo entre 1996 y 2015 se registraron un total de 10 sucesos y afectaron anualmente a 10 millones de personas. El número de inundaciones en el mismo intervalo alcanzó la cifra de 100 incidentes que afectaron a 35 millones de personas al año; la mayoría de las personas afectadas viven en el sudeste asiático. Estos fenómenos producen alteraciones inesperadas, tales como el aumento de la variabilidad de las lluvias y la evapotranspiración de las tierras de cultivo, que provocan cambios en las tierras aptas para la agricultura. Asimismo, empeora el rendimiento en los lugares en que el estrés térmico disminuye la captación de carbono. Por otro lado, se prevén mayores variaciones de caudal y descarga de los ríos y recarga de agua subterránea, lo que afectaría a la agricultura de secano y regadío. En definitiva, estos sucesos pueden perjudicar alarmantemente a las infraestructuras destinadas al suministro de agua y saneamiento, lo que impediría el abastecimiento seguro de los consumidores.

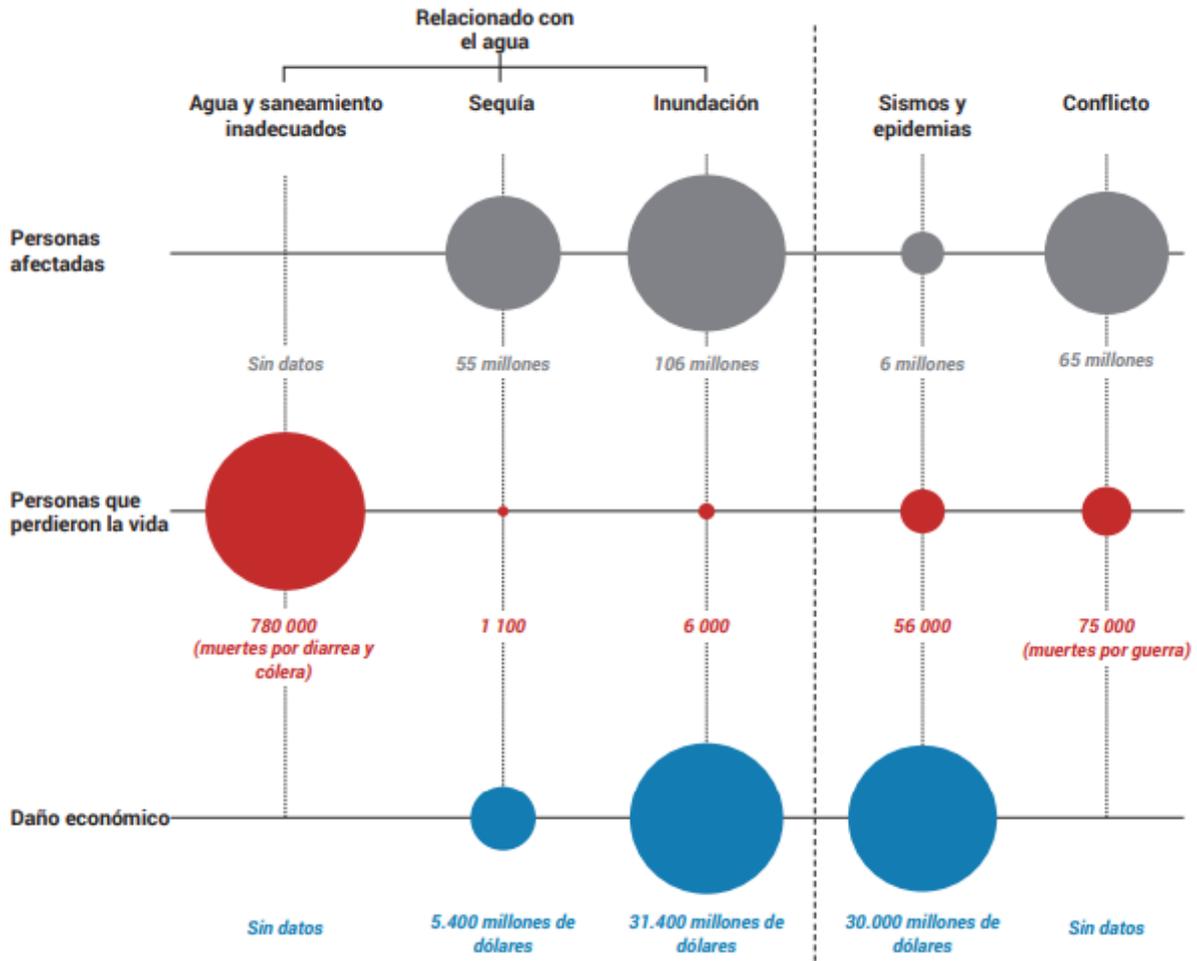


Figura 2. Impacto anual promedio por servicios inadecuados de agua potable y saneamiento, desastres relacionados con el agua, epidemias, sismos y conflictos. Fuente: UNESCO, 2019.

El agua, así como está presente en la naturaleza, también ha de gestionarse para su consumo seguro en el medio urbano. Las grandes civilizaciones clásicas como la egipcia, griega o romana ya crearon grandes infraestructuras para el tratamiento, canalización y distribución, que, alterando el ciclo natural del agua, la adecuan y transportan hasta los puntos de consumo. Se conoce como ciclo urbano del agua la ordenanza que conforman las aguas pluviales, el agua potable y las residuales. El ciclo se extiende desde la captación hasta su devolución al medio, después de haberla usado. La gestión de estos servicios se basa en el abastecimiento y saneamiento. Inicialmente, el agua se capta sobre todo de cauces superficiales y manantiales y se almacena en embalses. El agua acumulada necesaria para el consumo potable se procesa y potabiliza en Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) donde se eliminan microorganismos patógenos y sustancias tóxicas, así como olores, sabores y colores. Tras esta limpieza el agua se conduce y acumula en depósitos, en tanto que sea necesaria para el consumo humano, que disponen de elementos de regulación de la demanda. La distribución a los puntos de consumo se realiza a través de una red de tuberías destinadas al abastecimiento. Una vez usada, se convierte en agua residual y a través del alcantarillado llega a los colectores principales. Estos están conectados a las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). El objetivo de estas plantas es depurarla mediante procesos biológicos naturales garantizando su calidad para que pueda ser vertida al río o mar en condiciones similares a las de su origen (Diputación Foral de Gipuzkoa, s.f.).

CONTEXTO

La urbanización conlleva la alteración de recursos naturales como aire y agua. Atendiendo a los recursos hídricos, el desarrollo urbano altera la hidrología de las cuencas y, además, modifica las redes de drenaje naturales. En efecto, la progresiva impermeabilización del suelo es el principal proceso de degradación del suelo y una de las principales causas de los cambios hidrológicos. La impermeabilidad se refiere al sellado del suelo con fines antrópicos y generalmente de carácter permanente mediante sustitución y cubrimiento de cobertura natural por otra de material impermeable artificial como el cemento o asfalto. Se consideran superficies impermeables las carreteras, las calles, las aceras, los techos y, en general, aquella superficie cubierta por estos materiales (Comisión Europea, 2012).

El sellado del suelo y la reducción de superficie vegetal limitan la capacidad de interceptar, almacenar e infiltrar en el subsuelo el agua de la lluvia. Consecuentemente, en eventos de precipitación la producción de escorrentía aumenta, la velocidad de ella también se ve incrementada, reduce el tiempo de concentración y disminuye la calidad del agua. El suelo natural ayuda a mejorar la calidad del agua pluvial cuando esta se infiltra a la tierra, característica relegada en los suelos impermeables que no tienen capacidad de filtrar o limpiarla. Todo ello provoca serios problemas de inundaciones (creación de balsas), medioambientales y sociales para los que las poblaciones urbanas no están correctamente preparadas. Otro fenómeno asociado a las superficies impermeables es la variación de temperatura en suelos altamente urbanizados, lo que incide en la formación de microclimas urbanos (conocidos como islas de calor), que presentan una relación directa entre la temperatura superficial y el uso del suelo (Connors et al., 2013; Perez et al., 2019).





Figura 3. Acumulación de agua en varios tipos de suelos impermeables en Vitoria-Gasteiz. Fuente: Elaboración propia.

La siguiente imagen (Figura 4) demuestra cómo, a medida que la capacidad de infiltración y evapotranspiración se reduce sustancialmente, el flujo de agua que circula sobre la superficie del suelo aumenta. Evidencias científicas reportan que en zonas urbanas impermeables se ha medido hasta un 90% de escorrentía superficial frente a un valor de 25% en entornos naturales permeables (Suriya & Mudgal, 2012).

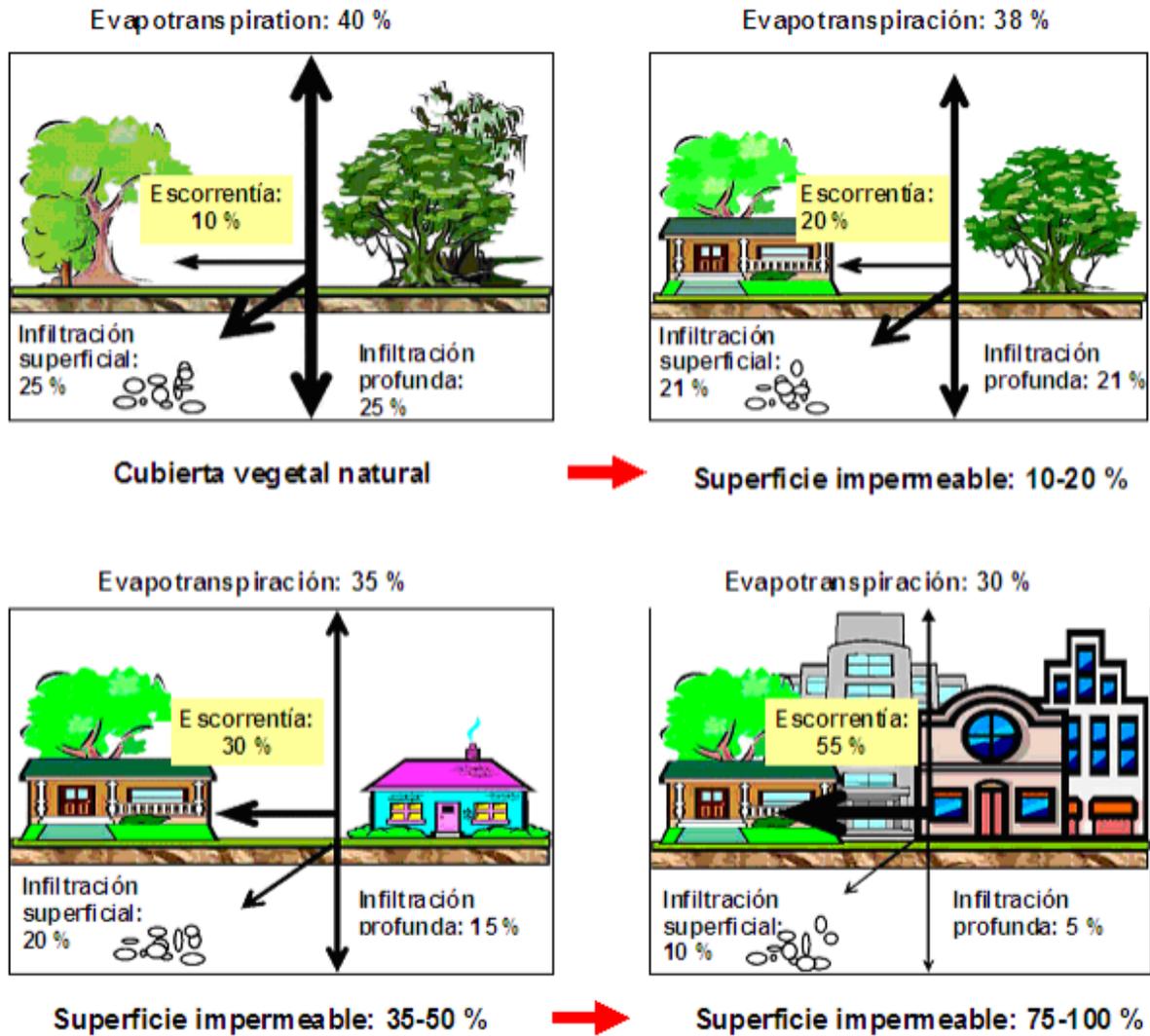


Figura 4. Diagrama de la influencia de la ocupación del suelo sobre el ciclo hidrológico. Fuente: Comisión Europea, 2012.

Los sistemas de alcantarillado y colectores tratan de recoger el agua pluvial que cae sobre las ciudades para conducirla a las EDAR. No obstante, en periodos de lluvias intensas la red de sumideros se sobrecarga y es incapaz de captar todo el volumen de agua proveniente de escorrentía superficial. Estos flujos contaminados por los residuos urbanos y en ocasiones mezclados con las aguas residuales suelen acabar en colectores, tanques de tormenta, estaciones de bombeo o en las propias EDAR. Si el volumen de agua recogida es tan alto que estas instalaciones son incapaces de gestionarla, puede provocar roturas o se producen alivios o descargas al medio natural sin previo tratamiento impactando gravemente en él (Fundación Conama, 2018).

