



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

**ANÁLISIS DEL SOFTWARE E2STORMED PARA EL DISEÑO
DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE Y APLI-
CACIÓN EN UN CASO DE ESTUDIO.**

Autor:

Javier Mur Satué

Director:

Benniamino Russo

Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia

2019



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

DOCUMENTO Nº 1

MEMORIA

ANÁLISIS DEL SOFTWARE E2STORMED PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE DRENAJE UR- BANO SOSTENIBLE Y APLICACIÓN EN UN CASO DE ESTUDIO

Autor:

Javier Mur Satué

1.1 MEMORIA



INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. TIPOLOGÍAS DE SUDS.	3
2.1. Clasificación de SUDs por función	3
2.2. Clasificación de SUDs por emplazamiento	4
2.2.1. CONTROL EN ORIGEN	6
2.2.1.1. <i>Tejados verdes</i>	6
2.2.1.1.1. <i>Sistemas Constructivos</i>	9
2.2.1.1.2. <i>Pavimentos porosos</i>	14
2.2.1.1.3. <i>Pavimentos modulares</i>	14
2.2.2. SUDS LOCAL	16
2.2.2.1. <i>Zanjas de infiltración.</i>	16
2.2.2.2. <i>Pozos de infiltración.</i>	17
2.2.2.3. <i>Cunetas verdes</i>	17
2.2.2.4. <i>Zonas de biorretención</i>	19
2.2.2.5. <i>Zonas de biorretención</i>	19
2.2.3. SUDS REGIONAL	22
3. APLICABILIDAD DE LOS SUDS A CLIMAS MEDITERRÁNEOS	25
3.1. SUDS EN ORIGEN	26
3.2. SUDS LOCAL	30
3.3. SUDS REGIONAL	32
4. MODELIZACIÓN EN SWMM V.5.1	33
4.1. DISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE SUDS	33
4.1.1. <i>Áreas de biorretención.</i>	34
4.1.2. <i>Jardines de lluvia</i>	38
4.1.3. <i>Tejados verdes</i>	39
4.1.4. <i>Zanjas de infiltración</i>	39
4.1.5. <i>Pavimentos Permeables</i>	40
4.1.6. <i>Cunetas verdes</i>	43
4.2. UBICACIÓN, CASO DE ESTUDIO Y RED DE DRENAJE.	43
4.3. ELABORACIÓN DE LAS LLUVIAS DE DISEÑO	44
4.4. ELECCIÓN DE LOS PARAMETROS PARA LOS SUDS A IMPLEMENTAR	49

1.1 MEMORIA

4.5.	DISCRETIZACIÓN DE ZONAS PARA LA APLICACIÓN DE LOS SUDS.	51
4.5.1.	<i>Distribución en zona de viviendas</i>	52
4.5.2.	<i>Distribución en zonas verdes o vegetadas</i>	53
4.6.	MODELO DE CÁLCULO EJECUTADO	55
4.7.	RESULTADOS OBTENIDOS LLUVIAS DE DISEÑO	60
4.7.1.	<i>Reducción de escorrentía</i>	60
4.7.2.	<i>Reducción de contaminantes</i>	61
4.8.	RESULTADOS OBTENIDOS LLUVIAS CONTINUAS	64
5.	MODELIZACIÓN EN ES2TORMED.	65
5.1.	ANÁLISIS DEL PROGRAMA E2STORMED	65
5.1.1.	<i>Volumen de escorrentía</i>	68
5.1.2.	<i>Calidad del agua</i>	70
5.1.3.	<i>Servicios de ecosistemas</i>	71
5.1.4.	<i>Infraestructuras dentro de los diferentes escenarios.</i>	72
5.2.	RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSIONES DEL PROGRAMA	73
5.2.1.	<i>Reducción de las escorrentías</i>	73
5.2.2.	<i>Costes de construcción</i>	74
5.2.3.	<i>Emisiones de CO₂</i>	75
5.2.4.	<i>Resultados para toma de decisiones</i>	76
5.1.	PARAMETRIZACIÓN Y COMPARATIVA CON SWMM	77
6.	CONCLUSIONES	80
7.	BIBLIOGRAFÍA	82

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mejora de los SUDS (Elaboración Propia)	1
Ilustración 2. Tendencia de citaciones en estudios de SUDs (Fuente: T.D. Fletcher et al.).....	2
Ilustración 3. Estrategia de tratamiento en cadena para la gestión de las aguas pluviales (adaptado de CIRIA, 1999).....	6
Ilustración 4. Capas cubierta verdes	6
Ilustración 5. Edificaciones con cubiertas verdes	7
Ilustración 6. Detalle constructivo pavimentos modulares (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2)	15
Ilustración 7. Detalle constructivo para zanjas de infiltración (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2)	16
Ilustración 8. Detalle constructivo para pozos de infiltración (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2)	17
Ilustración 9. Detalle constructivo para cunetas verdes (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).....	18
Ilustración 10. Detalle constructivo para zonas de biorretención (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).....	19
Ilustración 11. Detalle constructivo para filtros de arena 1 (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2)	20
Ilustración 12. Detalle constructivo para filtros de arena 2 (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2)	21
Ilustración 13. Detalle constructivo para filtros de arena 3 (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2)	21
Ilustración 14. Ejemplo de implementación de estanques (Fuente: StwrmWater Management Design Manual).....	23
Ilustración 15. Ejemplo de implementación de humedales (Fuente: StwrmWater Management Design Manual).....	24
Ilustración 16. Climogramas áridos Zaragoza y Murcia (Fuente: INE, Elaboración Propia).....	25

