

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE
SANEAMIENTO Y DRENAJE EN UN ÁREA
DE LA CIUDAD DE TUDELA



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

Trabajo Fin de Grado

Estudiante: Diego Ilarri Pérez

Directora: Idoya Lacosta Gavari

Tudela, 11 de junio de 2021

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Agradecemos la colaboración prestada por NILSA y por todo su personal técnico. Su buena disposición ha sido de gran ayuda para la realización de este Trabajo de Fin de Estudios.

RESUMEN

Este trabajo tiene por objetivo diseñar un modelo de rehabilitación del sistema de drenaje urbano de un área de la ciudad de Tudela. En la actualidad, los nuevos proyectos de rehabilitación de drenajes contemplan la implantación de técnicas sostenibles, buscando siempre una transformación de la ciudad que permita cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible propuestos para 2030. El trabajo compara las variaciones que se producen tanto en el volumen de escorrentía como en la concentración de sus contaminantes. Para la modelización se utiliza el software profesional SWMM (Storm Water Management Model), desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency). Se proponen cuatro situaciones de actuación diferentes y se analiza en qué medida las técnicas de drenaje urbano sostenible tienen un impacto relevante. Los resultados muestran que estas tecnologías sirven de apoyo de forma eficiente a la red de drenaje convencional.

PALABRAS CLAVE

Gestión integrada del agua, inundación, escorrentía, drenaje urbano sostenible, SuDS, LID.

ABSTRACT

The objective of this project is to design a model for the rehabilitation of the urban drainage system in an area of the city of Tudela. Currently, new drainage rehabilitation projects contemplate the implementation of sustainable techniques, always seeking to transform the city in order to meet the sustainable development objectives proposed for 2030. The project compares the variations that occur in both the volume of runoff and the concentration of its pollutants. The modelling uses the professional software SWMM (Storm Water Management Model), developed by the EPA (Environmental Protection Agency). Four different scenarios are proposed and the extent to which sustainable urban drainage techniques have a relevant impact is analysed. The results show that these technologies efficiently support the conventional drainage network.

KEY WORDS

Integrated water management, flooding, runoff, sustainable urban drainage, SuDS, LID.

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	7
1.- INTRODUCCIÓN	1
2. LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	2
3.- OBJETIVOS	6
4.- LA CLIMATOLOGÍA DE LA RIBERA DEL EBRO	6
4.1. Descripción de la climatología	6
4.2. Descripción de las precipitaciones	7
4.4. Previsión de la evolución de la pluviometría	8
5.- EL CICLO DEL AGUA	10
5.1. El ciclo natural del agua	11
5.2. El ciclo urbano del agua	12
5.2.1. Incidencia de la urbanización en el ciclo del agua	12
5.2.2. Las inundaciones	13
6.- EL DRENAJE URBANO SOSTENIBLE	17
6.1. Las limitaciones del drenaje urbano convencional	18
6.2. Introducción al drenaje urbano sostenible	18
6.2.1. Aclaraciones sobre la terminología	20
6.2.2. Principios generales de las técnicas LID	20
6.2.3. La gestión jerarquizada del agua	22
6.3. Ventajas e inconvenientes de las técnicas de drenaje sostenible	24
6.4. Descripción de las técnicas LID	28
6.4.1. Técnicas que no implican cambios estructurales	28
6.4.2. Técnicas que implican cambios estructurales	29
6.5. Marco normativo	34
7. PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	36
7.1. Descripción y características de la cuenca urbana de Tudela	37
7.2. Hidrología de la zona	37
7.2.1. Pluviometría	38
7.2.2. Proceso lluvia-escorrentía	39
7.3. Descripción de la red de drenaje actual	41
7.4. Elección de las subcuencas	43

<i>8.- EL SOFTWARE SWMM5.1</i>	43
8.1. Descripción del software	44
8.2. Modelado del estudio.....	45
8.3. Modelado de los elementos LID	47
8.3.1. Tipología de los elementos LID.....	47
<i>9.- METODOLOGÍA DEL TRABAJO</i>	52
<i>10.- RESULTADOS</i>	61
10.1. Resultados relativos al caudal	61
10.1.1. Situación 0	62
10.1.2. Situación 1	64
10.1.3. Situación 2	66
10.1.4. Situación 3	67
10.2. Comparativa de resultados en las distintas situaciones	69
10.2.1. Resultados relativos al caudal	69
10.2.2.- Resultados relativos a la infiltración	70
10.2.3. Resultados relativos a la calidad del agua.....	71
10.2.4. Resultados relativos a la sobrecarga de la red de drenaje.....	73
<i>11.- CONCLUSIONES</i>	75
<i>12.- FUTURAS INVESTIGACIONES</i>	78
<i>13.- BIBLIOGRAFÍA</i>	78
<i>ANEXO I</i>	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Representación del ciclo del agua	11
Ilustración 2. Alteración del ciclo del agua al impermeabilizarse una cuenca rural (según el porcentaje). Elaboración propia con datos recogidos del trabajo de Miguel Valbuena Villalonga [13].....	13
Ilustración 3. Comparativa del ciclo del agua en el caso previo a la urbanización (A), posterior a la urbanización (B) y con la aplicación de técnicas de drenaje urbano sostenible (C) [21]	19
Ilustración 4. Fundamentos básicos que persigue una configuración integral de técnicas SuDS dentro de un entorno urbano. Basado en el Manual de CIRIA [22]	21
Ilustración 5. Cadena de gestión del agua en un sistema de drenaje urbano sostenible. 23	
Ilustración 6. Distribución de los hábitats de interés comunitario [25].....	38
Ilustración 7. Plano de Tudela con la red de saneamiento y depuración NILSA [25] ...	42
Ilustración 8. Plano de Tudela, centrado en el barrio de Lourdes, con las subcuencas a estudiar	43
Ilustración 9. Esquema de modelización de una celda de bio-retención en el software SWMM5.1	48
Ilustración 10. Esquema de modelización de un jardín de lluvias en el software SWMM5.1	48
Ilustración 11. Esquema de modelización de un tejado verde en el software SWMM5.1	49
Ilustración 12. Esquema de modelización de una trinchera de infiltración en el software SWMM5.1	50
Ilustración 13. Esquema de modelización de un pavimento permeable en el software SWMM5.1	50
Ilustración 14. Esquema de modelización de un depósito de lluvias en el software SWMM5.1	51
Ilustración 15. Esquema de modelización de una desconexión de bajante de tejados en el software SWMM5.1	51
Ilustración 16. Esquema de modelización de una cuneta verde en el software SWMM5.1	52
Ilustración 17. Modelización 3D de jardín de lluvia en SolidWorks 2020	55
Ilustración 18. Modelización 3D de celda de bio-retención en SolidWorks 2020	56
Ilustración 19. Modelización 3D de desconexión de bajantes de tejados en SolidWorks 2020	57
Ilustración 20. Localización de las subcuencas sin la aplicación de técnicas LID.....	58
Ilustración 21. Localización del jardín de lluvia dentro de la subcuenca 1	59
Ilustración 22. Localización del jardín de lluvia y la celda de bio-retención dentro de la subcuenca 1 y 2, respectivamente.....	60
Ilustración 23. Localización del jardín de lluvia, la celda de bio-retención y los tejados con desconexión de bajantes dentro de la subcuenca 1 y 2, respectivamente	61

Ilustración 24. Representación de la carga de los colectores y la inundación de nodos en la cuenca de estudio.....	62
Ilustración 25. Imágenes de la Avenida Zaragoza después de la tormenta [28]	63
Ilustración 26. Representación de la carga de los colectores y la inundación de nodos	65
Ilustración 27. Representación de la carga de los colectores y la inundación de nodos	66
Ilustración 28. Representación de la carga de los colectores y la inundación de nodos	68

1.- INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para los seres vivos. Está también en la base del desarrollo agrícola e industrial de los pueblos y juega un gran papel en el bienestar físico y emocional de las personas. En las ciudades, el agua puede transformar espacios y ejercer un impacto positivo en el microclima de determinadas áreas urbanas.

En una cuenca natural, el agua se integra en el entorno según el llamado ciclo natural del agua en el que una parte de la lluvia caída se infiltra de forma natural en el terreno, mientras que otra se evapora según los parámetros climatológicos de cada área. En los episodios de lluvia intensa, la cantidad de agua que no se infiltra o evapora, circula por la superficie de la tierra.

Sin embargo, la transformación de las cuencas naturales en urbanas reduce la capacidad de infiltración del suelo, aumentando de forma importante la escorrentía. El modelo tradicional de tratamiento de dicha escorrentía ha sido su ocultación y eliminación final a través de drenajes urbanos subterráneos, habitualmente uniendo el agua pluvial a las aguas residuales urbanas mediante redes unitarias.

Esta gestión poco sostenible de los recursos hídricos aborda el tratamiento de las aguas pluviales como si fueran residuales, por lo que no se aprovechan. Además, el destino final de dicha escorrentía es la depuradora de aguas residuales, lo cual hace que deban ser sometidas a un tratamiento que encarece la gestión del agua. La situación se agrava cuando ocurren episodios de lluvia intensa o torrencial. A los problemas descritos anteriormente se añade que la escorrentía producida arrastra los contaminantes depositados sobre la superficie durante los periodos secos. Estos contaminantes tienen características específicas que requerirían de tratamientos que muchas veces no pueden realizarse, por lo que acaban siendo vertidos al medio sin tratamiento. Además, el exceso de agua en superficie importantes sobrecargas en la red y en muchas ocasiones, inundaciones que producen cuantiosos daños económicos e incluso humanos.

Estos problemas, unidos a las consecuencias que el cambio climático está generando en los patrones pluviométricos han forzado un cambio de paradigma en la gestión del agua en las ciudades. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) proponen modelos de ciudades sostenibles y resilientes que sean capaces de, en la medida de lo posible, restaurar el ciclo natural del agua. Las técnicas de drenaje urbano sostenible tratan de recuperar el comportamiento de la cuenca previo a la urbanización, preservando el ciclo natural del agua.

En este trabajo se va a hacer una propuesta de modelización de drenaje de un área de la ciudad de Tudela, analizando el impacto que tendría la implantación de técnicas de drenaje urbano sostenible, considerando los beneficios e inconvenientes resultantes y evaluando en qué medida son una alternativa real para la gestión integral del agua.

2. LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En septiembre de 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas, en su Resolución 70/1 Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [1], estableció que los 17 objetivos y las 169 metas de la Agenda 2030 debían ser objeto de seguimiento y para ello, definió un conjunto de indicadores que pudieran ser medibles a nivel mundial.

Con posterioridad, en su Resolución A/RES/71/313, la misma asamblea definió dichos indicadores y recomendó que los sistemas estadísticos de cada país fueran los instrumentos adecuados para integrar los datos que surgiesen de dicho seguimiento. El marco de indicadores mundiales está constituido por 231 indicadores distribuidos entre los distintos objetivos y metas. Este conjunto es muy heterogéneo ya que contiene indicadores relativos a ámbitos económicos, sociales, medioambientales e institucionales. El resultado las mediciones realizadas por el INE¹ desvela que en España se ha alcanzado una tasa de cobertura del 60% sobre el total de indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) del marco global. Esto indica que, aunque estamos en el buen camino, todavía hay un amplio margen para la mejora e implementación de todas las acciones que desemboquen en una mejora de la situación actual. [1]

Esta es la razón por la que las Comunidades Autónomas, y Navarra entre ellas, han desarrollado planes estratégicos que incluyen el desarrollo de cada uno de los ODS mencionados. El Pleno del Parlamento de Navarra aprobó una Resolución por la que se insta al Gobierno de Navarra a realizar un estudio para determinar cuáles son las políticas, programas y actuaciones que está aplicando de cara a hacer frente a los retos que implica la Agenda 2030. Para su cumplimiento el Gobierno de Navarra adoptó un acuerdo por el que se crea una Comisión Interdepartamental para la realización de un informe sobre las políticas, programas y actuaciones del Gobierno de Navarra, de cara a hacer frente a los retos que implica la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible. [2]

Tras la constitución de dicha Comisión Interdepartamental, se han realizado los trabajos oportunos para la elaboración del informe, que recoge el estado actual de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Navarra, revisando por cada uno de ellos las orientaciones para la política interna de Navarra y para la de Cooperación al Desarrollo. [3]

La Universidad Pública de Navarra actúa de forma directa en el desarrollo de los ODS, impartiendo formación, proporcionando ayudas y estableciendo alianzas con entidades sociales. Tal es esta implicación, que la UPNA se ha situado la sexta universidad a nivel mundial en el ODS “hambre cero” (ODS02) gracias a su labor académica e investigadora y sus recursos para estudiantes, como se refleja en la clasificación Times

¹ Instituto Nacional de Estadística

Higher Education 2021. Además, en todos los ODS en conjunto, la UPNA se sitúa en el tramo entre las 200 y 300 mejores universidades de un total de 1.115 analizadas, lo que significa que está entre el 25% mejor. [4]

El Campus de Tudela, por su parte, como parte activa de la universidad, quiere contribuir también al desarrollo de dichos objetivos. Este trabajo se centra en la mejora de tres de los 17 ODS establecidos, concretamente en los objetivos 6, 9 y 11.

El objetivo 6 pretende garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todas las personas. La garantía de un suministro de agua de calidad es fundamental para el desarrollo de una sociedad. El carácter de recurso fundamental que tiene el agua hace que su cuidado sea imprescindible para alcanzar un desarrollo sostenible. [5] La necesidad de contar con agua de calidad, la convierte en una realidad económica y también en un bien público, base de la vida y de la economía.

La naturaleza semiárida de gran parte de la Ribera de Navarra y el creciente problema de desertificación, hace, además, que el ODS 06, este especialmente relacionado con el ODS 13 de lucha contra el cambio climático. Este trabajo se centra en los siguientes aspectos del objetivo 6:

	<p>Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todas las personas</p>
METAS	INDICADORES
6.3. Calidad de agua. Contaminación y agua residuales	<p>6.3.1. Proporción de los flujos de aguas residuales domésticas e industriales tratados de manera adecuada</p> <p>6.3.2. Proporción de masas de agua de buena calidad</p>
6.4. Uso eficiente de los recursos hídricos	<p>6.4.1. Cambio en el uso eficiente de los recursos híbridos con el paso del tiempo</p> <p>6.4.2. Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles</p>
6.5. Gestión integral de la gestión el agua	6.5.1. Grado de gestión integrada de los recursos hídricos
6. B. Participación de las comunidades locales	6.B.1. Proporción de dependencias administrativas locales que han establecido políticas y procedimientos operacionales para la participación de las comunidades locales en la gestión del agua y el saneamiento

Tabla 1. Metas e indicadores del ODS 06 abordados en el trabajo [5]

El trabajo realizado actuará en este objetivo mejorando la calidad del agua, reduciendo la contaminación de la escorrentía, modernizando el sistema de gestión actual del agua y devolviendo a la zona urbana el ciclo hidrológico previo.

El objetivo 9 pretende potenciar y construir infraestructuras resilientes, así como promover la innovación a este respecto. Hay que recordar que el nivel de desarrollo de una comunidad se mide por el desarrollo de sus infraestructuras. De hecho, el desarrollo de infraestructuras sostenibles y de calidad debe ser un estímulo para la recuperación económica de los territorios. [6]

En la Tabla 2 se recogen los aspectos en los que este trabajo contribuye al estudio de dichas infraestructuras.

 <p>9 INDUSTRY, INNOVATION AND INFRASTRUCTURE</p>	<p>Construir Infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.</p>
<p>METAS</p>	<p>INDICADORES</p>
<p>9.A. Facilitar el desarrollo de infraestructuras sostenibles y resilientes en los países en desarrollo mediante un mayor apoyo financiero, tecnológico y técnico.</p>	<p>9.A.1.Total de apoyo internacional oficial (asistencia oficial para el desarrollo más otras corrientes oficiales)</p>

Tabla 2. Metas e indicadores del ODS 09 abordados en el trabajo [6]

Este trabajo colabora con este objetivo en la implantación de infraestructuras sostenibles y con el fin de hacer a la ciudad más resiliente para enfrentarse a futuras adversidades meteorológicas.

Por último, el objetivo 11 desea lograr que las ciudades y pueblos sean más inclusivos, resilientes y sostenibles. La transformación paulatina de las ciudades debe ser un objetivo común que consiga núcleos urbanos fundamentados en la equidad y en el bienestar. [7]

Los nuevos desarrollos urbanos han propiciado la aparición de urbanizaciones residenciales de baja densidad, con un alto consumo de suelo y de agua y también con una elevada dependencia del vehículo privado, con los consiguientes impactos sociales, medioambientales y energéticos.

Por otro lado, nuestro territorio presenta una elevada vulnerabilidad al cambio climático por lo que se debe trabajar para mitigar los riesgos que de dicho cambio se derivan. Las prioridades de actuación en esta materia pasan por reducir el impacto ambiental

negativo de las ciudades, atendiendo, entre otras muchas cosas a la gestión de las aguas residuales y a la reducción de los efectos negativos derivados de los desastres, tanto en términos de daños materiales y humanos como culturales.

En la siguiente tabla, se recogen los aspectos del ODS 11 en los que se centra el trabajo:

 11 SUSTAINABLE CITIES AND COMMUNITIES	Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
METAS	INDICADORES
11.3. Urbanización inclusiva y sostenible	11.3.2. Proporción de ciudades que cuentan con una estructura de participación directa de la sociedad civil en la planificación y la gestión urbanas y funcionan con regularidad y democráticamente
11.5. Desastres y reducción de la vulnerabilidad	11.5.1. Número de muertos, desaparecidos, heridos, reubicados o evacuados debido a desastres por cada 100.000 personas 11.5.2. Pérdidas económicas directas en relación con el PIB mundial, daños en la infraestructura esencial y número de interrupciones de los servicios básicos atribuidos a desastres
11.6. Deshechos y contaminación en ciudades	11.6.1. Proporción de residuos sólidos municipales recogidos y administrados en instalaciones controladas con respecto al total de residuos municipales generados, desglosada por ciudad
11.7. Acceso a zonas y espacios verdes y espacios públicos seguros.	11.7.1. Proporción media de la superficie edificada de las ciudades que se dedica a espacios abiertos para el uso público de todos, desglosada por sexo, edad y personas con discapacidad

Tabla 3. Metas e indicadores del ODS 11 abordados en el trabajo [8]

La contribución de este trabajo a dicho objetivo pasa por mejorar la resiliencia y sostenibilidad de la ciudad de Tudela. La implantación de técnicas sostenibles proporciona un entorno sostenible y reduce la vulnerabilidad generada por los impactos ambientales. Además, ayuda a la gestión de contaminantes arrastrados por la escorrentía, asegurando la sostenibilidad de las zonas verdes.

3.- OBJETIVOS

Los objetivos plantados en este trabajo han sido los siguientes:

- Conocer en profundidad la gestión del agua en la ciudad de Tudela teniendo en cuenta las características climatológicas de la zona y los recursos hídricos disponibles.
- Profundizar en el conocimiento de las técnicas de drenaje urbano sostenible estudiando las diferentes tipologías y los procesos por los cuales éstas son capaces de reducir el volumen total de escorrentía urbana.
- Estudiar un modelo de diseño de drenaje urbano compuesto, que incluya tanto una red de alcantarillado convencional como técnicas de drenaje sostenible.
- Analizar las ventajas y desventajas de la incorporación de técnicas de drenaje urbano sostenible en una zona de la cuenca urbana de la ciudad de Tudela.

4.- LA CLIMATOLOGÍA DE LA RIBERA DEL EBRO

En este apartado estudiaremos las características del clima de la zona de la Ribera de Navarra, centrándonos en sus patrones de precipitación característicos y en la posible evolución de estos.

4.1. Descripción de la climatología

El clima de Tudela es de tipo mediterráneo continental. Presenta una acusada continentalidad con temperaturas extremas, fuertes vientos desecantes, escasez de precipitaciones a lo largo del año y una marcada sequía estival, por lo que el desarrollo de la vegetación resulta limitado. [9]

Por lo que respecta a la temperatura, la media anual (TMA) se encuentra en 14.6°C, con una máxima absoluta anual de 41.0°C en el mes de agosto y una mínima absoluta anual de -9°C en el mes de diciembre. Estos datos demuestran una fuerte oscilación térmica. Durante los meses de verano pueden llegar a darse eventos de golpes de calor, debido a los vientos secos del norte, provenientes del continente europeo, o a vientos del sur, tras atravesar la meseta. Estos valores han sido obtenidos en el año 2018. [10]

4.2. Descripción de las precipitaciones

El conocimiento del patrón de precipitaciones es vital para modelizar las situaciones a las que se ve sometida la red de drenaje urbano.

La precipitación media anual aproximada en la zona es de 411mm. La precipitación es escasa durante todo el año, siendo abril el mes más lluvioso, seguido de octubre, siendo, por tanto, los periodos equinocciales, los más susceptibles de sufrir eventos de lluvias torrenciales. [10]

La llegada de las escasas lluvias proviene, en mayor medida, de los temporales mediterráneos asociados a los vientos del sureste y a las tormentas de verano. Estas últimas destacan por la cantidad de lluvia registrada de forma violenta, más que por el número de eventos.

Por otro lado, el riesgo de nevadas es bajo, apenas alcanzando los 3 días de nieve de media al año. De la misma manera, el riesgo de granizo también es bajo. Sin embargo, a pesar de encontrarse entre 1 y 2 días de media al año, las repercusiones que genera de forma negativa son relevantes, sobre todo en la agricultura. [9]

Para ilustrar el patrón climatológico de la zona se adjunta a modo de ejemplo el correspondiente a 2014. El gráfico 1 muestra el volumen de precipitación acumulada y las temperaturas máximas, mínimas y medias en Tudela a lo largo del año 2014.

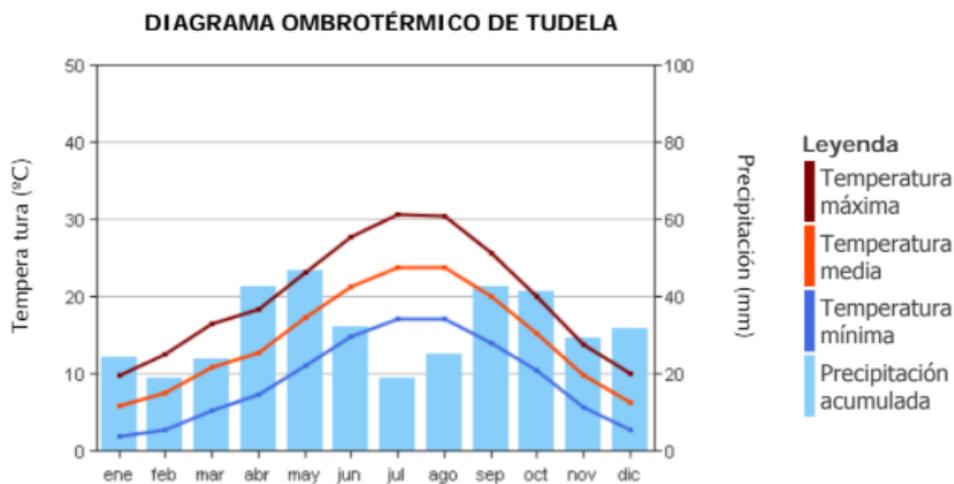


Gráfico 1. Representación de la evolución de temperatura y precipitación en Tudela en 2014 [9]

En primer lugar, puede observarse una marcada etapa de lluvias en los meses de abril-mayo y septiembre-octubre, alcanzando precipitaciones acumuladas de más de 40mm. Por otro lado, las temperaturas cuentan con un pico destacado en los meses de julio y agosto. La diferencia de temperaturas entre estos meses y los meses de invierno es considerable. Las temperaturas mínimas actúan de la misma forma que las máximas, manteniendo la diferencia de forma regular durante todo el año.

4.4. Previsión de la evolución de la pluviometría

El cambio climático es atribuido, de forma directa o indirecta, a la actividad humana. La principal causa del cambio climático es el aumento de acumulación de gases de efecto invernadero, provocando el llamado calentamiento global. Sin embargo, este cambio de clima no afecta únicamente en la temperaturas máximas y mínimas, sino también en otros aspectos que afectan directamente a la vida de las ciudades. [11]

A continuación, se mostrarán los gráficos de predicción en la cuenca del Ebro de las variables más perjudiciales en la vida de las ciudades, extraídos de la Agencia Estatal de Meteorología AEMet. [12]

El gráfico 2 presenta las previsiones esperadas desde la actualidad hasta 2100 en cuanto a la variación de la temperatura ambiental en la cuenca del Ebro.

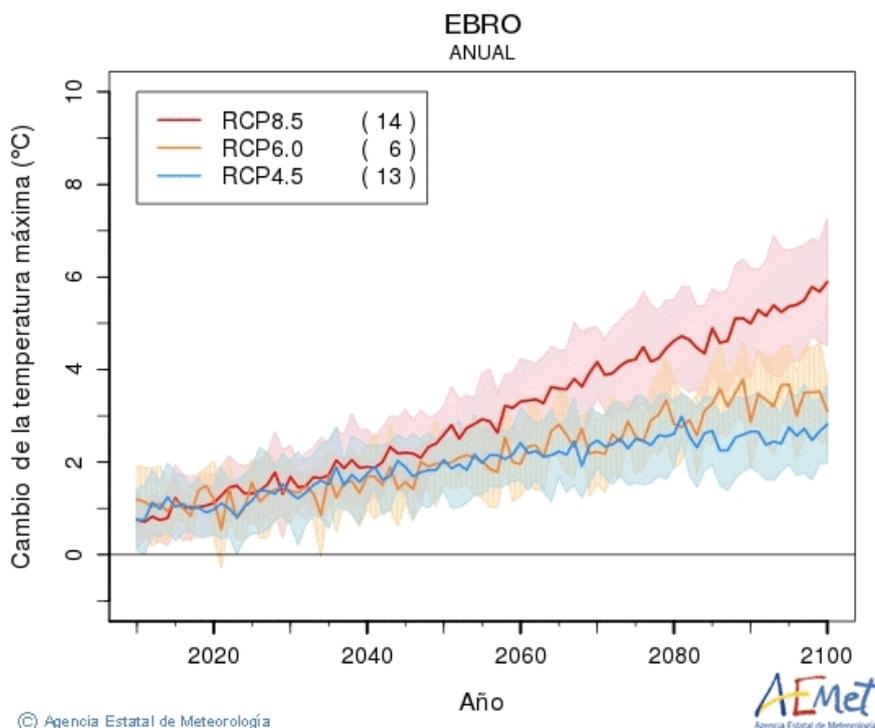


Gráfico 2. Pronóstico cambio de temperatura máxima [12]

Tanto la temperatura máxima como mínima sufrirían un aumento, llegando a $+4^{\circ}\text{C}$, en comparación a las temperaturas actuales. El efecto de la subida de temperaturas es la generación de sequías, aumentando el riesgo de incendios. La pérdida de suelo que se produce en estos eventos se traduce en un aumento importante de la escorrentía con el consiguiente impacto en el drenaje de la ciudad.

Otra previsión importante es el referido al cambio en los días de lluvia. El gráfico 2 muestra dicho pronóstico en la zona estudiada en este trabajo.