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Gestionar eficientemente el agua pluvial resulta una tarea complicada por la incapacidad de las urbes de recibir elevados flujos de agua. Algunas de las medidas más extendidas que favorecen la mejora de la red

de saneamiento pluvial planteadas por el urbanismo sostenible¹ son las técnicas de drenaje sostenible. En Europa, se conocen bajo el término de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible o del inglés *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), en Australia, en cambio, la práctica es denominada *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), en el que los SUDS forman parte del diseño. Estados Unidos y Canadá efectúan medidas *Low Impact Development* (LID) (Sirishantha & Rathnayake, 2017). Las técnicas que se aplican mediante esta tecnología tienen en consideración en el diseño asociado la cantidad, calidad y servicio de las aguas pluviales.

Se trata de una red integrada de áreas con vegetación y espacios abiertos diseñados que se utilizan para proteger los principios y funciones de los ecosistemas naturales y ofrecer una amplia variedad de beneficios para el ciudadano y la biodiversidad urbana. Los SUDS son un complemento de las infraestructuras centralizadas de los sistemas de alcantarillado convencionales para minimizar los impactos hidrológicos de la urbanización y aumentar la resiliencia ante eventos de precipitaciones extremas en los centros urbanos.

La aplicación de SUDS contribuye a la:

- ✓ Mejora del estado de las masas de agua (reducen el impacto de los desbordamientos de la infraestructura de saneamiento en episodios de lluvias y mejoran la calidad del agua pluvial).
- ✓ Protección frente a inundaciones y sequías.
- ✓ Adaptación y mitigación (sumideros CO₂) al impacto del cambio climático.
- ✓ Reducción del consumo energético en el ciclo urbano del agua (aprovechamiento de aguas pluviales, menor volumen de agua a plantas de tratamiento, menos bombeos, etc.).
- ✓ Habitabilidad de las ciudades, calidad de vida.

El empleo de SUDS fomenta dos objetivos principales: reducir la cantidad de agua que llega al punto final de vertido y mejorar la calidad del agua que se vierte al medio natural (MITECO, 2019).

Conocidas las ventajas que ofrece el uso de estas técnicas, en el estado español existe un marco normativo que las impulsa. Actualizado en 2021 el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH), en su artículo 126 ter. 7, establece que: *“Las nuevas urbanizaciones, polígonos industriales y desarrollos urbanísticos en general deberán introducir sistemas de drenaje sostenible, tales como superficies y acabados permeables, de forma que el eventual incremento del riesgo de inundación se mitigue. A tal efecto, el expediente del desarrollo urbanístico deberá incluir un estudio hidrológico-hidráulico que lo justifique.”* (Real Decreto 849/1986).

En Euskadi, abogan por la penetración de SUDS en espacios públicos como privados mediante la publicación de ordenanzas de gestión y uso eficiente del agua estableciendo porcentajes mínimos de superficies permeables: en aceras será del 20%, y en plazas y zonas verdes urbanas del 35% (Confederación Hidrográfica del Cantábrico, 2022).

Los SUDS sobre todo actúan como elementos preventivos que además son capaces de aprovechar el agua de la lluvia para labores de riego y baldeo y mejorar el entorno paisajístico del medioambiente. Con el

¹ El urbanismo sostenible se entiende como el desarrollo urbano que fomenta un espacio que no atente contra el medio ambiente y que responda a las necesidades sociales de su entorno. Tiene como objetivos principales consumir el mínimo de recursos y energía posibles y generar el mínimo de residuos y emisiones, por ello se entiende como un urbanismo ecológico. Desde una perspectiva social, su finalidad es mejorar la calidad de vida de la población, asegurando la participación ciudadana en el diseño del proyecto (Universidad Europea, 2023).

objeto de gestionar óptimamente el agua de la lluvia, se opta por una estrategia integral, es decir, atajar todos los tramos del recorrido desde el inicio, cuando llega a la superficie, pasando por el transporte hasta el final cuando es infiltrada por el suelo o vertida a la red de saneamiento.

Este tren o cadena de gestión, que trata de asemejarse lo máximo posible al ciclo hidrológico natural, en primer lugar, detiene el agua en su lugar de origen; en segundo lugar, ralentiza su recorrido a través del terreno urbanizado disminuyendo así la escorrentía; el tercer paso consiste en almacenar la cantidad de agua sobrante y, por último, infiltrar esta agua al terreno o reutilizarla.

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO, 2019) clasifica los sistemas (Ferri, 2023; Green Blue Management, 2018) en los siguientes cuatro segmentos según la estrategia de actuación que se quiere apaciguar:

➤ Control en origen

- Cubiertas vegetadas (Green roof): Cubiertas planas o inclinadas cubiertas total o parcialmente por vegetación autóctona de la zona preferiblemente con necesidades hídricas bajas. Estructuralmente formada por un sistema multicapa.
- Pavimento permeable: Son un tipo de pavimento que permite la filtración de la escorrentía a capas subsuperficiales. El agua se almacena temporalmente bajo el pavimento pudiendo ser infiltrado o descargado de forma controlada aguas abajo. En algunos casos, el agua infiltrada o descargada también puede ser aprovechada para otros usos y almacenada en aljibes.

➤ Ralentización y conducción

- Drenes filtrantes: Elementos lineales en forma de zanjas someras rellenas de material granular o reticular, que permiten el almacenamiento temporal de la escorrentía. La entrada de la escorrentía suele producirse lateralmente desde la superficie.
- Banda o zanja filtrante: Sistemas vegetados lineales con cierta inclinación cuya finalidad es ralentizar la escorrentía superficial y facilitar su filtración atrapando sólidos y aceites. Van asociados a elementos longitudinales impermeables y como primer sistema de tratamiento dentro de un tren de SUDS.
- Cuneta vegetada o rellenada: Canales poco profundos de geometría trapezoidal, fondo plano, vegetados y diseñados para el tratamiento, transporte y atenuación de la escorrentía. La entrada de la escorrentía puede producirse de forma lateral o en cabecera de las mismas por medio de una tubería o embocadura.

➤ Almacenamiento

- Aljibes: Depósitos que interceptan la escorrentía de tejados y superficies impermeables altas a través de bajantes y la almacenan para usos que no requieran la calidad del agua potable, como es el riego de jardines o la limpieza de vehículos, entre otros.
- Estanques y balsas de detención y/o infiltración: Elementos inundables situados en una depresión en el terreno, que permanecen normalmente secos hasta la llegada de la precipitación, donde almacenan temporalmente la escorrentía, proporcionando como función principal la detención y laminación de caudales punta; así como la sedimentación de la contaminación, contribuyendo a mejorar la calidad de la escorrentía.
- Humedales artificiales: Elementos deprimidos con una lámina permanente de agua y funciones de atenuación y tratamiento de escorrentías. Los humedales artificiales se

transforman en el hábitat de una gran diversidad de plantas y animales. Su creación favorece la biodiversidad, y la proliferación de la flora y la fauna del lugar, pero para ello es necesario mantener un flujo base de agua permanentemente, incluso en épocas de sequía.

➤ Infiltración

- Alcorques de infiltración: Conjunto del hueco en el pavimento donde se planta el árbol, el suelo estructural formado por grava o celdas rellenas de tierra vegetal que lo rodea y el pavimento sobre el que se asienta.
- Zanjas de infiltración: Excavaciones en el terreno que captan y almacenan temporalmente la escorrentía de superficies impermeables contiguas.
- Parterres inundables / franjas de biorretención: Zonas vegetadas deprimidas que permiten la gestión del volumen y calidad de las escorrentías. El parterre actúa como medio receptor de la escorrentía y la detiene temporalmente, facilitando su salida controlada a través de infiltración o de un conducto drenante en la base con descarga a la red de colectores. La vegetación es la encargada de eliminar partículas arrastradas y contaminantes.





Figura 5. Ejemplos de SUDS. Fuente adaptada: MITECO, 2019; RedSUDS 2022.

Pavimento permeable

El pavimento es una estructura construida por un conjunto de capas. La elección del primer material, capa receptora de agua, puede permitir el control de la escorrentía allá donde se genera y recuperar la capacidad de infiltración original.

Los sistemas de pavimento permeable son una de las técnicas de drenaje sostenible más eficaces, versátiles y competitivas disponibles actualmente para el tránsito de peatones y vehículos (Green Blue Management, 2018). Su disposición facilita el flujo vertical de agua a través de los materiales dispuestos y gestiona la escorrentía urbana en origen, interceptándola, retrasando su cinética, reduciendo su volumen y tratándola desde el punto de vista de la calidad del agua. En efecto, el uso de pavimentos permeables se recomienda únicamente cuando la superficie a drenar tenga una pendiente máxima del orden del 2-3% tales como estacionamientos, vías con tráfico ligero u ocasional y andenes, entre otros, para evitar la necesidad de construir terrazas o barreras transversales al flujo que aseguren el correcto rendimiento del sistema (Ajuntament de Barcelona, 2020; Ballard et al., 2015).

El conjunto de capas superpuestas entre sí y apoyadas sobre superficie natural o artificial (explanada) normalmente está compuesto de arriba hacia abajo por: a) pavimento permeable, b) base y c) subbase.

- a) La función principal de la capa receptora es permitir el paso del agua a las capas subyacentes y ser el primer filtrador de materiales contaminantes. Los pavimentos se clasifican en función del tipo de superficie permeable en dos grupos:
 1. Pavimentos permeables por junta: materiales impermeables en disposición permeable, la permeabilidad del pavimento se consigue a través de la configuración que crea huecos entre los adoquines y/o bloques.
 2. Pavimentos de naturaleza porosa: superficie cubierta enteramente por un material poroso que permite la filtración de escorrentía. Los materiales más comunes son:
 - I. Asfalto y hormigón permeables: similares a los materiales convencionales,

pero permiten el paso de agua a través de los poros.

- II. Sistemas de malla o geocelda: celdas de plástico u hormigón rellenas de grava o tierra vegetada que permiten el paso del agua, suelen encontrarse por el nombre césped reforzado.



Figura 6. Pavimentos permeables de naturaleza porosa (izq.) y por junta (dcha.). Fuente: Elaboración propia

- b) La base de apoyo se monta con material granular con gran porosidad. Como su propio nombre indica es el elemento que absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales y presenta una permeabilidad mayor a la del pavimento.
- c) La subbase se compone por gravas o zahorras con bajo porcentaje de partículas finas.

La separación entre capas de diferentes propiedades se garantiza con la instalación de geosintéticos tales como geotextiles, geomallas, geomembranas, georredes o geocompuestos manufacturados a partir de polímeros. La misión principal de estos componentes radica en la filtración y protección ya que retienen los contaminantes arrastrados por el agua (Madrado-Uribeetxebarria et al., 2023). Ocasionalmente, se colocan celdas de plástico de alta resistencia para aumentar la capacidad de almacenar agua. Adicionalmente, se complementa con tuberías de drenaje que dirigen el agua hacia la red de saneamiento.

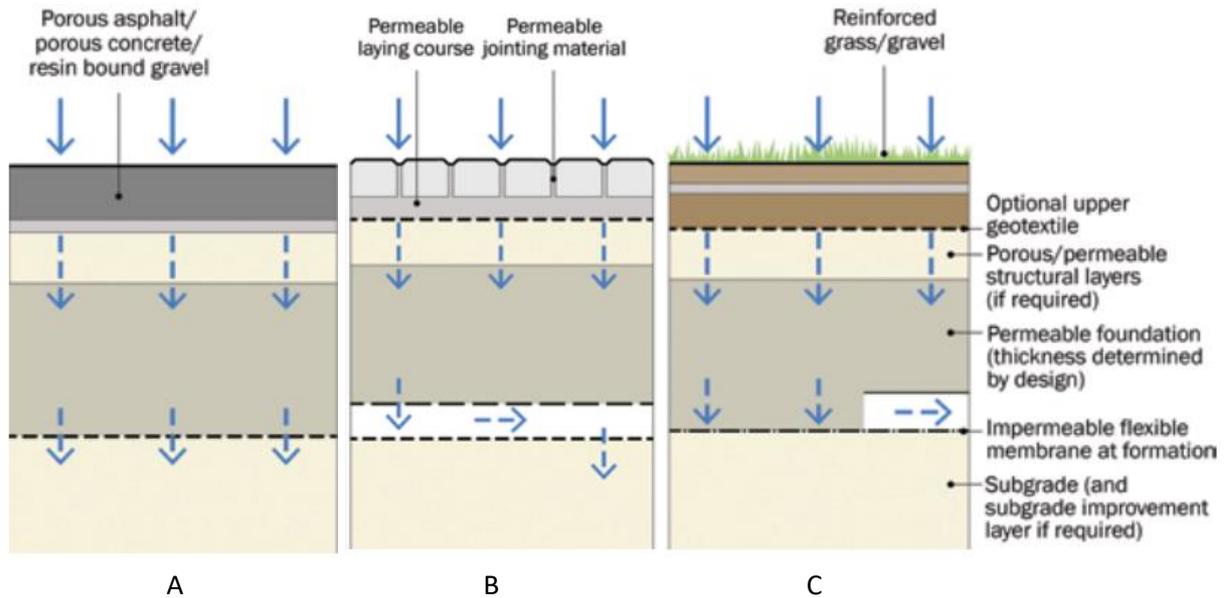


Figura 7. Secciones tipo de sistema de pavimento permeable y posibles destinos del agua captada: A) el agua se infiltra en el terreno; B) parte se infiltra en el terreno y parte se evacua mediante tuberías drenantes; C) el agua se evacua a las EDAR para su tratamiento, almacenamiento o infiltración. Fuente adaptada: Ballard et al., 2015.