Ilustración 17. Ejecución de pavimentos permeables modulares	26
Ilustración 18. De izquierda a derecha, Pavimentos permeable modular y pavimento permeable continuo.....	27
Ilustración 19. Actuación de un pavimento permeable.....	28
Ilustración 20. Cubierta vegetal baobab en valencia con vegetación tipo sedum (Fuente: Singular Green).....	28
Ilustración 21. Cubierta vegetal Garoé en Benidorm (Fuente: Singular Green)	29
Ilustración 22. Aplicación de SUDs en el barrio de Les Roquetes Barcelona	30
Ilustración 23. Ejecución de un filtro de arena para reducción de escorrentías y contaminantes	31
Ilustración 24. Pantalla de introducción de parámetros para zonas de biorretención dentro de los "LID Control" del programa SWMM	34
Ilustración 25. . Pantalla de introducción de parámetros para jardines de lluvia dentro de los "LID Control" del programa SWMM	38
Ilustración 26. . Pantalla de introducción de parámetros para tejados verdes dentro de los "LID Control" del programa SWMM	39
Ilustración 27. Pantalla de introducción de parámetros para tejados verdes dentro de los "LID Control" del programa SWMM	40
Ilustración 28. Pantalla de introducción de parámetros para pavimentos permeables dentro de los "LID Control" del programa SWMM	41
Ilustración 29. Pantalla de introducción de parámetros para pavimentos permeables dentro de los "LID Control" del programa SWMM.	43
Ilustración 30. Evolución de las precipitaciones en función de los tiempos de retorno para las que han sido calculadas.	47
Ilustración 31. Curvas IDF para T2,T10 y T50	48
Ilustración 32. Distribución de la lluvia de diseño a partir de las curvas IDF mediante el método de bloques alternados.....	48
Ilustración 33. Diferenciación de zonas según su permeabilidad. En azul zonas de viviendas, en verde zonas vegetadas	51
Ilustración 34. Gráficos de distribución de las diferentes áreas dentro de las zonas de viviendas. A la izquierda situación inicial a la derecha situación Final	53

Ilustración 35. Gráficos de distribución de las diferentes áreas dentro de las zonas verdes (situación inicial).....	54
Ilustración 36. Gráficos de distribución de las diferentes áreas dentro de las zonas verdes (situación final).....	54
Ilustración 37. Cálculo realizado por el programa SWMM para el módulo de SUDs/LIDs.....	55
Ilustración 38. Ventana de introducción de ocupación de SUDs dentro de una subcuenca	56
Ilustración 39. Tabla justificativa sobre las superficies iniciales de las zonas verdes	57
Ilustración 40. Tabla justificativa sobre las superficies finales con aplicación de SUDs de las zonas verdes	58
Ilustración 41. Ventana de aplicación de áreas ocupadas por SUDs (Pavimento permeable)	58
Ilustración 42. Ventana de aplicación de áreas ocupadas por SUDs (Cuneta Verde)	58
Ilustración 43. Ventana de aplicación de áreas ocupadas por SUDs (Zanja infiltración).....	59
Ilustración 44. Gráfico de evolución de las escorrentías sin aplicación de SUDs (CMS/m ³).....	60
Ilustración 45. Gráfico de evolución de las escorrentías con aplicación de SUDs (CMS/m ³).....	60
Ilustración 46. Gráfico reducción (CMS/m ³)	60
Ilustración 47. Gráfico de evolución de concentración de contaminantes sólidos en suspensión (Mg/L)	61
Ilustración 48. Reducción de sólidos en suspensión.....	61
Ilustración 49. Gráfico de evolución de concentración de demanda química de oxígeno (Mg/L)..	62
Ilustración 50. Reducción de la demanda química de oxígeno	62
Ilustración 51. Gráfico de evolución de concentración de demanda bioquímica de oxígeno (Mg/L)	63
Ilustración 52. Reducción de la demanda bioquímica de oxígeno	63
Ilustración 53. Lluvia continua 2013. Serie histórica del aeropuerto de Zaragoza.....	64
Ilustración 54. Reducción para una lluvia continua de sólidos en suspensión, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y escorrentía.	64
Ilustración 55. Ventana de introducción de datos generales E2STORMED.....	66
Ilustración 56. Introducción de temperaturas medias y precipitaciones medias.	66
Ilustración 57. Vista general y botones para generar los escenarios.	67

Ilustración 58. Pantalla para la introducción del volumen de escorrentía.....	68
Ilustración 59. Coeficientes de escorrentía recomendados en E2STORMED (SFPUC 2009).....	69
Ilustración 60. Pantalla de introducción de datos cualitativos de calidad de agua	70
Ilustración 61. Pantalla de introducción de datos para servicios de ecosistemas	71
Ilustración 62. Pantalla de introducción de datos reducción de dióxido de carbono.....	72
Ilustración 63. Infraestructuras por escenarios.....	72
Ilustración 64. Gráfico de la evolución de los costes de construcción	74
Ilustración 65. Gráfico de la evolución de los costes de mantenimiento	74
Ilustración 66. Gráfico de la evolución de las emisiones durante la construcción.....	75
Ilustración 67. Gráfico de la evolución de las emisiones durante el mantenimiento	75
Ilustración 68 Gráfico de la evolución de la reducción de Kg CO ₂	75
Ilustración 69. Ventana para selección de los criterios ponderados	76
Ilustración 70. Valoración ponderada bajo los criterios escogidos.	77
Ilustración 71. Gráfico comparativo de los resultados obtenidos para una anualidad.	79

Incluir los diferentes índices de elementos (diferentes a ilustraciones y tablas) que se hayan utilizado en el documento.