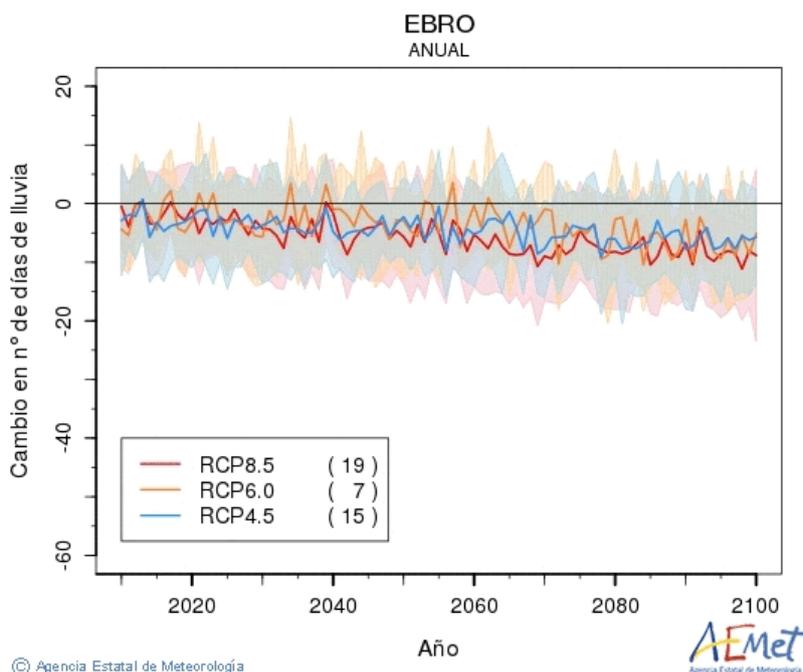


Gráfico 3. Pronóstico cambio en número de días de lluvia [12]

Puede observarse una disminución de los días de lluvia que, sumado al aumento de temperaturas del que se ha hablado anteriormente, conduce a que los periodos de sequía se vuelven más largos e intensos. Esta disminución de los días de lluvia favorece que los contaminantes urbanos se acumulen durante más tiempo en superficie y que cuando llueva, la escorrentía superficial generada arrastre una mayor concentración de dichos contaminantes, dado el amplio periodo de tiempo entre eventos de precipitación.

Por último, pero no por ello menos importante, se esperan futuros cambios en la intensidad de los episodios lluviosos. El gráfico 5 suministra las previsiones de AEMet en la intensidad de las lluvias, cuando estas se produzcan.

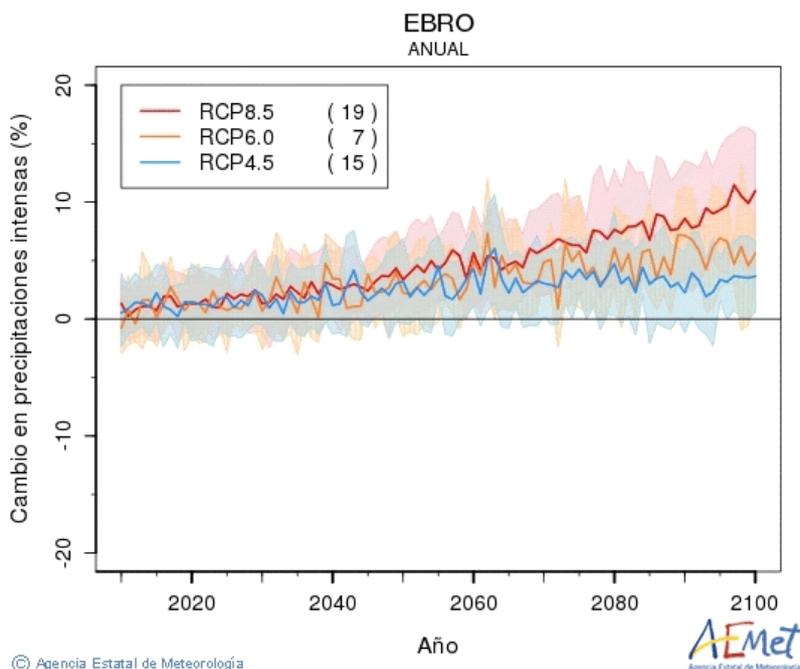


Gráfico 4. Pronóstico cambio de precipitaciones intensas [12]

Como se puede apreciar, a pesar de la disminución de días de lluvia presentados en el gráfico 4, estas lluvias, cuando se produzcan, van a tender a ser más intensas. El aumento de intensidad de las precipitaciones provocará un mayor riesgo para los sistemas de drenaje, obstruyéndolos con mayor facilidad y exigiendo un esfuerzo económico adicional.

Las predicciones realizadas por los expertos han alertado a las instituciones y han influido en la toma de decisiones de los gobiernos, que han apostado firmemente por la transformación sostenible de las ciudades y de sus sistemas de drenaje.

5.- EL CICLO DEL AGUA

Una vez estudiados los problemas en la red de drenaje urbano convencional y la climatología y pluviometría de la zona, puede abarcarse el siguiente problema: el ciclo urbano del agua.

El reciente aumento del porcentaje de suelo urbanizado en el área de estudio tiene como consecuencia lógica un impacto sobre el ciclo natural del agua. El porcentaje de área urbanizada se ha incrementado en un 35% en los últimos años, frente al 8% que ha crecido en Navarra. [10]

Para entender mejor este cambio sufrido, se estudiarán el ciclo natural del agua y el posterior ciclo urbano del agua.

5.1. El ciclo natural del agua

El ciclo del agua es un proceso continuo, donde una molécula de agua describe un ciclo cerrado pasando por varios estados de agregación de materia diferentes. En el ciclo del agua pueden contemplarse varias etapas: evaporación, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía, circulación subterránea, fusión y solidificación. [13]

Estas etapas se resumen en: parte de la precipitación es interceptada por plantas antes de llegar al suelo, el resto se infiltra y aumenta la humedad del terreno, produciéndose acumulaciones superficiales y flujos de escorrentía superficial y subsuperficial. El agua acumulada puede tomar dos salidas: formar lagos o infiltrarse y formar acuíferos. El agua, una vez en los arroyos y ríos, circula hacia el mar, pudiendo ser almacenada en embalses. Así, lagos, ríos, acuíferos y embalses se convierten en las principales fuentes de agua dulce disponible para la utilización del ser humano. El proceso de evapotranspiración de la vegetación, junto a la evaporación por acción del sol, permite al agua volver a la atmósfera en forma de vapor. [14] [15]

A continuación, se representa el ciclo del agua natural, previo a la urbanización:

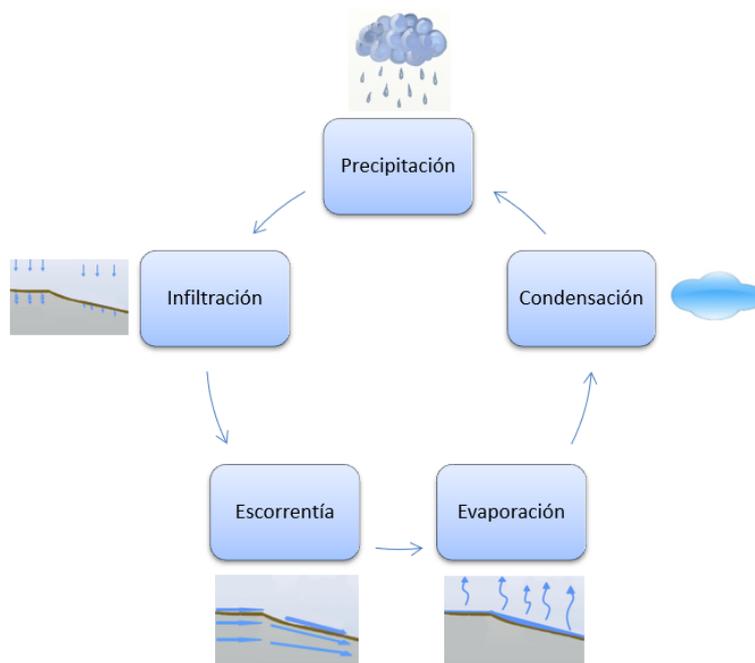


Ilustración 1. Representación del ciclo del agua

En la figura se puede observar como la infiltración y la evaporación son etapas fundamentales en la parte del ciclo que se desarrolla en la litosfera.

5.2. El ciclo urbano del agua

Por el contrario, el ciclo del agua en las ciudades es totalmente distinto. La urbanización del terreno incide en una gran parte de los procesos que componen el ciclo hidrológico. Este inconveniente perturba la dinámica natural del medio ambiente, alterando así el ciclo del agua.

La ciudad apenas cuenta con cobertura vegetal, por lo que la intercepción de la lluvia se minimiza. Como consecuencia, la lluvia acaba en tejados y suelos impermeables con un umbral de escorrentía bajo. De esta forma, la precipitación se transforma en escorrentía superficial, que se concentra en grandes caudales. Esta concentración de agua es conducida a través de sumideros y alcantarillas, en el sistema de saneamiento. [14]

El resultado es que el ciclo urbano del agua es diferente al ciclo natural y altera los volúmenes de evaporación, de infiltración y de escorrentía. En áreas densamente urbanizadas, la evapotranspiración y la infiltración pueden llegar a anularse casi completamente. [13]

La marcada diferencia entre ambos ciclos del agua genera serios problemas en las zonas urbanas que traducen en pérdidas económicas, impactos medioambientales, problemas sociales y una pérdida masiva de agua que podría ser reutilizada. Por esta y otras razones, es fundamental la aproximación del ciclo urbano del agua al ciclo natural del agua. Para ello, será necesaria la utilización de sistemas capaces de reducir esta diferencia. Es evidente que nunca podrá llegar a alcanzar el ciclo natural, pero una reducción en la distancia entre ambas podrá resolver en gran parte los problemas antes mencionados.

5.2.1. Incidencia de la urbanización en el ciclo del agua

Con la urbanización, la capacidad de infiltración del terreno se ve afectada notablemente debido a que se impermeabiliza parte del suelo con materiales que no permiten la percolación del agua través de ellos. Este factor puede llevar a anular de forma completa su capacidad de infiltración. En consecuencia, la circulación subterránea también se ve afectada, reduciéndose en igual medida que disminuye la capacidad de infiltración. Otra consecuencia importante de la reducción de la infiltración es la disminución de la evaporación del agua subterránea hacia la atmósfera. [13]

La transformación de una cuenca natural en una urbana no ocurre de forma instantánea. Es un proceso gradual que avanza a la vez que aumenta el crecimiento de la ciudad. A medida que esto ocurre, el volumen de agua infiltrado disminuye y aumenta la escorrentía superficial. En la siguiente ilustración puede observarse la alteración del ciclo del agua en este proceso de impermeabilización gradual.

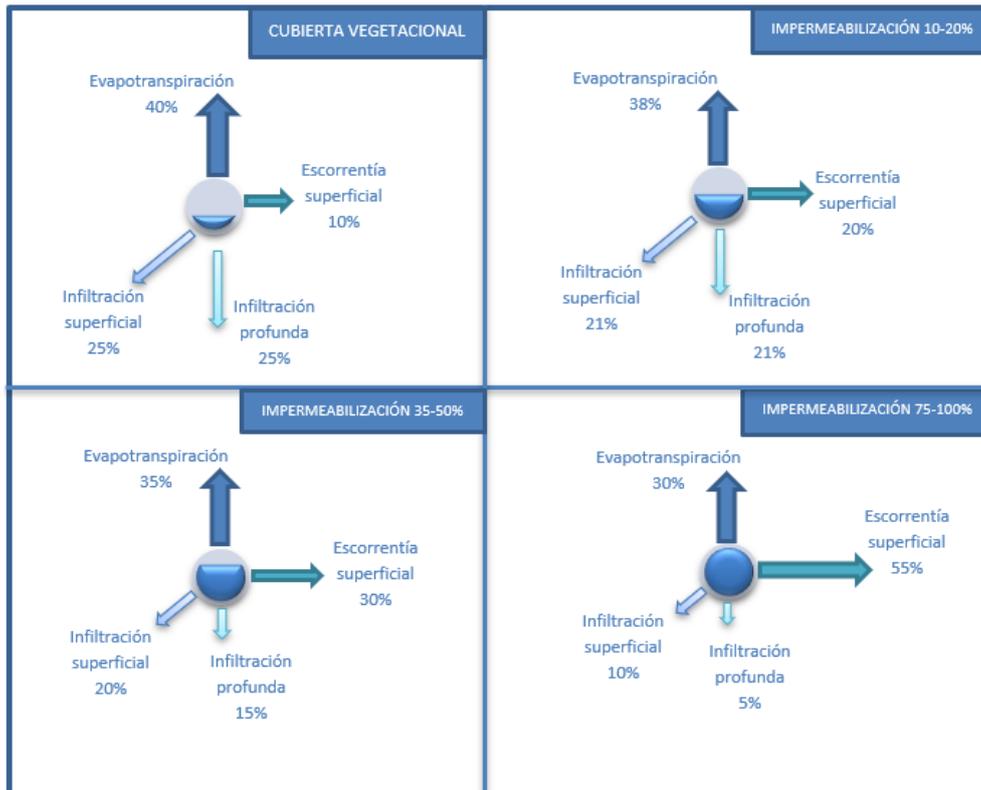


Ilustración 2. Alteración del ciclo del agua al impermeabilizarse una cuenca rural (según el porcentaje).
Elaboración propia con datos recogidos de Valbuena Villalonga [13]

Este efecto provoca una diferencia notoria en el caudal que se genera (comparado con el que se produce en el ciclo natural del agua). En episodios de lluvias torrenciales, este caudal punta ocurre en un espacio de tiempo muy corto. La gestión de estas avenidas intensas de agua obliga a la construcción en las ciudades de sistemas de drenaje de gran tamaño, capaces de disminuir los efectos negativos y daños que puedan causar. [14]

Según varios estudios, cerca del 90% de las precipitaciones pueden transformarse en escorrentía superficial en zonas urbanas impermeable. Sin embargo, en áreas naturales permeables, este valor desciende considerablemente hasta un 25%. [16]

5.2.2. Las inundaciones

La imposibilidad de infiltración del agua en el terreno se hace que el agua busque otras salidas, rápidas y directas. De este modo llegan a generarse corrientes de escorrentía superficial tan grandes que causan inundaciones en las ciudades.

Para lidiar con todos estos problemas se tiende a mejorar los sistemas de drenaje urbano convencionales: se construyen mayores tanques de tormenta, se automatizan las conexiones, se intenta monitorizar el caudal a tiempo real, etc. Sin embargo, en ocasiones las avenidas de agua son tan grandes que se llega a sobrepasar la capacidad de los colectores y los tanques de tormenta. A pesar de las inversiones para mejorar los

sistemas de drenaje, los problemas relacionados con la cantidad de escorrentía superficial siguen produciendo importantes pérdidas económicas e incluso pérdidas humanas. [14] [17]

Se puede clasificar las inundaciones según diferentes criterios. En primer lugar, se clasifican según las causas que las provocan, que pueden ser consideradas naturales, inducidas o mixtas. A este respecto distinguimos entre:

- Causas climáticas: debidas a precipitaciones de duración y/o intensidad anormal, tifones, huracanes, ciclones y gota fría.
- Causas geológicas: se refieren a las características litológicas de la cuenca, de la red hidrográfica (formas, tipos), las características de los cauces (formas, pendientes), movimientos e inestabilidad de laderas y la restricción del desagüe de los ríos, debido a la acumulación de residuos en la desembocadura.
- Causas antrópicas: impulsadas por la acción directa del ser humano; algunos ejemplos son la deforestación, la rotura de presas o la construcción de infraestructuras que modifican el recorrido natural del cauce, etc.

De igual forma, se puede clasificar las inundaciones según los efectos que provocan.

- Efectos sociales: algunos de los impactos inmediatos por inundación son la pérdida de vidas humanas, daños a bienes, así como la pérdida de medios de subsistencia y efectos psicosociales.
- Efectos económicos: se produce la disminución de la capacidad adquisitiva y de la capacidad productiva de una región, así como daños estructurales. A ello se suma el coste de la posterior recuperación.
- Efectos ambientales: las inundaciones pueden destruir las comunidades ecológicas (vegetación, animales, etc.) y dificultan la capacidad de colonización de las especies. También pueden contribuir a la dispersión de contaminantes y provocar importantes cambios en los cursos fluviales. [18]

5.2.2.1. La colmatación del sistema de drenaje

La finalidad que presenta cualquier red de drenaje es recolectar las aguas de escorrentía provenientes de los eventos de lluvia, además de aguas residuales si cuenta con una red unitaria. Sin embargo, llama la atención la escasez de criterios de riesgo implantados que sirvan de criterio para el diseño y construcción de las redes de drenaje en caso de fallo. El problema aumenta en localidades donde las lluvias torrenciales son habituales, conociendo que la red de drenaje está un poco anticuada y se ve desbordada con relativa

frecuencia. Las inundaciones son el riesgo natural que mayor número de víctimas ha causado entre 1990 y 2005, con cerca de un 40% del total. [13]

Parece lógico que se diseñe una infraestructura encargada de evitar los daños relacionados con los eventos de inundación, sobre todo por los riesgos que pueden ocasionar a la ciudad y a sus habitantes.

Debe ponerse especialmente atención en el comportamiento hidráulico de la red ante eventos de precipitación extrema. Las consecuencias más importantes de la colmatación del sistema de drenaje son el calado y la velocidad de la escorrentía superficial en las calles. [13]

5.2.2.2- La contaminación de las aguas pluviales

Como se ha comentado, una vez la escorrentía superficial ha cobrado protagonismo (especialmente en eventos de lluvia intensa) debido a la impermeabilidad del terreno, la red de drenaje urbano no es capaz de cumplir con su función y se ve colapsada. Sin embargo, el problema de la inundación no será el único significativo, puesto que debe sumarse un problema asociado a la calidad del agua que se vierte a las aguas receptoras. Esto es debido a que la propia escorrentía superficial arrastra consigo una variedad de contaminantes que se encuentran en el ambiente urbano.

Los contaminantes depositados y acumulados en las calles durante el periodo seco previo a la lluvia son arrastrados por los primeros caudales de escorrentía. Este primer proceso es conocido como “firstflush” o primer lavado. Puesto que el volumen de escorrentía no es demasiado grande durante los primeros minutos de lluvia, esta presentará una elevada concentración de contaminantes en el “firstflush”. Las acumulaciones de contaminantes de las calles son arrastradas durante cada una de las lluvias que se producen, por lo que una lluvia intensa puede arrastrar la misma cantidad de contaminantes que una lluvia menor. [13]

El problema cobra importancia cuando la red de drenaje urbano es unitaria, ya que los contaminantes depositados en la red como consecuencia del tránsito de aguas residuales serán remolcados por las aguas pluviales. Reintegrar estas aguas al medio ambiente con la calidad necesaria según las normas sólo será posible si son tratadas en estaciones depuradoras. A esto se añade los cuantiosos sobrecostos necesarios para gestionar los volúmenes de escorrentía que llegan.

Los contaminantes más frecuentes que se localizan en las aguas receptoras de escorrentía urbana son:

- Sedimentos: la erosión causada por el flujo del agua sobre una superficie impermeable desgasta y daña el suelo. Una parte de este suelo puede desprenderse y ser arrastrada con el resto de escorrentía. Estos sedimentos

pueden causar daños en fauna y flora cuando son depositados en fondos de arroyos, lagos, etc. Las consecuencias de estos daños son reducción de la visibilidad y de la penetración de luz y el deterioro del hábitat.

- Metales: como cadmio, cobre, cobalto, hierro, níquel, plomo y zinc se depositan en calzadas y aceras en consecuencia de los vehículos que circulan por ellas. Son arrastrados en eventos de lluvia intensos, donde la escorrentía generada es importante. Algunos metales pueden ser dañinos para humanos y/o fauna acuática. El agua de lluvia tiene mayor capacidad de disolver metales que el agua convencional, debido a su mayor acidez.
- Nutrientes: fertilizantes, la descomposición de rocas y suelos naturales, la expulsión de gases de escape de los vehículos, deposiciones de mascota o detergentes son fuente de fosfatos y nitratos que entran al agua de lluvias. El fósforo y el nitrógeno son reductores del nivel de oxígeno en el agua, lo que incrementa el crecimiento de algas y plantas acuáticas, causando la muerte de otros organismos acuáticos.
- Pesticidas: los niveles de pesticida de los niveles urbanos son muy superiores a las tierras de cultivo (aproximadamente 10 veces mayor por metro cuadrado). Como consecuencia de la falta de conocimiento y control al uso de pesticidas en ciudades, el nivel de estos sigue aumentando.
- Microorganismos: la materia fecal estaría siendo filtrada por suelos y plantas en un medio natural; sin embargo, en la situación de ciudades densamente urbanizadas, dicha materia es transportada por el agua de lluvia. La materia fecal introduce *E.Coli* y coliformes fecales, que puede ser origen de enfermedades de piel.
- Hidrocarburos y subproductos de vehículos: la industria automovilística utiliza líquidos refrigerantes y anticongelantes, que contienen etilenglicol y propilenglicol, que pueden ser tóxicos, además de otros materiales relacionados con el uso y mantenimiento de vehículos, como aceites y grasas. A esto se suman materiales de escape de los vehículos que se depositan en los pavimentos y selladores con base de alquitrán, siendo productos químicos altamente tóxicos.
- Otros: algunos iones principales como el sodio, cloruros, calcio, magnesio y potasio son complementos que afectan a la calidad del agua, así como la alcalinidad, dureza, pH, salinidad y temperatura del agua de lluvia. [13]

Como se ha podido ver, la concentración de contaminantes en las aguas pluviales es considerable. Sin embargo, apenas existe concienciación de la contaminación que producen los eventos de lluvia. Es necesario educar y concienciar a los ciudadanos de este fenómeno, además de motivar a no arrojar contaminantes extra.

5.2.2.3. La depuración de las aguas pluviales

En la mayoría de los casos, las aguas pluviales acaban en los canales de aguas residuales, provocando un importante aumento del caudal a la llegada de la depuradora. Actualmente, las urbanizaciones nuevas cuentan con dos tipos de redes de saneamiento, una para pluviales y otra para residuales, pero lo habitual en zonas urbanas de cierta antigüedad es el predominio de las redes unitarias.

La instalación de una red unitaria es más sencilla, así como su servicio, ya que implica un solo ramal de alcantarillado en cada calle y una sola embocadura a las diferentes edificaciones. El inconveniente de este sistema es la facilidad con la que aparecen reboses en los aliviaderos por exceso de caudal. Además, como ya se ha dicho, la depuradora sufrirá un impacto no considerado, ya que la mezcla de aguas contendrá contaminantes que esta no podrá tratar.

Si la red es separativa, por el contrario, el coste de instalación y gastos de primer establecimiento serán mayores a la instalación de una red unitaria (entre 1,5 y 2 veces mayor); sin embargo, el agua proveniente de cada conducto será tratado de la forma correcta, sin sobredimensiones de la depuradora. [19]

6.- EL DRENAJE URBANO SOSTENIBLE

Se encuentra, entonces, ante la problemática de cómo recuperar las redes de drenaje convencionales para mejorar todos los problemas expuestos en los apartados anteriores.

El problema puede enfrentarse de dos formas. Por un lado, la que actualmente se está utilizando, métodos convencionales como la ampliación en los diámetros de los tubos de las redes o sobrecostes en las depuradoras para batallar el suplemento de caudal que aborda. Un método capaz de solucionar el problema de forma parcial y durante un periodo de tiempo concreto. Surgen entonces otras soluciones, sistemas nuevos con la vista puesta en el medio ambiente y capaces de solucionar el problema a largo plazo.

Estas nuevas soluciones sostenibles tienen detractores, debido fundamentalmente a la falta de datos suministrados hasta el momento y al desconocimiento que todavía se tiene sobre dichas técnicas. [13]

A continuación, se estudiarán los sistemas de drenaje urbano sostenibles que existen actualmente, cómo funcionan, ventajas y desventajas, cómo afectan al ciclo del agua y la posterior aplicación en los medios urbanos.

6.1. Las limitaciones del drenaje urbano convencional

Históricamente, para reducir los excesivos volúmenes de escorrentía superficial, esta se ha recogido mediante una sucesión de bajantes situadas a lo largo de la calle y transportada por una red subterránea de colectores. El objetivo de estos es evacuar rápidamente el agua de lluvia. El trayecto suele terminar en la planta de tratamiento o depuradora. En la mayoría de las ciudades, el sistema de drenaje trata de gestionar la totalidad del agua de lluvia a través de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR), lo que se transforma en un sobrecoste económico importante, como se ha visto previamente. [16]

El problema reside en los eventos de lluvia intensa, donde la red de sumideros no es capaz de captar todo el caudal de escorrentía superficial y los contaminantes que conlleva, afectando a las zonas naturales. Además, los volúmenes de agua de lluvia fusionados con las aguas residuales generan caudales imposibles de tratar por las depuradoras, lo que exige producir alivios, conocidos como Descargas de Sistemas Unitarios (DSU), directamente al medio natural.

6.2. Introducción al drenaje urbano sostenible

Cuando los colectores que componen la red de drenaje no tienen la capacidad suficiente para cumplir su función de evitar la inundación de una ciudad, el método existente es reducir la cantidad de agua que llega a ellos. En otras palabras, disminuir la escorrentía superficial aumentando la retención y la infiltración.

Desde finales del siglo XX, se han desarrollado infraestructuras capaces de modernizar y lograr una mayor eficacia por medio de técnicas de retención en los sistemas de drenaje urbanos. Las infraestructuras más populares son los depósitos de tormenta y las balsas de laminación. Por un lado, los tanques de tormenta se sitúan en zonas altamente urbanizadas, soterrados bajo el terreno. Las balsas de laminación, por su parte, tienen la función de reducir caudales antes de pasar por zonas con limitaciones de drenaje o para compensar la infiltración perdida en el proceso de urbanización, y son construidas a cielo abierto.

Sin embargo, el alto coste económico es el principal inconveniente, debido a la dificultad de obtener el espacio necesario en la red urbana y el impacto que causa su construcción a la actividad diaria de la ciudad.

En ciudades densamente urbanizadas, la opción de disminuir la escorrentía aumentando la infiltración parece totalmente imposible. Las zonas verdes en parques, plazas, etc. ayudan a infiltrar el agua de lluvia que cae sobre ellas hacia un terreno natural, por lo

que esa cantidad de agua no será transportada por los colectores de la red de alcantarillado y, por consiguiente, no contribuirá a su colapso. Pero, en ciudades densamente urbanizadas, la escasez de espacio perjudica a la incorporación de nuevas zonas verdes capaces de contribuir a la ayuda de infiltración del agua de lluvia.

Las llamadas técnicas de drenaje urbano sostenible están basadas en encontrar nuevos métodos que contribuyan a mejorar el funcionamiento del sistema de drenaje urbano en las ciudades gracias a las técnicas de retención y al uso de las zonas verdes disponibles. Además, ayudan a preservar el medio ambiente y mejorar la eficiencia del tratamiento del agua de lluvias. [13] [17]

Estos sistemas no convencionales, basados en filtración y retención, se emplazan previos al sistema de alcantarillado. Para resumir su funcionalidad se dice que emulan el ciclo hidrológico natural y se basan en criterios de filtración y retención en origen.