Resulta destacable señalar que el pavimento permeable a diferencia de otras técnicas no requiere de gran espacio y existen en el mercado gran variedad de diseños que son fácilmente modulables según el entorno urbano de localización pudiendo ser fácilmente integrados paisajísticamente. Como mayor desventaja de estos sistemas se observa que, la exposición ambiental, el tráfico de vehículos y la acumulación de sedimentos provocan que la capa superficial sufra un deterioro, desgaste y colmatación (*clogging*) que disminuya la permeabilidad en algunos puntos (García-Haba et al., 2022). En concreto, el arrastre de contaminantes como ramas u hojas reduce la velocidad de infiltración del agua, aumentando así la probabilidad de generación de escorrentía, con la consecuente disminución del rendimiento hidráulico (Hernández-Crespo et al., 2019). Diversos estudios constatan que los suelos porosos son más propensos a perder la permeabilidad y reducir su vida útil sin un correcto mantenimiento frente a los permeables por junta (Sañudo-Fontaneda et al., 2018). En concreto, los primeros son susceptibles de colmarse completamente tras 8 años de funcionamiento mientras que superficies de adoquines con junta permeable se muestran más resilientes y resistentes frente a este proceso, pese a sufrir reducciones de su permeabilidad de entre el 30% y el 45% al cabo de 10 años de operación. Es por ello que es esencial realizar tareas de mantenimiento regularmente para potenciar sus beneficios y alargar la vida útil. La limpieza del suelo dependerá del tipo de superficie, no obstante, como pautas generales los fabricantes sugieren un barrido y aspiración del suelo al inicio de cada estación y recortar la maleza de la zona. Los eventos de lluvia de alta intensidad tienen mayor capacidad de movilización e infiltración de contaminantes, por lo que como medida preventiva sería adecuada realizar una limpieza en seco previa (Hernández-Crespo et al., 2019). Al cabo de los años de su instalación, la infraestructura puede requerir una aspiración profunda para recuperar la permeabilidad inicial y a los 20-25 años el material filtrante tendrá que sustituirse. Por otro lado, su ubicación no es apta en lugares con tráfico de vehículos pesados como autopistas, en lugares con altas cargas de sedimentos ni zonas donde exista mucho arbolado. Habiendo considerado las desventajas de su uso, la penetración de áreas permeables en zonas urbanizadas resulta una técnica eficaz para lograr un drenaje más sostenible siempre que el mantenimiento sea el correcto.

ESTADO DEL ARTE

La implantación de suelos permeables es una práctica habitual, aunque la monitorización de estos no es frecuente. Además, no se pone foco en la importancia de la monitorización y la bibliografía existente es escasa (Heneghan et al., 2021). En la literatura, tal y como se detalla a continuación, se recogen descripciones de diversas configuraciones de pavimento permeable realizadas en regiones con diferentes climatologías. Estas instalaciones, promovidas en su mayoría por instituciones públicas o proyectos de investigación se han testeado a nivel laboratorio y unos pocos han recogido datos reales.

Los estudios de laboratorio llevados a cabo para evaluar el desempeño hidrológico o ambiental frecuentemente descuidan aspectos fundamentales obteniendo resultados inconcretos. Reproducir el comportamiento de los pavimentos permeables a escala de laboratorio da lugar a subestimar las condiciones reales: recrear eventos de precipitación fiables, cargas del tráfico rodado, la formación de biofilms o costras en la superficie que reducen la permeabilidad y el volumen de agua evotranspirada, son algunos ejemplos de ello. Al no estar definida una metodología estandarizada para la evaluación de los pavimentos permeables resulta complicado arrojar conclusiones a largo plazo sobre sus ventajas (Sambito et al., 2021).

Especialmente la investigación de sistemas de pavimento permeable bajo condiciones reales está subdesarrollada en los países mediterráneos (Gimenez-Maranges, 2020). A nivel estatal se han realizado escasos análisis sobre el comportamiento hidráulico de los pavimentos permeables instalados. El caso de estudio ubicado desde 2014 en el aparcamiento del Campus Universitario de Cartuja en Granada (Csa según la clasificación climática de Köppen: clima continental y precipitación media anual de 432 mm) recopiló datos en dos fases (Rodríguez-Rojas, 2020; Rodríguez-Rojas, 2018). Primeramente, se obtuvieron resultados comparativos sobre las variables hidrológicas y la eficiencia de tres tipos de pavimentos permeables. En la segunda fase, la investigación se centró en el rendimiento a medio plazo y los posibles efectos de la colmatación y su relación con la saturación del suelo. Se instalaron tres tipos de pavimentos modulares: modular espaciado, de rejilla de hierba y de rejilla de grava en un área de 813 m². Las mediciones de los parámetros las realizaron por medio de un pluviómetro y caudalímetros instalados en cada superficie de pavimento donde registra el volumen y caudal. La medición de esorrentía *in situ* fue despreciada ya que en fases previas de laboratorio se concluyó que iba a ser mínima, por lo que se optó por calcularla a través del modelo SWMM (Storm Water Management Model). La capacidad de infiltración se midió analizando la evolución de la eficiencia, definida como la mejora del rendimiento del pavimento permeable respecto a uno impermeable, con el fin de cuantificar la mejora generada por los SUDS. Así, se realizó un análisis a partir de tres variables hidrológicas: "volumen generado" (volumen de agua que fluye al alcantarillado: 'volumen de drenaje' más 'volumen de esorrentía'), 'caudal punta' (valor máximo del caudal producido por el pavimento), y 'tiempo de residencia del agua' (tiempo que tarda el suelo en drenar la profundidad total de las precipitaciones).

Los resultados obtenidos evidencian que la capacidad de infiltración en el suelo impermeable fue nula, solo recogiendo lluvia superficial. Por el contrario, en las zonas permeables solo se generó esorrentía en un periodo de retorno T=20 años, lo que demuestra que los SUDS son capaces de absorber la totalidad de lluvia en precipitaciones regulares. Las eficiencias volumétricas superiores al 80% ponen de relieve el potencial de estos sistemas para reducir el volumen de agua que se acumula en el alcantarillado. Considerando el caudal punta en los SUDS, este fue próximo a cero (0,01-0,20 l/s) y se obtuvo una reducción del 95%, lo que demuestra la elevada capacidad de infiltración a la vez que se disminuye el riesgo de inundaciones. Como último indicador hidrológico evaluado, los valores obtenidos para el tiempo de residencia del agua en los pavimentos permeables son superiores (70%), es decir, aumenta la



capacidad de retención del suelo, ralentizando y retrasando el flujo del agua. Esta investigación demuestra que los pavimentos permeables son capaces de infiltrar prácticamente la totalidad de lluvia en la mayoría de los eventos sin generar escorrentía obteniendo eficiencias similares a otros tipos de SUDS, garantizando además un espacio para la circulación peatonal y vehicular. Por último, se afirma que a pesar de no haber diferencias significativas el pavimento de rejilla de hierba lo hace el más eficiente para entornos urbanos por su adaptabilidad a diferentes usos y gran variedad de diseños.

La comparación de suelos permeables entre condiciones atlánticas frente a mediterráneas desarrollado por Fernández-Gonzalvo et al. (2021) concluye que en primer lugar la acumulación de suciedad sobre la superficie aumenta el tiempo de infiltración y reduce la permeabilidad en ambos regímenes indistintamente. Asimismo, valorando la calidad del agua, las concentraciones de contaminantes en el agua infiltrada fueron mayores en el régimen mediterráneo que en el atlántico. Por último, se demostró que el nulo mantenimiento de la implantación repercute en el volumen infiltrado, a medida que el suelo se apelmaza la capacidad de este para absorber el agua se dificulta.

OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

Tal y como se ha concluido en el estado del arte, el estudio experimental *in situ* de pavimentos permeables realizado en la bibliografía hasta la actualidad es reducido. Se requiere de un estudio más profundo para concretar una metodología que permita realizar de forma unificada la monitorización del comportamiento real de los pavimentos permeables.

Teniendo en cuenta esta información, el siguiente trabajo fin de máster tiene como objetivo:

- Estudiar el comportamiento hidráulico de las secciones construidas en la planta piloto de pavimentos permeables de Txomin-Enea, Donostia.
- En particular, se persigue concluir primeramente cuáles son los beneficios de implantar un material permeable frente al convencional a partir de datos reales y observar qué configuración es la más ventajosa.
- Además, se desean sentar las bases para determinar una metodología para la monitorización de pavimentos permeables reales.

Se presenta este trabajo en el marco de la asignatura Redes de Fluidos, impartida en el Máster de Ingeniería Energética Sostenible. En el contexto de la citada materia, el alumnado profundiza en la hidráulica urbana aplicada a redes de fluidos y es capaz de proponer medidas sostenibles para la mejora de la eficiencia de las redes y para resolver problemas relacionados con la gestión del agua.

BENEFICIOS QUE APORTA EL PROYECTO

Los beneficios que aporta este proyecto se pueden dividir en dos grupos: beneficios técnicos y beneficios sociales.

Beneficios técnicos

El desconocimiento de los nuevos procesos hidrológicos llevados a cabo mediante los pavimentos permeables impide la extensión de los sistemas de drenaje sostenible. La puesta en marcha de una zona piloto de pavimentos permeables a escala real monitorizada permite arrojar conclusiones sobre el comportamiento del sistema. Es más, la caracterización hidráulica de estos abre nuevas vías para la planificación de futuras implantaciones y mejoras en la operación y mantenimiento.

Beneficios sociales

Generalmente, el pavimento permeable es un elemento que pasa desapercibido al viandante. A través de este trabajo se pretende divulgar a ámbitos más amplios de la sociedad las mejoras que ya se están realizando en las ciudades para gestionar eficientemente el agua pluvial. Además, la elaboración de este material pretende acercar a los habitantes de Donostia el estado de los proyectos experimentales que se llevan a cabo en su propia ciudad. Por último, el sector especializado en hidrología urbana puede conocer de primera mano los resultados obtenidos a partir de la toma de datos reales.



METODOLOGÍA

Descripción de la zona de investigación en Txomin-Enea

El barrio de origen rural Txomin-Enea ubicado entre los barrios de Loyola y Martutene, en el valle del río Urumea en Donostia/San Sebastián (Gipuzkoa) ha sufrido una transformación en el ámbito Smart y sostenibilidad a través de diferentes proyectos y actuaciones piloto que se han llevado a cabo en el distrito y que podrían ser escalables a otros barrios o incluso ciudades (Fomento San Sebastián, 2021).

Las actuaciones, diseñadas desde una perspectiva integral y transversal y cofinanciadas por el Gobierno Vasco y H2020, cuentan con la creación de un *District Heating* -sistema de calefacción y agua caliente sanitaria centralizado- alimentado con energía renovable, la rehabilitación energética de edificios antiguos, estudio del potencial de instalaciones de energías renovables, una flota de transporte público con vehículos eléctricos y la implantación de SUDS, entre otros, que se realizaron mediante un proceso de reflexión colaborativa con la ciudadanía para valorar el futuro del barrio en pos de ser más eficiente, moderno, conectado y sostenible.

Este espacio de transformación ha logrado un impacto social gracias a la mejora de calidad de vida de los residentes en el barrio con lugares ergonómicos; medioambiental con la reducción de consumo y emisiones y finalmente económico.

De hecho, en 2021, gracias a 'Smart Txomin', las acciones llevadas a cabo en el barrio fueron galardonadas al mejor proyecto de ciudad inteligente en los XI Premios CNIS (Congreso Nacional de Innovación y Servicios Públicos). En este congreso organizado por el Ayuntamiento de Madrid y por El Club de Innovación premian a las administraciones pioneras en la aplicación de iniciativas innovadoras.

En este contexto, el Ayuntamiento de Donostia en colaboración con la Universidad del País Vasco creó en 2019 una zona piloto para la investigación del potencial hidráulico de los pavimentos permeables frente al pavimento convencional (impermeable).

Descripción de la configuración

La zona piloto dispone de un área total de 264 m² en Camino Kristobaldegi, 20014 Donostia, Gipuzkoa. Concretamente en: 43°18'17.7"N 1°57'30.5"W.

Donostia tiene un clima Cfb (templado sin estación seca con verano templado) según la clasificación de Köppen-Geiger, con una temperatura media anual de 13,4°C y promedio anual de precipitación de 1476 mm. Las lluvias se reparten a lo largo del año de forma regular, aunque hay meses que puntualmente registran niveles inferiores a 50-60 mm, la media mensual mantiene unos valores entre 90-120 mm los meses menos lluviosos, y entre 140-175 mm los más lluviosos (Juntas Generales de Gipuzkoa, 2021).