Estos elementos se pueden crear con los rótulos predeterminados o con otros rótulos personalizados, por ejemplo: Fotografía, Plano, Esquema, etc

1. INTRODUCCIÓN

Las ciudades son los núcleos urbanos más agresivos desde el punto de vista hidrológico dada sus alteraciones sobre la superficie. Al pavimentar y asfaltar calles se produce un cambio sustancial en cuanto a la infiltración de la zona de actuación alcanzando casi un 100% de la impermeabilidad y ayudando así a crear grandes escorrentías que deben ser reconducidas mediante grandes colectores que recojan el agua de lluvia. A su vez, esta agua de lluvia vendrá sin ninguna laminación y generará picos importantes que pueden formar grandes problemas de inundaciones. Estos episodios generaran la imposibilidad de su tratamiento en las estaciones de aguas pluviales antes de su vertido al medio receptor

Para paliar las deficiencias de este modelo de urbanización, nacen los sistemas de drenaje urbanos sostenibles en adelante SUDS. Los SUDS vienen desarrollándose desde el presente siglo y cada vez su aplicabilidad se está viendo incrementada, tanto por sus beneficios económicos, demandados por las administraciones, como por sus beneficios medio-ambientales demandados principalmente por la sociedad.

Los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles, son entendidos como técnicas 'verdes' de la ingeniería que diseñan las soluciones imitando los procesos naturales de drenaje del agua de lluvia:

- Resulta una mejora tanto en la captación de escorrentía, puesto que tratan de infiltrar gran cantidad de agua que luego no computará en los colectores. Por tanto este punto es muy interesante dado que se resolverían problemas en zonas críticas de inundación o incluso se reducirían los diámetros de las redes con la reducción de coste que conlleva.
- La típica escorrentía urbana está llena de contaminantes debido al lavado que produce a su paso sobre las calles. La infiltración hace que esta contaminación se quede retenida en el SUD y el agua pueda a ser incluso reutilizada para usos domésticos.
- Es evidente que la amenización del paisaje urbano será también uno de sus puntos fuertes al dotar de mayores espacios verdes y mayor biodiversidad.

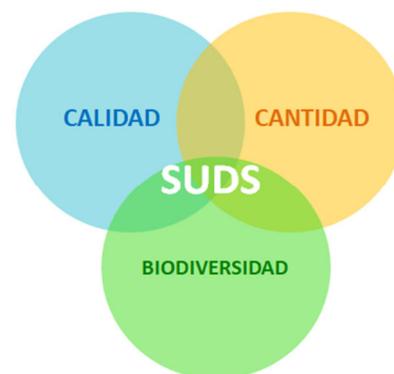


Ilustración 1. Mejora de los SUDS (Elaboración Propia)

Se aprecia una tendencia al alza en cuanto a citaciones de estos sistemas y técnicas verdes, y si bien en países del norte de Europa su aplicación es mayor, en países del sur como España, no se encuentran tan desarrollados, tanto por el desconocimiento de la sociedad, como por el clima.

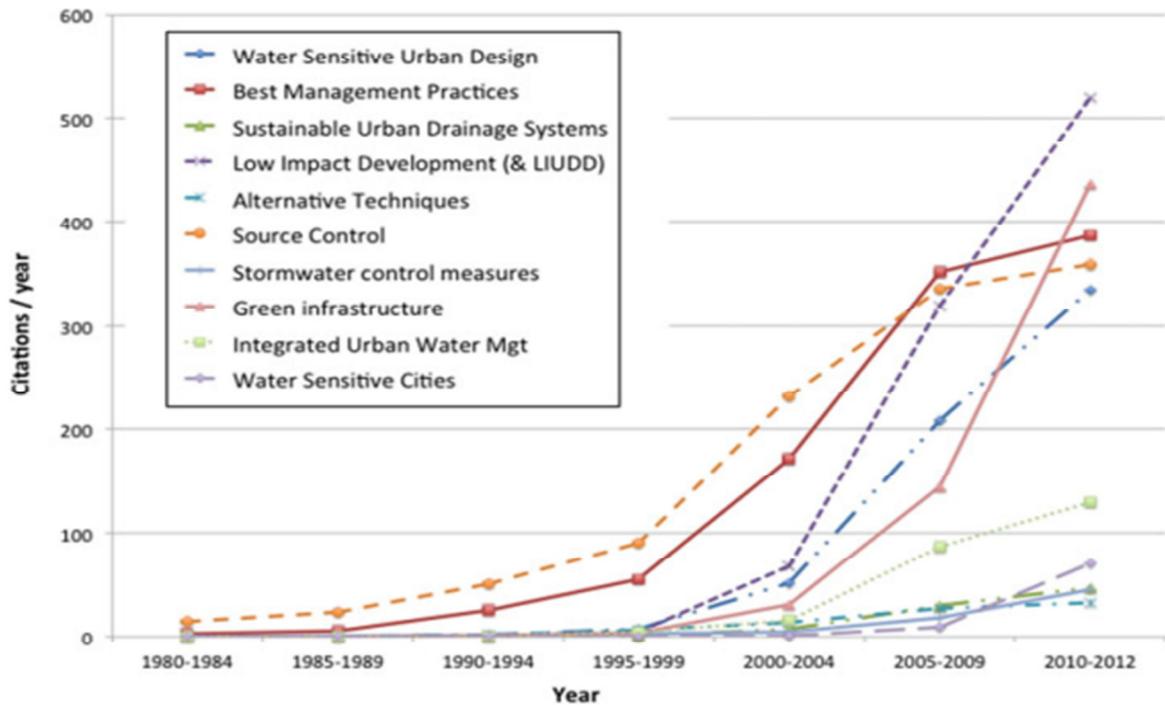


Ilustración 2. Tendencia de citaciones en estudios de SUDs (Fuente: T.D. Fletcher et al.)

2. TIPOLOGÍAS DE SUDs.

2.1. CLASIFICACIÓN DE SUDs POR FUNCIÓN

Un primer tipo de clasificación, y la más simple de todas, común tanto según la organización CIRIA, como en la publicación del CEDEX "Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano" (Puertas Agudo J., Suárez López J., Anta Álvarez J.; 2008) y usada por otros muchos autores, es la que distingue las medidas entre estructurales y no estructurales.