El diseño y dimensionado de estas técnicas dependen de cada proyecto particular, es decir, de los objetivos de reducción que se planteen, del volumen de escorrentía a gestionar y de las características pluviométricas e hidrológicas de la zona. [20]

La siguiente ilustración expone la clara diferencia en la generación de escorrentía superficial dependiendo de la situación de la zona:

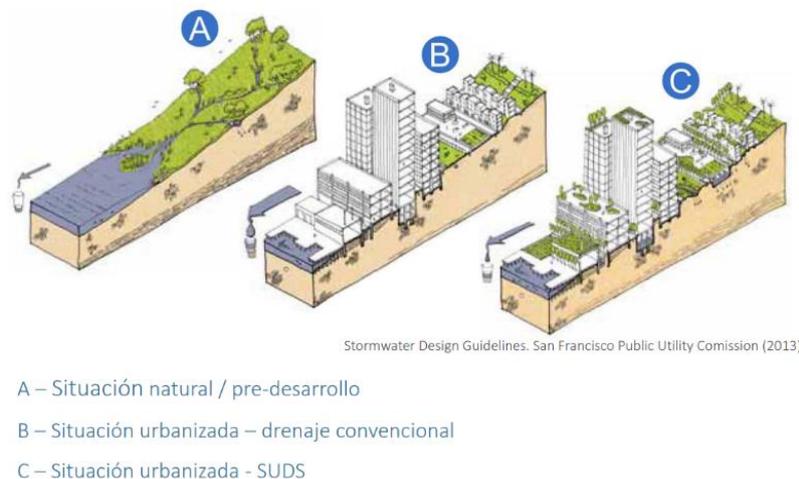


Ilustración 3. Comparativa del ciclo del agua en el caso previo a la urbanización (A), posterior a la urbanización (B) y con la aplicación de técnicas de drenaje urbano sostenible (C) [21]

En primer lugar, se observa que en la situación A, la generación de escorrentía superficial es mínima, puesto que gran parte del caudal se infiltra en el terreno natural, disminuyendo el volumen de escorrentía que recorre la zona. Además, la evapotranspiración de la zona verde ayuda en dicha disminución.

En segundo lugar, imagen B, se observa un área densamente urbanizada en el que el sistema de drenaje es convencional. La impermeabilización de la zona y la falta de espacio para implantar técnicas sostenibles ocasionan graves problemas de escorrentía

superficial. El agua no puede infiltrar al terreno y la red de drenaje se ve saturada, por lo que el volumen de agua sobrante se convierte en escorrentía superficial, recorriendo las calles y generando graves problemas.

Por último, la situación C se beneficia de la inclusión de técnicas SuDS, disminuyendo el volumen de agua de escorrentía, la concentración de contaminantes y ayudando a la infiltración del agua al terreno natural. El resultado de esta incorporación no es el ciclo natural, pero es un proceso que se acerca a él y que reduce en gran medida los riesgos que se presentan en la situación (B).

6.2.1. Aclaraciones sobre la terminología

El aumento de popularidad de las técnicas de drenaje urbano sostenible durante las últimas décadas ha generado que gente de todo el mundo las investigue, las estudie y las intente mejorar, especializándose en la materia. Por esta razón, términos diferentes han sido utilizados alrededor del mundo, dando pie a confusiones y contradicciones, para referirse a dichas técnicas. Las terminologías que se han utilizado para describir las técnicas de drenaje urbano sostenible son las siguientes:

- “Low Impact Development” (LID). Este término se ha utilizado principalmente en América del Norte y Nueva Zelanda. El propósito inicial de la terminología era dar nombre a las medidas de control para recuperar una hidrología natural en las ciudades, pero actualmente se utiliza para referirse a las prácticas de gestión de aguas pluviales. Lleva en uso desde 1977.
- “Sustainable urban drainage systems” (SuDS) o “sustainable drainage systems” (SuDS). El nuevo enfoque de la gestión de aguas pluviales surge a finales de los 90s, en Reino Unido, cuando CIRIA publica sus guías para el uso de técnicas de control de la escorrentía. En 1997, se utiliza por primera vez el término y, en el 2000, se formaliza. Actualmente, el manual editado por CIRIA es el más popular. [13] [22]

En este trabajo se utilizarán ambas terminologías indistintamente.

6.2.2. Principios generales de las técnicas LID

Se puede resumir lo expuesto hasta el momento diciendo que el problema ocasionado por la escorrentía superficial en las zonas densamente urbanas se ha agravado en las últimas décadas y, más allá de encontrar una solución, el problema sigue volviéndose más y más importante. La solución, durante siglos, para estos excesos de escorrentía superficial ha sido urbanizar una zona natural con un sistema de red de saneamiento,

compuesto por sumideros y canales que la transporten. A esto se unen los enormes costes económicos en la fabricación y actualización de infraestructuras para reducir el caudal de las escorrentías. Una nueva perspectiva surge con las técnicas de drenaje urbano sostenible, también conocidas como SuDS o LID, que reman en la dirección opuesta a los sistemas tradicionales. Las técnicas de drenaje urbano sostenible pretenden recuperar, en la medida de lo posible, el comportamiento de las cuencas previo a la urbanización, así como devolver el ciclo natural del agua.

La siguiente representación muestra los cuatro pilares en los que se centran los sistemas de drenaje urbano sostenible:

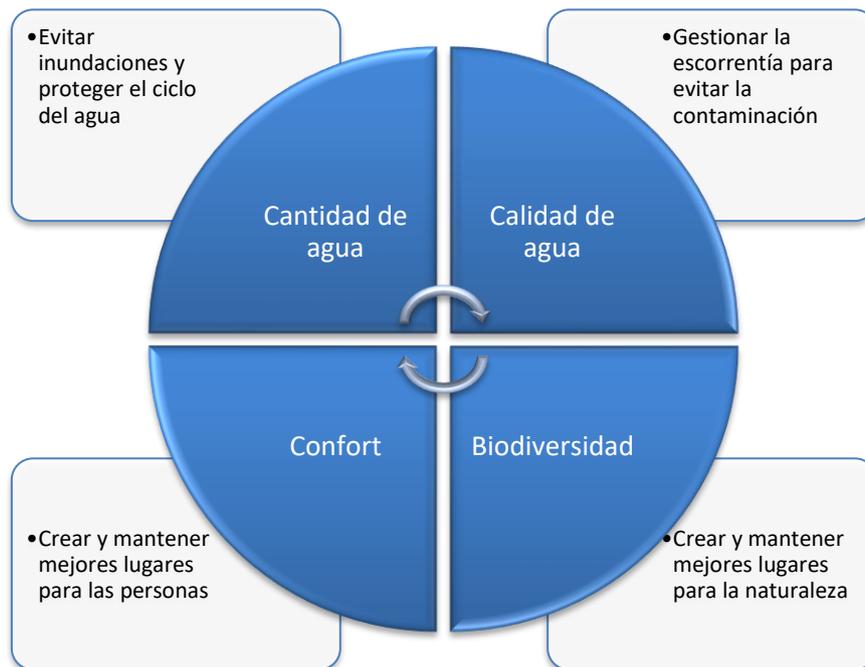


Ilustración 4. Fundamentos básicos que persigue una configuración integral de técnicas SuDS dentro de un entorno urbano. Basado en el Manual de CIRIA [22]

El catálogo de elementos LID es amplio, pudiendo trabajar varios de ellos de forma conjunta, además de ser compatibles con los sistemas de drenaje convencionales. Permiten una mayor eficacia en la gestión de aguas de lluvia; al mismo tiempo, cuentan con un enfoque más sostenible. Se estima que, a largo plazo, los LID serán capaces de sustituir por completo las redes de colectores convencionales, pero hay un largo camino a recorrer hasta entonces. [13]

A diferencia de lo que piensa mucha gente, el agua de lluvia es un recurso muy valioso, que puede ser utilizado en actividades importantes como el riego o la limpieza de las calles, por lo que su pérdida es también una pérdida económica. Por otro lado, este recurso puede generar muchos beneficios en una ciudad: favorece la biodiversidad urbana, aumenta la belleza y la estética de parques y jardines e incluso humaniza los edificios de la ciudad.

El manual *The SuDS Manual* de CIRIA desarrolla las diferentes técnicas de drenaje sostenible y su aplicación, reduciendo los impactos de escorrentía superficial y maximizando los beneficios en áreas desarrolladas. [13]

En definitiva, la respuesta ante el anticuado sistema de drenaje convencional es la implementación de técnicas LID, por los beneficios previamente expuestos. Los objetivos que estas presentan son los siguientes:

- Mejorar la gestión del agua en su conjunto, comenzando con las aguas pluviales.
- Proteger los sistemas naturales y mejorar el ciclo del agua en entornos urbanos, tanto en calidad como en cantidad.
- Incrementar la calidad paisajística dentro del entorno urbano, integrando en él cursos de agua y naturalizando buena parte de la infraestructura hídrica.
- Minimizar el coste de las infraestructuras de drenaje al mismo tiempo que se incrementa el valor del entorno.
- Reducción de costes al disminuir el volumen de los influentes en depuradoras y al no alterarse de manera frecuente el patrón de contaminantes para el que la depuradora ha sido diseñada.
- Rebajar la demanda de agua potable, realizando una gestión integral de los recursos hídricos al fomentar la reutilización en origen tanto de aguas pluviales como de aguas grises.
- Disminuir el riesgo de inundaciones en las ciudades. [23]

Los objetivos de las técnicas de drenaje sostenible muestran un avance en el sistema de drenaje convencional, es decir, una ayuda moderna y medioambientalmente sostenible que ya está siendo implantada en muchos países desarrollados.

6.2.3. La gestión jerarquizada del agua

El agua de lluvia, dado sus múltiples beneficios manifestados, debe gestionarse de forma que puedan obtenerse dichos beneficios. Los métodos utilizados para esta labor se desglosan en los siguientes, formando una serie progresiva:

- Prevención: concienciar a los ciudadanos, mediante programas educativos de instrucción del tema, de motivación, promoción, etc., en cuestiones medioambientales y aprovechamiento del agua, ya que pueden evitar futuros problemas y ahorrar esfuerzos innecesarios.

- **Gestión en origen:** captar la escorrentía en el origen de su generación, o cerca de él, es beneficioso, ya que evita que el volumen de escorrentía sea demasiado grande y que la concentración de contaminantes aumente. Este tipo de gestión es el más adecuado en zonas densamente urbanizadas, donde la falta de espacio complica la implantación de técnicas LID, siendo instaladas en propiedades privadas.
- **Gestión en el entorno urbano:** para actuar contra la escorrentía que no ha sido tratada en origen, otras técnicas LID y de la red de drenaje convencional deben ser capaces de gestionar este volumen de agua (mayor que en el origen). El agua que no puede ser tratada debe ser transportada hacia una zona verde o a una infraestructura para ser tratada. Los objetivos en este punto son reducir la velocidad de escorrentía y el pico de caudal.
- **Gestión de cuencas:** En este nivel de gestión, se incluye el tratamiento final de la escorrentía en estaciones depuradoras, siendo vertido al medio natural tras su tratado. Crear un paisaje multifuncional en el que el diseño LID se combine con el medio será un compromiso necesario para mantener una visión global de la gestión de aguas pluviales. [13]

La siguiente figura representa la cadena de gestión del agua, tal y como se ha descrito cada una de sus partes:

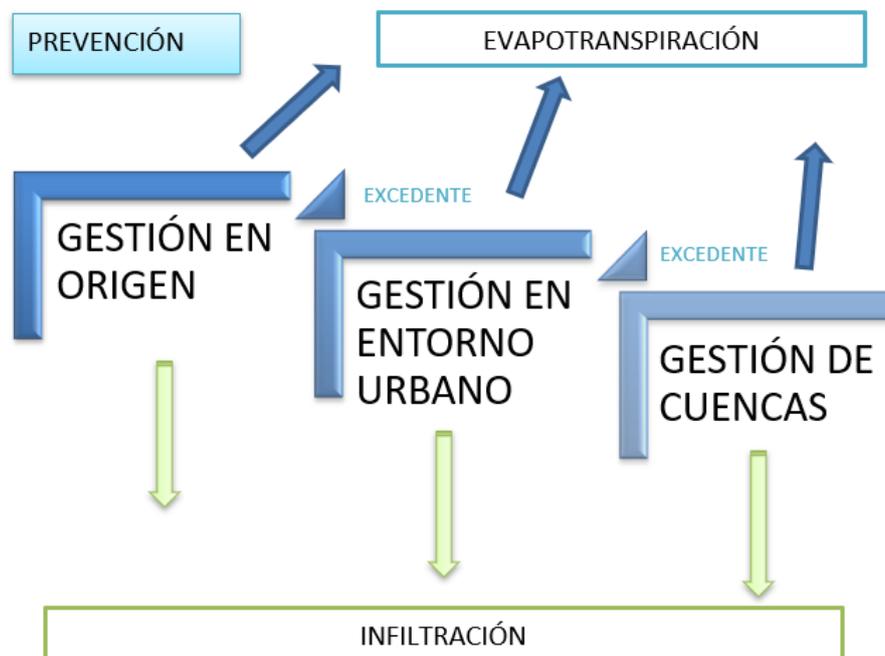


Ilustración 5. Cadena de gestión del agua en un sistema de drenaje urbano sostenible. Figura de elaboración propia obtenida de Valbuena Villalonga [13]

Este método de gestión permite intervenir en la raíz de los problemas. El pilar de gestión jerarquizada es la división de la cuenca en subcuencas con características comunes, optimizando de esta forma la estrategia de drenaje en cada una de ellas. [13]

Con la subcuenca representada, la escorrentía se ve reducida considerablemente gracias a haber superado las dos primeras fases de gestión jerarquizada. La red de drenaje se habría aliviado, por lo que los problemas se ven rebajados.

6.3. Ventajas e inconvenientes de las técnicas de drenaje sostenible

Los beneficios de las técnicas de drenaje sostenible dependen de varios factores, como factores locales o de diseño de los mismos. La clasificación de estas ventajas viene dada en el manual de CIRIA.

Si se contempla la cantidad de agua de escorrentía, el objetivo es conseguir un hidrograma de salida de la escorrentía similar a la existente en una cuenca natural. La mayoría de los sistemas LID cuentan con una capa de retención, donde parte del agua de lluvia es captada, permitiendo ralentizar y reducir la escorrentía de las calles durante el evento de lluvia que, posteriormente, será liberado hacia la red de colectores de forma continua.

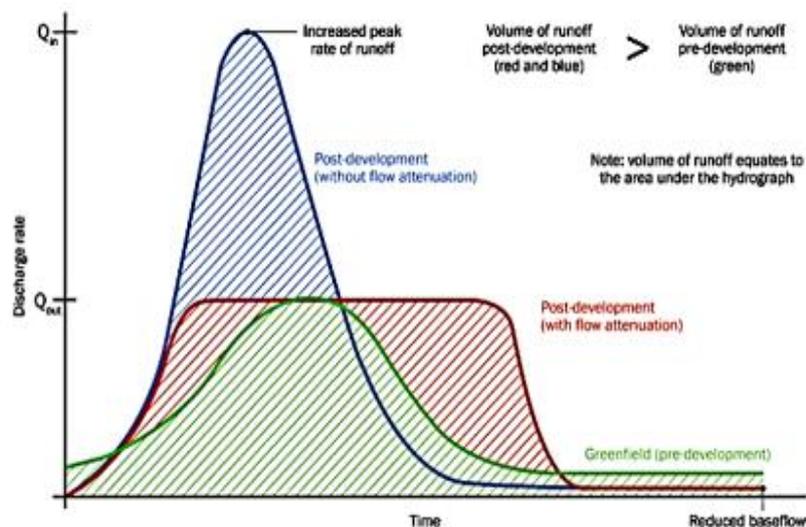


Gráfico 5. Hidrogramas en la salida del drenaje urbano [22]

La figura muestra la comparación entre los hidrogramas en la salida del sistema de drenaje urbano para el caso previo a la urbanización (verde), posterior a la urbanización (azul) y con medidas de atenuación (rojo).

En consecuencia, se observa como una intervención de este tipo sería realmente beneficiosa en eventos de lluvia extrema, pero no demasiado en eventos de precipitación habituales. Para reducir el excedente de escorrentía, se debe favorecer la infiltración al terreno natural o su reutilización. [13]

Pero favorecer la infiltración no solo va a depender de la técnica LID, sino de la geología de la cuenca. En zonas de suelo arcilloso, incluso antes de ser urbanizada, la

escorrentía superficial ya era elevada. Así que recuperar los caudales previos a la urbanización no siempre soluciona el problema. Por otro lado, en suelos más permeables, el beneficio obtenido por dichas técnicas será más apreciable.

Otra opción a evaluar en zonas de baja infiltración es recuperar el agua para reutilizarla en tareas como regadío, a pesar de que el beneficio obtenido es, por lo general, inferior al que aporta la infiltración.

En resumen, el diseño y dimensión de la infraestructura LID deberá ser capaz de captar y reducir lo máximo posible el pico de escorrentía, siempre que la superficie sea adecuada para infiltrar dicha cantidad de agua.

En lo referente a la calidad del agua, hay que tener en cuenta la función que realizan los LID en el tratamiento y la limpieza de la escorrentía superficial en áreas urbanas, logrando proteger los sistemas receptores finales de agua y la fauna y la flora de los mismos.

Una importante ventaja de las técnicas LID, en comparación de las depuradoras, es la capacidad de tratar la contaminación de las aguas receptoras antes de recorrer las calles. Disminuir parte de los contaminantes, además del volumen de agua, que arrastra ayuda a reducir gastos en el tratado de las depuradoras. [13]

Para llevar a cabo la esta función, las técnicas LID están compuestos de agentes biológicos, químicos y físicos. Los procesos utilizados por las técnicas LID para la retención y eliminación de los contaminantes arrastrados por la escorrentía superficial son:

- Adsorción: es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material.
- Sedimentación: los materiales sólidos en suspensión transportados por la escorrentía urbana sedimentan al reducirse la velocidad del flujo de agua, al entrar en los sistemas de drenaje sostenible. Además, muchos de los contaminantes contenidos en la escorrentía urbana circulan en conjunto con el sedimento, luego este proceso es doblemente efectivo.
- Filtración: las partículas de contaminante quedan atrapadas, en mayor o menor medida, en función de la porosidad del material utilizado en el LID. La contrapartida de este proceso es la progresiva colmatación del medio poroso, lo que requiere constante mantenimiento.
- Bio-filtración: consiste en la filtración biológica de la escorrentía a su paso por la vegetación. El agua de lluvia es tratada a través de su interacción con la vegetación, cuyas estructuras vegetales atrapan el material suspendido. Su eficiencia dependerá de la densidad de vegetación.

- **Biodegradación:** se trata de la descomposición natural de una sustancia por la acción de agentes biológicos. La presencia de condiciones aeróbicas y anaeróbicas en los LID establece el escenario para la aparición de microorganismos que contribuirán a la eliminación de contaminantes.
- **Precipitación:** es el proceso por el cual se forman precipitados insolubles en el agua acumulada en el LID, los cuales acaban siendo depositados.
- **Bio-acumulación:** consiste en el proceso de incorporación de parte de una sustancia química a los seres vivos. Las plantas son capaces de bio-acumular metales pesados, nutrientes y otros contaminantes.
- **Volatilización:** ciertos compuestos pueden ser convertidos en gas a lo largo de su tratamiento en los LID, sobre todo en compuestos derivados del petróleo y ciertos pesticidas. [13]

A nivel de biodiversidad, implementar la red de drenaje con técnicas LID tiene dos efectos importantes. Por un lado, acercar la naturaleza a la ciudadanía y por otro, crear nuevos hábitats o rehabilitar los ya existentes, dotando a las ciudades de un entorno más saludable. Con un diseño adecuado, los LID pueden proporcionar cobijo, comida y cría a una gran variedad de especies de plantas y animales, creación de ecosistemas diversos, resilientes y autosuficientes y contribuyen a la consecución de los objetivos de biodiversidad locales contemplados en los marcos y estrategias de actuación.

Por último, estos sistemas inciden positivamente en la calidad de vida de las personas. La gestión del agua es fundamental en el entorno urbano para la creación de entornos habitables. El uso de las técnicas LID dota al paisaje urbano de valor estético y aporta un efecto de salud y bienestar.

Por otro lado, como se ha visto anteriormente, la gestión de escorrentías superficiales puede ayudar a reducir las temperaturas en verano, influenciar en el sentido de la comunidad y prosperidad en el área, además de ejercer una gran tarea en la educación medioambiental. [13]

La multitud de ventajas o beneficios que aportan las técnicas de drenaje urbano sostenible podrían resumirse en los siguientes:

- Gestionan el agua de lluvia de forma sostenible y eficiente.
- Aumentan la permeabilidad superficial, reduciendo el riesgo de inundaciones por incapacidad del sistema.
- Reducen los picos de caudal, aminorando la escorrentía superficial.
- Rehabilitan el ciclo hidrológico natural en las zonas urbanas.
- Protegen frente a contaminantes y vertidos accidentales.

- Participan en proyectos de regeneración urbana.
- Protegen y mejoran la calidad del agua y de la biodiversidad existente en los ecosistemas.
- Enriquecen de forma visual y ambiental las zonas urbanas. [16] [20] [24]

Pero, para que todos estos beneficios puedan ser realmente alcanzados, los ciudadanos deben estar concienciados de ellos y la clase política conseguir introducir estas técnicas en la normativa urbanística.

El inconveniente principal que presenta las técnicas de drenaje urbano sostenible es el poco recorrido que todavía tiene este tipo de sistemas. A pesar de presentar muchos beneficios y de haberse demostrado su buen funcionamiento en las ciudades en los que han sido instaladas, todavía no se ha podido demostrar categóricamente que puedan ser una alternativa real a los sistemas convencionales de drenaje urbano. [13]

A continuación, se describen otros inconvenientes derivados de la relativa inexperiencia de las técnicas:

- A pesar de los largos periodos de desarrollo, los datos del funcionamiento de las técnicas son muy escasos.
- Su uso es limitado si el nivel de freático es próximo a la superficie y en zonas de pendiente elevada.
- Costes de construcción, superiores a los costes de construcción de sistemas convencionales.
- La necesidad de costes en mantenimiento específico y periódico, coste económico y operacional, para buena funcionalidad y alta eficacia.
- Su monitorización y análisis puede aumentar los costes.
- Malas experiencias en la aplicación de las técnicas, debidas a fallas de referencias.
- Restricciones urbanísticas, como falta de espacio, carga de tráfico importante, etc.

Todos estos puntos generan desconfianza hacia los LID e impiden la puesta en marcha de proyectos de drenaje urbano sostenible. Por otro lado, se encuentra la diversa climatología y condiciones geológicas de las diferentes regiones y ciudades del mundo.

Teóricamente, las técnicas de drenaje urbano sostenible son el futuro del drenaje urbano. Pero, para que esto se cumpla, el régimen de lluvias debe de ser de intensidad moderada y constante en el tiempo, además de ser necesario un espacio suficiente para su aplicación.

6.4. Descripción de las técnicas LID

Las numerosas técnicas LID existentes actualmente pueden ser clasificadas de diversas formas. En este estudio, igual que la mayoría de investigadores de la materia, se han dividido entre técnicas que no implican cambios estructurales y técnicas que sí implican cambios estructurales.

6.4.1. Técnicas que no implican cambios estructurales

Las técnicas que no implican cambios estructurales se caracterizan por no implicar directamente la construcción de infraestructura de ningún tipo ni actuaciones sobre la red existente. Aun así, son medidas que claramente colaboran en la consecución de los objetivos perseguidos por el drenaje urbano sostenible.

6.4.1.1. Medidas para minimizar la escorrentía

La primera medida consiste en minimizar las zonas pavimentadas. La consecuencia de reducir el porcentaje de área impermeable de la zona urbana es aumentar la infiltración y aproximarse al comportamiento natural de la cuenca. En áreas de nueva urbanización, la aplicación de esta medida es relativamente fácil; pero, en zonas ya urbanizadas, a falta de espacio, su implementación se complica.

La segunda medida es direccionar la escorrentía a zonas verdes existentes. La escorrentía originada en áreas impermeables puede ser conectada a las zonas verdes existentes, mejorando el rendimiento de estas. [13]

6.4.1.2. Medidas para mejorar la limpieza del agua

Con un buen mantenimiento de las calles, la contaminación se vería contundentemente reducida. Esto se traduce en un “firstflush” de la escorrentía superficial arrastrando una menor cantidad de contaminantes y, a posteriori, llegando a la red de aguas receptoras.

Algunas medidas concretas para mejorar la limpieza se centran en la educación ciudadana. Estas pueden ser: concienciar a la población acerca del peligro que supone ensuciar las calles, evitar transportar y utilizar fertilizantes, herbicidas o pesticidas cerca de zonas en las que puedan ser transportados por la escorrentía, utilizar técnicas de drenaje sostenible domésticas.

Por otro lado, medidas de mantenimiento, que incluyen limpieza y mantenimiento frecuentes tanto de la infraestructura de drenaje existente como de las propias calles, aparcamientos y otras zonas impermeables, así como el mantenimiento y control de las propias técnicas LID estructurales para asegurar su funcionamiento a largo plazo.

Por último, medidas de contención, especialmente en sustancias contaminantes, en el caso de vertido accidental. [13]

6.4.2. Técnicas que implican cambios estructurales

Las técnicas que implican cambios estructurales, como indica su nombre, requieren algún elemento constructivo. Estas formarán parte de la infraestructura de drenaje sostenible. Como se ha comentado previamente, la diferente terminología de las técnicas puede incitar a confusiones, ya que no hay una catalogación única. CIRIA clasifica estas técnicas en *The SuDS Manual* de la siguiente forma:

6.4.2.1. Cunetas verdes

Las cunetas verdes son estructuras lineales a cielo abierto cubiertas de vegetación, excavadas en el terreno y sin revestir. Permiten la infiltración a través de su base y paredes, mientras transportan la escorrentía de un punto a otro. Deben generar velocidades inferiores a 1 o 2 m/s en el agua que circule, con el fin de que las partículas en suspensión puedan sedimentarse y no aparezcan problemas de erosiones.

En ambientes urbanos, la aplicación de esta técnica es complicada por la falta de espacio para canalizar la escorrentía en superficie. La forma y tipo de vegetación de las cunetas verdes depende del proyecto, pero suelen ser anchas y poco profundas. [13]

Se pueden dividir en tres sub-tipos:

- Cunetas de transporte o tradicionales: es la tipología estándar de cuneta verde, que simplemente se excava y se cubre de vegetación. Son particularmente efectivas para transportar la escorrentía captada hacia otros sistemas de tratamiento mayor o a los lugares de vertido correspondientes, mientras ralentizan el flujo y permiten su infiltración.
- Cunetas secas: la base de la cuneta se excava y rellena de material muy permeable, que permite que todo el volumen se infiltre a través del fondo. Se llaman así porque la mayor parte del tiempo no contienen agua. Este tipo de cuneta permite un mayor almacenamiento de escorrentía y favorece en mayor medida la infiltración.

- Cunetas húmedas: retienen el agua de forma permanente. Para ello, se ejecutan en lugares que tienen el nivel freático elevado o con el suelo impermeable. [23]

6.4.2.2. Pavimentos permeables

Permiten al agua pasar a través de ellos, infiltrándose en el terreno o quedando captada, de forma que pueda ser reutilizada o evacuada posteriormente. Proporcionan una superficie de rodadura para vehículos y de tránsito para los ciudadanos. Si el firme se compone de varias capas, todas ellas han de tener permeabilidades crecientes desde la superficie hacia el subsuelo. Por lo tanto, los pavimentos permeables suponen una técnica que intercepta, retiene e infiltra la escorrentía para atenuar el pico de caudal y reducir el volumen de escorrentía. Además, las distintas capas permeables retienen partículas de diversos tamaños, aceites y grasas. [13] [16]

Existen dos técnicas diferenciadas para obtener un pavimento permeable:

- Pavimentos porosos: infiltran el agua a través de la totalidad del material en superficie.
- Pavimentos permeables: su superficie está formada por un material impermeable, pero se dejan espacios entre los bloques de material para permitir el paso del agua.

La clasificación más habitual para estos pavimentos permeables es en función de los materiales utilizados en su construcción:

- Pavimentos permeables modulares: consisten en empedrar la superficie con bloques de hormigón, arcillas, roca natural, etc., dejando amplias juntas entre ellos, rellenas de material granular, para permitir el paso del agua a las capas inferiores. Su uso se extiende a zonas peatonales, caminos, zonas de aparcamiento, puertos, etc.
- Asfalto poroso: se trata de un tipo de asfalto que aumenta su relación de poros eliminando la porción de finos de la mezcla. Es tan poroso que permite el paso del agua a través de él, manteniendo al mismo tiempo cierta resistencia. Este, además, reduce el ruido del tráfico. Se puede utilizar en zonas de aparcamiento, caminos, carreteras de tráfico ligero, parques, escuelas, etc.
- Césped reforzado: se utilizan mallas de hormigón o polímeros rellenas de substrato sembrado con césped o simplemente de grava. Su diferencia con respecto a los pavimentos modulares es que la proporción de área permeable es mayor. Su uso se limita a zonas de parking, escuelas, caminos, etc.