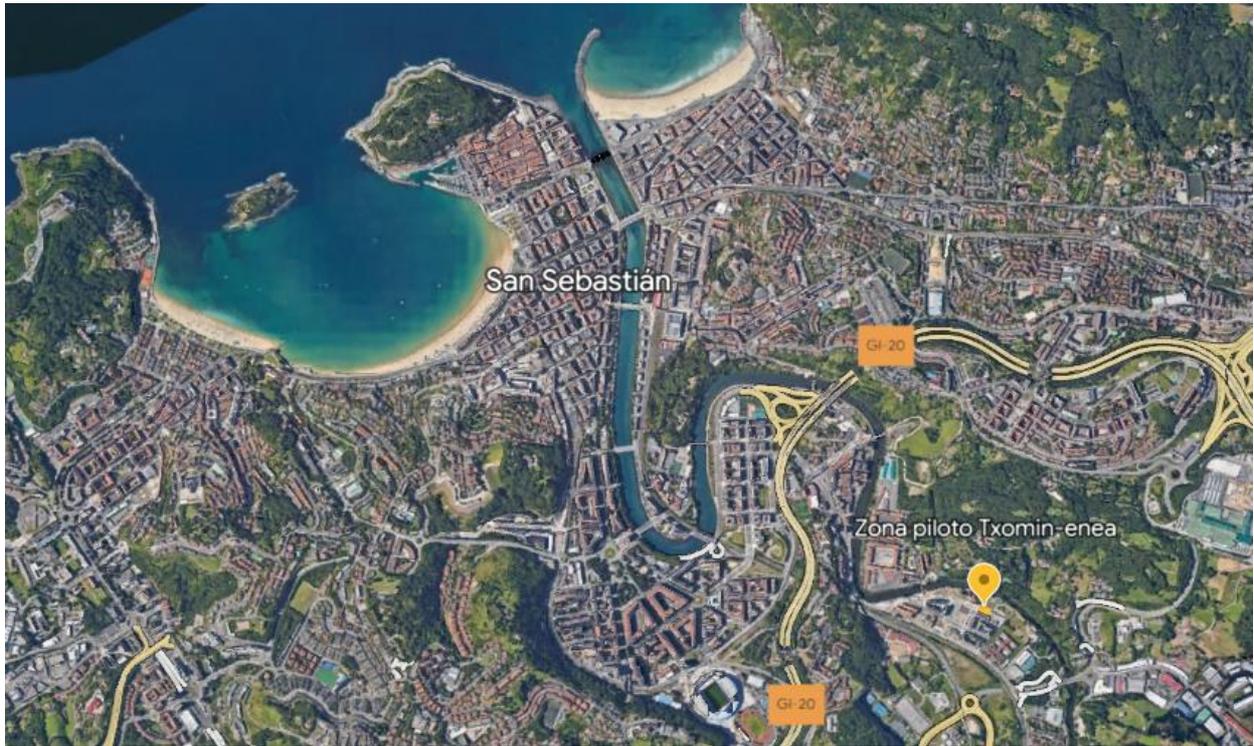


Figura 8. Localización de la zona piloto Txomin-Enea en Donostia. Fuente: Google Earth



Figura 9. Zona piloto Txomin-Enea. Fuente: Google Earth

La zona de investigación cuenta con varias secciones sensorizadas que tienen como objetivo final analizar la respuesta de los materiales permeables frente a los tradicionales. El área está dividida en dos usos: la franja superior de la figura 10 pertenece a la acera peatonal (P) y la franja inferior, por el contrario, es calzada para la circulación/estacionamiento de vehículos ligeros (A). La infraestructura, a su vez se divide

en tres áreas con diferentes configuraciones de material. La primera, sombreada de color marrón en la figura 10 y denominada zona de control, ha sido construida con acabado que evita que el agua penetre en las capas inferiores de la tierra: baldosas hexagonales empleadas habitualmente por el ayuntamiento de San Sebastián (P_{imp}) y asfalto convencional (A_{imp}). El área en verde, por el contrario, tiene un acabado permeable. Esta sección a su vez se subdivide en dos tipos de configuración; ambas incorporan adoquines permeables (P) y asfalto poroso (A) sobre capas de grava. La última sección, Zona 2, incorpora como elemento adicional celdas de plástico en una capa profunda para aumentar la capacidad de recogida de agua y analizar su posible impacto en el vertido (señaladas con subíndice *cell*).

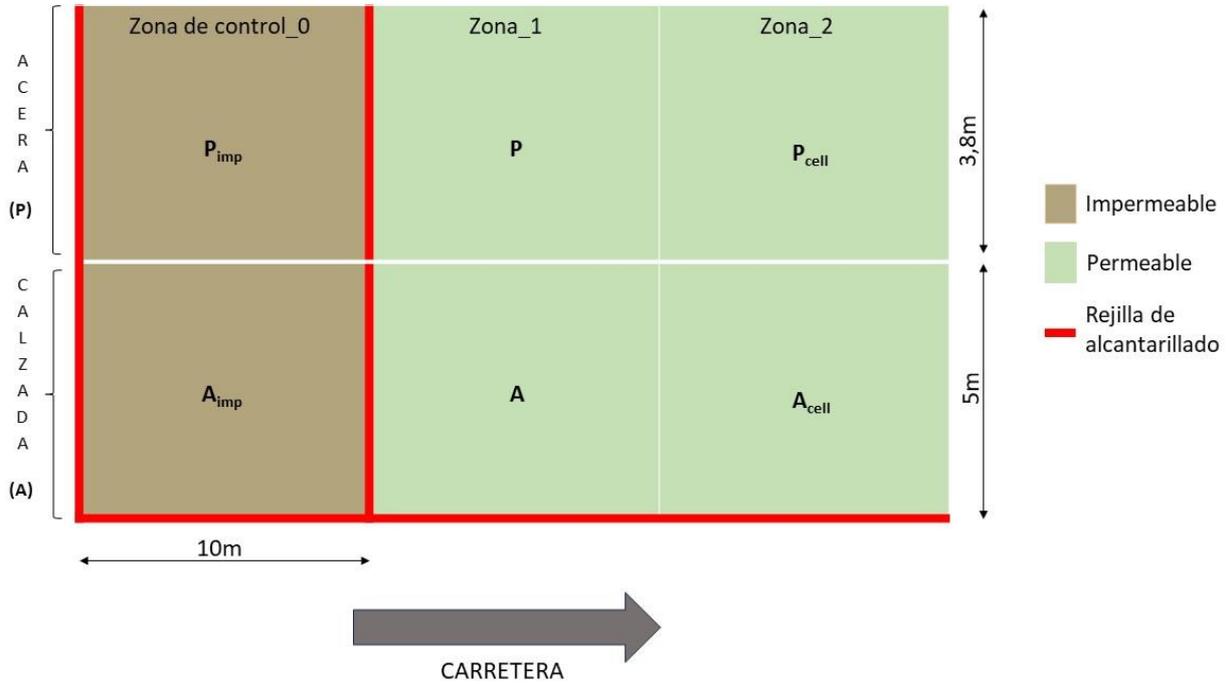


Figura 10. Distribución en planta de la zona piloto. Fuente: elaboración propia



Figura 11. Zona de investigación en Txomin-Enea. Fuente: elaboración propia

A continuación, se recogen en las tablas 1 y 2 los materiales y grosores construidos en las seis áreas diseñadas.

Tabla 1. Secciones de pavimentos en la zona impermeable Z0 (zona de control)

Tipo de superficie	
Acera Z0 450mm	Calzada Z0 650mm
Baldosa hidráulica hexagonal 50mm	Ofita en capa de rodadura de áridos ofíticos 40mm
Mortero de nivelación 30mm	Riego de adherencia
Solera de hormigón con mallazo 150mm	Caliza en capa intermedia de áridos calizos 60mm
Base zahorra artificial 250mm	Riego de imprimación
	Base zahorra 200mm
	Subbase zahorra 350mm

Tabla 2. Secciones de pavimentos en las zonas permeables Z1 y Z2

Tipo de superficie			
Acera permeable Z1 580mm	Acera permeable con celdas Z2 580mm	Calzada porosa Z1 680mm	Calzada porosa con celdas Z2 680mm
Adoquín permeable 80mm	Adoquín permeable 80mm	Ofita 30mm Ofita 50mm	Ofita 30mm Ofita 50mm
Gravilla 2/6,3 50mm	Gravilla 2/6,3 50mm	Gravilla 2/6,3 50mm	Gravilla 2/6,3 50mm
Geotextil	Geotextil	Geotextil	Geotextil
Gravilla 4/20 500mm	Gravilla 4/20 400mm	Grava 4/20 550mm	Grava 4/20 500mm
Geotextil+geomembrana+geotextil	Geotextil	Geotextil+geomembrana+geotextil	Geotextil
	Celdas 52mm 50mm		Celdas 52mm 50mm
	Geotextil+geomembrana+geotextil		Geotextil+geomembrana+geotextil



Figura 12. De izquierda a derecha: baldosa hexagonal, adoquín permeable Z1 y adoquín permeable Z2. Fuente: elaboración propia



Figura 13. Pavimento acabado convencional y poroso. Fuente: Elaboración propia

Recogida de datos y parámetros a analizar

Dicha área, está acondicionada para la recogida de datos de precipitaciones y caudal infiltrado, aunque se prevé que en futuro pueda ser adaptada para medir la calidad del agua también.

El régimen de lluvias en la ubicación se mide a través de un pluviómetro ubicado en la cubierta de Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, aproximadamente a 5 kilómetros del punto de estudio. No obstante, por fiabilidad se opta por contrastar los datos de eventos lluviosos con la estación meteorológica de Miramón (a 2 km) administrada por Euskalmet.

Para la medición del agua pluvial que cae sobre la zona de ensayo se han construido seis arquetas independientes e impermeabilizadas en su contacto con el suelo natural para controlar que el agua no se infiltre a las profundidades y monitorizar debidamente el volumen de agua gestionado por cada una. Dos de ellas recogen la escorrentía que llega a las rejillas de alcantarillado dispuestas: la primera arqueta denominada Rimp recoge la lluvia sobre la zona de control, es decir Aimp y Pimp. La otra arqueta, Rperv, recoge la lluvia no infiltrada del suelo permeable (A, P, Acell y Pcell). El resto de las arquetas (cuatro)

corresponden al agua infiltrada en cada sección de suelo permeable:

- Dp: Drenaje subsuperficial de los adoquines permeables de la primera zona (P)
- Da: Drenaje subsuperficial del asfalto poroso de la primera zona (A)
- Dpcell: Drenaje subsuperficial de los adoquines permeables con celdas en la subbase de la segunda zona (Pcell)
- Dacell: Drenaje subsuperficial del asfalto poroso con celdas en la subbase de la segunda zona (Acell)

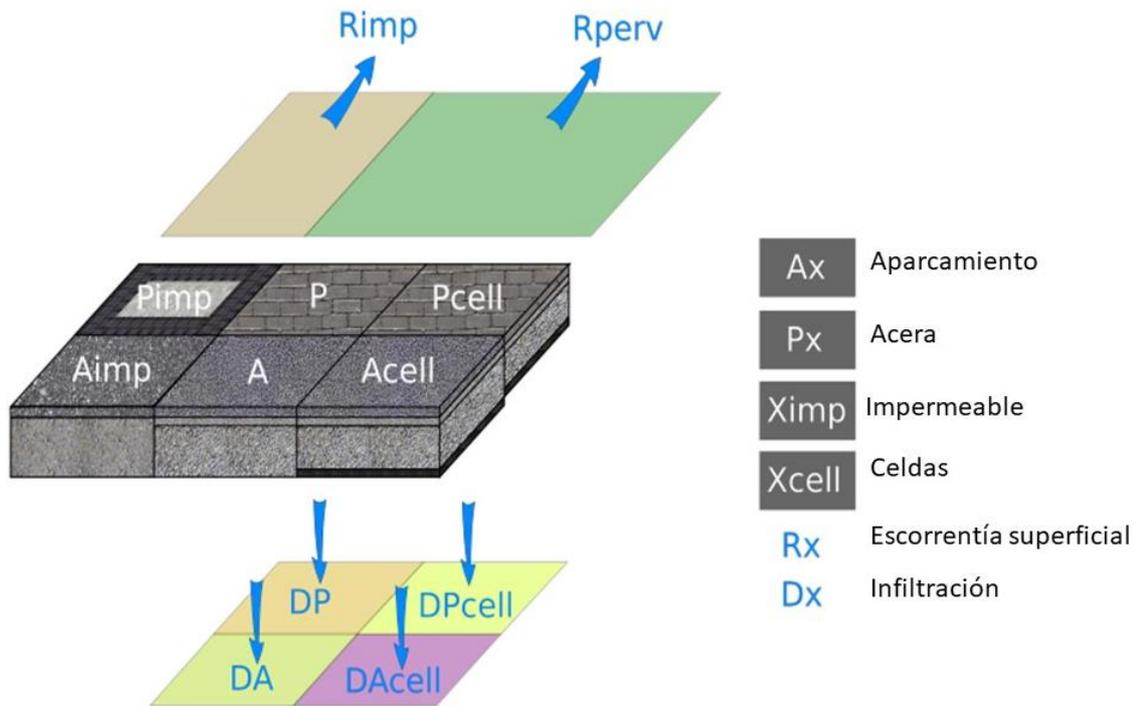


Figura 14. Esquema de la zona permeable. Fuente: Madrazo-Uribeetxebarria et al., 2022.