Medidas No Estructurales: Las medidas no estructurales previenen por una parte la contaminación del agua reduciendo las fuentes potenciales de contaminantes y por otra evitan parcialmente el tránsito de las escorrentías hacia aguas abajo y su contacto con contaminantes. Entre las medidas no estructurales de mayor difusión cabe citar las siguientes:

- Educación y programas de participación ciudadana para: - Concienciar a la población del problema y sus soluciones - Identificar agentes implicados y esfuerzos realizados hasta la fecha - Cambio de hábitos - Hacer partícipe del proceso a la población, integrando sus comentarios en la implementación de los programas
- Planificación y diseño, minimizando las superficies impermeables para reducir la escorrentía.
- Campañas de concienciación ciudadana para reducir la suciedad en las calles.
- Limpieza frecuente de superficies impermeables para reducir la acumulación de contaminantes.
- Control sobre la aplicación de herbicidas y fungicidas en parques y jardines.
- Control de las zonas en obras para evitar el arrastre de sedimentos.
- Existencia de procedimientos de actuación y equipamiento adecuado para tratar episodios de vertidos accidentales rápidamente y con técnicas secas en lugar de limpieza con agua.
- Limitación del riesgo de que la escorrentía entre en contacto con contaminantes.
- Control de las conexiones ilegales al sistema de drenaje.
- Recogida y reutilización de pluviales

Medidas estructurales: Son aquellas que gestionan la escorrentía contaminada mediante actuaciones que contengan en mayor o menor grado algún elemento constructivo o supongan la adopción de criterios urbanísticos.

Infiltración	Filtración	Detención y Retención	Vegetación
<ul style="list-style-type: none"> • Sumideros • Zanjas de infiltración • Pavimentos permeables 	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas de bioretención • Zanja filtrante 	<ul style="list-style-type: none"> • Depósitos de retención • Estanques de retención • Drenaje geocelular 	<ul style="list-style-type: none"> • Cubiertas verdes • humedales

2.2. CLASIFICACIÓN DE SUDs POR EMPLAZAMIENTO

Una clasificación muy extendida cataloga las Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TDuS) en función de su emplazamiento en el sistema de saneamiento y drenaje urbano. Esta clasificación está recogida dentro del manual "The New York State Stormwater Design Manual", el cual está destinado a establecer especificaciones y criterios uniformes dentro de un Plan de prevención de contaminación de aguas pluviales (SWPPP) creado por la EPA (Environmental Protection Agency). En España las únicas instrucciones técnicas que existen al respecto son las presentadas por la consejería de medio ambiente, territorio e infraestructuras de Galicia bajo el título "Instrucciones básicas para obras hidráulicas en Galicia" que en posee un apartado de técnicas de drenaje urbano sostenible basado en el "CEDEX (2009). Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano" y en la "ASCE-EPA. (2002). Urban Stormwater BMP performance monitoring. American Society of Civil Engineering, U.S.Environmental Protection Agency." Bajo este criterio se pueden diferenciar tres niveles:

- **Sistemas para el control de la escorrentía en origen:** Las técnicas de control de entrada en origen están diseñadas para manejar las aguas de escorrentía en el punto donde llueve. El control de las entradas es proporcionar un volumen de retención en superficies o lugares especialmente preparados como techos, estacionamientos, patios industriales o residencias, o en general, cualquier superficie diseñada adecuadamente. Este volumen de agua puede derivarse posteriormente de un sistema de control o de-

tención local en la subcuenca, almacenarse y tratarse para su uso (para fines urbanos, así como para la infiltración) o incluso la evaporación (si la lámina de agua es pequeña).

- **Técnicas de control local: pequeñas superficies y cuencas urbanas <5 ha:** El control local y las técnicas locales de tratamiento son instalaciones de almacenamiento de escurrimiento que usan infiltración para reducir los volúmenes de lluvia dirigidos a la red de drenaje o red de alcantarillado. El objetivo de estas instalaciones es evitar la escorrentía más común por las lluvias que ingresan a la red de drenaje. Cuando las características del suelo son adecuadas, el agua generada en áreas impermeables se transporta a lugares específicos con vegetación donde ocurre la infiltración. Si estos lugares no existen de forma natural, las aguas pueden ser conducidas a depósitos u otras instalaciones donde se permite la infiltración.
- **Técnicas de control regional:** grandes superficies y puntos previos de vertido a medios receptores: Las instalaciones de retención o detención a nivel subcuenca son técnicas que pueden utilizarse en secciones altas, medias bajas o altas de las redes de agua de lluvia de los sistemas de separación, donde ya se recoge una cuenca apreciable. La principal diferencia entre el almacenamiento a nivel de subcuenca y el tratamiento local y el control de las entradas en el origen está en la cantidad de área del contribuyente que se intercepta. El almacenamiento en el nivel secundario generalmente intercepta un volumen significativo. Cuando la urbanización es más aguda o la cuenca está más consolidada, es difícil obtener espacio para construir un sistema para de lagunas o humedales. En este caso, se recurre a sistemas de almacenamiento compactos - tratamiento en línea. El tratamiento generalmente consiste, por ejemplo, en la filtración a través de lechos de arena. En el caso de que se persiga la reutilización de una porción del agua, el tratamiento será adecuado para un uso posterior. Es razonable diseñar el sistema con diferentes líneas de tratamiento, una para el agua que se reutilizará y otra para el agua que verterá, ya que los objetivos de calidad serán diferentes. El uso de lagunas o estanques para el control y tratamiento de la escorrentía urbano ha sido ampliamente utilizado en los últimos años en los Estados Unidos y en Europa. Al mismo tiempo, los diseños son cada vez más sofisticados para alcanzar los objetivos ambientales previstos, tanto desde el punto de vista de la calidad del agua como desde el punto de vista de la integración del paisaje en entornos urbanos. Las estrategias de control regional se aplican para cuencas de 25-250 hectáreas, no son tan sencillas de utilizar como las locales, tienden a incrementar la temperatura del agua vertida, son más caras y requieren de una planificación técnica avanzada. A pesar de ello cuentan con varias ventajas frente a las técnicas de control in situ como son:

compatibilidad con zonas de recreo, económicamente son más rentables y que se pueden emplear sistemas de desagüe con varias zonas para regular y tratar los sucesos menos energéticos pero más frecuentes.