- Grava fijada con resina: se utiliza en zonas de tráfico ligero, escuelas, caminos, etc. y resulta atractivo a la vista.
- Hormigón poroso: se trata de un tipo de hormigón que, al omitir las arenas más finas de la mezcla, consigue que su relación de poros sea tan elevada que permite el paso del agua a través de él, manteniendo al mismo tiempo cierta resistencia. Se utiliza en zonas de parking y de tráfico ligero.
- Pavimento de bloques porosos: se trata de un tipo de pavimento permeable modular que tiene la peculiaridad de que los bloques están hechos de hormigón poroso. Estos priorizan la infiltración a través del propio hormigón antes que por las juntas.

Este tipo de técnicas tiene la capacidad de incorporar tuberías perforadas en la capa drenante con el objetivo de evacuar los excedentes de agua que no es capaz de infiltrar el terreno natural. [13]

En definitiva, la función de los pavimentos permeables es doble: ser capaces de captar, retener e infiltrar el agua de lluvia de la tormenta de diseño y proporcionar una resistencia estructural suficiente para resistir las cargas a las que se verá solicitado.

6.4.2.3. Sistemas de almacenamiento

El agua de lluvia es recogida por estos tanques o depósitos para ser utilizada posteriormente. El agua recorre superficies impermeables como tejados hasta ser almacenada. Además de reducir la escorrentía superficial de las calles de la ciudad, ayuda a solventar ciertos problemas de demanda de agua con su método de reciclaje.

Los usos del agua recolectada son variados, desde aplicaciones domésticas como el riego, cisternas de baño o limpieza, hasta aplicaciones comerciales o industriales. Para según qué usos, el agua pasará por un tratamiento para eliminar contaminantes. El tamaño del depósito dependerá de la aplicación. En caso de que sobre parte del agua recolectada es recomendable verterla en zonas con superficies permeables. [13]

El sistema de almacenamiento cuenta con dos elementos: el depósito y el sistema de tuberías necesarias para el transporte y la captación de la escorrentía. Además, para algunos casos será necesario incorporar un sistema de bombeo.

El sistema de almacenamiento más popular es el conocido como “rain barrel”. Las dimensiones son relativamente pequeñas y capta el agua de lluvia caía sobre un edificio.

6.4.2.4. Sistemas de bio-retención

Los sistemas de bio-retención son sistemas diseñados principalmente para el control de la calidad del agua (almacenamiento, infiltración y eliminación de contaminantes) antes de su vertido al medio a través del uso de suelos y vegetación, puesto que su capacidad para el control de caudal es reducida. Se sitúan habitualmente en zonas en ligera depresión. Pueden ser utilizados en multitud de paisajes y escenarios, utilizando un sinfín de combinaciones de materiales, formas y dimensiones.

Para facilitar la infiltración del agua, se coloca un suelo permeable bajo una capa de “mulch” o filtro orgánico y un dren colector de arena o gravilla. La eliminación de la contaminación se optimiza mediante la presencia de vegetación. Para un perfecto funcionamiento de estas técnicas se precisa de un sistema de pretratamiento como una zanja vegetal de infiltración y un dren filtrante perimetral de arena. También es aconsejable la colocación de un desagüe de emergencia. [13]

El alto rendimiento de esta técnica en la eliminación de contaminantes se debe a la variedad de mecanismos presentes:

- La franja filtrante reduce la velocidad de la escorrentía permitiendo la deposición de las sustancias de mayor tamaño.
- En la zona de detención se facilita la infiltración, evaporación y la sedimentación de partículas.
- El “mulch” favorece el crecimiento de microorganismos que eliminan hidrocarburos y materia orgánica.
- Estos contaminantes también se eliminan en el suelo filtrante, además de hacerlo también los metales pesados y nutrientes.
- La vegetación favorece la remoción de contaminantes y la estabilización del suelo. [23]

Como es habitual en la incorporación de técnicas de drenaje urbano sostenible, la falta de espacio en las zonas urbanizadas es preocupante, ya que limita su instalación.

6.4.2.5. Sistemas de infiltración

El objetivo principal de esta técnica es favorecer la infiltración de la escorrentía urbana. Los sistemas de infiltración más comunes son los pozos, franjas y depósitos de infiltración. Tienen una profundidad de entre 1 y 3 metros rellenos de un material granular, que permita el almacenamiento de escorrentía proveniente de superficies impermeables.

Los pozos de infiltración son sistemas subterráneos de almacenamiento temporal de la escorrentía procedente principalmente de tejados y azoteas. Mediante esta técnica se

consigue desconectar estas aguas de la red principal, disminuyendo así el caudal a circular por la red de alcantarillado. No pueden utilizarse en suelos poco permeables.

Existen varios tipos de pozos de infiltración: pequeños pozos contruidos con elementos modulares o materiales granulares envueltos en geotextil y, por otro lado, los prefabricados de hormigón perforado, rodeados de relleno granular.

Las zanjas de infiltración son más estrechas y menos profundas que los pozos. Se utilizan principalmente para el control de la calidad. Hay que tener cuidado con el terreno donde se van a instalar, evitándose siempre localizaciones cerca de las cimentaciones de edificios o de carreteras.

Por último, la finalidad de los depósitos o estanques de infiltración es almacenar el agua de lluvia en superficie mientras va filtrando en el terreno. Son depresiones en el terreno y suelen estar cubiertos de vegetación. Captan la escorrentía de las superficies impermeables adyacentes. Se está popularizando últimamente su uso en glorietas. [23] [13]

6.4.2.6. Tejados verdes

Los tejados verdes, cunetas vegetadas o “Green Roofs” están concebidas para interceptar y retener las aguas pluviales, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando el caudal pico. Los beneficios que ofrecen no sólo están asignados a la hidrología urbana, sino que potencian un funcionamiento eficiente del propio edificio.

Consisten, estructuralmente, en un sistema multicapa colocado sobre los tejados de los edificios, favoreciendo el crecimiento de la vegetación. El sistema trabaja en conjunto interceptando y almacenando la mayor cantidad de agua de lluvia posible y reteniendo contaminantes. Parte del agua interceptada se podrá eliminar mediante la evapotranspiración a través de las plantas. Además, actúa como capa de aislante térmico en el edificio, ayudan a compensar el efecto “isla de calor” que se produce en las ciudades y reduce los niveles de ruido. Como consecuencia, posibilitan la reducción de costes energéticos. [13]

La clasificación de tejados verdes se divide en:

- Tejados extensivos. La capa de sustrato es fina (entre 2 y 15 centímetros) y el tipo de vegetación es de tipo herbáceo o musgoso, con requerimientos de mantenimiento reducidos. Por este motivo, son aplicados en una gran variedad de localizaciones. Tienden a no ser accesibles y pueden ser planos o inclinados.
- Tejados intensivos. La capa de sustrato es más profunda (mayor de 15 centímetros) y suelen admitir una amplia variedad de plantaciones, aunque

requieren un mantenimiento mayor. Su uso suele limitarse a nuevas construcciones. Por lo general, son accesibles.

Las capas que componen los tejados verdes están compuestas de diferentes materiales, siendo los siguientes en orden ascendente:

- Membrana impermeable. Impide que el agua contenida en las capas superiores alcance la estructura del edificio.
- Barrera de raíces. Impide que las raíces puedan penetrar a través de la membrana impermeable dañándola. Esta barrera puede ser un biocida o una espesa capa de polietileno.
- Capa de drenaje. Su función es controlar el agua de retención del tejado y sus propiedades en combinación con el sustrato. Puede estar compuesta de varios tipos de materiales granulares o elementos modulares/sistemas laminares.
- Geotextil. Situado, normalmente, entre la capa de drenaje y el sustrato para que el segundo no contamine al primero. Deberá ser de alta permeabilidad para no influir en el proceso de filtrado del agua.
- Sustrato. Es el espacio físico, dotado de una estructura porosa, con nutrientes, composición química y propiedades de drenaje necesarios para el crecimiento de las plantas escogidas.
- Capa de vegetación. Habrá que escoger la especie más adecuada en función de la climatología. Puede ser plantada artificialmente, mediante semillas, esquejes o por colonización natural. [23]

6.5. Marco normativo

La normativa actual de saneamiento se refiere únicamente a los sistemas de drenaje convencional, y no nombra de forma explícita los términos SuDS o LID. Sin embargo, sí que menciona la necesidad de aplicar técnicas de drenaje sostenible, lo que implícitamente deja abierta la puerta a estas tecnologías.

En la legislación española no hay referencias a los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible. SAN-1/4 establece que los nuevos diseños de saneamiento urbano han de realizarse dando prioridad a las técnicas de drenaje sostenibles.

A continuación, se recogen la legislación y recomendaciones más relevantes asociadas con los SuDS a nivel europeo, estatal y autonómico.

- Normativa Europea

- “Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo”, Documento de trabajo de la Comisión Europea 2012, (ISBN 978-92-79-26211-1). [25]
 - Directiva Marco 2000/60/CE, por la que se establece el marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
 - Directiva sobre inundaciones del 2007, tiene como objetivo reducir y gestionar los riesgos que las inundaciones representan para la salud humana, el medio ambiente, patrimonio cultural y la economía. [26]
 - La Directiva de las Aguas Subterráneas, establece unos estándares de calidad e introduce medidas para prevenir o limitar las entradas de contaminantes en las aguas subterráneas. [27]
 - La Directiva de Aguas Residuales Urbanas 1991. [28]
- Normativa Española
 - Real Decreto Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueban las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas.
 - Resolución de 28 de abril de 1995, de la Secretaría de estado de Medio Ambiente y Vivienda por la cual se dispone la publicación del acuerdo del consejo de ministros de 17 de febrero de 1995, en la que se aprueba el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales.
 - Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. [29]
 - Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. [30] [31]
 - Real Decreto 233/2013, de 5 de abril, por el que se regula el Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la regeneración y renovación urbanas. [32]
 - Real Decreto 400/2013, de 7 de junio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental. [33] [23]
 - Normativa Comunidad Foral de Navarra

- Orden Foral 128/2009, de 20 de marzo, de la Consejera de Desarrollo Rural y Medio Ambiente, por la que se revisan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos de fuentes agrarias. [34]
- Decreto Foral 12/2006, de 20 de febrero, por el que se establecen las condiciones técnicas aplicables a la implantación y funcionamiento de las actividades susceptibles de realizar vertidos de aguas a colectores públicos de saneamiento. [35]
- Decreto Foral 191/2000, de 22 de mayo, por el que se modifica parcialmente el Reglamento de la Ley Foral 10/1988, de 23 de diciembre, de saneamiento de las aguas residuales de Navarra desarrollado por el Decreto Foral 82/1990, de 5 de abril. [36]
- Ley Foral 10/1988, de 29 de diciembre, de saneamiento de aguas residuales en Navarra (BOE nº32, 7 de febrero de 1989).

7. PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Con el conocimiento adquirido acerca de las técnicas de drenaje urbano sostenible, el siguiente paso es comprobar en qué medida estas técnicas pueden resultar útiles. El presente estudio va a analizar la posibilidad de aplicar este tipo de técnicas sostenibles en un barrio de Tudela, más en concreto en el barrio de Lourdes.

Este barrio de Tudela presenta una anticuada red de drenaje unitaria, por lo que la aplicación de técnicas de drenaje urbano sostenible sería una buena aportación. Pero, la cuestión es si realmente serán capaces de solucionar los problemas de cantidad y calidad de escorrentía superficial que se produce en eventos de lluvias torrenciales. Otra cuestión preocupante es si será notorio el cambio en la reducción de volumen de escorrentía superficial y si mejorará de calidad del agua que estos sistemas proporcionan. También, sería interesante comprobar si el cambio producido por estos elementos sostenibles será o no significativo. Se espera que este trabajo pueda dar respuesta a todas estas cuestiones.

El objetivo de este trabajo es resolver las dudas que ofrece la aplicación de las técnicas de drenaje urbano sostenible, con datos reales de eventos de precipitación extremos producidos con anterioridad. Se estudiará la capacidad de las técnicas en cuatro situaciones diferentes y se discutirá si su aplicación puede resultar de utilidad. Cada una de las situaciones incorporará progresivamente más técnicas sostenibles; es decir, partiremos con un escenario sin técnicas de drenaje sostenible y se irán incorporando gradualmente.

El caso de estudio se llevará a cabo mediante la simulación del proceso precipitación-escorrentía en la cuenca urbana de Tudela. El software de cálculo a utilizar será el

Storm Water Management Model (SWMM), de la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), en su versión SWMM 5.1.

7.1. Descripción y características de la cuenca urbana de Tudela

El caso de estudio se centra en una cuenca urbana de Tudela. El municipio de Tudela se sitúa en la Ribera Navarra, en la cuenca del río Ebro. Tiene una extensión de 215,68 km² y limita al norte con Castejón, Arguedas y Valtierra; al sur con Tarazona, Cascante, Murchante, Ablitas, Fontellas; al este con Cabanillas y Bardenas Reales; y al oeste y norte con Fitero, Cintrúenigo y Corella.

Litológicamente, la mayor parte del sustrato rocoso que aflora en el territorio corresponde a materiales continentales de la edad del Mioceno, formado por un importante paquete de materiales terciarios de naturaleza detrítica, cuya potencia supera varios cientos de metros.

Presentan, por tanto, todo tipo de depósitos, desde conglomerados y areniscas hasta arcillas con calizas y con yesos. Sobre estos materiales terciarios, se ha desarrollado una importante cobertura cuaternaria, originada por los materiales depositados por los ríos Ebro y Queiles. Los materiales que constituyen estos depósitos son gravas, arenas, limos y arcillas, con granulometría variada en función de las características de sedimentación del cauce. [10]

La descripción geomorfológica del territorio está condicionada fundamentalmente por tres factores geológicos:

- En primer lugar, por la estructura del sustrato rocoso, serie monoclinical con buzamientos muy suaves hasta prácticamente horizontales.
- En segundo lugar, por la composición litológica del sustrato, dominado por rocas arcillo-limosas, de competencia media-baja, con intercalaciones, y a veces alternancias, de calizas y areniscas, litologías de mucha mayor dureza resistencia.
- En tercer lugar, por la existencia de un amplio valle fluvial, donde discurre el río Ebro, ocupado por depósitos aluviales y fluviales que presentan una pendiente muy suave. Además, la mayoría del resto de depósitos cuaternarios corresponden a terrazas colgadas y a depósitos de glaciares, que ocupan así mismo una gran extensión con escasa pendiente. [10]

7.2. Hidrología de la zona

El río Ebro es el principal colector de aguas fluviales de la Región. El régimen hidrológico es de tipo pluvio-naval, con un máximo caudal en marzo y mínimo en agosto.

En cuanto a las aguas subterráneas, el término municipal de Tudela se encuentra asentado sobre la Unidad Hidrogeológica del Ebro y afluentes, constituida por acuíferos en aluviones de gran extensión. [10]

El siguiente mapa plasma los principales flujos de agua que se encuentran en la Ribera de Navarra, así como la distribución de los núcleos urbanos más importantes:

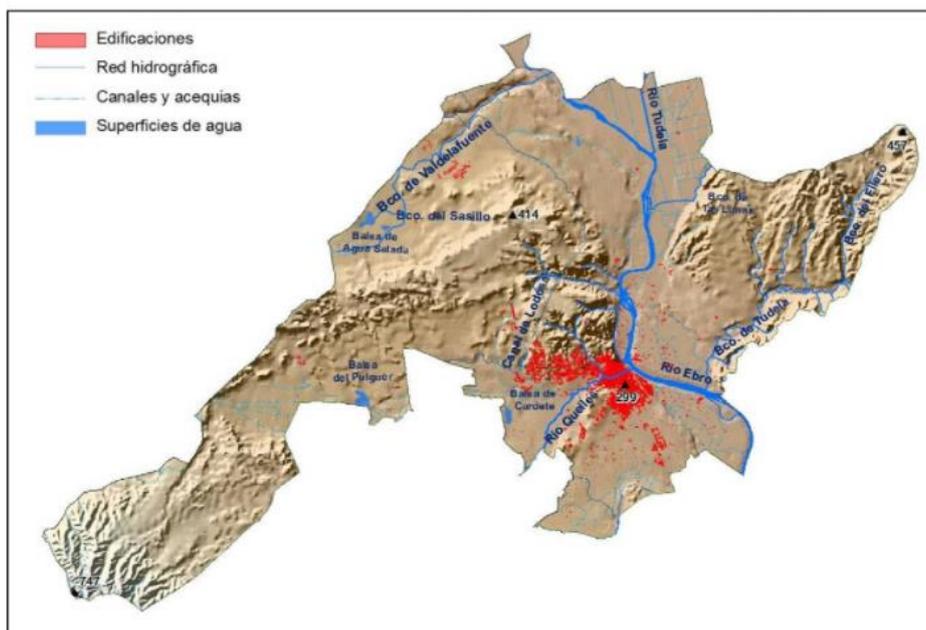


Ilustración 6. Distribución de los hábitats de interés comunitario [37]

La principal fuente de superficie de agua en la zona de la Ribera es el río Ebro, que cuenta con afluentes como el río Queiles o el río Tudela, el Mediavilla. El río Ebro es el segundo río más largo de España y el segundo más caudaloso, por lo que es una fuente fundamental para la vida diaria de los ciudadanos de Tudela. Además, al ser Tudela el núcleo más poblado de la zona, los recursos hídricos son utilizados principalmente por los habitantes de este municipio.

7.2.1. Pluviometría

La climatología típica de la zona de Tudela se corresponde con el clima mediterráneo continental, caracterizado principalmente por la acusada oscilación térmica, detallado en el apartado 4.1. *Descripción de la climatología* y 4.2. *Las precipitaciones*. La precipitación total anual se sitúa en, aproximadamente, 411mm, aunque la distribución de estas no está balanceada, pues los meses de abril, mayo y octubre superan los 44mm de media cada uno, mientras que meses como febrero, julio o agosto no alcanzan los

23mm. A pesar de estas medias, el día con la máxima cantidad de lluvia captada durante el año pasado ocurrió en septiembre, con una precipitación de 80mm.

7.2.2. Proceso lluvia-escorrentía

Además de la propia agua de lluvia, intervienen una serie de procesos en la formación de escorrentía. Conocer las características de la cuenca es importante para describir la escorrentía superficial y simular correctamente su trayectoria. Parte del agua de lluvia no es parte de la escorrentía superficial, ya sea por los procesos de infiltración, de evaporación o por los de retención en superficie. Los métodos incorporados en SWMM5.1 para el cálculo de las pérdidas de precipitación son la ecuación de Horton, el método GreenAmpt y el método del número de curva del SCS (Soil Conservation Service). [13]

7.2.2.1. Retención en superficie

La capacidad de infiltración depende de la intensidad de lluvia. Si la intensidad de lluvia es menor que la capacidad de infiltración potencial, el suelo infiltrará a un ritmo menor a su potencial; sin embargo, si la intensidad supera ese potencial, el agua se irá acumulando en la superficie y la infiltración se producirá a la máxima velocidad posible según las condiciones del terreno.

En el caso de producirse dichas acumulaciones de agua, parte de esta agua puede tomar dos caminos: permanecer acumulada en depresiones o desplazarse a la escorrentía superficial. En este segundo caso, aparecen nuevas pérdidas ocasionadas por plantas u otros elementos que impiden su movimiento. En la mayoría de los casos, estas pérdidas son del orden de milímetros. [13]

Para controlar la cantidad de agua acumulada en superficie en SWMM5.1, deberá asignarse a cada subcuenca un valor de retención en mm para zonas permeables y otro valor para zonas impermeables, además del porcentaje de suelo impermeable en que no aparecen pérdidas de este tipo. Estos parámetros no son fáciles de calcular de forma precisa, pero deben aproximarse en la medida de lo posible.

7.2.2.2. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de evaporación del agua que se encuentra en la superficie del suelo y de la transpiración a través de la vegetación. La evapotranspiración afecta principalmente al agua retenida en superficie. [13]

En SWMM5.1, una de las subcuencas apenas cuenta con zonas verdes, por lo que el valor de transpiración será muy pequeño; en la otra, el valor aumenta debido al alto porcentaje de zona verde.

7.2.2.3. Infiltración

El proceso de infiltración consiste en la penetración del agua desde la superficie del terreno hacia el suelo. En primer lugar, la falta de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie es saciada. Tras esto, superando cierto nivel de humedad, el agua llega a la zona subterránea, colmando los espacios vacíos.

Debido a la multitud de factores que afectan a la capacidad de infiltración y a sus grandes variaciones en el espacio/tiempo, la infiltración es un proceso muy complejo de describir. Por este motivo, se aproxima por medio de ecuaciones matemáticas. Existen varias ecuaciones para calcular la infiltración, pero la elegida ha sido el Método del Número de Curva (CN).

Este método fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) en 1972 para calcular las pérdidas producidas por la escorrentía en un evento de lluvia. La elección de este método ha sido, entre otras cosas, porque tiene en cuenta el proceso de pérdidas en conjunto, incorporando tanto la infiltración como la retención e intercepción. [38]

La hipótesis planteada por el SCS es que cumple la siguiente igualdad:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Ecuación 1

Siendo:

P_e , cantidad de agua que se convierte en lluvia efectiva (sin pérdidas).

P , cantidad de lluvia total precipitada.

F_a , cantidad de agua infiltrada en la cuenca.

S , máxima retención potencial.

I_a , parte de lluvia que se pierde antes de iniciarse el proceso de escorrentía.

Por el principio de continuidad se conoce que $P = P_e + I_a + F_a$, por lo que:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Ecuación 2

De este modo se obtiene la cantidad de lluvia que no se pierde, es decir, que se convierte en escorrentía superficial. A pesar de que SCS propone una relación de I_a para la simplificación del proceso, SWMM5.1 mantiene la fórmula, ya que permite al usuario escoger el valor retención en superficie. Se define el número de curva (CN) como:

$$S = \frac{25.400}{CN} - 254$$

Ecuación 3

El valor de CN oscila entre 0 y 100, en función del tipo y uso del suelo. Por lo tanto, la única estimación que requiere SWMM5.1 en el método del número de curva es el CN para cada subcuenca. El problema de conocer las propiedades de las subcuencas del estudio queda solucionado con este método, quedando las variables a estimar reducidas. [13]

7.3. Descripción de la red de drenaje actual

En los últimos años, parte de la red de saneamiento de Tudela ha sido modificada implementando redes separativas de aguas residuales urbanas y pluviales; sin embargo, no todos los barrios cuentan con estas actualizaciones. La parte del barrio de Lourdes tratada en este trabajo, cuenta con red unitaria, a pesar de que algunas calles alrededor de este barrio están implementando red separativa. La red de colectores y galerías se encuentran en el subsuelo.

A continuación, se facilita un plano de Tudela, centrado en el barrio de Lourdes, obtenido de la página web Infraestructuras de Datos Espaciales de Navarra IDENA:

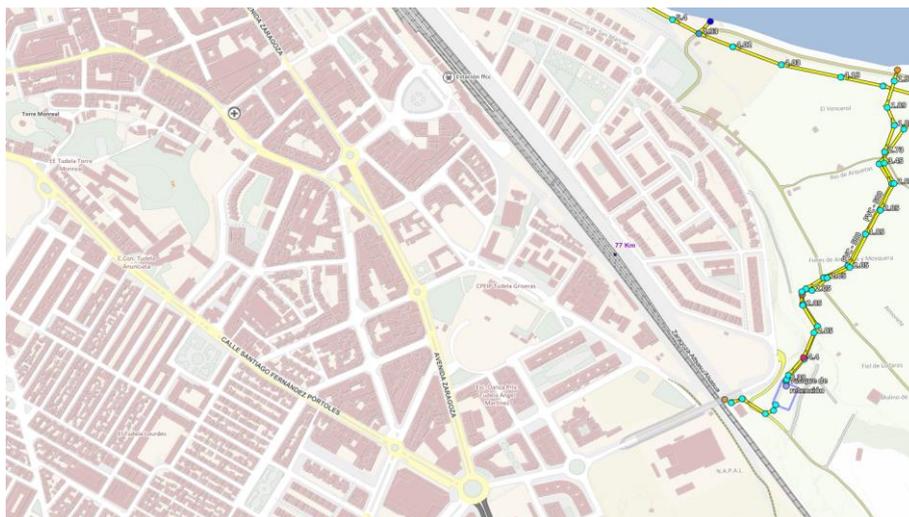


Ilustración 7. Plano de Tudela con la red de saneamiento y depuración NILSA [37]

En el plano puede observarse la situación de tanque de tormentas y su desembocadura en la depuradora de aguas residuales. En ciudades como Pamplona, la red de drenaje está incorporada en los planos de SITNA¹, sin embargo, la situación de la red de drenaje actual no es pública, por lo que únicamente se cuenta con los pertenecientes a NILSA.

Para ampliar el conocimiento de la red actual de Tudela, puesto que los documentos oficiales facilitados no son demasiado explícitos, se realizó una visita al tanque de tormentas de la ciudad de la mano de NILSA. El técnico de NILSA en Tudela aclaró muchas de las dudas iniciales sobre la actual red de drenaje del municipio.

Así, Tudela cuenta con un tanque de tormentas, donde el agua se acumula en eventos de lluvia intensos cuando la red de drenaje se ve superada. El tanque de tormentas es, por lo tanto, un sistema de emergencia que ha funcionado bien desde su construcción. Una vez la tormenta amaina y los canales y pozos de la red se recuperan, el agua del tanque es evacuada y transportada hasta la depuradora. Los contaminantes arrastrados por el agua se depositan en el fondo del tanque y son posteriormente retirados a mano, por lo que es un método efectivo, aunque muy costoso para disminuir la concentración de algunos contaminantes. Puesto que no ha habido un evento de lluvia demasiado intenso en las últimas semanas, el tanque de tormentas se encontraba vacío. En el caso en que la tormenta sea muy intensa y el tanque de tormenta también se vea rebasado, la infraestructura cuenta con un método de alivio de agua en el que solo se separan los contaminantes de mayor tamaño y los más pesados, por lo que el resto son devueltos sin tratamiento alguno al río Ebro. Este efecto provoca que gran parte de la concentración de contaminantes sea arrojada al río.

¹ Sistema de Información Territorial de Navarra

7.4. Elección de las subcuencas

La cuenca principal del barrio de Lourdes ha sido dividida en dos subcuencas de menor tamaño, de forma que el ensayo de dichas subcuencas sea más realista y preciso.

Para crear una delimitación precisa de las subcuencas, se dividirá la superficie en tantas subcuencas como puntos de conexión a la red de drenaje existan: en este caso, dos. Para la delimitación de las subcuencas se ha tenido en cuenta el área que drena a cada uno de los pozos de registro de la red. El software SWMM5.1 permite la clasificación de cada subcuenca como permeable o impermeable, debido a que este factor influye mucho en la generación de escorrentía superficial. Además, en el caso de que se elija opción en superficie impermeable, el programa permite llevar a cabo una división entre impermeable con o sin retención superficial.

Para la correcta selección de las fronteras de las subcuencas, se ha utilizado el plano de la ilustración 7.



Ilustración 8. Plano de Tudela, centrado en el barrio de Lourdes, con las subcuencas a estudiar

La elección de dos tipos de subcuencas tan dispares permite el estudio en distintas condiciones; por ejemplo: el tamaño de las cuencas, el porcentaje de impermeabilidad, la pendiente del terreno, etc.