El agua pluvial que cae en cada arqueta se conduce por un par de rejillas tranquilizadoras dispuestas verticalmente para filtrar los contaminantes y laminar el flujo del agua. Posteriormente, se encuentra un vertedero con forma de U por el que pasa el agua en su transcurso hacia la red de saneamiento a través de los conductos instalados. La arqueta que recibe Rimp cuenta con un vertedero de 4 mm ya que se espera que sea el que más volumen de agua reciba, mientras que el resto tienen un vertedero de 2 mm adecuado para caudales bajos.

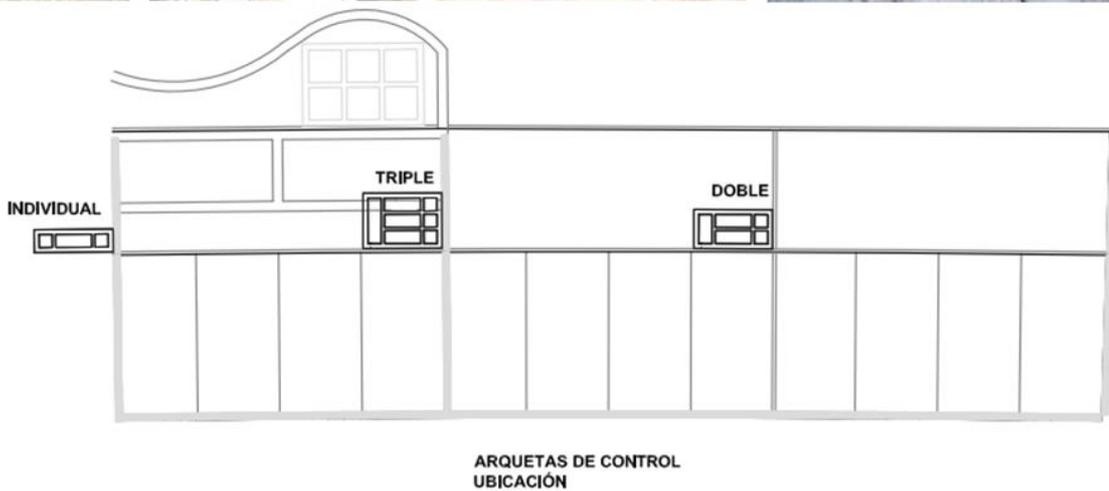


Figura 15. Las seis arquetas que recogen el agua en la zona piloto. La individual recoge Rimp; la triple Rperv, Da y Dp; la doble Dacell y Dpcell.

Los sensores de presión pegados en el fondo de cada arqueta miden el nivel de agua que almacena cada depósito tras haber sido infiltrada o arrastrada superficialmente.



Figura 16. Ellenex PLS2-L Standard Level Sensor

El agua que se deposita en la arqueta bien proveniente directamente de la escorrentía recogida por la

canaleta de las rejillas de alcantarillado o tras haber sido infiltrada por el conjunto de capas que forman un suelo permeable se acumula hasta una altura, denominada en adelante h_0 . El vertedero, colocado a una altura de 80-100 milímetros sobre el suelo de la arqueta, determina la cota de vertido. El sensor mide la altura que alcanza el agua tras el episodio de precipitaciones. Así, el caudal que fluirá por el vertedero (Q) corresponde a la variación de cotas (h) entre el nivel inicial de agua presente en la arqueta (h_0) y el flujo recibido (h_s). El nivel de agua que quede por debajo de la cota de vertido será agua estancada.

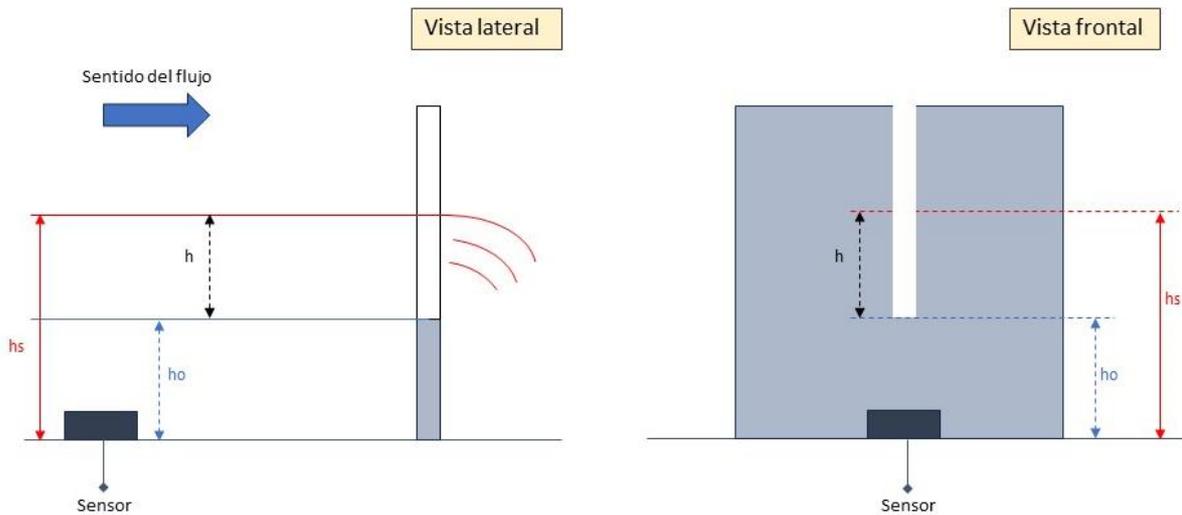


Figura 17. Medición del nivel de agua que fluye por el vertedero. Fuente: Elaboración propia.

h_0 : altura inicial que mide el sensor cuando no llueve

h_s : altura que mide el sensor cuando llueve

$$h = h_s - h_0$$

Los vertederos en forma de U han sido calibrados -relación entre el caudal (l/h) y la altura (mm)- dando lugar a la siguiente ecuación:

Caudal del vertedero en forma de U de 4 mm situado en la arqueta que recoge Rimp:

$$Q (l/h) = 1,34 \cdot h^{1,47}$$

Caudal del vertedero en forma de U de 2 mm situado en las arquetas que recogen el resto de los parámetros:

$$Q (l/h) = 0,687 \cdot h^{1,5}$$

Conociendo el caudal de salida de las arquetas y la pluviometría en la localización se pretende analizar la respuesta de los pavimentos valorando el caudal de escorrentía superficial, el caudal de infiltración, el tiempo de respuesta y el pico de escorrentía superficial.

RESULTADOS

El periodo de monitorización comprende desde julio de 2021 hasta diciembre de 2021, los sensores toman datos en intervalos de 10 minutos y se graban en un servidor. La visualización de los datos, accesible en la plataforma Grafana, permite seleccionar el periodo que se quiera estudiar y ver/descargar el nivel del agua (entre 0 y 300 mm), las precipitaciones y el voltaje de la batería (0-3,6 V).

La Figura 18 muestra los datos almacenados en un determinado intervalo. A la izquierda la medición de los sensores, en mm, y en la derecha la medición del pluviómetro en mm acumulados durante cada intervalo de medición, 10 minutos.

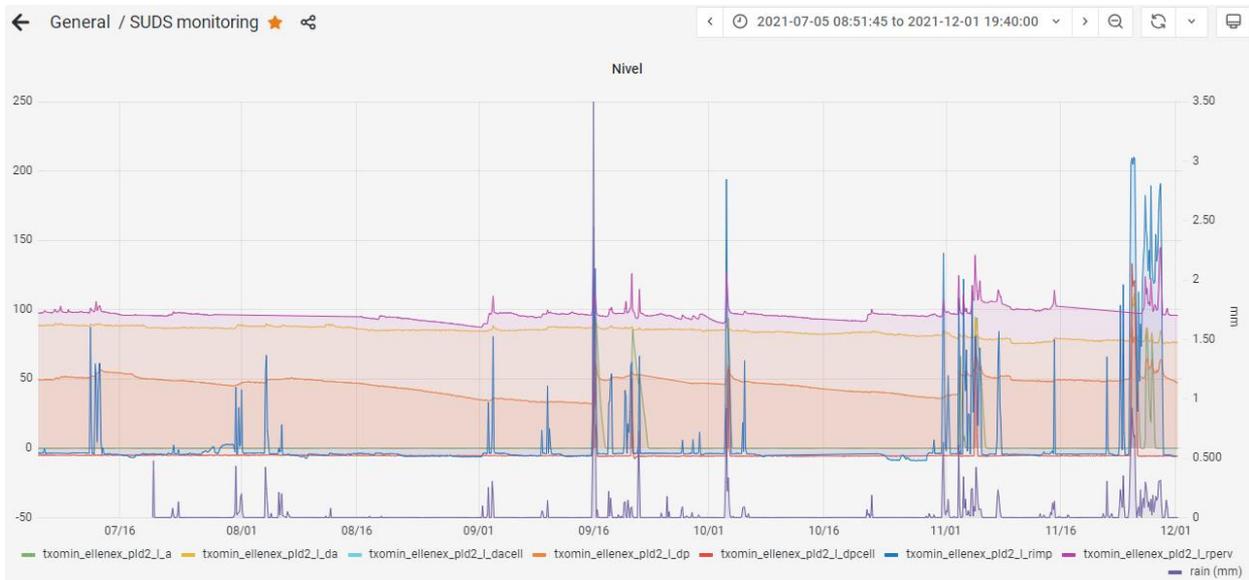


Figura 18. Visualización de los datos medidos por los sensores entre 05-07-2021 y 01-12-2021 en la plataforma Grafana.

A continuación, se muestra una ampliación de la figura 18. Como se ha mencionado con anterioridad, la cota de vertido mínima es de 80 mm, solamente cuando el agua pluvial infiltrada alcanza la cota a la que está situada el vertedero se evacua a la red de drenaje. Los valores correspondientes a Rperv y Da se sitúan en todo momento en el rango mencionado.

No obstante, Dp contiene agua por debajo de lo esperado; y el resto, Dpcell, Dacell y Rimp antes de que comience la tormenta indican alturas cercanas a 0 o incluso negativas. Este fenómeno se debe a que las arquetas no están plenamente selladas y se vacían, ya sea porque el agua se evapora o se fuga por el suelo y/o las paredes. Consecuentemente, el proceso en estas arquetas es el siguiente: se llenan con el drenaje pluvial, cuando alcanzan la cota de vertido evacuan el agua por el vertedero, cuando la altura del agua está por debajo se vacían. Es decir, cuando el sensor mida una altura mayor de 0 el agua se infiltra y existen pérdidas que hay que contabilizar.

En resumen, el caudal de salida en las arquetas bien selladas es el correspondiente al caudal evacuado por el vertedero hacia la red de drenaje y en el resto es el caudal del vertedero más el caudal correspondiente a las pérdidas por infiltración. Para determinar las pérdidas existentes en estas

arquetas se han utilizado las mediciones del nivel adquiridas por el sensor. Se ha considerado que cuando el nivel de agua está por debajo del nivel de vertido, el decremento del nivel es equivalente a las pérdidas existentes en esa arqueta.

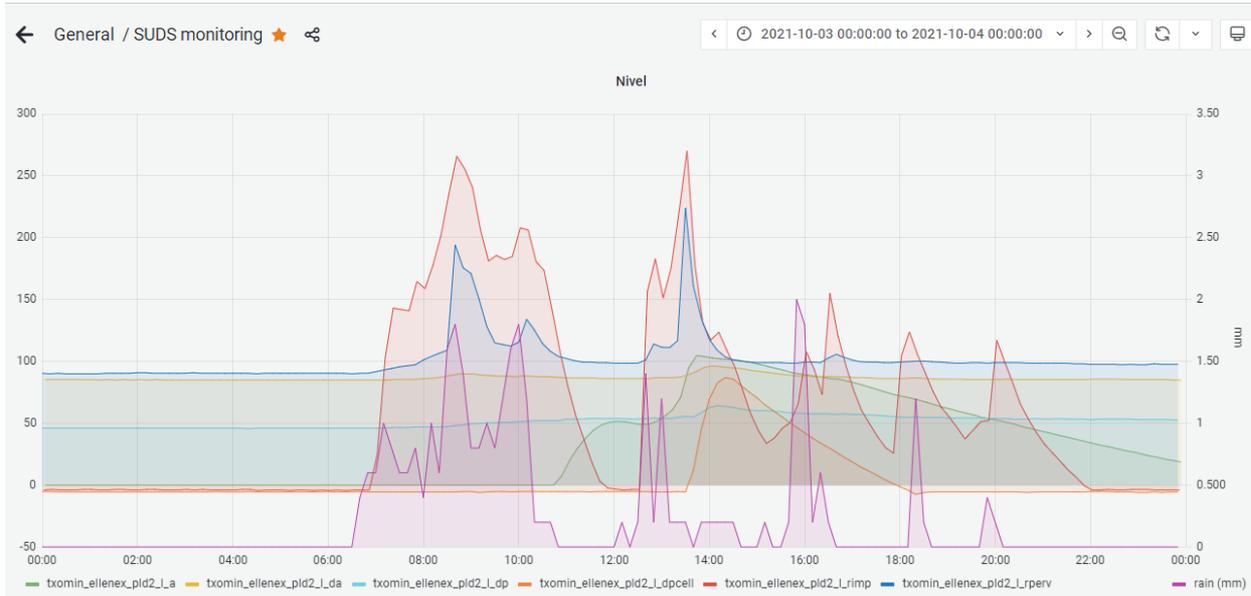


Figura 19. Visualización de los datos medidos por los sensores el 03-10-2021 en la plataforma Grafana.