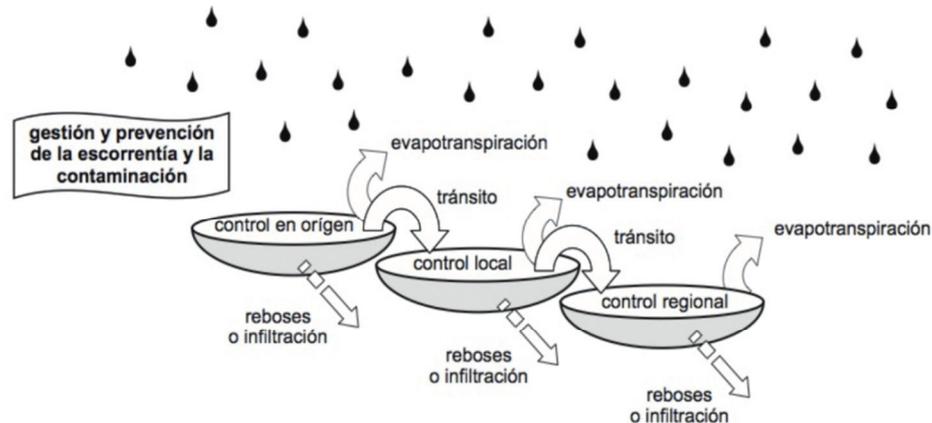


Ilustración 3. Estrategia de tratamiento en cadena para la gestión de las aguas pluviales (adaptado de CIRIA, 1999)

2.2.1. CONTROL EN ORIGEN

2.2.1.1. Tejados verdes

Las cubiertas verdes son reconocidas como las tecnologías de la construcción para cubiertas o azoteas de cualquier edificación con las cuales se logra un crecimiento vegetativo con el fin de obtener una función ecológica, de aislamiento térmico y acústico y una función de reducción de escorrentías.

Para que este crecimiento vegetativo, existen varias técnicas que consisten en esencia la superposición de capas para simular un suelo apto para el crecimiento de ciertas especies vegetales. Existen muchas combinaciones a la hora de la superposición de capas para la creación de una estructura de este tipo, pero sin embargo la estructura principal de la misma es siempre muy similar y tiene una distribución como la que se muestra en la siguiente imagen.

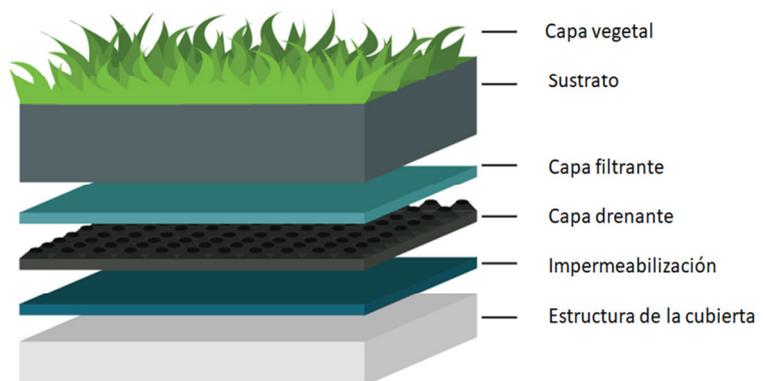


Ilustración 4. Capas cubierta verdes

Existen tres tipos diferenciados de cubiertas verdes que son diferenciadas por su espesor y por las especies vegetales utilizadas: extensivos, intensivos, semi-intensivos.



Cubiertas Intensivas



Cubiertas Extensivas

Ilustración 5. Edificaciones con cubiertas verdes

Tal y como se puede apreciar las cubiertas extensivas tienen una menor masa vegetal, esto hace que todos los parámetros constructivos varíen, debido a la solicitud y las necesidades que dicha masa vegetal requiere. De esta manera encontramos las características recogidas en la siguiente tabla en función de la tipología de tejado verde.

	Extensivo	Semi-Intensivo	Intensivo
Profundidad	25-125 mm	125-180 mm	180-610 mm
Peso	74-122kg/m ²	122-195 Kg/m ²	170-390 kg/m ²
Peso c/agua	95-175 kg/m ²	195-280 kg/m ²	350-815 kg/m ²
Plantas	Musgos, sedums, suculentas y algunas gramíneas	Perennes seleccionados, sedums, ornamentales, aromáticas y pequeños arbustos	Plantas perennes, césped, verde putt, arbustos y árboles, la agricultura en la azotea.
Altura de Plantas	15 cm	1-3 m	10m
Capacidad de retención de agua	25-64 l/m ²	70 l/m ²	113 l/m ²
Riego	No se recomienda, dependerá de la zona	Parcialmente, según se requiera	Si Automático

	Extensivo	Semi-Intensivo	Intensivo
Mantenimiento	Bajo Anuales	Medio Mensuales	Alto Quincenales
Coste	Bajo	Medio	Alto

Tabla 1. Características de las cubiertas verdes según su tipología

Las características de unos y otros conllevan unas ventajas y desventajas que vienen recogidas en las siguientes tablas.