8.- EL SOFTWARE SWMM5.1

El software utilizado para la simulación de los elementos que conforman el área de Tudela es SWMM en su versión 5.1, siendo esta la más actualizada.

8.1. Descripción del software

La división Water Supply and Water Resources Division de la EPA creó este software hace más de cuarenta años. En todo este tiempo, el programa ha evolucionado hacia versiones más avanzadas. A día de hoy, es quizás el modelo de cálculo de cantidad y calidad de escorrentía urbana más conocido y utilizado a nivel profesional. [23]

El Stormwater Management Model SWMM5.1 es un modelo dinámico de simulación de movimiento del agua de precipitación y contaminantes, tanto en la escorrentía superficial como en la infiltración hacia el subsuelo. Además de la simulación a través de redes de colectores y canales que transportan el agua hacia instalaciones de almacenamiento y/o tratamiento.

El modelo puede utilizarse para simular un solo evento pluviométrico o una sucesión de ellos durante un amplio período de tiempo. Además, este programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua. SWMM5.1 modeliza los elementos que componen un sistema de drenaje urbano convencional. [22]

SWMM5.1 considera distintos procesos hidrológicos que se producen en la salida de las aguas urbanas. Entre ellos se encuentran:

- Precipitaciones variables con el tiempo
- Evaporación de las aguas superficiales estancadas
- Acumulación y deshielo de nieve
- Intercepción de precipitaciones por almacenamientos en depresiones
- Infiltración de las precipitaciones en capas del suelo no saturadas
- Entrada del agua de la infiltración en acuíferos
- Intercambio de flujo entre los acuíferos y el sistema de transporte
- Modelo de depósitos no lineales para el flujo superficial [22]

El programa tiene multitud de aplicaciones, en las que destacan:

- El diseño y dimensionamiento de los elementos de una red de drenaje
- El diseño y dimensionamiento de estructuras de retención y demás componentes empleados para el control de inundaciones y la protección de la calidad de las aguas
- El establecimiento de potenciales zonas de inundación en entornos urbanos

- Ayuda a definir estrategias de control con el fin de minimizar las descargas de sistemas unitarios (DSU)
- Determinar el impacto de aportes e infiltraciones que puede causar una red de residuales
- Analizar la evolución de contaminantes en la red
- Evaluar el funcionamiento y la eficacia de las Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible [22]

En definitiva, SWMM5.1 es capaz de modelizar redes de drenaje tanto unitarias como separativas, así como cuencas y cauces naturales. Los principales elementos que contiene un modelo en SWMM5.1 son:

- Pluviómetro (“Rain Gauge”): Es la serie temporal de lluvias que se utiliza para la modelización.
- Sub-cuencas (“subcatchment”): Serie de parámetros característicos que transforman la lluvia que cae sobre ellas en escorrentía. Esta escorrentía se conecta a la red de drenaje en uno de los nodos de la red.
- Uniones (“junctions”): Pueden representar pozos de registro o simplemente nodos de cambio de dirección, pendiente, geometría, etc. de la red de drenaje.
- Conductos (“conduits”): Cada uno de los tramos de la red de drenaje entre dos nodos de la misma. Pueden representar colectores, canales, etc. con todo tipo de secciones transversales.
- Salida (“outfall”): Se trata del nodo de la red de drenaje que representa su final; el vertido a un medio receptor. Puede ser realmente el vertido al medio o simplemente hacia otro sector de una red más amplia o a la planta depuradora. [13]

8.2. Modelado del estudio

SWMM5.1 convierte datos de precipitación efectiva en escorrentía urbana superficial. El hecho de que la cuenca de estudio se divida en una serie subcuencas de menor tamaño permite captar el efecto de la variabilidad espacial; es decir, que calcula la escorrentía generada en cada una de las subcuencas por separado.

La primera tarea consiste en crear un nuevo proyecto SWMM y establecer y/o corregir las opciones predeterminadas. El uso de estas opciones por defecto puede simplificar mucho el posterior trabajo. A continuación, se fijan algunas opciones de presentación del mapa.

Tras seleccionar las opciones de configuración del proyecto, se añaden componentes de la red en el Plano del Área del Estudio, dibujando en primer lugar las cuencas. Tras esto, se añaden los conductos del sistema de drenaje que conectan entre sí los diferentes nudos del sistema.

SWMM añade una serie de propiedades y valores por defecto a los objetos visuales que se añaden, pudiendo ser modificados.

El siguiente paso es la simulación del proyecto, tras establecer algunas opciones para determinar las condiciones en las que se realizará el informe. El Informe de Estado (Status Informe) contiene un resumen útil de información relacionada con los cálculos de la simulación. [22]

La representación mediante colores de los resultados de la simulación sobre el mapa del área estudiada será de gran ayuda para obtener una mayor visión de los resultados.

Existen dos tipos de gráficos:

- Gráficos de Series Temporales.
- Gráficos de Perfiles Longitudinales. SWMM5.1 puede generar gráficos que muestren perfiles longitudinales y gráficos mostrando cómo evoluciona el nivel del agua a lo largo de un determinado camino de nudos y líneas conectados entre sí.

En SWMM5.1, el usuario tiene la posibilidad de escoger entre tres metodologías de cálculo:

- Flujo Uniforme

El modo de cálculo más simple, asumiendo que en cada intervalo de tiempo computacional el flujo de agua es uniforme y permanente. Este tipo de cálculo no tiene en cuenta el almacenamiento de agua en conductos, efectos de remanso, resaltos hidráulicos, pérdidas en entradas y salidas, entradas en carga o flujo inverso.

- Onda cinética

Se trata de un método aproximado, que no puede representar el comportamiento de fenómenos como: remansos, flujos a presión, flujo inverso y distribuciones no ramificadas del sistema

- Onda dinámica

Proporciona los resultados más precisos de los tres métodos. La onda dinámica tiene en cuenta almacenamiento en conductos, efectos de remanso, pérdidas en entradas y salidas de la red, flujo inverso y entradas en carga. Puede aplicarse a cualquier esquema de red de drenaje, tanto en redes malladas como arborescentes. Este procedimiento de cálculo requiere más tiempo de cálculo, dado que los incrementos de tiempo requerido

para mantener la estabilidad del sistema son menores. Debido a las características que presenta, este será el método utilizado en el estudio. [13] SWMM tiene la capacidad de analizar la acumulación, arrastre, transporte y tratamiento de cualquier número de constituyentes de la calidad del agua.

8.3. Modelado de los elementos LID

Las últimas versiones de SWMM incorporan la posibilidad de modelizar diferentes tipos de técnicas LID, simulando los procesos de retención, infiltración, evapotranspiración y reducción de la carga contaminante en la medida que las diferentes capas que las componen son capaces de llevarlos a cabo. [13]

La pantalla principal de SWMM5.1 cuenta con la opción de *LID Controls*, en la pestaña *Hydrology*, donde permite crear o editar las diferentes técnicas LID que pueden ser utilizadas. Posteriormente, se podrá especificar qué área ocupa en cada una de las subcuencas.

Existen dos métodos diferentes de implantar las técnicas LID en las subcuencas:

- Situar uno o más sistemas LID en una subcuenca existente, disminuyendo el área no cubierta por LID.
- Crear una subcuenca adicional específicamente para alojar el LID a implementar.

El método aplicado en el proyecto será el primero, situando las diferentes técnicas LID en una misma subcuenca. Utilizando esta opción se consigue que los LID actúen en paralelo. Los diferentes LID implementados tratarán tanto el área que cae sobre ellos como parte de la escorrentía generada en la porción impermeable de la subcuenca que se dirige hacia ellos. [13]

8.3.1. Tipología de los elementos LID

Han sido desarrolladas las características y propiedades de las diferentes técnicas de drenaje urbano sostenible en el apartado 6.4.2. *Técnicas que implican cambios estructurales*. A continuación, se exponen las 8 técnicas de LID que ofrece SWMM5.1 para su aplicación en proyectos:

- Celdas de bio-retención (“Bio-retention Cells”)

El sistema de bio-retención que ofrece SWMM5.1 consiste en áreas deprimidas, que contienen vegetación en una capa de tierra con unas propiedades concretas sobre una base de grava que permite el drenaje. Este sistema cuenta con la función de almacenar el agua de lluvia, infiltrándola hacia el terreno natural y evapotranspirar, tanto la escorrentía allegada de áreas adyacentes que drenan hacia ella como la propia agua de lluvia que cae sobre su superficie directamente. [13]

El diseño que ofrece SWMM5.1 de esta técnica, diferenciando las capas, es el siguiente:

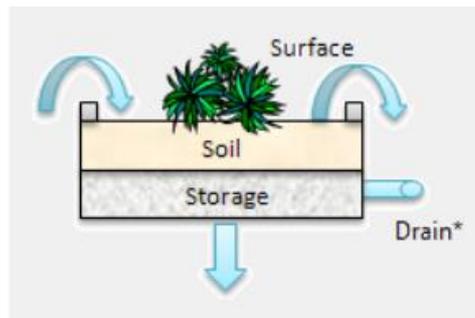


Ilustración 9. Esquema de modelización de una celda de bio-retención en el software SWMM5.1

Las capas de una celda de bio-retención quedan bien diferenciadas, siendo: superficie, suelo y almacenamiento. Las flechas azules muestran que el agua de lluvia llega a la superficie, en los casos comentados anteriormente, y puede salir por la propia superficie o infiltrándose al terreno. En casos concretos, se añade un tubo de drenaje, que conecta directamente con la red de alcantarillado.

- Jardines de lluvia (“Rain Gardens”)

Los jardines de lluvia son otro tipo de sistema de bio-retención. Las propiedades que ofrece esta técnica han sido expuestas en el apartado 5.4.2. Técnicas que implican cambios estructurales. A diferencia de las celdas de bio-retención, esta técnica no cuenta con la capa de almacenamiento, por lo que la capacidad de almacenar escorrentía es mucho menor. Además, al no contar con dicha capa, el tubo de drenaje tampoco puede ser aplicado. [13]

El diseño ofrecido por SWMM5.1 es el siguiente:

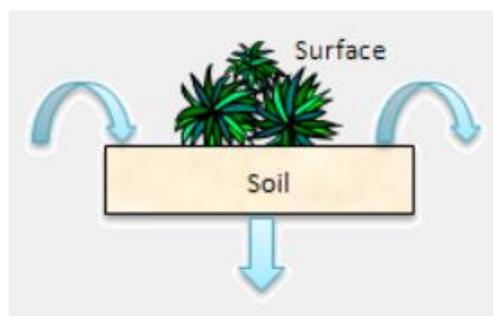


Ilustración 10. Esquema de modelización de un jardín de lluvias en el software SWMM5.1

Las capas disponibles son: superficie y suelo. Como indican las flechas azules, el agua de lluvia llega por la superficie, igual que en las celdas de bio-retención, y puede salir por la superficie de nuevo o infiltrarse hacia el terreno.

- Tejados verdes (“Green Roofs”)

Los tejados verdes, previamente explicados, permiten plantar vegetación sobre una capa de suelos con características concretas. Este suelo se sitúa sobre una capa de un material drenante que permite la retención del agua de lluvia sobre el tejado. Tienen la capacidad de almacenar y transportar el agua de lluvia hacia la red de alcantarillado o hacia una zona de terreno permeable adyacente. [13]

El diseño presentado por SWMM5.1 es el siguiente:

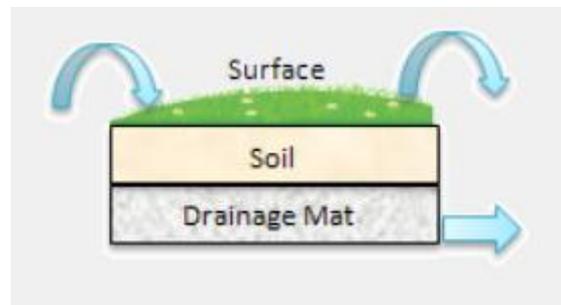


Ilustración 11. Esquema de modelización de un tejado verde en el software SWMM5.1

Se diferencian claramente las tres capas mencionadas: superficie, suelo y material drenante. El flujo de agua de lluvia llega directamente a la superficie y desagua por la propia superficie o por el material drenante de la base.

- Trincheras de infiltración (“Infiltration Trenches”)

Se trata de un sistema de infiltración, que puede ser transformado en pozo o depósito de infiltración, modificando la superficie que ocupa la trinchera y su profundidad. Esta técnica consiste en una excavación rellena de grava drenante, capaz de retener la escorrentía que llega hasta ella y el agua de lluvia que cae directamente sobre su superficie. Facilitan un espacio donde el agua de lluvia se almacenará y parte de ella filtrará sobre el terreno natural. En casos concretos, puede aplicarse un tubo de drenaje, que ayuda a la salida del agua hacia la red de alcantarillado. [13]

El diseño que ofrece SWMM5.1 es el siguiente:

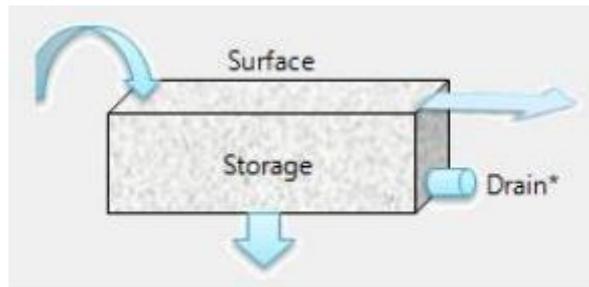


Ilustración 12. Esquema de modelización de una trinchera de infiltración en el software SWMM5.1

Las capas que dispone esta técnica son: superficie y almacenamiento. Las flechas azules indican que el agua de lluvia llega por la superficie y toma tres salidas: superficie, infiltración al terreno natural o el tubo de drenaje.

- Pavimento permeable (“Permeable pavement”)

Zonas excavadas son rellenadas de grava drenante y pavimentadas de hormigón o de una mezcla bituminosa porosa. En casos concretos, se aplica una capa de arena entre la capa de grava y la de pavimento. El agua de lluvia, en forma de escorrentía superficial o lluvia directamente caída sobre su superficie, traspasará con facilidad la capa de pavimento, llegando a la capa de almacenamiento, donde infiltrará hacia el terreno natural. Además, puede incorporarse un tubo de drenaje en la capa de almacenamiento, ayudando al agua a fluir hacia la red de alcantarillado. [13]

El diseño ofrecido por SWMM5.1 es el siguiente:

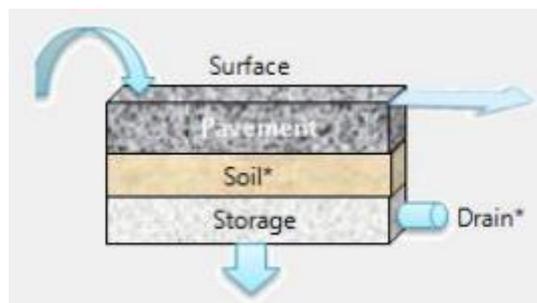


Ilustración 13. Esquema de modelización de un pavimento permeable en el software SWMM5.1

Las capas que presenta el pavimento permeable son: superficie, suelo (en casos concretos) y almacenamiento. Las flechas azules muestran la entrada del agua por la superficie y su salida por la misma superficie, infiltrada en el terreno natural o, en casos concretos, por el tubo de drenaje.

- Depósitos de lluvia (“Rain Barrels”)

El funcionamiento de estos sistemas consiste en el almacenamiento del agua recogida en eventos de lluvia para su posterior uso. Esta técnica permite almacenar el agua o transportarla hacia la red de alcantarillado o hacia áreas permeables adyacentes. El destino principal de este tipo de sistema son las casas, siendo así de uso particular. [13]

El diseño que ofrece SWMM5.1 es el siguiente:



Ilustración 14. Esquema de modelización de un depósito de lluvias en el software SWMM5.1

Cuenta con una única capa, la de almacenamiento. Las flechas azules indican que el agua es captada por su superficie y puede salir por la propia superficie o directamente hacia la red de alcantarillado o área permeable adyacente.

- Desconexión de bajantes de tejados (“Rooftop Disconnection”)

La finalidad de esta técnica es infiltrar en el terreno natural el agua de lluvia recogida en los tejados. Para ello, el agua es transportada hacia zonas permeables desde los propios tejados. Las bajantes de los tejados, por lo general, están conectados directamente con la red de alcantarillado; de esta forma, el volumen de agua que llega hacia ellos se reduce considerablemente. [13]

El diseño ofrecido por SWMM5.1 es el siguiente:

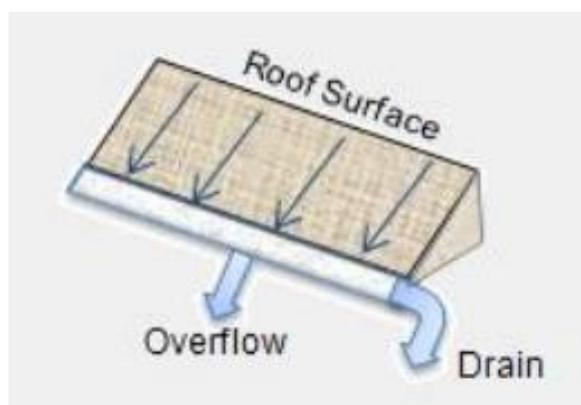


Ilustración 15. Esquema de modelización de una desconexión de bajante de tejados en el software SWMM5.1

La única capa con la que cuenta esta técnica es la superficie. Las flechas azules representan el agua de lluvia captada por la superficie de los tejados en forma de escorrentía y transportada por la bajante o, en caso de rebose, el agua caería de los propios canalones.

- Cunetas verdes (“Vegetatives Swales”)

Las cunetas verdes son depresiones con pendiente longitudinal cubiertas de vegetación. Su función es la de ralentizar la escorrentía superficial y proporcionar tiempo adicional para que pueda infiltrarse en el terreno natural. El espacio con el que cuentan es suficiente para almacenar el agua, infiltrarla hacia el terreno natural y, gracias a la vegetación, evapotranspirar. El agua que llega a estas cunetas proviene de la escorrentía transportada en zonas adyacentes o la caída directamente sobre la superficie en el evento de lluvia. [13]

El diseño que ofrece SWMM5.1 es el siguiente:

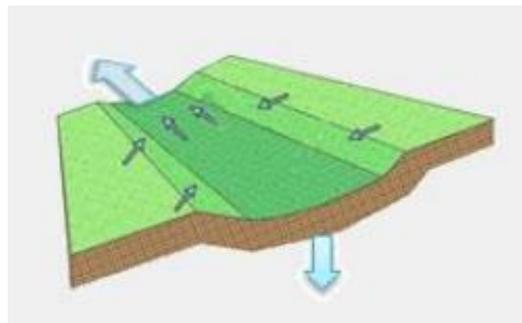


Ilustración 16. Esquema de modelización de una cuneta verde en el software SWMM5.1

La única capa de las cunetas verdes es la superficie. Las flechas azules indican que el agua de lluvia proviene, como se ha comentado, de escorrentía de zonas adyacentes o la caída sobre la superficie y su salida es la infiltración en el terreno o por la superficie, en caso de rebose.

9.- METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Como se ha comentado, el proyecto se ha realizado en una zona del barrio de Lourdes, en el municipio de Tudela, durante el evento de lluvia del 31 de mayo de 2020. La cuenca principal está dividida en dos subcuencas, con notable diferencia de tamaños. Durante el evento, la medición recogida por el pluviómetro manual del municipio fue de 35 L/m². La mayor parte del evento de precipitación (prácticamente toda) cayó entre las 16:00h y las 17:00h.

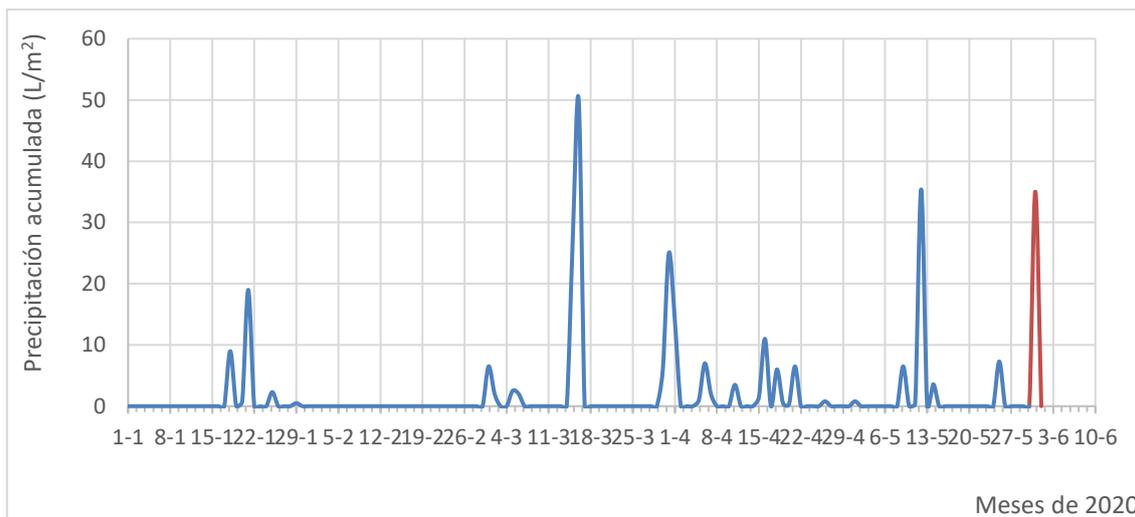


Gráfico 6. Concentración de precipitación acumulada entre los meses de enero y junio de 2020

Como se puede observar en la gráfica, el volumen de caudal acumulado en el evento de lluvia del 31 de mayo no fue el mayor; sin embargo, se ha seleccionado este porque el evento transcurre en apenas una hora, mientras que los casos en que el volumen total es mayor suceden a lo largo del día, ya que se trata de volumen de agua acumulado. Este trabajo quiere simular un evento de lluvia torrencial, por lo que la selección de este evento de una hora es la mejor alternativa.

Una vez creado un nuevo proyecto, se han modificado algunos parámetros en el menú *Opciones*, comenzando por aplicar Onda dinámica en el método de cálculo, además de *Número de curva* en el método de cálculo de la infiltración. A continuación, se precisa el evento de lluvia en el apartado *Dates*, comenzando la simulación a las 00:00h y terminando a las 18:00h, puesto que el evento ya había terminado. Se consideró un periodo de 4 días secos, previos al día del ensayo. Los intervalos de cálculo son de 15 minutos. La distribución de lluvia fue: de 15:00-16:00h, 0.5 litros; de 16:00-17:00h, 34 litros; de 17:00-18:00h, 0.5 litros. Esta es una estimación, puesto que no se cuenta con los datos precisos por horas, pero sabiendo que se trata de un evento de lluvia torrencial es una aproximación acertada. Por último, para el *Criterio de flujo normal* fue seleccionado el de *Slope y Número de Froude*, y para calcular la *Ecuación Principal de Fuerza* se estableció *Hazen-Williams*.

El segundo paso es editar las propiedades de *Climatología*. Al ser un evento de lluvia torrencial, no se han incorporado datos de temperatura, evaporación, velocidad del viento, ni deshielo, ya que se consideran despreciables. Otros proyectos importantes, como el de Valbuena Villalonga “Rehabilitación de redes de alcantarillado mediante técnicas LID, usando SWMM5 en un caso real” también desprecia dichos parámetros. Al evento de lluvia se le ha asignado el nombre de LL1.

Seguidamente, se ha enfocado el menú Hidrología, comenzando por el Pluviómetro. En este apartado, definimos el evento de lluvia como lluvia de diseño con formato intensidad.

Tras el diseño de la lluvia, definimos las subcuencas. La primera ha sido diseñada con un área de 2.8 hectáreas, aplicando también la anchura, pendiente y porcentaje de permeabilidad. En el diseño de la segunda subcuenca, el proceso ha sido el mismo, dando como resultado una subcuenca de 11.11 hectáreas. Se ha sido consciente del gran tamaño de la subcuenca 2; otra opción hubiese sido considerar la división en varias subcuencas más pequeñas. Sin embargo, al tratarse de un estudio preliminar, se ha optado por una definición más sencilla. Cabe destacar que este estudio tiene carácter exploratorio.

Teniendo en cuenta que la escorrentía será arrastrada gracias a la fuerza de la gravedad, no se han incorporado bombas al sistema.

Además, se ha elegido una zona donde la red de drenaje es unitaria. Las subcuencas han sido citadas como SC1 y SC2.

Posteriormente, en el menú *Parámetros Hidráulicos*, se han definido los nodos y conductos de las subcuencas. Se ha precisado de 6 nodos para el ensayo. El dato de altura sobre el nivel del mar se ha definido consultando la página web IDENA³. Destacar entre los valores que la máxima profundidad de agua es de 2 metros. Se han nombrado a los nodos como 1, 2, 3, 4, 5 y 6. En el mismo apartado de *Nodos*, definimos el vertedero al final del trayecto. Se ha decidido no aplicar tratamiento y el dato de altura sobre el nivel del mar ha sido extraído también de IDENA. Se ha nombrado como V7.

A continuación, se definen los conductos. Entre las posibilidades que ofrece SWMM5.1, se ha decidido la selección de sección circular. Se aplican los datos de longitud, rugosidad y diámetro de los canales. En todos los conductos, el diámetro aplicado ha sido de 0.4 metros y el coeficiente de rugosidad de Manning de 0.01, debido a que son los parámetros más comunes en este tipo de instalaciones. Los nombres recibidos han sido T1, T2, T3, T4, T5 y T7.

El siguiente paso es definir los criterios de calidad del agua. Para ello, en el apartado de *Contaminantes*, se ha establecido una contaminación difusa con tres tipos diferentes de contaminantes: sólidos en suspensión, demanda bioquímica de oxígeno y amonio.

Aunque se ha visto que la contaminación urbana difusa puede contener otros contaminantes, como se ha visto en el apartado 5.2.2.2. *La contaminación de las aguas pluviales*, se han seleccionado los tres más comunes y en mayor proporción. Los nombres que han recibido han sido SS, DBO5 y NH₄, respectivamente. Una fracción de la concentración de escorrentía de contaminantes se convierte en la concentración actual de escorrentía de contaminantes. La concentración de DBO5 está asociada a los SS en un 85%, mientras que el NH₄ está asociado únicamente en un 3%. Los valores de concentraciones han sido extraídos de la tesis de Seco, I., & Gómez, M. (2014).

3 Infraestructuras de Datos Espaciales de Navarra

Por otro lado, se ha concretado el uso del suelo, definiéndolo solamente como zona residencial. Se han definido los días de limpieza de la cuenca en intervalos de un día, con una eficacia s de un 40%. El último lavado se había realizado un día antes.

Para aumentar el campo de investigación del trabajo, se ha participado en una charla impartida por NILSA. En ella, NILSA exponía una de las misiones en las que se encuentran actualmente. Este trabajo consiste en la localización de residentes de Pamplona contagiados con el Covid-19. Para ello, dividido por barrios, analizan las aguas residuales con el objetivo de encontrar restos del virus. Una vez localizado, reducen la zona de acción hasta topar con el contagiado. Encontrar al contagiado es muy complicado, dado el elevado número de edificios de cada barrio de Pamplona, pero acerca a conocer la situación actual de cada barrio.

Por último, se han definido los LID que se van a utilizar en el ensayo durante las diferentes situaciones. De esta manera, han sido 3 tipos de LID los establecidos: jardín de lluvia, celda de bio-retención y desconexión de tejados.