Para simplificar su presentación se han tomado tres sucesos de lluvia representativos, procurando que fueran tormentas de diferentes magnitudes para analizar el comportamiento de los pavimentos según la intensidad de la precipitación: débil (menos de 2 mm/h), moderada (entre 2 y 15 mm/h) y fuerte (entre 15 y 30 mm/h). Asimismo, la disponibilidad de datos sensorizados para las seis arquetas en el mismo momento es bastante reducida y limitan el análisis de eventos considerablemente. Como última premisa, las tormentas escogidas han sido eventos espaciados por al menos 24 horas con la tormenta previa y posterior.

Tabla 3. Características de los eventos pluviales analizados

Evento pluvial	Fecha	Precipitación acumulada (mm)	Duración (h)	Intensidad (mm/h)
R1	15/09/2021	99,4	9,3	10,69
R2	03/10/2021	34	13,3	2,56
R3	15/11/2021	2,2	1,9	1,2

a. Caudal de salida

Se muestra la respuesta hidrológica de los tres eventos analizados. Principalmente, se observan dos características comunes: la notable reducción del caudal que producen los pavimentos permeables en los dos regímenes de lluvia escogidos y la semejanza entre ellos.

El intervalo de cada barra de lluvia muestra los datos recogidos cada 10 minutos por el pluviómetro ubicado en Miramón.

R1 15/09/2021

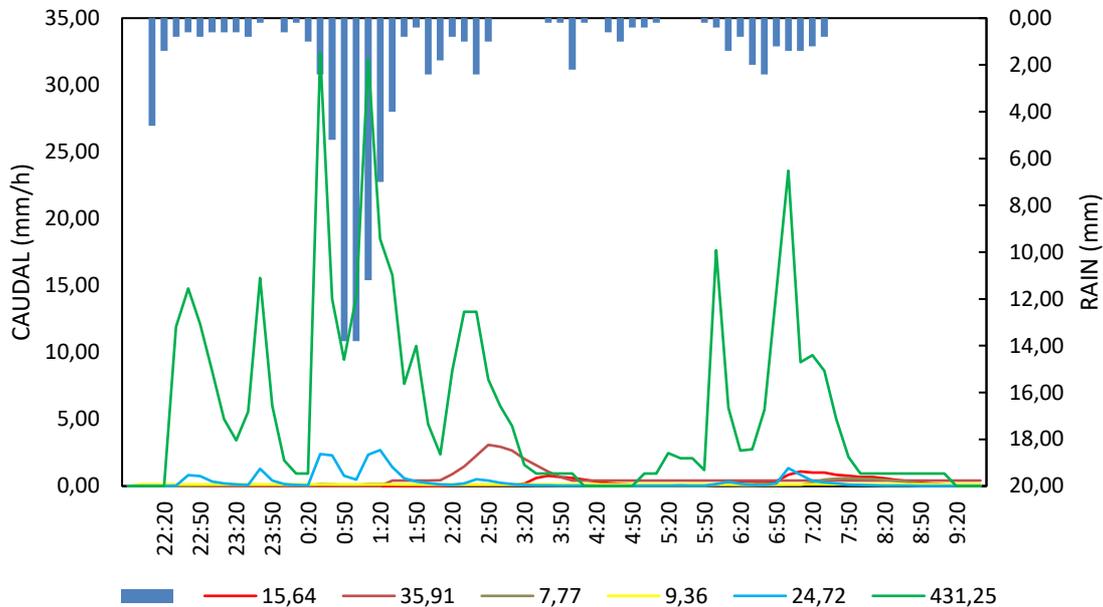


Figura 20. Respuesta hidrológica de los pavimentos el 15/09/2021.

La tormenta que tuvo lugar aquel día es la mayor registrada en el periodo de medición (ver Figura 18). El comportamiento hidráulico de las zonas donde está instalado el suelo formado por capas de material poroso evacua caudales del orden de 0-3,5 mm/h frente al valor de la zona permeable, alrededor de 30 mm/h. La reducción del caudal entre los puntos máximos (caudal pico) que se miden en cada caso alcanza una cuota del 90%. Este dato es importante porque repercute en el diseño de las redes de drenaje. El proceso para su dimensionamiento involucra múltiples factores, entre ellos, la impermeabilidad del suelo requiere de sistemas más elaborados preparados para conducir elevados volúmenes de agua además de alcantarillado para descongestionar los flujos de escorrentía.

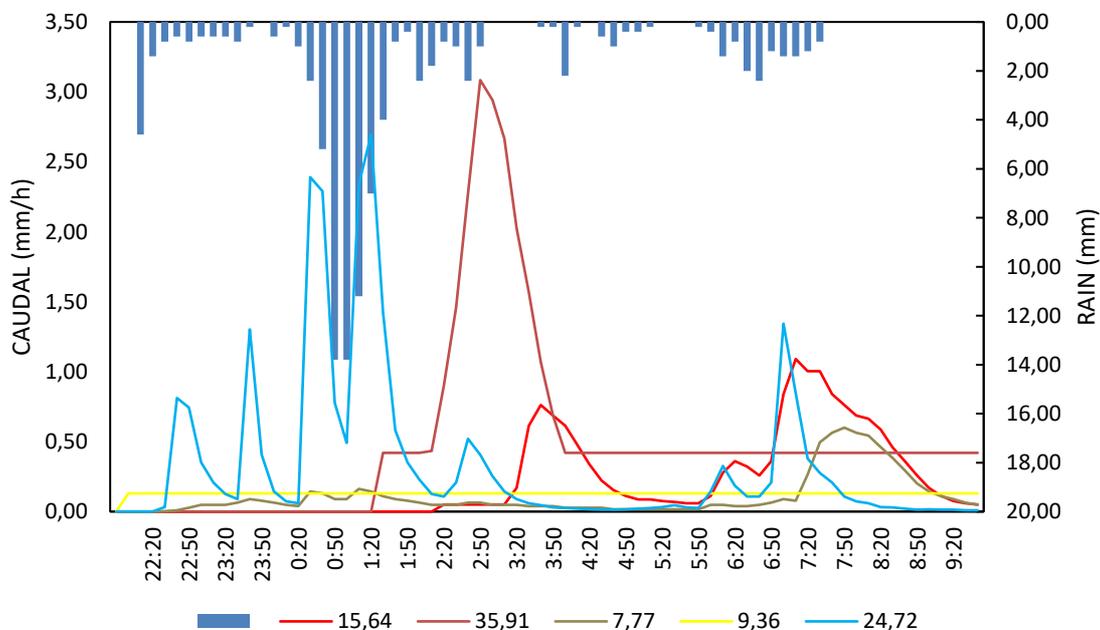


Figura 21. Respuesta hidrológica de los pavimentos permeables el 15/09/2021.

En el gráfico superior se percibe en detalle la respuesta de cada tipología permeable. El tiempo de respuesta de ellos es mayor que en el suelo convencional, así mediante la infiltración vertical del agua se disminuye la velocidad de flujo y aumenta el tiempo de residencia del agua. Es más, la escorrentía en el suelo impermeable se aprecia instantes después que comience la lluvia mientras que, en el suelo permeable, su aparición es lenta y toma hasta 2 horas después del momento inicial.

R2 03/10/2021

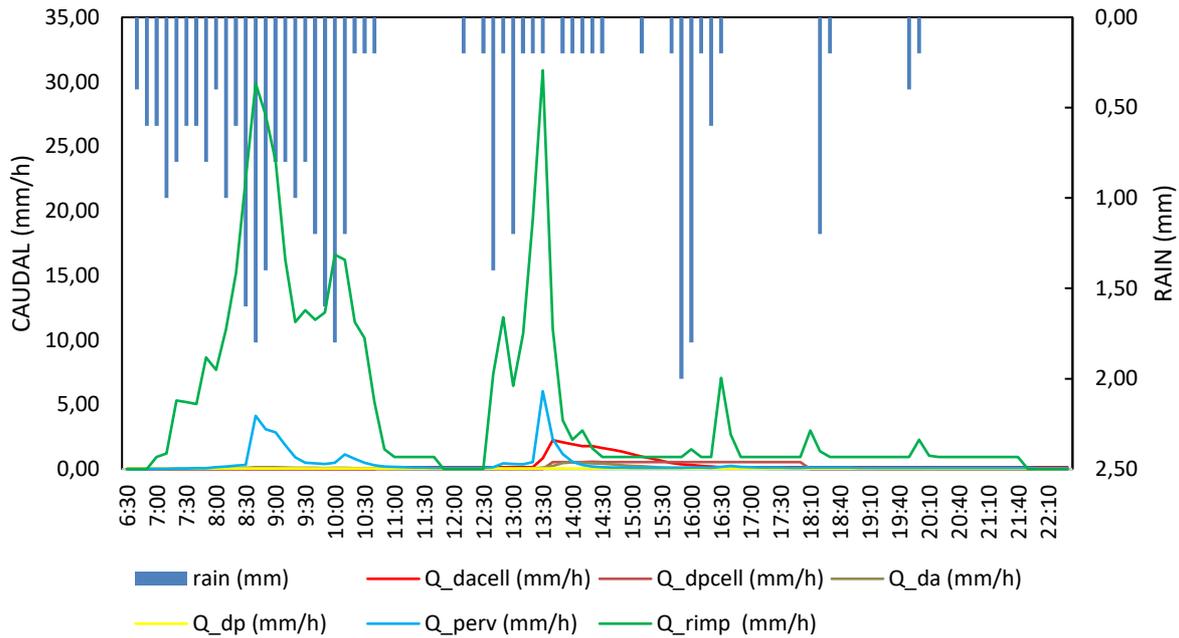


Figura 22. Respuesta hidrológica de los pavimentos el 03/10/2021.

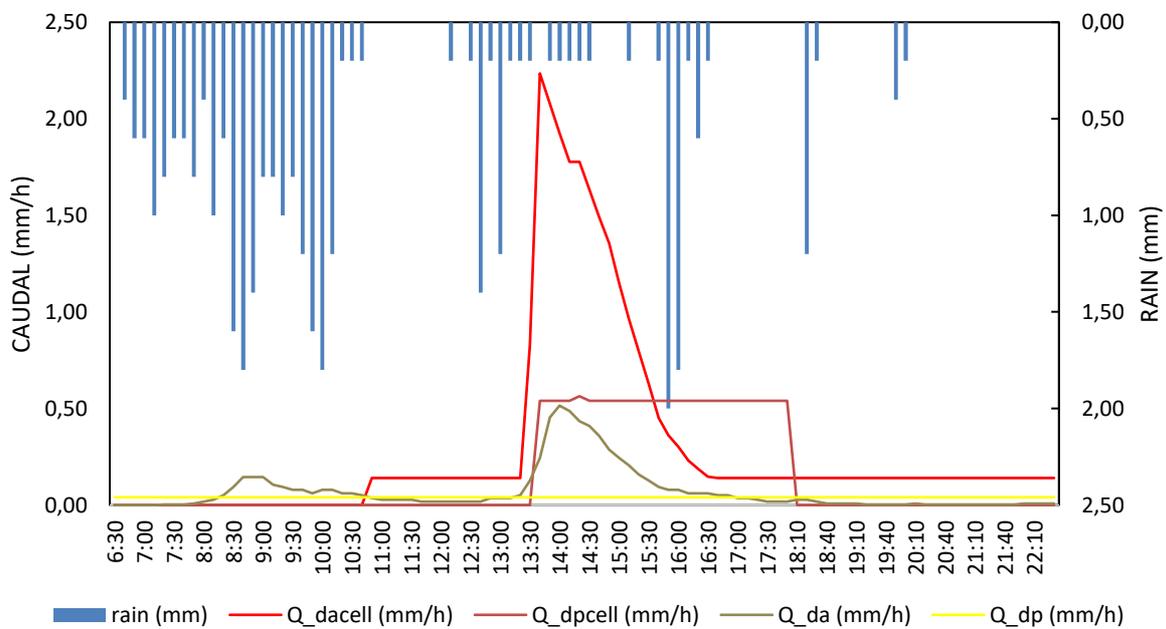


Figura 23. Respuesta hidrológica de los pavimentos permeables el 03/10/2021.

Al igual que sucede en el caso precedente la respuesta del pavimento permeable es eficiente en la gestión de agua, se produce una reducción del 77 % en la comparación de caudales punta. Por otro lado, los pavimentos Dacell y Dpcell construidos con una capa de celdas de 52 mm disminuyen la velocidad y retrasan el flujo del agua. La malla construida en polipropileno almacena temporalmente el agua para su posterior canalización.