	Cubiertas verdes Extensivas	Cubiertas verdes intensivas
Ventajas	Ligero; la cubierta no requiere de refuerzo	Una mayor diversidad de plantas y hábitats
	Apto para grandes áreas	Buenas propiedades de aislamiento
	Aptos para tejados con 0-30º de pendiente	Puede simular un jardín silvestre en el suelo
	Bajo mantenimiento, larga vida	Se puede hacer muy atractivo visualmente
	Mayor facilidad de permisos de obra	A menudo accesible, mayor posibilidad de recreación y cultivo de alimentos
	Sistema de drenaje	Más eficiencia energética y de capacidad de retención de agua
	Menor necesidad de conocimiento técnico	Mayor vida útil de la membrana
	Adecuada para modernizaciones	
	Se puede dejar crecer vegetación espontánea	
	Relativamente barato	
	Más natural	
	Mayor facilidad de permisos de obra	
	No requieren de riegos	

Tabla 2. Comparación Ventajas de cubiertas verdes extensivas/intensivas (fuente: adaptado de "Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry In Canada" CMHC.1998.)

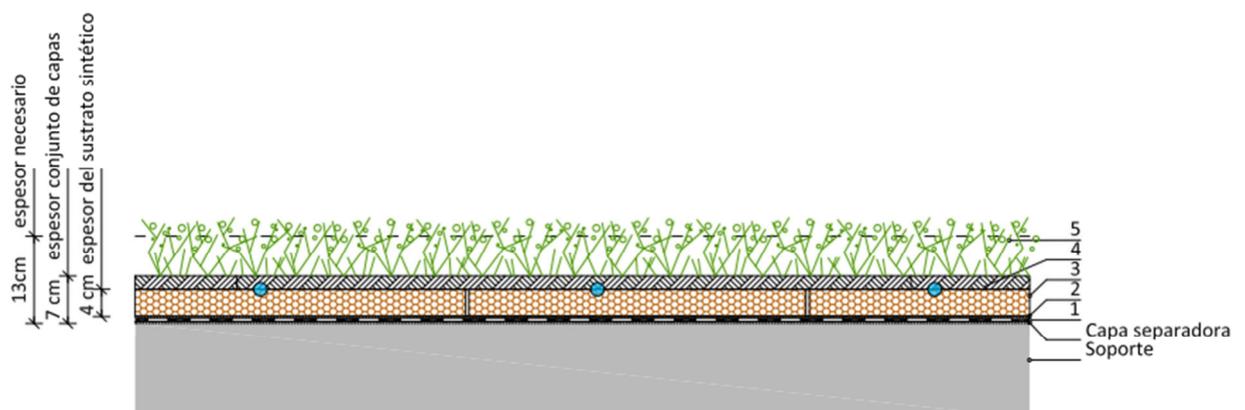
	Cubiertas verdes Extensivas	Cubiertas verdes intensivas
Desventajas	Menor eficiencia energética y de retención de aguas pluviales	Mayor carga en la cubierta. Poco uso en rehabilitación y modernización
	Limitación de la vegetación	Necesidad de sistemas de riego, que demandan energía, por lo tanto mayor inversión y costes de explotación
	Zonas no aptas para la recreación	Sistemas más complejos que requieren de una mayor experiencia
	Menor atractivo en invierno.	

Tabla 3. Comparación desventajas de cubiertas verdes extensivas/intensivas (fuente: adaptado de "Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry In Canada" CMHC.1998.)

2.2.1.1.1. Sistemas Constructivos

Para un vislumbramiento de los diferentes tipos de sistemas constructivos se han consultado varias empresas del sector encontrándose en la empresa SingularGreen S.L. un amplio catálogo de soluciones de cubiertas extensivas e intensivas, que reflejan las diferencias y características propias de las mismas mediante los siguientes detalles constructivos

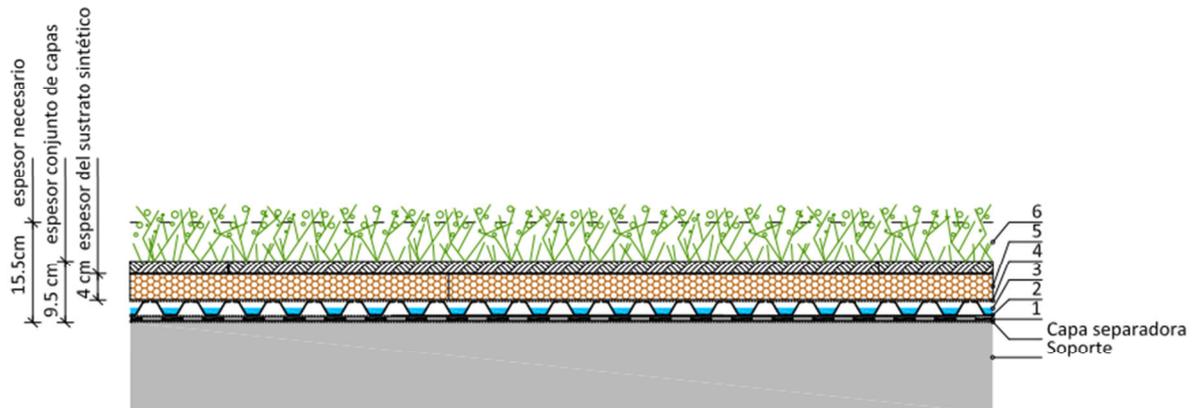
SISTEMA RIZOMA:



LEYENDA

- 5- Vegetación. Especies de césped (Rizoma_Cd) o Sedum (Rizoma_Sm) son sistema de plantación a través de tepes.
- 4- Riego. Sistema enterrado formado por tuberías de \varnothing 16 mm, con goteros integrados.
- 3- Sustrato. Plancha de lana de roca.
- 2- Capa separadora. GTX-100-SG, geotextil de gramaje 100 gr/m².
- 1- Impermeabilización. Membrana líquida de poliuretano.