Para ampliar la información reunida, se ha asistido al seminario web (Webinar) “Successful community engagement for SuDS”, impartido por la asociación CIRIA (Construction Industry Research and Information Association). La conferencia ha resultado de gran ayuda para la ampliación de conocimientos tanto medioambientales como de sistemas de drenaje urbano sostenible, facilitando ejemplos reales de sistemas implantados en Inglaterra, así como aportando recomendaciones para la aplicación de cada técnica LID en situaciones particulares. [39] [40]

- El jardín de lluvia, diferenciado en dos capas, cuenta con una berma de altura 200mm, fracción de volumen de vegetación de 0.2mm; y, en cuanto al suelo, un espesor de 675mm, conductividad de 120mm/hora, conductividad de la pendiente 48.65 y cabeza de succión de 49mm.

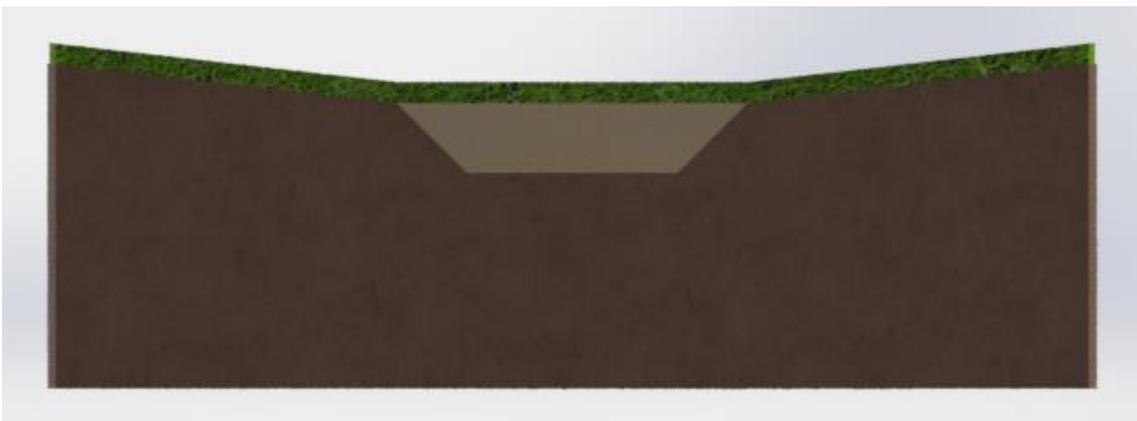


Ilustración 17. Modelización 3D de jardín de lluvia en SolidWorks 2020

En la tabla 4 aparecen registradas las propiedades de las capas con las que cuenta el jardín de lluvia que forma parte de la propuesta:

Jardín de lluvia		
Capa de superficie	Altura de berma (mm)	200
	Volumen de vegetación	0,2
Capa de suelo	Tipo de suelo	Arena
	Espesor (mm)	675

Tabla 4. Propiedades de los parámetros de las capas

- En la celda de bio-retención, la altura de berma es de 300mm, con mismo valor de volumen de vegetación que el jardín de lluvia, además de una pendiente en la superficie de 2.5%. En cuanto al suelo, el espesor de es 450mm y los términos de conductividad y succión son iguales a los del jardín de lluvia. El almacenamiento de la parte inferior consta de 300mm de espesor y una relación de infiltración de 29.972mm/hora. No cuenta con tubo de drenaje. El porcentaje de contaminantes que elimina esta técnica es de: SS 80%, DBO05 80% y NH₄ 50%.

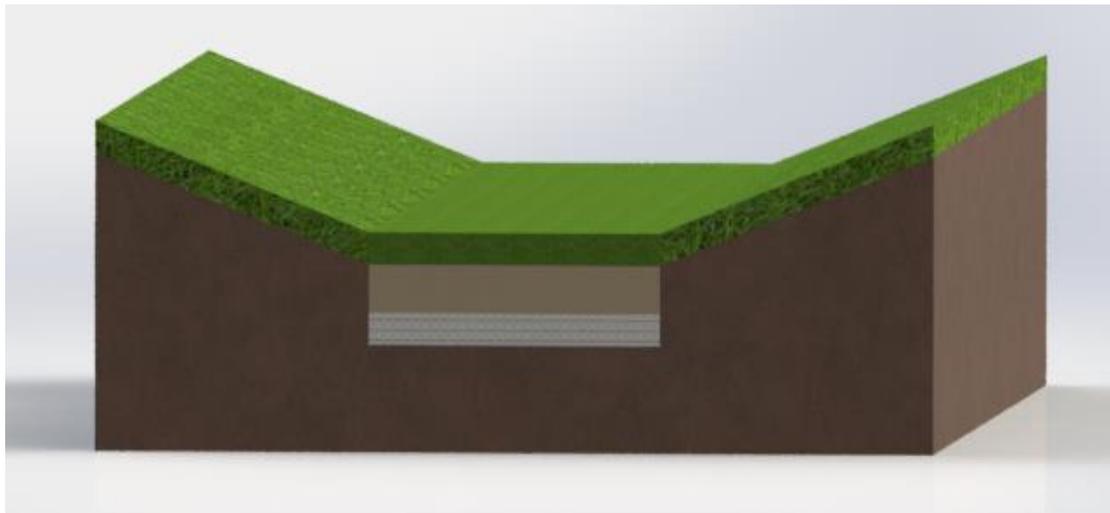


Ilustración 18. Modelización 3D de celda de bio-retención en SolidWorks 2020

La conformación de la celda se ha llevado a cabo de forma similar a la realizada por Miguel Valbuena Villalonga, y sus características pueden verse en la siguiente tabla:

Celda de bio-retención		
Capa de superficie	Altura de berma (mm)	300
	Volumen de vegetación	0,2
Capa de suelo	Tipo de suelo	Arena
	Espesor (mm)	450
Capa de almacenamiento	Espesor (mm)	300
	Relación de huecos	0,625

	Velocidad de infiltración del terreno (mm/h)	29,972
	Factor de colmatación	0

Tabla 5. Propiedades de los parámetros de las capas

- Los datos aplicados en la desconexión de bajantes de tejados son más simples. Por un lado, en la superficie, la profundidad de almacenaje es de 1000mm, con una rugosidad de Manning de 0.02 y una pendiente del 20%. La capacidad de flujo en el tejado es de 350mm/hora.



Ilustración 19. Modelización 3D de desconexión de bajantes de tejados en SolidWorks 2020

Las características de dichos tejados ser representan en la tabla:

Desconexión de bajantes pluviales	
Capacidad de flujo (mm/h)	350
Rugosidad de la superficie	0,02

Tabla 6. Propiedades de los parámetros de los tejados

Especificados las tres técnicas de drenaje urbano sostenible que se han aplicado, pueden implementarse en diferentes situaciones. Las situaciones experimentales han sido las siguientes:

- **Situación 0**

La situación 0 no presenta ninguna técnica LID. Esta situación es la cuenca actual, por lo que permitirá conocer la situación en la que nos encontramos, comprendiendo la amenaza a la que nos enfrentamos en caso de producirse un evento de lluvia similar al estudiado.

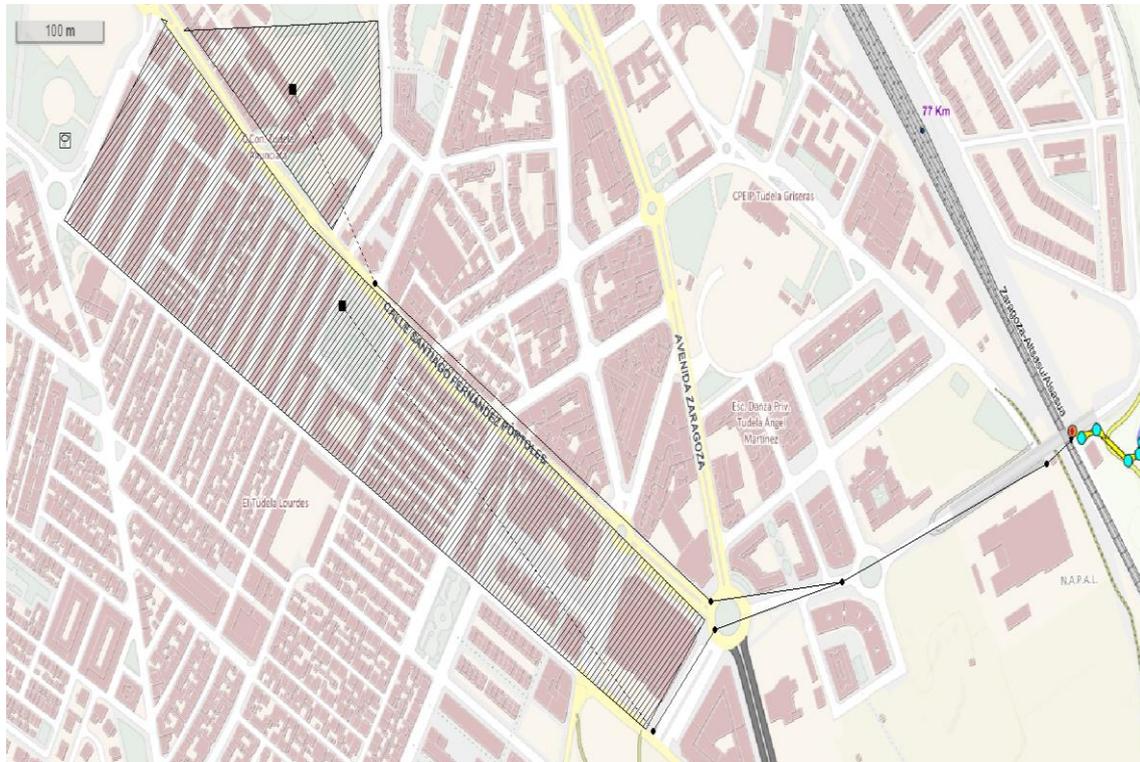


Ilustración 20. Localización de las subcuencas sin la aplicación de técnicas LID

- **Situación 1**

El planteamiento en la situación 1 se ha centrado en la utilización de técnicas LID de la forma menos invasiva posible. Por ello, se ha propuesto introducir en la subcuenca 1 un jardín de lluvia que es un tipo de LID de superficie y cuya construcción, rápida y sencilla, no altera sustancialmente los ritmos de los ciudadanos. También se ha valorado que tienen un alto contenido estético, por lo que resulta adecuado para embellecer la zona de la subcuenca considerada.

Cuenta con un área de 2800m², lo que implica el 11.1% del total de la subcuenca. El porcentaje de área impermeable tratada es del 10%, así como del 30% en el área permeable tratada.



Ilustración 21. Localización del jardín de lluvia dentro de la subcuenca 1

- **Situación 2**

Para diseñar la situación 2, se parte de la situación 1 como situación inicial, por lo que sigue manteniéndose el jardín de lluvia de la subcuenca 1. Ahora, se implementará una técnica LID en la subcuenca 2 con el objetivo de mejorar su situación. Para ello, se propone incluir una celda de bio-retención. De igual forma que el jardín de lluvia, la celda de bio-retención es una técnica poco invasiva y que requiere una baja inversión. En este caso, se ha pensado convertir la mediana de la Avenida del Barrio en un sistema de drenaje sostenible con una celda de bio-retención.

La aplicación de dicha técnica se ha aplicado en la zona intermedia entre calzadas, por lo que el porcentaje de área ocupada en la subcuenca es muy reducido. Con una suma de 10 unidades, el área total de ocupación del LID es de 100m^2 , correspondiendo a un 0.908% del área total. Por otro lado, de igual forma, la calzada no cuenta con zona permeable, por lo que el porcentaje de tratamiento sólo actuará en área impermeable: 10%.



Ilustración 22. Localización del jardín de lluvia y la celda de bio-retención dentro de la subcuenca 1 y 2, respectivamente

- **Situación 3**

Para el diseño de la situación 3, se ha propuesto otra técnica LID para la subcuenca 2, la desconexión de tejados. La elección de esta técnica se debe a la similitud con las celdas de bio-retención en el sentido de ser elementos de superficie, sencillos, baratos y de poco impacto social. Sin embargo, sí que requieren un mayor compromiso por parte de la comunidad, ya que, aunque muchas veces puedan colocarse en edificios públicos, en la mayoría de los casos se deben instalar en propiedades privadas. Otro motivo para su elección es el aprovechamiento de la instalación de las celdas de bio-retención en esta subcuenca, ya que la escorrentía generada en dichos tejados puede ser descargada en las celdas.

Así, el resultado es suma de la aplicación de las celdas de bio-retención y una zona con desconexión de tejados. A lo nombrado en la situación 2, se añaden 70 tejados con esta técnica, contando con un total de 100m², correspondiente al 6.79% del área total de la subcuenca. Únicamente se aplica un tratado de área impermeable del 7%.

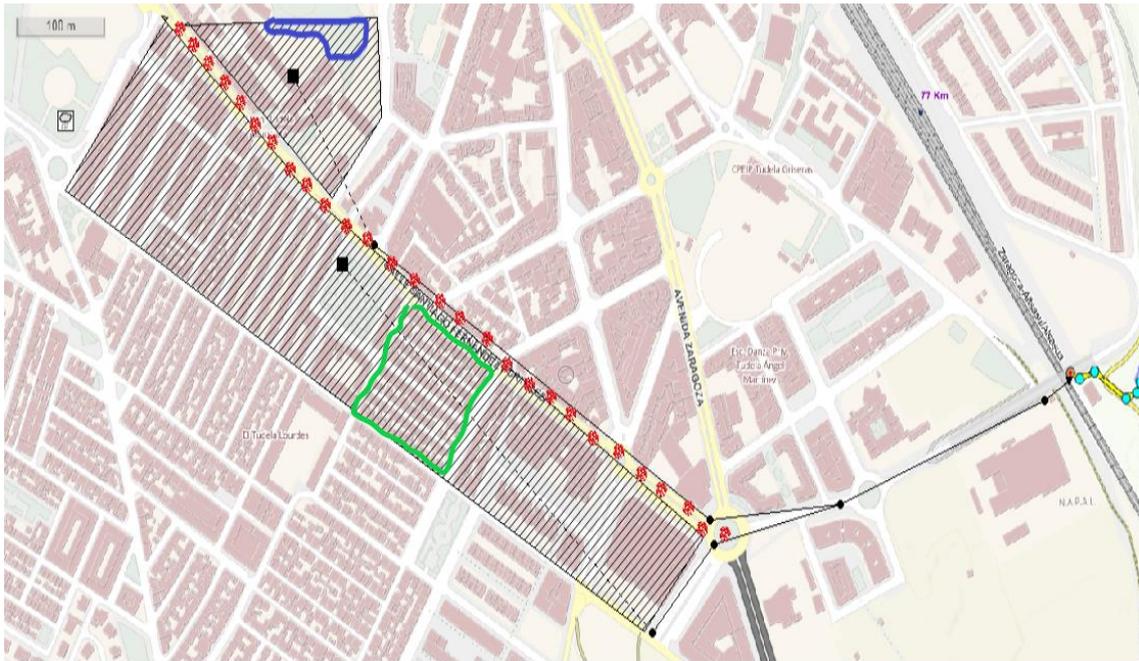


Ilustración 23. Localización del jardín de lluvia, la celda de bio-retención y los tejados con desconexión de bajantes dentro de la subcuenca 1 y 2, respectivamente

Una vez introducidos todos los datos en el programa, se genera las simulaciones correspondientes y se obtienen los resultados que, a continuación, se van a exponer.

10.- RESULTADOS

En esta sección se van a presentar los resultados obtenidos de cada una de las situaciones previamente expuestas, además del análisis correspondiente de dichos resultados.

Como ya se ha explicado, se va a trabajar en distintos escenarios, implementando en cada uno de ellos diferentes técnicas LID. A medida que avanza la simulación de las cuatro situaciones, el número de técnicas LID aumenta, así como el compromiso social que se requiere para su instalación.

Los resultados obtenidos en las cuatro situaciones han sido los siguientes:

10.1. Resultados relativos al caudal

Los resultados relativos al caudal se analizan de forma independiente para cada una de las situaciones.

10.1.1. Situación 0

Después de la simulación de la situación 0 en SWMM5.1 se ha obtenido que, del total de $4,9 \cdot 10^6$ L caídos en ambas subcuencas, $3,98 \cdot 10^6$ L salen a la superficie (cuando deberían haber sido captadas por la red de drenaje y evacuadas hacia la salida), creando un episodio de inundación intensa. Igualmente, de los seis colectores de la red simulados en el problema, cinco entran en carga en algún momento del evento de lluvia (T1, T2, T3, T4 y T5); y de los seis pozos de registro, tres rebosarán agua hacia las calles en algún momento (2, 3 y 5).

La ilustración 24 representa la situación en la que se encuentran los colectores y pozos en el momento más intenso del episodio, que corresponde a una hora después del inicio de la tormenta (17:00h).

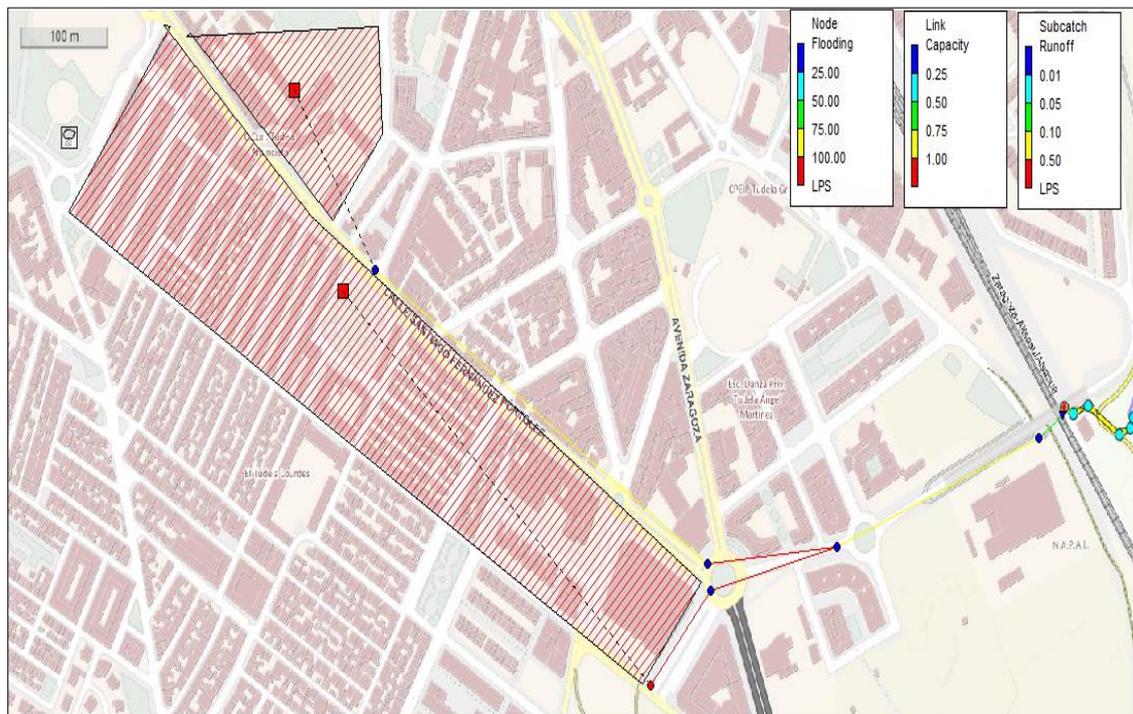


Ilustración 24. Representación de la carga de los colectores y la inundación de nodos en la cuenca de estudio

Por un lado, las líneas de color rojo y amarillo representan los canales que han entrado en carga. Por otro lado, el color de los nodos denota los litros/segundo liberados por cada uno. En la imagen, puede observarse una situación claramente más desfavorable en la subcuenca 2, debido principalmente a la falta de terreno permeable.

Los nodos en los que la lámina de agua ha llegado a la superficie de la calle se encuentran mayoritariamente en las zonas en las que los colectores han entrado en carga. Destaca las situaciones de los pozos 2 y 3, lo cual es coherente con el evento de inundación que sufrió la Avenida Zaragoza en alguna de sus zonas. A pesar de que el

nodo 3 aparezca en color azul, durante algún momento de la simulación del acontecimiento de lluvia sufre un rebosamiento, como veremos posteriormente.

En la ilustración 25, se observa la situación real que vivió la Avenida Zaragoza de Tudela durante el evento de lluvia que se está estudiando.



Ilustración 25. Imágenes de la Avenida Zaragoza después de la tormenta [41]

La simulación que se ha obtenido refleja adecuadamente la situación real que se vivió ese día. El desbordamiento de los nodos 2 y 3, que están situado en la rotonda que se encuentra en el inicio de la Avenida Zaragoza, es uno de los causantes de la inundación de dicha avenida, como se puede observar en la ilustración.

Gracias a los gráficos de perfiles longitudinales, en el mismo instante de tiempo se puede analizar la situación de las dos subcuencas con más detalle:

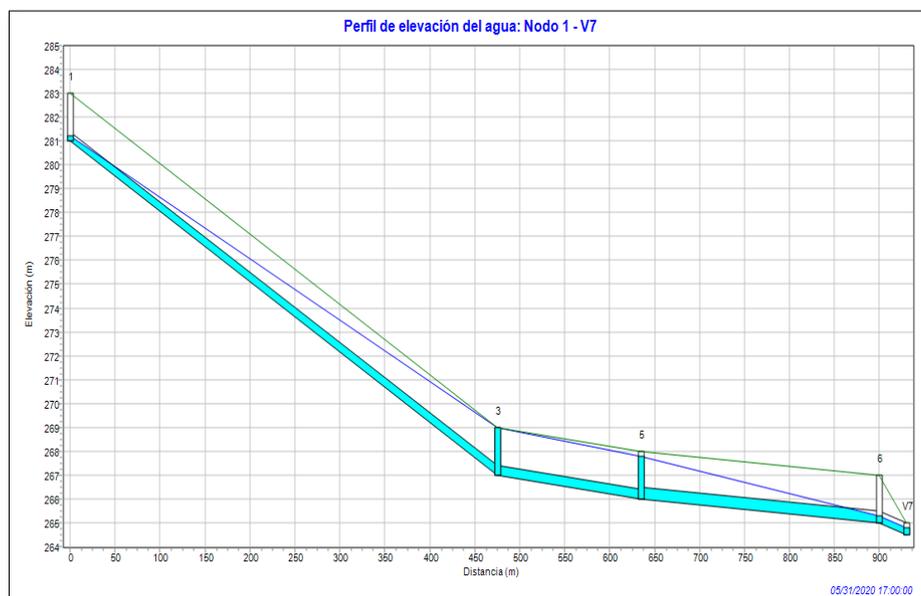


Gráfico 7. Vista de perfil de la rama correspondiente a la subcuenca 1

Observando el gráfico, se puede observar que en la subcuenca 1, el pozo de registro 3 inunda las calles. Además, ratifica el exceso de agua en los canales durante la simulación.

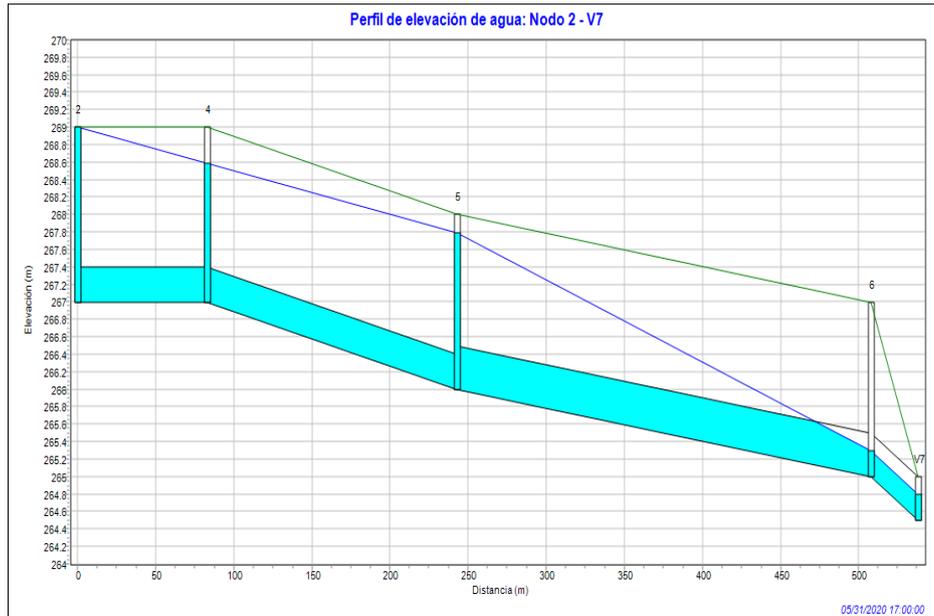


Gráfico 8. Vista de perfil de la rama correspondiente a la subcuenca 2

En la subcuenca 2, en el mismo momento, el nodo 2 se encuentra inundado.

A pesar de no llegar a colapsar, el pozo de registro 5 (común en las dos subcuencas) no cuenta con margen suficiente, puesto que un evento de lluvia de dimensiones algo superiores a la actual podría ser suficiente para inundar también dicho pozo.

10.1.2. Situación 1

El jardín de lluvia se ha colocado en la subcuenca como parte de ella. Por tratarse de una técnica de tratamiento en origen reciben el agua de lluvia directamente sobre ellas. Por este motivo, los parámetros de la subcuenca 1 han tenido que ser modificados. Se han instalado finalmente 2800m² de jardín de lluvia.

Una vez aplicados en el modelo los valores correspondientes, se ha procedido a realizar la simulación correspondiente e intentar evaluar si ha mejorado en algún punto el funcionamiento de la subcuenca 1.

Para el episodio de lluvia que se está considerando se ha conseguido reducir en un 31% el volumen de escorrentía en la subcuenca 1, teniendo en cuenta que se ha pasado de un volumen de escorrentía de $0,72 \cdot 10^6$ L en la situación 0 a $0,5 \cdot 10^6$ L en la situación 1. La disposición en la subcuenca 2 no se ha modificado en cuanto a este parámetro.

Como se puede observar en la ilustración 26, siguen apareciendo los mismos colectores sobrecargados que en la situación 0. Sin embargo, se ha conseguido reducir el tiempo que estos colectores están en carga. En concreto, el colector 3 pasa de estar

sobrecargado 0,67 h a estarlo 0,01 h. En cuanto a los pozos de registro, ahora sólo es el pozo 3 el que vierte agua al exterior.

Ahora, la situación en la zona una hora después del comienzo de la tormenta ha cambiado de la siguiente forma:

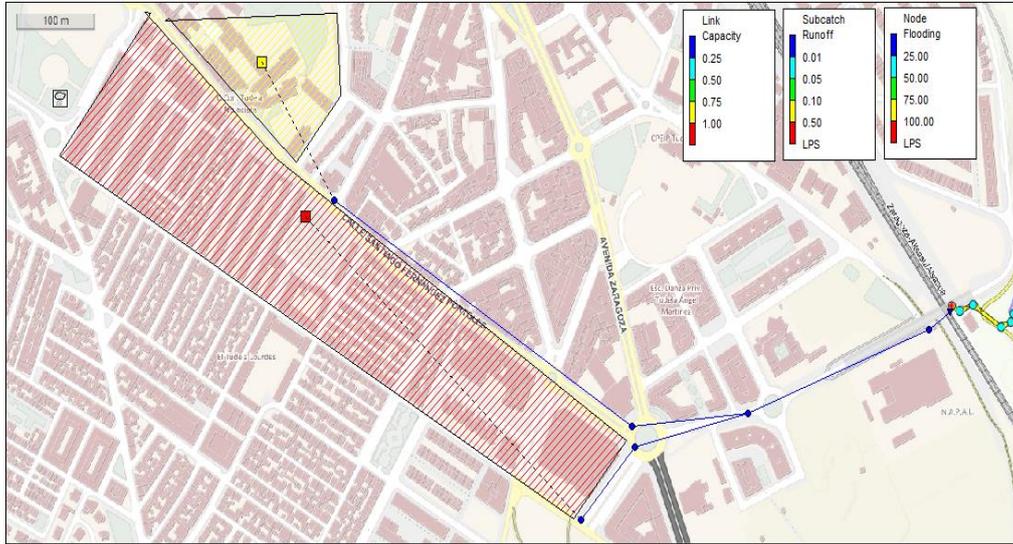


Ilustración 26. Representación de la carga de los colectores y la inundación de nodos

Recapitulando, los principales cambios observados en la situación 1 son la liberación de carga de los colectores a la subcuenca 1, sobre todo en el número de horas que se mantiene dicha carga; y, aunque sigue produciéndose una gran cantidad de salida de agua al exterior, esta lo hace en menor medida y solamente a través de un pozo.