R3 15/11/2021

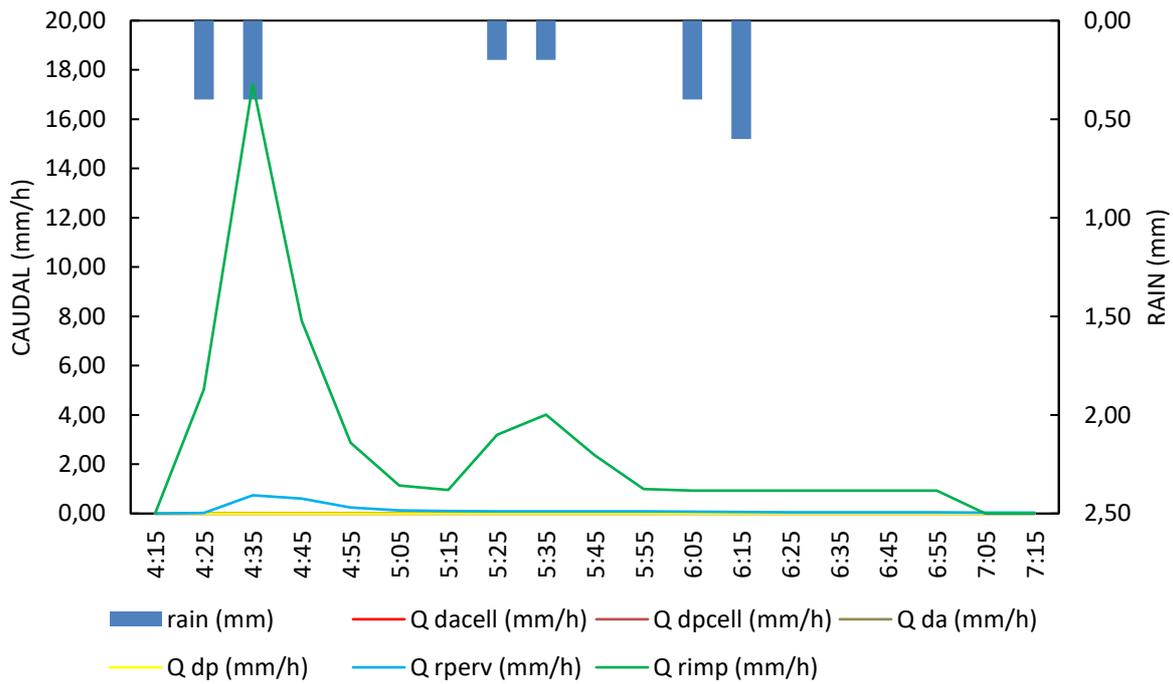


Figura 24. Respuesta hidrológica de los pavimentos el 15/11/2021.

Las salidas que se observan en precipitaciones ligeras (hasta 2 mm/h) solo contemplan el agua de escorrentía. Tal y como se esperaba, por el suelo impermeable escurre el agua horizontalmente hasta el sistema de alcantarillado y por tanto cargando la red de drenaje de un volumen elevado. A diferencia, la escorrentía generada en el suelo permeable es despreciable y el valor que se recoge pertenece a la lluvia caída directamente sobre la rejilla de alcantarillado o canaleta. Los suelos permeables por lo tanto filtran el agua que cae sobre ellos y previenen el flujo del agua superficial. En definitiva, queda demostrado que cuando llueve poco gestionan el drenaje pluvial eficientemente y sin necesidad de verterla a la red de drenaje. La reducción del caudal punta en el suelo permeable frente al convencional alcanza un 96%.

b. Volumen de salida

Se considera volumen de salida la cantidad de agua recogida en total en cada intervalo de 10 minutos. Este valor integra el volumen vertido a la red e infiltrado por las arquetas.



R1 15/09/2021

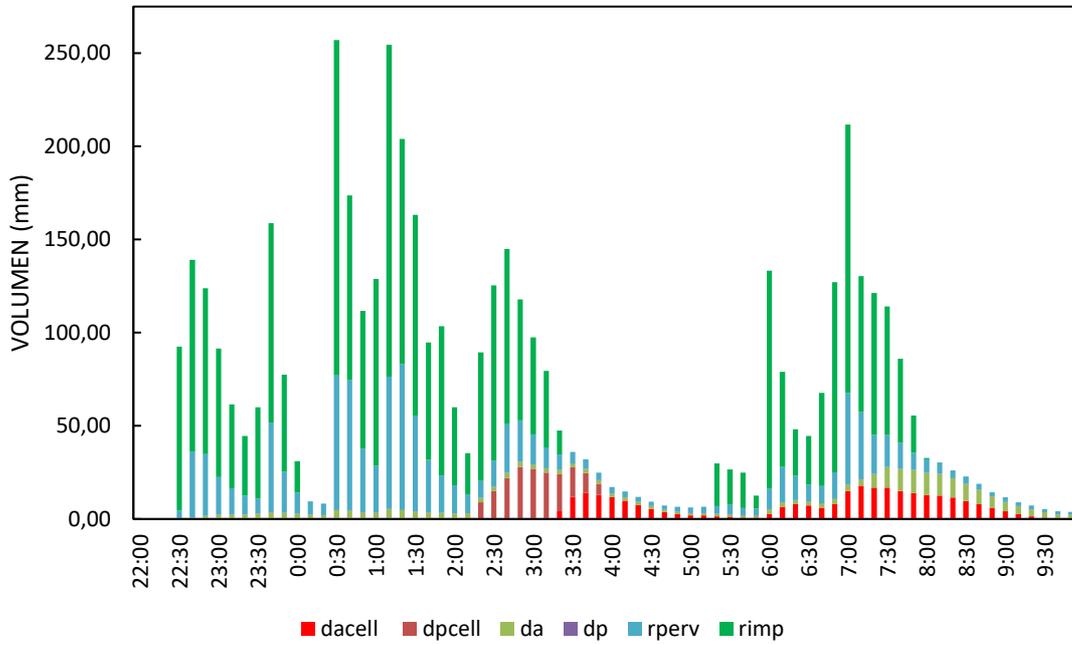


Figura 25. Volumen de salida de los pavimentos el 15/09/2021.

R2 03/10/2021

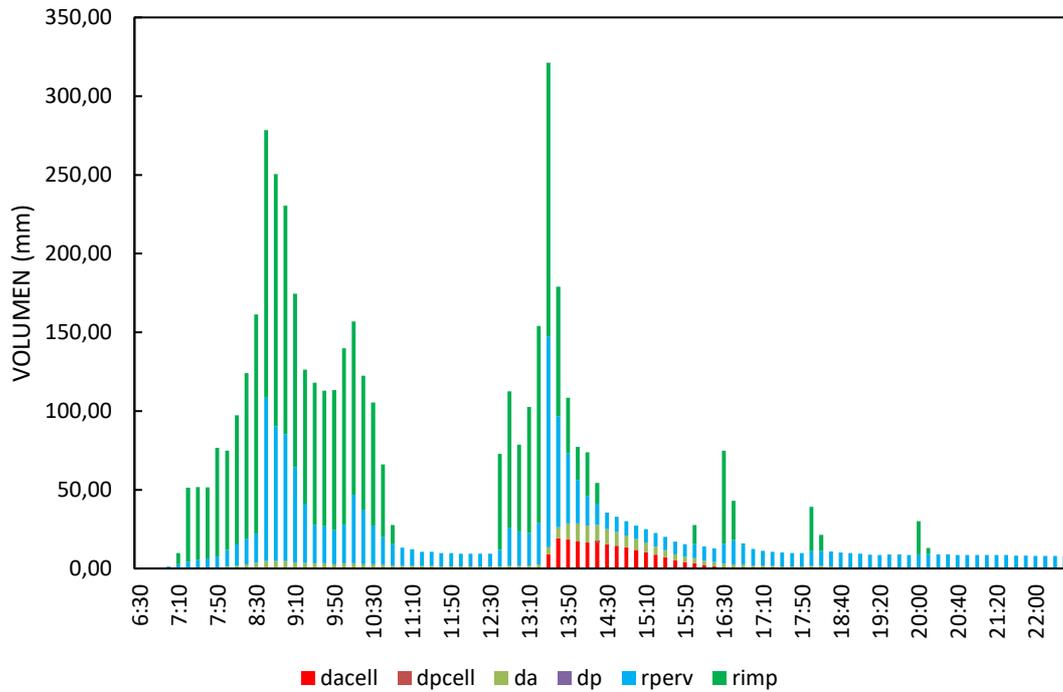


Figura 26. Volumen de salida de los pavimentos el 03/10/2021.

R3 15/11/2021

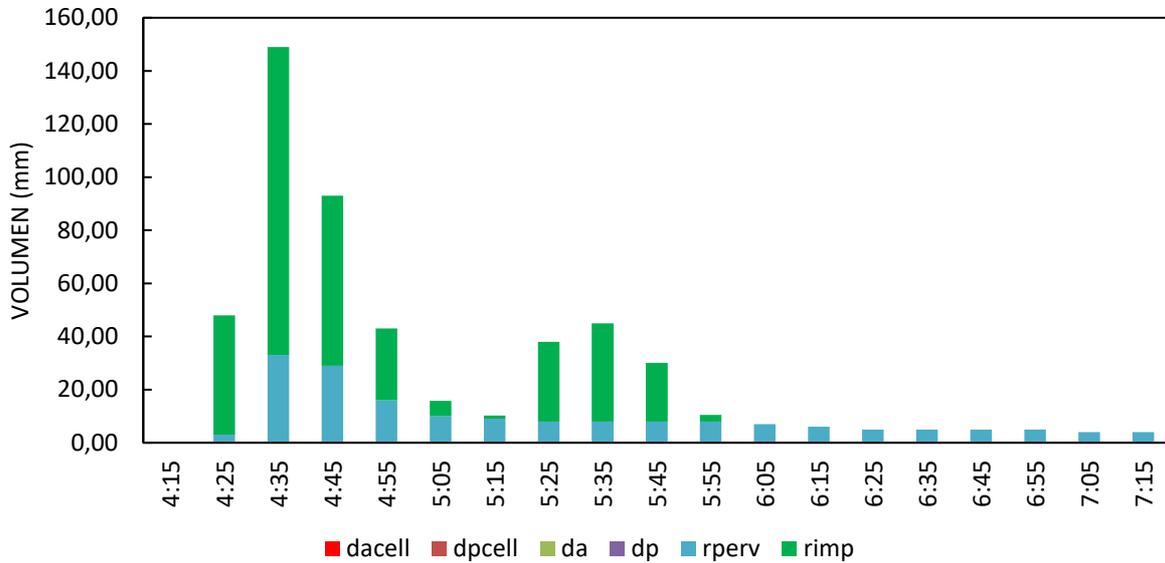


Figura 27. Volumen de salida de los pavimentos el 15/11/2021.

Las reducciones en volúmenes de salida, como ocurre con los caudales, son significativas. Algunas arquetas sufren pérdidas por infiltración por lo que el volumen de vaciado se ha contabilizado. Como resultado se obtiene una disminución del 39%, 30% y 51% respectivamente.

c. Monitorización de la instalación: buenas prácticas

La importancia en el diseño y dimensionamiento del área por monitorizar reside en maximizar sus prestaciones y evitar problemas de mal adaptación que perjudique la eficiente toma de datos. El caso en estudio inicialmente fue equipado para medir la altura de agua drenada a través del pavimento permeable y la escorrentía recogida por la canaleta. Conociendo la variación de cota se puede calcular el caudal de salida. Otros casos experimentales se centran en la medición de la calidad del agua tras ser depurada por el trascurso de las diferentes capas permeables y otras analizan la progresión de la degradación del suelo.

El análisis de los datos recogidos ha permitido observar qué decisiones podrían optimizar el funcionamiento de una infraestructura similar. Los datos almacenados en el servidor emitidos por los sensores han evidenciado las siguientes consideraciones:

- En ocasiones el sensor ubicado sobre el suelo, es decir cota 0, mide niveles de agua negativos. Este efecto se debe a que cuando la arqueta está completamente vacía la presión del interior puede llegar a ser inferior a la presión atmosférica exterior. En estos casos, se ha tomado como valor de medición 0.
- Los sensores, que funcionan a batería, frecuentemente se encuentran descargados impidiendo la medición de datos.
- Inicialmente, se dispuso un vertedero triangular de 30°. En la puesta a punto se comprobó que

para los caudales esperados resultaba ineficiente por lo que se optó por situar una placa con un agujero con forma de U pegado a este.

- Las arquetas de construcción en primera instancia estaban diseñadas para que fueran un depósito estanco que estuviera totalmente impermeabilizado en contacto con el terreno. Así, el caudal de salida solo sería el que fluye por el vertedero hacia la red de saneamiento. No obstante, solamente dos de las seis arquetas muestran datos que no evidencian pérdidas por infiltración. La comparación de pavimentos se condiciona por este obstáculo.
- El agua que fluye horizontalmente en un suelo impermeable se conoce bajo el término escorrentía. Colocando unas rejillas de alcantarillado rodeando la zona de control se mide la cantidad de esta. Sin embargo, se sabe que los suelos permeables previenen la aparición de ella. En este caso, la rejilla que pretende medirla solo recoge la lluvia que cae sobre su superficie desmitificando su propósito.
- La trascendencia de una buena limpieza y mantenimiento de los suelos permeables es objeto de muchos estudios. A pesar de que la implantación se realizó hace apenas dos años no se ha considerado un plan de conservación. El estado del suelo en la actualidad podría mejorarse con la retirada de la maleza y limpieza. Asimismo, los objetos de mobiliario urbano tales como farolas o bancos instalados reducen el área útil.



Figura 28. Instantáneas tomadas en julio de 2023 de la zona permeable donde están ubicados los bancos

La consideración de estas cuestiones en una implantación de nueva construcción que sea monitorizada ceñiría la comparación de la respuesta hidráulica de las diferentes configuraciones. De la misma manera, este caso de estudio presenta potencial para analizarlo en profundidad. El breve periodo del que se tienen datos para las seis variables limita la evaluación de datos, se recomienda un espectro de tiempo más amplio y preciso que comprenda otras estaciones meteorológicas.



CONCLUSIONES

La mayoría de los pavimentos permeables monitorizados han recogido datos de los primeros 1-2 años de instalación. Este breve periodo, solo refleja los resultados en el estado inicial de la instalación. Resulta evidente que para obtener información suficientemente contrastada sobre las características hidrológicas de un sistema de pavimento permeable sería necesario extender la toma y análisis de datos reales en una serie de condiciones específicas tales como eventos de precipitaciones intensas y duraciones variables y en cambios estacionarios. La disponibilidad de datos del caso en estudio, limitado a verano y otoño de un año reduce el análisis a un periodo breve e inconcluso. Es más, es conveniente que se realicen proyectos demostrativos en la región atlántica donde el régimen de lluvias es abundante para extraer conclusiones sobre el tipo de pavimento más efectivo.

El análisis comparativo realizado permite concluir que el pavimento permeable ubicado en Txomin-Enea tiene un comportamiento positivo, la infiltración al terreno del agua pluvial alivia la presión sobre las redes de drenaje en periodos de precipitaciones intensas, permite racionalizar el dimensionamiento de estas redes y mejora la calidad ambiental del espacio con un bajo impacto energético y económico.

Los resultados extraídos de los tres eventos de lluvia seleccionados muestran que en general las eficiencias obtenidas son muy elevadas, especialmente en la reducción del caudal punta donde se alcanzan valores que superan el 80%. La capacidad de estos pavimentos para mitigar eventos de lluvia es considerable disminuyendo el volumen generado y aumentando el tiempo de residencia del agua. En régimen de lluvia ligeros, el acabado permeable demuestra su valor gestionando el agua correctamente sin siquiera verter a la red de drenaje. En precipitaciones más cuantiosas por consiguiente maneja la infiltración aumentando el tiempo de residencia del agua y ralentizando el vertido de salida. Así, los caudales formados son significativamente más bajos que en los de un entorno urbano impermeabilizado. La colocación de celdas de plástico en la última capa del suelo permeable demuestra que efectivamente ralentizan el flujo de agua, aunque su uso podría resultar más conveniente en pavimentos que soporten cargas estructurales mayores. Comparando los resultados obtenidos en San Sebastián con el caso de estudio localizado en Granada, este obtuvo una reducción del 96% siendo el pavimento más efectivo el formado por rejilla de hierba.

Como líneas futuras de investigación, se contempla la puesta a punto de la infraestructura para registrar eventos más extremos ya que las precipitaciones observadas no han sido muy elevadas. Disponer de una serie histórica de datos, soporta el análisis de la reducción de inundaciones generadas por la implantación de estos pavimentos y facilita la estimación de ahorro económico que se producirá en la gestión y operación de los sistemas de alcantarillado. De igual manera, la infraestructura puede equiparse para la medición de la calidad del agua después de la infiltración por el terreno permeable, la capacidad filtrante de las capas granulares y geotextiles elimina sedimentos y contaminación, o la degradación de la permeabilidad y colmatación de las capas expuestas.

La expansión de prácticas sostenibles para el manejo de agua se ve limitada por la falta de proyectos demostrativos en ciertos lugares con un seguimiento adecuado. La promoción de cualquier innovación en el proceso viene precedida por evidencias que demuestren sus beneficios y costes, así administraciones públicas e industria se inclinarán en invertir en la construcción de zonas permeables o la promoción de sistemas de drenaje sostenible. Las conclusiones obtenidas revelan cómo una pequeña zona puede jugar un papel decisivo en la restauración de las ciudades en espacios sostenibles que no perjudiquen la habitabilidad en ellas. La configuración de pavimento permeable es una técnica flexible y que no requiere espacio adicional, en el mercado se encuentran numerosas tipologías de acabado



adaptables a múltiples ubicaciones. La recomendación de aumentar el área de suelo permeable urbano para reducir el impacto causado por el sellado beneficia a los habitantes de una ciudad garantizando las condiciones de servicio en eventos excepcionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Ajuntament de Barcelona. (2020). *Guia tècnica per al disseny de SUDS a Barcelona*. Comissió de SUDS de l'Ajuntament de Barcelona. Recuperado en julio de 2023 de https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/sites/default/files/PlecPrescripcionsTecniquesDrenatge_Guia.pdf
- Ballard, B. W., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellaguer, R. (2015). *The SUDS Manual*. CIRIA. <http://www.scotsnet.org.uk/documents/nrdg/ciria-report-c753-the-suds-manual-v6.pdf>
- Chow, V. T. (1993). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Comisión Europea. (2012). *Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo*. Documento de trabajo de los servicios de la comisión. Recuperado en julio de 2023 de <https://circabc.europa.eu/ui/welcome>
- Confederación Hidrográfica del Cantábrico. (2022). Propuesta de proyecto de plan hidrológico de la demarcación hidrográfica del Cantábrico Oriental, Revisión para el tercer ciclo: 2022-2027, Normativa. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, y Agencia Vasca del Agua. Recuperado en julio de 2023 de https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/plan_hidrologico_2022_2027/es_def/adjuntos/3_NORMATIVA_PH_COriental_20220726.pdf
- Connor, J. P., Galletti, C. S., & Chow, W., T., L. (2013). Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperatura in Phoenix, Arizona. *Landscape Ecology*, 28, 271-283. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-012-9833-1>
- Diputación Foral de Gipuzkoa. (s.f.). *Ciclo urbano del agua*. Abastecimiento y saneamiento. Recuperado en julio de 2023 de <https://www.gipuzkoa.eus/es/web/obrahidraulikoak/abastecimiento-y-saneamiento/ciclo-urbano-del-agua>
- FAO. (2023). *Access data on the 21 SDG indicators under FAO custodianship at the global, regional and country levels*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado en julio de 2023 de <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/642/es/>
- Fernández-Gonzalvo, M., Hernández-Crespo, C., Martín, M., & Andrés-Doménech, I. (2021). Comparison of permeable pavements effluent under Atlantic and Mediterranean rainfall regimes: A mid-term laboratory experience. *Building and Environment*, 206, 108332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108332>
- Ferri, L. (2023). *Tipologías De Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible (SUDS)*. Paisaje y Medio Ambiente. Recuperado en julio de 2023 de <https://www.projargroup.com/tipologias-de-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds/>
- Fundación Conama. (2018). Agua y ciudad, sistemas urbanos de drenaje sostenible. Congreso Nacional del Medio Ambiente. Recuperado en julio de 2023 de <http://www.conama2018.org/web/index.php>
- Fomento San Sebastián. (2021). *Smart Txomin*. Proyectos Smart. Recuperado en julio de 2023 de <https://www.fomentosansebastian.eus/es/donostia-smart/proyectos-smart/smart-txomin>

- García-Haba, E., Rodríguez-Hernández, J., Andrés-Doménech, I., Hernández-Crespo, C., Anta, J., & Martín Monerris, M. (2022). Diseño de pavimentos permeables en España: situación actual y necesidades futuras. *Ingeniería Del Agua*, 26(4), 279-296. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.18290>
- Gimenez-Maranges, M., Pappalardo, V., La Rosa, D., Breuste, J., & Hof, A. (2020). The transition to adaptive storm-water management: Learning from existing experiences in Italy and Southern France. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102061. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102061>
- Green Blue Management. (2018). *Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres*. Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, Ayuntamiento de Madrid. Recuperado en julio de 2023 de <https://greenbluemanagement.com/proyectos/guia-de-diseno-de-suds-para-madrid/>
- Heneghan, E., Collier, M., & Kelly-Quinn, M. (2021). An evaluation of the potential applications of nature-based solutions for water quality protection: Ireland as a case study. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*, 121B(3), 147-162. <https://doi.org/10.1353/bae.2021.0015>
- Hernández-Crespo, C., Fernández-Gonzalvo, M., Martín, M., & Andrés-Doménech, I. (2019). Influence of rainfall intensity and pollution build-up levels on water quality and quantity response of permeable pavements. *Science of The Total Environment*, 684, 303-313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.271>
- Hidrología Sostenible. (s.f.). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible – SUDS*. Comunicación. Recuperado en julio de 2023 de <http://www.hidrologiasostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds/>
- Juntas Generales de Gipuzkoa. (2021). *Precipitaciones*. El clima. Recuperado en septiembre de 2023 de https://www.bngipuzkoa.eus/WAS/CORP/DJGPortalWEB/territorio_historico_de_gipuzkoa.jsp?id=040502&idioma=es#:~:text=El%20promedio%20anual%20de%20precipitaci%C3%B3n,c ar%C3%A1cter%20moderado%20de%20las%20temperaturas
- Madrazo-Uribeetxebarria, E., Garmendia-Antín, M., Almandoz-Berrondo, G. & Andrés-Doménech, I. (2023). Analysis of the hydraulic performance of permeable pavements on a layer-by-layer basis. *Construction and Building Materials*, 387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131587>
- Madrazo-Uribeetxebarria, E., Garmendia-Antín, M. & Meaurio, M. (2022). Zoladura iragazkorak, hirietako drainatze-sarean txertaturiko elementu gisa. *Ekaia, ale berezia 2022*, 91-107 <https://doi.org/10.1387/ekaia.23083>
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. (1986). Real Decreto 849/1986, de 11 de abril. <https://www.boe.es/buscar/pdf/1986/BOE-A-1986-10638-consolidado.pdf>
- MITECO. (2019). *Guías de adaptación al riesgo de inundación: sistemas urbanos de drenaje sostenible*. Ministerio para la transición ecológica, Gobierno de España. Recuperado en julio de 2023 de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/guia-adaptacion-riesgo-inundacion-sistemas-urbano-drenaje-sostenible_tcm30-503726.pdf
- Naciones Unidas. (2020). *El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático*. Noticias ONU. Recuperado en julio de 2023 de



<https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732>

- Perez, C. S., Castro, D. C., Ramírez, K. A., Cuervo, L. P., & Upegui, E. (2019). Crecimiento urbano e impermeabilización del suelo alrededor de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, en la ciudad de Bogotá. *Ambiente y Desarrollo*, 23(44), 1-16. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd23-44.cuis>
- RAE. (2022). *Definición de agua*. Diccionario de la lengua española. Recuperado en julio de 2023 de <https://dle.rae.es/agua?m=form>
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. *Boletín Oficial del Estado*, 103, de 30 de abril de 1986. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1986/04/11/849/con>
- RedSUDS (2022). *Tipología*. Recuperado en septiembre de 2023 de <https://redsuds.es/alcorques-de-infiltracion/>
- 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. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 7774. <https://doi.org/10.3390/ijerph17217774>
- Rodríguez-Rojas, M. I., Huertas-Fernández, F., Moreno, B., Martínez, G., & Grindlay, A. L. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.075>
- Sambito, M., Severino, A., Freni, G., & Neduzha, L. (2021). A Systematic Review of the Hydrological, Environmental and Durability Performance of Permeable Pavement Systems. *Sustainability*, 13(8), 4509. <https://doi.org/10.3390/su13084509>
- Sañudo-Fontaneda, L. A., Andres-Valeri, V. C., Costales-Campa, C., Cabezon-Jimenez, I., & Cadenas-Fernandez, F. (2018). The Long-Term Hydrological Performance of Permeable Pavement Systems in Northern Spain: An Approach to the “End-of-Life” Concept. *Water*, 10(4), 497. <https://doi.org/10.3390/w10040497>
- Sirishantha, U., & Rathnayake, U. (2017). Sustainable urban drainage systems (SUDS – What it is and where do we stand today? *Engineering and Applied Science Research*, 44(4), 235-241. https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_DOI=10.14456/easr.2017.36
- Suriya, S., & Mudgal, B. V. (2012). Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. *Journal of Hydrology*, 412-413, 210-219.
- UNESCO. (2021). *El valor del agua*. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Recuperado en julio de 2023 de <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es>
- UNESCO. (2019). *No dejar a nadie atrás*. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Recuperado en julio de 2023 de <https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr/2019>
- Universidad Europea (2023). *Urbanismo sostenible: una transformación ecológica y social*. Arquitectura y Diseño. Recuperado en julio de 2023 de <https://universidadeuropea.com/blog/urbanismo-sostenible/>