El nivel del agua en toda la línea puede apreciarse en la figura siguiente:

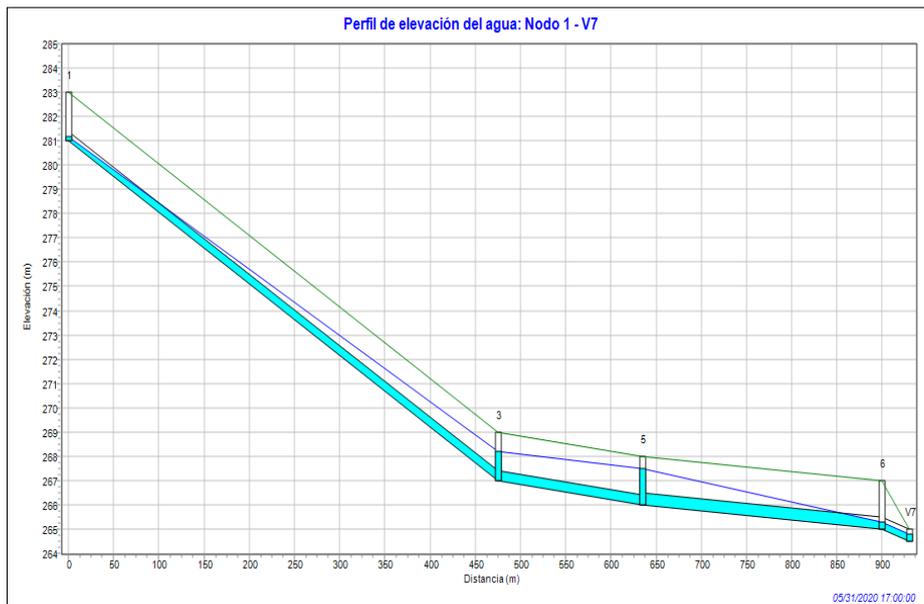


Gráfico 9. Vista de perfil de la rama correspondiente a la subcuenca 1

En la figura puede apreciarse la normalización del pozo 3. Con esta simulación se demuestra que la aplicación de una sola técnica LID en esta subcuenca es suficiente para evitar inundaciones en episodios de lluvia intensos como el simulado.

10.1.3. Situación 2

El diseño del sistema se ha establecido siguiendo las indicaciones propuestas en CIRIA en cuanto al ancho de cada celda, su área y su longitud, por lo que ha habido que colocar varias unidades a lo largo de toda la avenida.

Tras realizar la simulación, el volumen total de escorrentía de la subcuenca 2 de $3,26 \cdot 10^6$ L experimenta una reducción del 14%, alcanzando el valor de $2,8 \cdot 10^6$ L. Evidentemente, la reducción no es suficiente para eliminar el problema, pero es una mejor que hay que tener en cuenta, debido a la sencillez del método propuesto. Lógicamente, a medida que aumente el número de técnicas LID implantadas, el resultado mejorará.

El nodo 2 sigue inundado, pero pasa de verter $2,128 \cdot 10^6$ L a $1,599 \cdot 10^6$ L, lo que supone una reducción del 25%. En cuanto a los canales sobrecargados, en todos ellos, disminuye el tiempo de sobrecarga.

La situación en el sistema ahora es la siguiente:

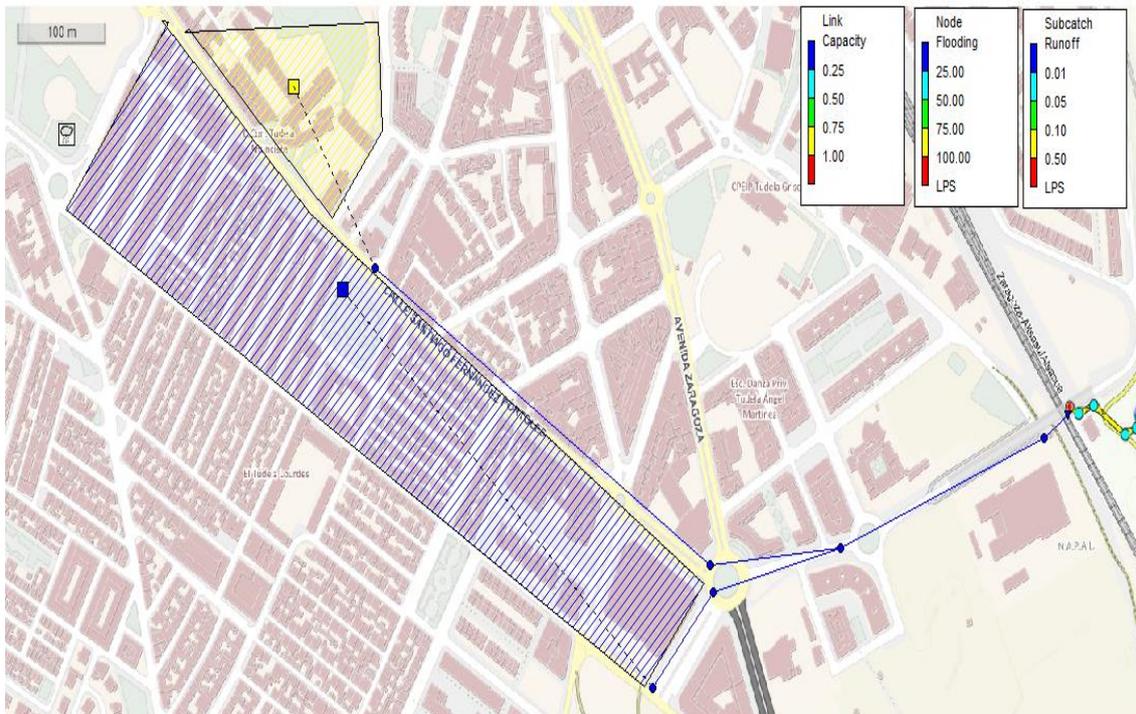


Ilustración 27. Representación de la carga de los colectores y la inundación de nodos

La representación del perfil del agua en la subcuenca 2 se aprecia en el gráfico 11. En ella se observa la bajada significativa del nivel del agua en el nodo 5, lo que se traduce en un alivio de la presión del agua en dicho punto y en las tuberías adyacentes.

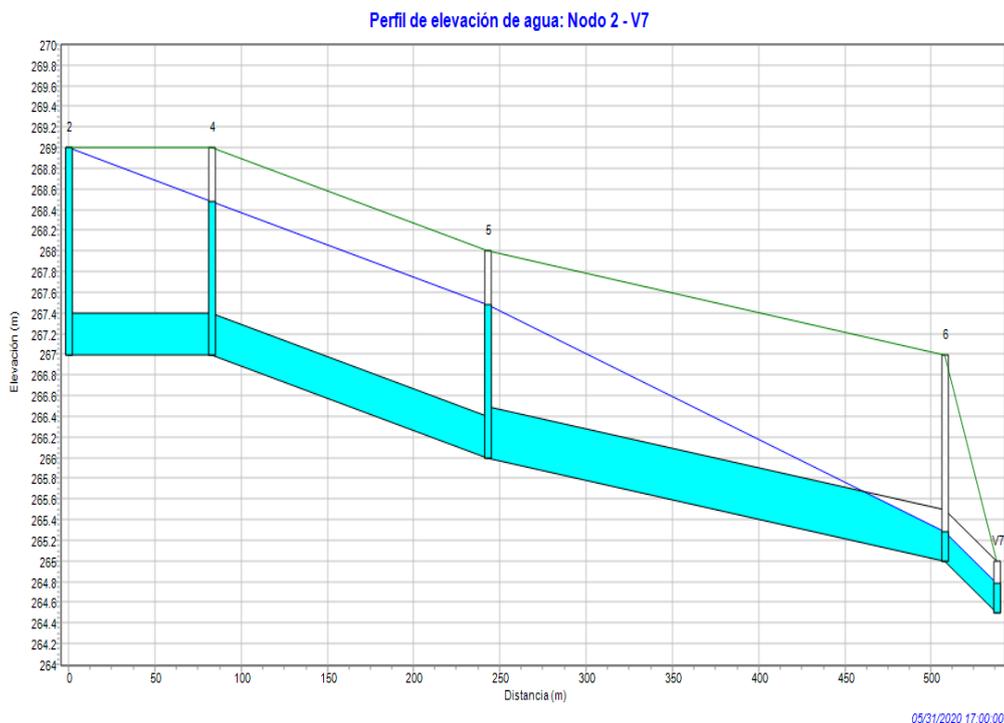


Gráfico 10. Vista de perfil de la rama correspondiente a la subcuenca 2

10.1.4. Situación 3

Los valores de la subcuenca 1 no varían, puesto que no se ha modificado la técnica LID aplicada ni se ha incorporado otra. Por otro lado, la implementación de la desconexión de tejados en la subcuenca 2, sumado a las celdas de bio-retención, sí generará cambios significantes. Mencionar la importancia de concienciar a los ciudadanos, ya que la técnica ha sido pensada para 70 tejados en la simulación; sin embargo, con una mayor participación, los resultados obtenidos pueden ser considerablemente mejores.

Al realizar la simulación, se obtiene que la subcuenca 2 pasa de experimentar un volumen total de escorrentía de $3,26 \cdot 10^6$ L a otra de $2,19 \cdot 10^6$ L, lo que constituye una reducción del 33% sobre el flujo inicial de la situación 0.

El nodo 2 sigue inundado, pero pasa de verter $2,128 \cdot 10^6$ L a $1 \cdot 10^6$ L, lo que supone una reducción del 53%. De la misma forma que en la situación 2, el tiempo de sobrecarga de los canales disminuye.

La situación en el sistema ahora es la siguiente:

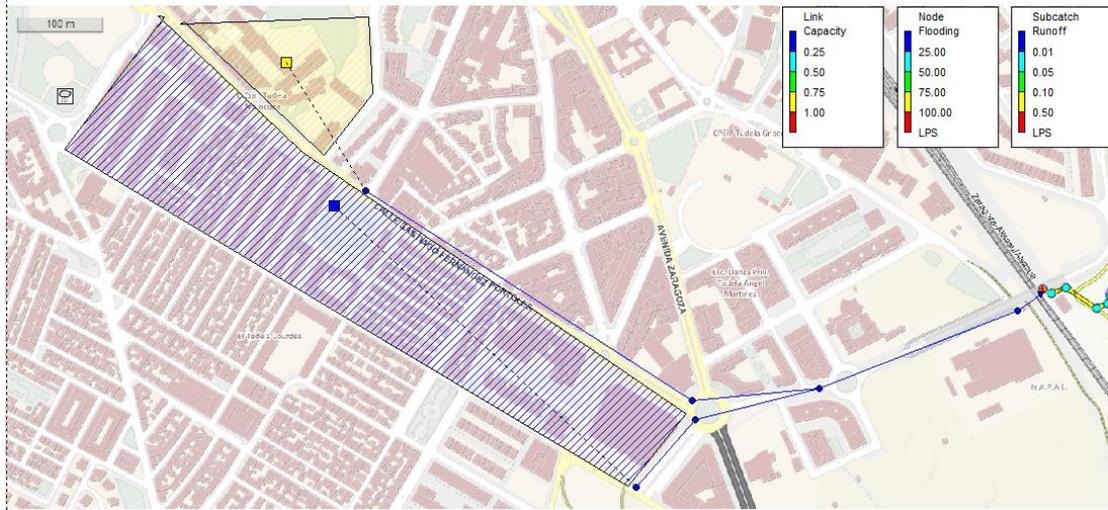


Ilustración 28. Representación de la carga de los colectores y la inundación de nodos

Visualmente, apenas se aprecian cambios en la simulación de la subcuenca. Sin embargo, los datos numéricos presentados posteriormente corroboran la reducción de escorrentía presentada, así como la reducción de producirse una inundación (a excepción del nodo 2, que todavía presenta desbordamiento).

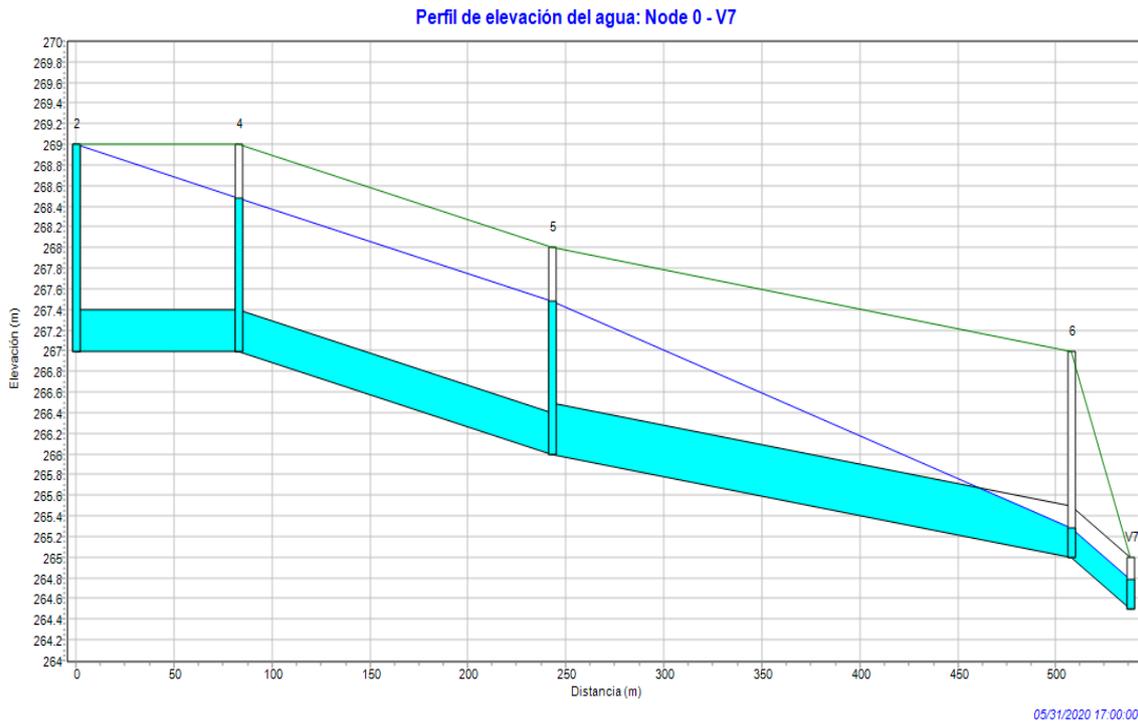


Gráfico 11. Vista de perfil de la rama correspondiente a la subcuenca 2

En cuanto al perfil de elevación del agua, tampoco se aprecian variaciones a simple vista.

10.2. Comparativa de resultados en las distintas situaciones

Hasta el momento, se han analizado los resultados obtenidos en cada situación por separado, así como el comportamiento del sistema de drenaje en cada una de las situaciones.

En este apartado se van a comparar los resultados de las situaciones entre sí, para intentar extraer la máxima información posible.

10.2.1. Resultados relativos al caudal

En la tabla se pueden ver los resultados del caudal pico y del volumen a la salida del sistema. Los porcentajes de reducción se han calculado respecto de S0.

Situación	Caudal pico (L/s)	Volumen total (Lx10 ⁶)	Reducción del pico (%)	Reducción de volumen (%)
S0	1205,10	3,98	-	-
S1	1134,29	3,76	6	5,5
S2	1002,49	3,30	18	17
S3	826,7	2,69	31,4	32,4

Tabla 7. Valores de caudal pico y volumen para las distintas situaciones

En la tabla se aprecia que el volumen evacuado por el sistema de drenaje en su conjunto se reduce a medida que se van incorporando nuevos elementos LID.

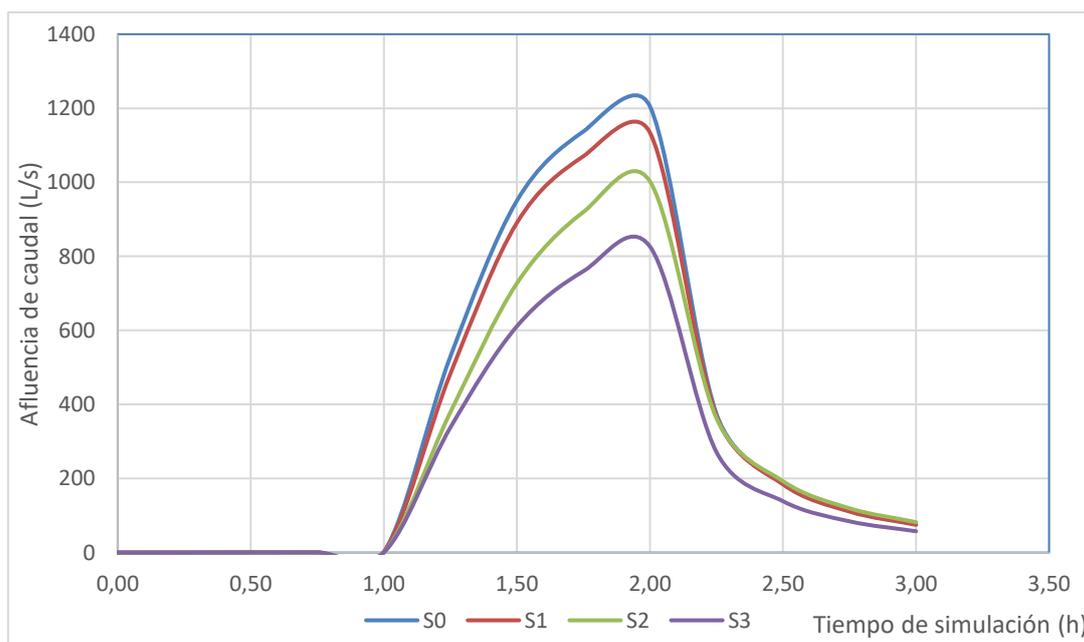


Gráfico 12. Caudal total a la salida del sistema

Puede observarse una reducción de afluencia de caudal con la implantación sucesiva de elementos de drenaje sostenible a medida que se avanza en las diferentes situaciones. Sin embargo, la gráfica muestra que las técnicas no han conseguido desplazar el pico de escorrentía, que se mantiene a las dos horas del comienzo del evento de lluvia. Hay que recordar la importancia de este desplazamiento, ya que, en caso de producirse, el sistema cuenta con más tiempo de drenaje antes de alcanzar el máximo, lo cual libera tensión en la red de drenaje en su conjunto.

Por lo demás, los resultados muestran una disminución importante del caudal transportado por los colectores y se reduce el pico de caudal en más de un 30%. Lo que consigue este dato es mostrar los beneficios que proporcionan las técnicas LID en eventos de lluvia torrencial como esta.

10.2.2.- Resultados relativos a la infiltración

La subcuenca 1 no sufre variación en su porcentaje de permeabilización puesto que el jardín de lluvia ha sido implantado en una zona que ya era permeable. Sin embargo, en la subcuenca 2, las técnicas LID han convertido parte del terreno impermeable en permeable, por lo que, como se observa en el gráfico 13, se perciben resultados diferentes en el grado de infiltración.

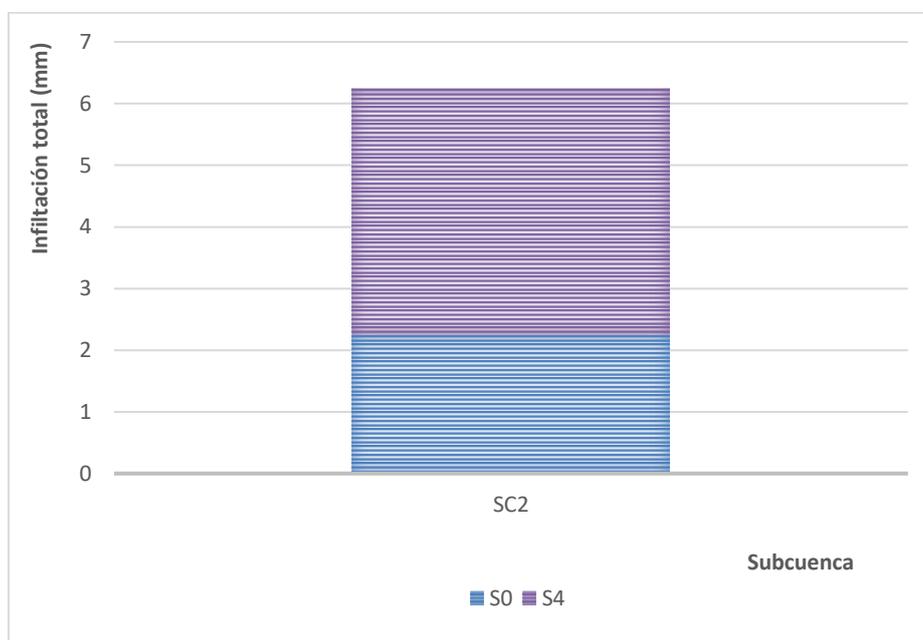


Gráfico 13. Variación en la infiltración entre la situación 0 y la situación 3

Se ve que el valor de la infiltración en la subcuenca 2 con la aplicación de las celdas de bio-retención y la desconexión de tejados ha aumentado considerablemente. Como ya se ha comentado, la unión de estas dos técnicas es muy beneficiosa en zonas densamente

urbanizadas, ya que permite la salida de la escorrentía procedente de los tejados hacia las celdas, infiltrándose directamente al terreno natural

10.2.3. Resultados relativos a la calidad del agua

La comparación de los resultados relativos a la calidad del agua permite comprobar la eficacia de las técnicas LID para la reducción de la concentración de contaminantes de la escorrentía.

El software SWMM5.1, en lo referente a la calidad el agua, se limita a hacer un balance de la cantidad de contaminantes en el sistema de drenaje total. Como ya se ha mencionado, los contaminantes estudiados son los sólidos totales en suspensión (SS), la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO5) y el amonio (NH_4).

Las cantidades que se observan corresponden a la cantidad de contaminante que se está vertiendo a la masa de agua receptora, que finalmente acabará en la estación depuradora.

Se puede observar, en la siguiente figura, la concentración correspondiente a los sólidos en suspensión:

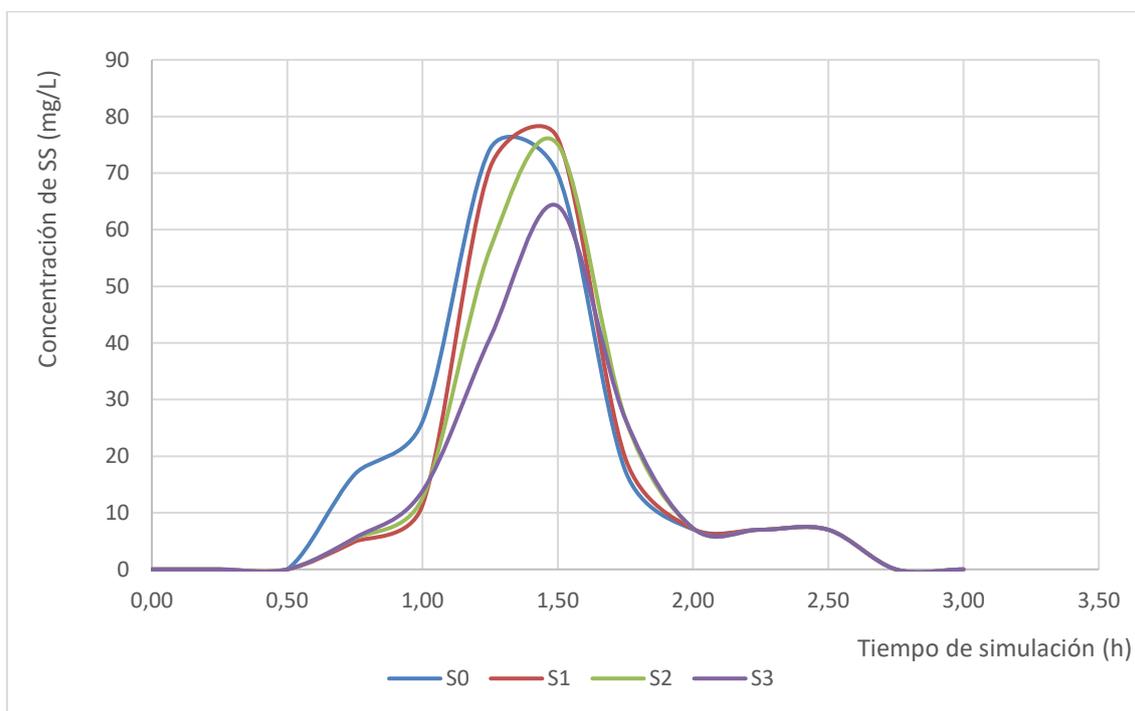


Gráfico 14. Sólidos en suspensión totales a la salida de los colectores (V7)

Vemos que la masa total vertida por la red de alcantarillado se reduce en un 20%, aproximadamente.

Se distingue claramente el fenómeno “firstflush”, ya que se observa un pico de concentración al poco tiempo de comenzar el evento lluvioso simulado. Este fenómeno se debe a los contaminantes depositados y acumulados en las calles y los colectores durante el periodo seco previo a la lluvia, son arrastrados por los primeros caudales de escorrentía, por lo que la concentración de contaminantes en el “firstflush” suele ser elevada.

También se puede apreciar en la gráfica, al compararla con el gráfico 15 que el pico de concentración decrece rápidamente en el instante que coincide con el pico de caudal de escorrentía. Esto se traduce en que a más caudal menor es la concentración de contaminantes, lo que indica que la principal fuente de contaminación es la escorrentía superficial urbana.

La concentración de sólidos en suspensión se reduce a medida que se incorporan más técnicas LID, pero no lo hace de forma uniforme a lo largo de toda la simulación. Sin embargo, en la situación 3 se observa un ligero desplazamiento en el tiempo hasta alcanzar el pico (en relación con las otras situaciones), lo que implica una mejora para la red de drenaje, ya que la concentración está dividida en un mayor margen de tiempo y el procesamiento de este contaminante será más leve.

El gráfico 16 muestra el resultado de concentración de BDO05:

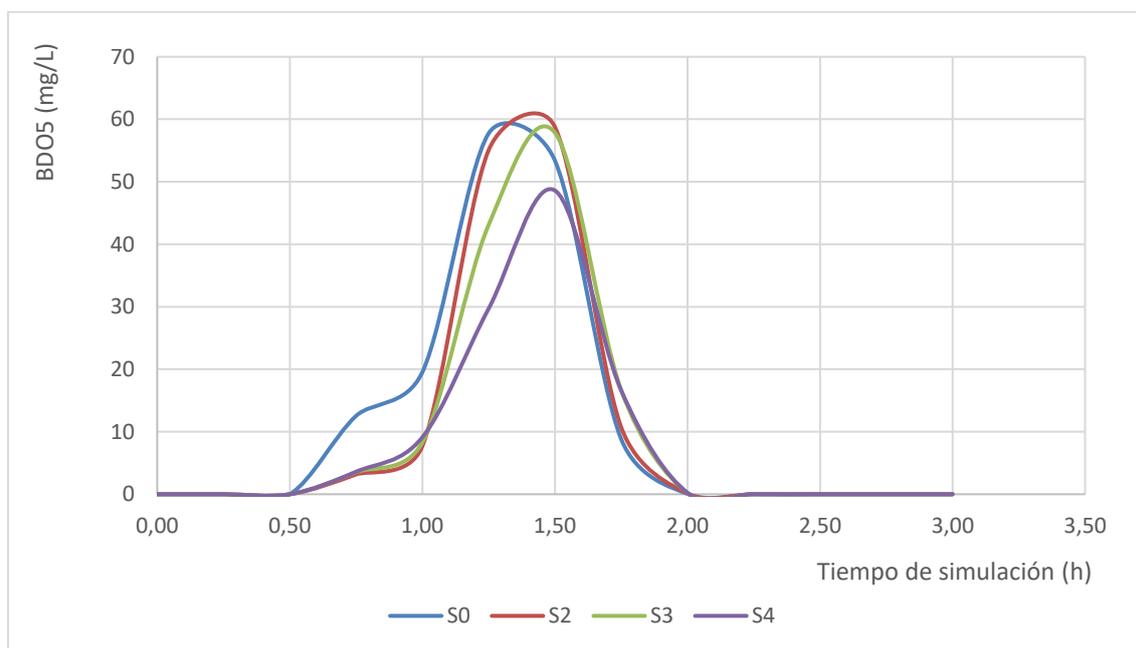


Gráfico 15. DBO05 a la salida de los colectores (V7)

El resultado del gráfico resultante a la concentración de DBO05 es similar al de sólidos en suspensión. Igualmente, en la situación 3, se produce una mejora en la red de drenaje, con valores más reducidos y con un mayor margen de tiempo para el procesamiento.

Por último, el gráfico 16 representa la concentración de NH_4 a la salida de los conectores.

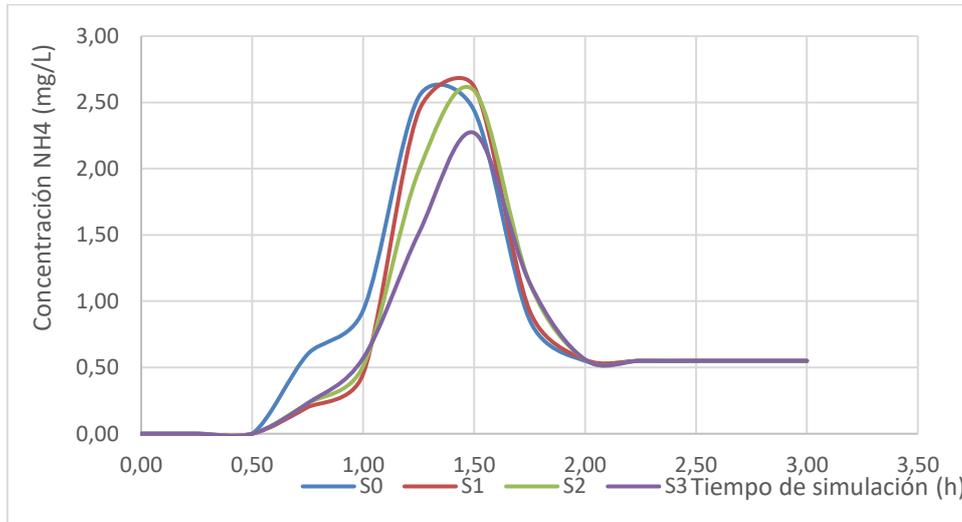


Gráfico 16. NH_4 a la salida de los colectores (V7)

La igual forma que las otras concentraciones de contaminantes calculados, el gráfico del NH_4 muestra una mejora en la situación 3. El valor final de 0.5 mg/L corresponde al valor inicial de amonio en el agua.

10.2.4. Resultados relativos a la sobrecarga de la red de drenaje

La siguiente gráfica muestra el volumen total de agua vertido al exterior por cada uno de los nodos, lo que provoca efectos de inundación:

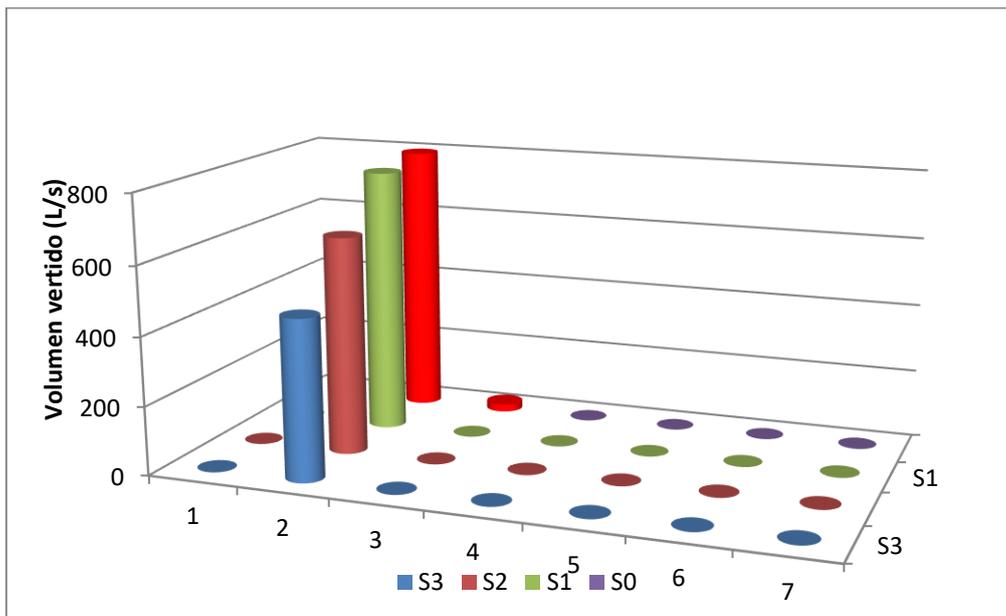


Gráfico 17. Caudal vertido al exterior por los nodos

Puede observarse una mejora a medida que avanzan las situaciones estudiadas. Los pozos 2, 3 y 5 sufrían desbordamiento en la simulación de la situación 0 (el pozo 5 mínimamente). A partir de la simulación 1, los pozos 3 y 5 ya no expulsaban agua a las calles, únicamente el pozo 2. Las medidas aplicadas no han sido suficientes para reducir el volumen vertido del pozo 2 hasta el valor mínimo, pero la reducción ha sido considerable. Esto significa que, en caso de producirse un evento de lluvia similar, solamente el pozo 2 sufriría vertería volumen de agua a la calle, lo que provocaría una inundación. La solución de este problema es la introducción de nuevas técnicas o el aumento de ocupación en las técnicas ya aplicadas.

Representación del tiempo de sobrecarga de los conductos o links (en horas) en las diferentes situaciones. Para los conductos de la subcuenca 1 se han tenido en cuenta las situaciones 0 y 1; para los conductos de la subcuenca 2, las situaciones 1, 2 y 3.

Los resultados tiempo de sobrecarga de la subcuenca 1 pueden observarse en la siguiente gráfica:

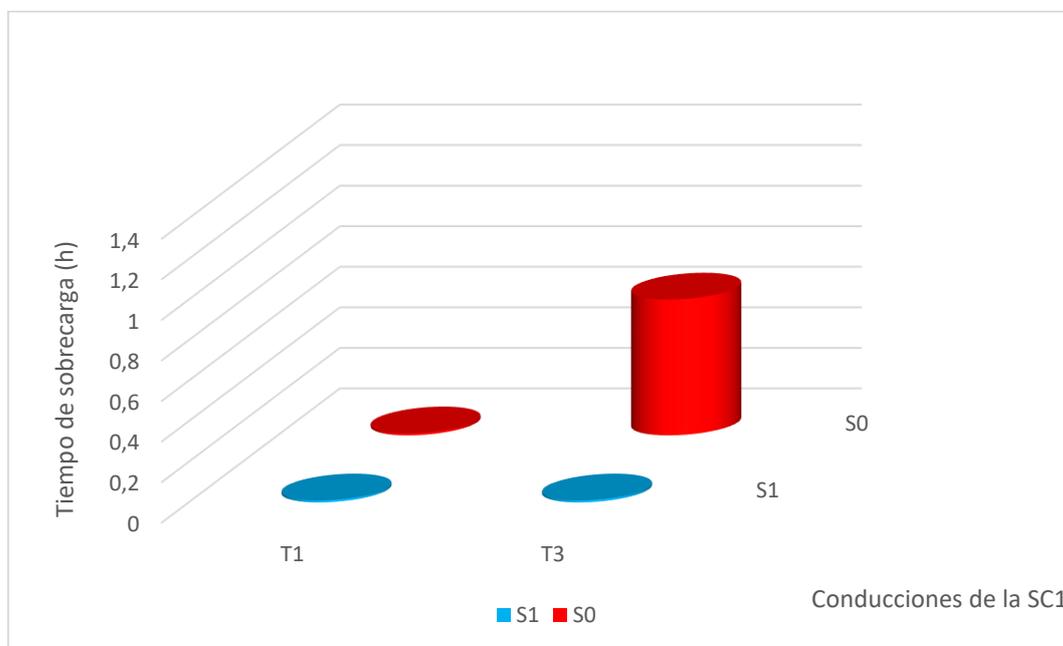


Gráfico 18. Tiempo de sobrecarga de los conductos de la subcuenca 1

Como se ha expresado anteriormente, los conductos T1 y T3 sufrían sobrecarga en algún momento durante la situación 0 o inicial. El conducto T1, como se puede observar, apenas sufría sobrecarga. Una vez aplicada la técnica de la situación 1 (jardín de lluvia), el estado de sobrecarga de ambos conductos se reduce notablemente, llegando a no sobrecargar en ningún momento de la simulación.

A continuación, el gráfico de los tiempos de sobrecarga de la subcuenca 2:

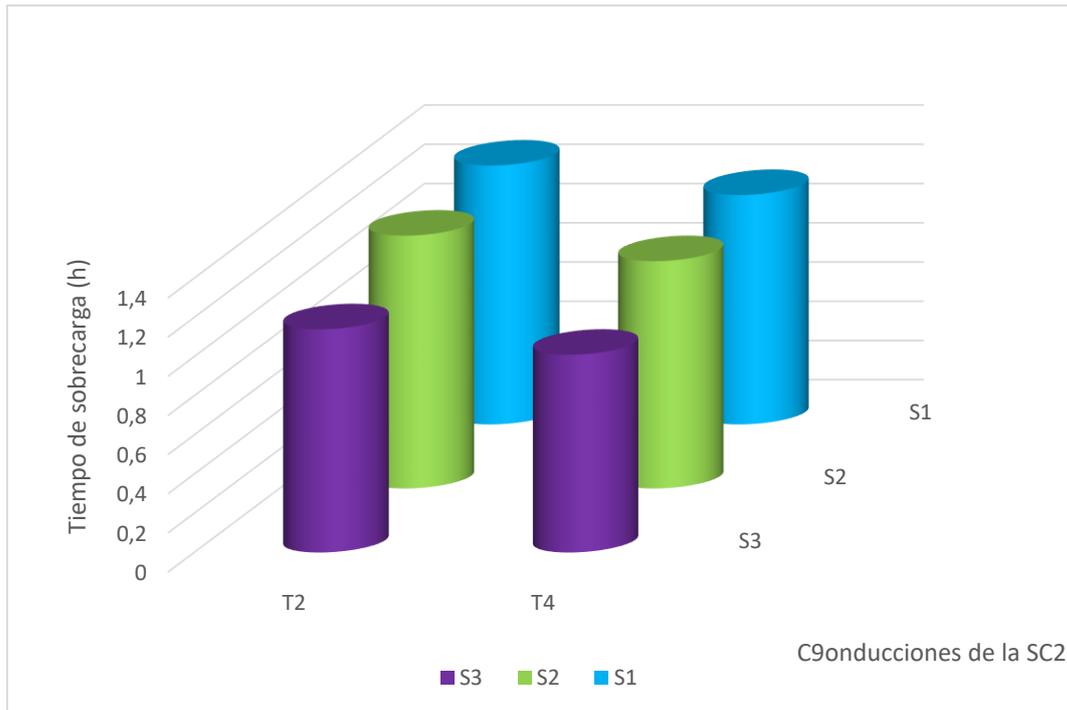


Gráfico 19. Tiempo de sobrecarga de los conductos de la subcuenca 2

En el caso de la subcuenca 2, es evidente la mejora en los conductos, reduciendo considerablemente el tiempo de sobrecarga; sin embargo, no es suficiente para lidiar el total de tensiones generadas. Cabe recordar que el porcentaje de aplicación de las técnicas LID era reducido y que, en caso de ampliarse, sobre todo para la desconexión de tejados (puesto que las celdas de bio-retención no cuentan con mucho más espacio para ser implantadas), los resultados serían mucho mejores.

11.- CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados obtenidos, se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- Las técnicas LID se han revelado como una alternativa real para el drenaje urbano convencional.

Las técnicas de drenaje urbano sostenible han demostrado ser eficientes y provechosas en eventos de lluvia torrencial, cumpliendo con creces la función de disminución del volumen de escorrentía. Conviene tener en cuenta las ventajas que estas técnicas

sostenibles pueden aportar cuando se planteen futuras rehabilitaciones del sistema de alcantarillado.

- Las técnicas LID son ciertamente efectivas en la disminución de contaminación en la escorrentía.

La contaminación de la escorrentía supone un sobrecoste económico considerable para tratar los contaminantes en la depuradora. Según los resultados obtenidos, la reducción de contaminantes con las técnicas aplicadas ha sido notable. Recaltar que no todas las técnicas actúan de igual forma contra los contaminantes; así que, antes de la inclusión de una de ellas, es necesario estudiarlas y buscar la más conveniente. La calidad del agua es fundamental para su reutilización y para su incorporación a zonas naturales.

- La inclusión de técnicas de drenaje sostenible requiere de un proyecto individualizado que se adapte a las condiciones particulares de cada localidad.

Las características de la cuenca y la climatología de la zona son atributos propios de cada localidad, por lo que la elección de la técnica LID dependerá de estos. A pesar de buscar los mismos objetivos, cada técnica LID tiene una funcionalidad diferente. Un estudio pormenorizado del área permitirá elegir la mejor solución.

- Las técnicas LID permiten que el ciclo urbano del agua se asemeje al ciclo natural.

La reducción de superficie impermeable, así como el aumento de infiltración y evaporación, entre otros, son ventajas que ofrece la aplicación de las técnicas LID, consiguiendo un avance hacia la recuperación del ciclo del agua previo a la urbanización. Evidentemente, el ciclo urbano del agua seguirá estando lejos del ciclo natural, pero cualquier progreso es conveniente. Esta aproximación al ciclo natural del agua genera ciudades más sostenibles y resilientes.

- Las técnicas LID aminoran la sobrecarga del sistema de drenaje.

En los pozos de registro y conductos sobrecargados de una red de drenaje convencional, la disminución de tiempo de sobrecarga y volumen de agua en un evento de lluvia intensa supone una reducción de riesgo de producirse fatiga por las presiones que soportan, llegando en algún momento a la rotura de alguna de ellas. Evitar este tipo de imprevistos es fundamental para un correcto funcionamiento de la red, sumado a evitar el sobrecoste económico que acarrea la reparación. Las técnicas LID, dentro de su actuación, al reducir el volumen de escorrentía, permiten la disminución de este tipo de

riesgo. A pesar de que, como en este estudio, el evento de lluvia es muy puntual y, por tanto, el periodo de retorno es elevado, implementar técnicas LID a tiempo puede realizar una acción preventiva que conviene considerar.

- La implantación de las técnicas LID deben ser progresiva.

La construcción de ciudades sostenibles no se produce de un día para otro. La implantación de estas técnicas acarrea una serie de problemas de las que somos conscientes, desde el desembolso económico a realizar hasta el alto grado de implicación que los ayuntamientos deben pedir a sus ciudadanos. Esta es la razón por la que se puede empezar implantando técnicas baratas y poco invasivas en la vida diaria de la población e ir aumentando este grado. A este respecto, estas políticas deben venir acompañadas de políticas educativas que acerquen estas infraestructuras a los ciudadanos.

- Las técnicas LID tienen carácter complementario.

Como se ha demostrado, estas técnicas no siempre trabajan independientemente de otras; la fusión de dos técnicas LID o de una técnica LID con el sistema de drenaje convencional puede aumentar el beneficio que esta aportaría por separado. En los casos en que la red de drenaje es separativa, la conexión de los SUDS con la red de pluviales permite recuperar un recurso natural que, de otro modo, se perdería. En los casos en que la red sea unitaria, las técnicas ayudan a aliviar el estrés hídrico del sistema. En ambos casos, disminuye la concentración de contaminantes que debe ser tratada con posterioridad.

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, la transformación de nuestras ciudades es una tarea que todos los gobiernos están decididos a abordar y que no está exenta de dificultad. Para llevarla a cabo, los expertos sugieren diferentes líneas de actuación, no excluyentes entre sí. En primer lugar, se sabe que las políticas de incentivación están dando buenos resultados en otros países de nuestro entorno, como Países Bajos e Inglaterra. Además, es fundamental desarrollar programas educativos para niños y adultos que les permita desarrollar actitudes positivas hacia este tipo de infraestructuras sostenibles. Por último, es necesario sensibilizar en la toma de decisiones para que este tipo de actuaciones se incluyan en los planes urbanísticos que se desarrollen a medio y largo plazo.

No hay que olvidar que cualquier actuación de este tipo requiere el acuerdo de toda la comunidad. Teniendo en cuenta que el agua es un bien común, la premio nobel de economía Elinor Ostrom apuntaba que toda gestión de un bien común debe ser realizada mediante el acuerdo colectivo y el consenso para que pueda tener éxito.

12.- FUTURAS INVESTIGACIONES

Este trabajo ha permitido conocer en profundidad cómo afectaría la inclusión de algunas técnicas LID al drenaje de un área muy concreta de la ciudad de Tudela. La realización de este trabajo ha planteado nuevos interrogantes que podrían ser explorados en el futuro.

El primero de ellos, en nuestra opinión, debería ser evaluar el efecto que tendría sobre la red la división del sistema en subcuencas más pequeñas. Entendemos que los resultados obtenidos de esta actuación se ajustarían más a las situaciones reales.

Otro aspecto importante es conocer cómo afectan a la red la variación de los diferentes parámetros que conforman el LID. Se supone que LIDs diseñados con una altura de berma mayor producirán mejoras significativas sobre los resultados obtenidos. Además, como se ha visto, la arena no es el único material de almacenamiento de los LID, por lo que podría estudiarse utilizar un material diferente.

Sabemos que la contaminación difusa en entornos urbanos contiene otros contaminantes además de los estudiados en este trabajo, por lo que sería interesante incluirlos en posteriores estudios. La información recogida de esta forma suministraría datos más exactos sobre la calidad del agua.

Por otro lado, en este estudio, se han seleccionado tres de las técnicas LID que menos compromiso implican por parte de la ciudadanía. Sin embargo, podría estudiarse la inclusión de otras técnicas que requieran un mayor grado de compromiso, como pueden ser los sistemas o depósitos de almacenamiento.

Por último, sería conveniente ampliar el estudio a otras zonas de la ciudad y comparar el comportamiento de estas técnicas en las distintas áreas, incluyendo aquellas que ya cuenten con redes de drenaje separativas.

13.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Insituto Nacional de Estadística INE, Indicadores de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, 2021.
- [2] Gobierno de Navarra, «Alineación de las políticas públicas competencia del

Gobierno de Navarra con la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible».

- [3] Naciones Unidas, «Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible,» Nueva York, 2018.
- [4] Universidad Pública de Navarra, «unavarra,» 23 Abril 2021. [En línea]. Available: <http://www.unavarra.es/sites/actualidad/contents/noticias/2021/04/21-04-23/la-upna-se-situa-la-sexta-univer.html>.
- [5] Instituto Nacional de Estadística INE, «Objetivo 6,» Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.ine.es/dyngs/ODS/es/objetivo.htm?id=5003>.
- [6] Instituto Nacional de Estadística INE, «Objetivo 9,» Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.ine.es/dyngs/ODS/es/objetivo.htm?id=4895>.
- [7] Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, «Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles,» [En línea]. Available: <https://www.agenda2030.gob.es/objetivos/objetivo11.htm>.
- [8] Instituto Nacional de Estadística INE, «Objetivo 11,» Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.ine.es/dyngs/ODS/es/objetivo.htm?id=4907>.
- [9] Ayuntamiento de Tudela, «Plan estratégico ciudad-PEC de Tudela (Navarra),» Diciembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.tudela.es/docs/calidad/diagnostico-estrategico-pec.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [10] LParq, «PLAN GENERAL MUNICIPAL DE TUDELA EMOT, estrategia y modelo de ocupación del territorio,» Tudela, 2019.
- [11] Fundación AQUAE, «Causas y consecuencias del cambio climático,» [En línea]. Available: https://www.fundacionaquae.org/causas-y-consecuencias-cambio-climatico?gclid=CjwKCAjw47eFBhA9EiwAy8kzNGm1_BQgH2jc38y5d0ekxicKxNnI54AYFxheelLGeV-dNr6ALIRd1NhoCHtQQA_vD_BwE.
- [12] AEMET, «Agencia Estatal de Meteorología,» 2021. [En línea].
- [13] M. Valbuena, «Rehabilitación de redes de alcantarillado mediante técnicas LID, usando SWMM5 en un caso real,» Barcelona, 2016.
- [14] L. Á. Sañudo, J. Rodríguez y D. Castro, Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), 2012.
- [15] I. Lacosta, M. D. Sánchez y R. Fernández, «Los conocimientos de los alumnos de secundaria sobre los fenómenos de contaminación de las aguas,» Zaragoza, 2006.

- [16] L. Á. Sañudo, «Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines y aglomerados porosos para el control en origen de inundaciones,» 2014.
- [17] C. García, «Escorrentía urbana, sistemas de recogida y drenaje,» Madrid, 2020.
- [18] L. Zarza, «iagua,» [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-inundacion>.
- [19] J. M. Horrach, «iagua,» 22 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/juan-mateo-horrach/gestion-pluviales-gran-olvidada-ciclo-agua>.
- [20] Sistemas de Drenaje Sostenible SL (SUDS), «Drenaje Sostenible - Diseño,» [En línea]. Available: <https://drenajesostenible.com/disenio/>.
- [21] San Francisco Public Utilities Commission, «Stormwater management requirements and design guidelines,» San Francisco, 2016.
- [22] CIRIA, The SuDS manual, Londres, 2015.
- [23] A. Abellán, «SuD Sostenible,» [En línea]. Available: <http://sudsostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible/objetivos-del-drenaje-urbano-sostenible/>.
- [24] J. Gazpio, «iagua - Beneficios de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS),» 30 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/juan-gazpio/beneficios-sistemas-urbanos-drenaje-sostenible-suds>.
- [25] Unión Europea, «Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo,» Luxemburgo, 2012.
- [26] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, «DIRECTIVA 2007/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación,» 2007.
- [27] P. E. Y. C. D. L. U. EUROPEA, «DIRECTIVA 2006/118/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro,» 2006.
- [28] CONSEJO DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS, «DIRECTIVA DEL CONSEJO sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas,» 1991.
- [29] MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO

- AMBIENTE, «11779 Real Decreto 1290/2012,» Boletín Oficial del Estado, 2012.
- [30] Ministerio de la Presidencia, «11184 Real Decreto 903/2010,» BOE, 2010.
- [31] Gobierno de Navarra, «El agua en Navarra - Legislación,» [En línea]. Available: http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Agua/Documentacion/legislacion.htm#header2. [Último acceso: 2021].
- [32] MINISTERIO DE FOMENTO, «3780 Real Decreto 233/2013,» BOE, 2013.
- [33] MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, «6078 Real Decreto 400/2013,» BOE, 2013.
- [34] Consejera de Desarrollo Rural y Medio Ambiente, «ORDEN FORAL 128/2009,» BOE, 2009.
- [35] Gobierno de Navarra, «DECRETO FORAL 12/2006,» BOE, 2006.
- [36] Gobierno de Navarra, «DECRETO FORAL 191/2000,» BOE, 2000.
- [37] IDENA, «Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (IDENA),» [En línea]. Available: <https://idena.navarra.es/Portal/Inicio>. [Último acceso: 2021].
- [38] Soil Conservation Service, [En línea]. Available: <https://www.scs.nsw.gov.au/contact-the-soil-conservation-service>.
- [39] D. Brittle, «Climate proofing social housing estates,» de *Successful community engagement for SuDS*, Londres, 2021.
- [40] D. G. Everett, «Principles of successful community engagement,» de *Successful community engagement for SuDS*, Londres, 2021.
- [41] «Una tromba de agua descarga sobre Tudela e inunda las calles,» *Noticias de Navarra*, 31 Mayo 2020.

ANEXO I

PARÁMETROS DE CÁLCULO DE LA SITUACIÓN INICIAL

SITUACIÓN 0

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.1

Element Count

Number of rain gages 1
 Number of subcatchments ... 2
 Number of nodes 7
 Number of links 6
 Number of pollutants 3
 Number of land uses 1

Pollutant Summary

Name	Units	Concen.	Concen.	1/days	CoPollutant
SS	MG/L	7.00	0.00	0.00	
DBO05	MG/L	0.00	0.00	0.00	SS (0.85)
NH4	MGL	0.55	0.00	0.00	SS (0.03)

Landuse Summary

Name	Interval	Removal	Swept
Residencial	1.00	0.40	1.00

Raingage Summary

Name	Data Source	Type	Interval
LL1	S6	INTENSITY	60 min.

Subcatchment Summary

Name	Area	Width	%Imperv	%Slope	Rain Gage	Outlet
SC1	2.80	300.00	65.00	5.9000	LL1	1
SC2	11.11	200.00	90.00	2.6500	LL1	2

Node Summary

Name	Type	Elev.	Depth	Area	Inflow
1	JUNCTION	281.00	2.00	0.0	
2	JUNCTION	267.00	2.00	0.0	
3	JUNCTION	267.00	2.00	0.0	
4	JUNCTION	267.00	2.00	0.0	
5	JUNCTION	266.00	2.00	0.0	
6	JUNCTION	265.00	2.00	0.0	
V7	OUTFALL	264.50	0.50	0.0	

Link Summary

Name	From Node	To Node	Type	Length	%Slope	Roughness
T1	1	3	CONDUIT	475.0	2.9486	0.0120
T2	2	4	CONDUIT	83.0	0.0004	0.0120
T3	3	5	CONDUIT	160.0	0.6250	0.0120

T4	4	5	CONDUIT	160.0	0.6250	0.0120
T5	5	6	CONDUIT	265.0	0.3774	0.0120
T7	6	V7	CONDUIT	30.0	1.6669	0.0120

Cross Section Summary

Conduit	Shape	Depth	Area	Rad.	Width	Barrels	Flow
T1	CIRCULAR	0.40	0.13	0.10	0.40	1	387.44
T2	CIRCULAR	0.40	0.13	0.10	0.40	1	4.32
T3	CIRCULAR	0.40	0.13	0.10	0.40	1	178.37
T4	CIRCULAR	0.40	0.13	0.10	0.40	1	178.37
T5	CIRCULAR	0.50	0.20	0.12	0.50	1	251.30
T7	CIRCULAR	0.50	0.20	0.12	0.50	1	528.16

Analysis Options

Flow Units LPS
 Process Models:
 Rainfall/Runoff YES
 Snowmelt NO
 Groundwater NO
 Flow Routing YES
 Ponding Allowed NO
 Water Quality YES
 Infiltration Method CURVE_NUMBER
 Flow Routing Method DYN WAVE
 Starting Date 05/31/2020 00:00:00
 Ending Date 05/31/2020 18:00:00
 Antecedent Dry Days 4.0
 Report Time Step 00:15:00
 Wet Time Step 00:05:00
 Dry Time Step 01:00:00
 Routing Time Step 30.00 sec
 Variable Time Step YES