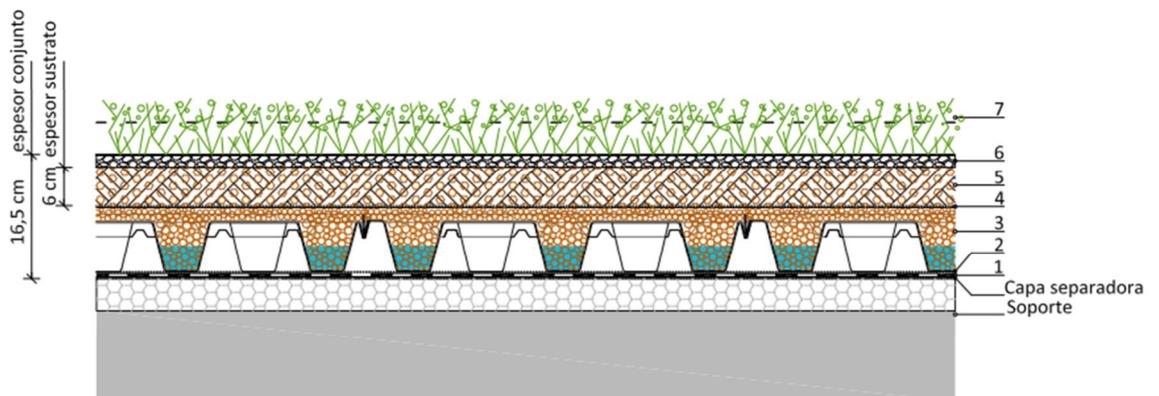
SISTEMA RUPÍCOLA:



LEYENDA

- 6- Vegetación. Especies de cesped (Rupícola_Cd) o Sedum (Rupícola_Sm) son sistema de plantación a través de tepes.
- 5- Sustrato. Plancha de lana de roca.
- 4- Capa filtrante. GTX.F-200-SG, geotextil de gramaje 200 gr/m².
- 3- Capa drenante y retenedora. LN-20-SG, lámina perforada nodular.
- 2- Capa separadora. GTX-100 -SG, geotextil de gramaje 100 gr/m².
- 1- Impermeabilización. Lámina de EPDM o membrana líquida de poliuretano.

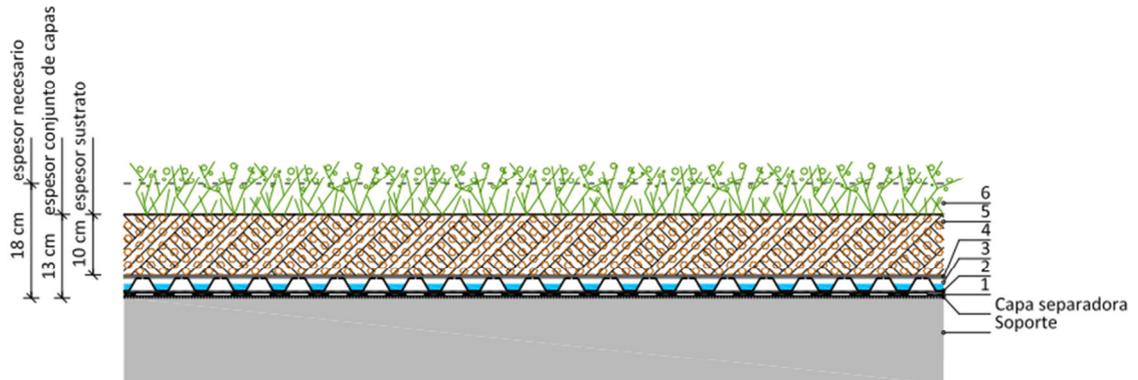
SISTEMA BAOBAB:



LEYENDA

- 7- Vegetación. Especies de crasas (Baobab_Cr) o Sedum (Baobab_Sm).
- 6- Sobresustrato. Capa de grava volcánica o piedra pómez.
- 5- Sustrato. Mezcla S.C.-SG formada por componentes orgánicos y componentes minerales granulares.
- 4- Capa filtrante. GTX.F-200-SG, geotextil de gramaje 200 gr/m².
- 3- Capa drenante y retenedora. LN-90-SG formada por bandeja nodulada rellena de arcilla expandida.
- 2- Capa separadora. GTX-100-SG, geotextil de gramaje 100 gr/m².
- 1- Impermeabilización. Lámina de EPDM o membrana líquida de poliuretano.

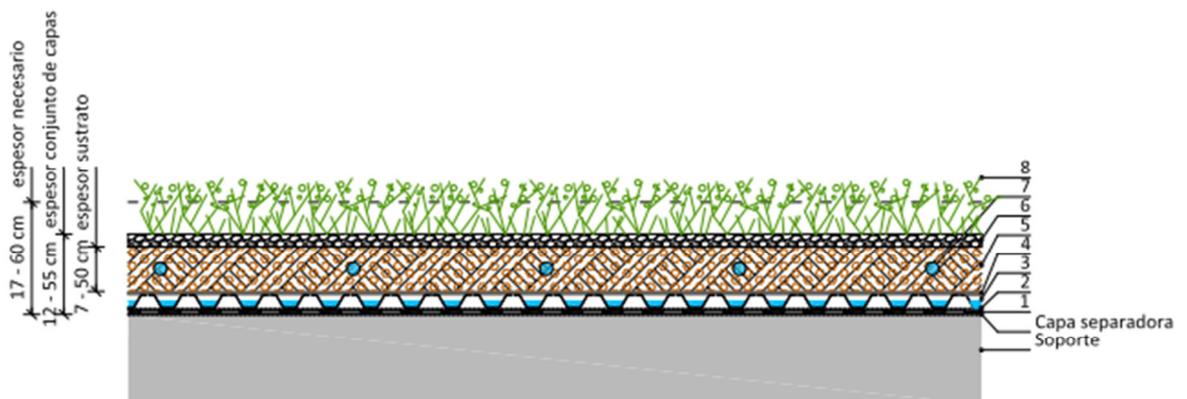
SISTEMA FITUM:



LEYENDA

- 6-Vegetación. Especies de crasas (Fitum_Cr) o Sedum (Fitum_Sm).
- 5-Mezcla tipo S.C.-SG formada por componentes orgánicos y componentes minerales granulares.
- 4-Capa absorbente y filtrante. MR-500-SG, geotextil de gramaje 500 gr/m².
- 3-Capa drenante y retenedora. LN-20-SG formada por lámina perforada nodular.
- 2-Capa separadora. GTX-100-SG, geotextil de gramaje 100 gr/m².
- 1-Impermeabilización. Lámina de EPDM o membrana líquida de poliuretano.

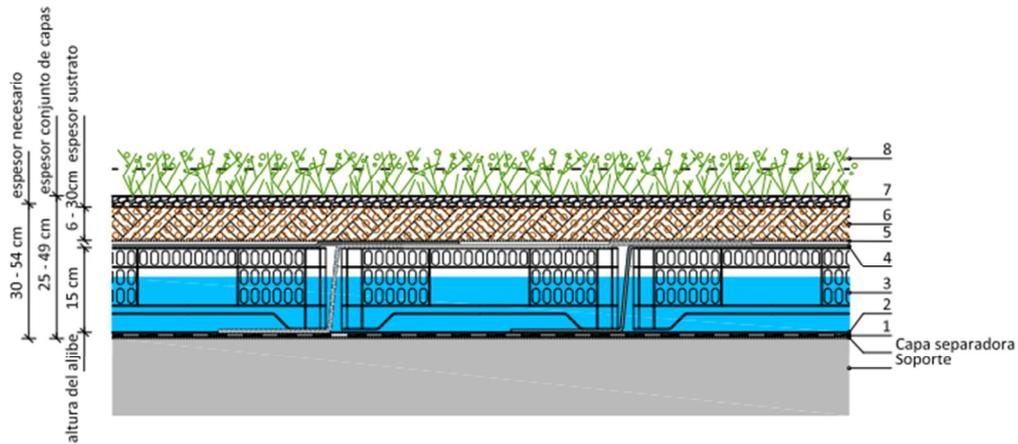
SISTEMA CANTIR



LEYENDA

- 8- Vegetación. Especies de crasas (Cántir_Cr), cespitosas (Cántir_Cp), sedum (Cántir_Sm), gramíneas (Cántir_Gr), vivaces (Cántir_Vs), arbustivas (Cántir_Ab) o arbóreas (Cántir_Ar).
- 7- Sistema de riego enterrado. Tuberías de \varnothing 16 mm, con goteros integrados.
- 6- Sobresustrato. Capa de grava volcánica o piedra pómez.
- 5- Sustrato. Mezcla de componentes orgánicos y componentes minerales granulares. Tipo y espesor en función del acabado vegetal.
- 4- Capa absorbente y filtrante. MR-500-SG, geotextil de gramaje 500 gr/m².
- 3- Capa drenante y retenedora. LN-20-SG formada por lámina perforada nodular.
- 2- Capa separadora. GTX-100-SG, geotextil de gramaje 100 gr/m².
- 1- Impermeabilización. Lámina de EPDM o membrana líquida de poliuretano.

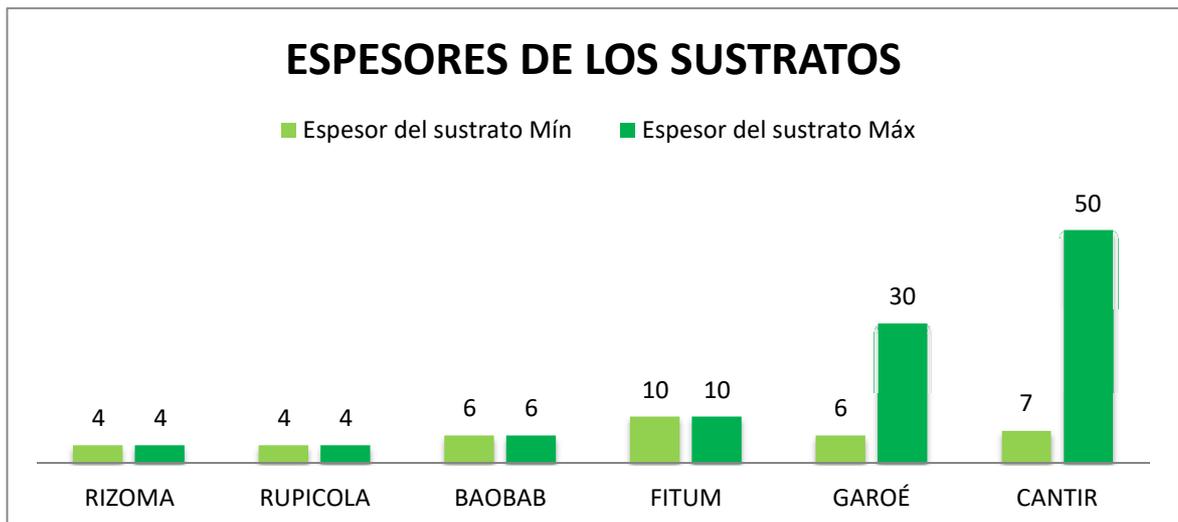
SISTEMA GAROÉ

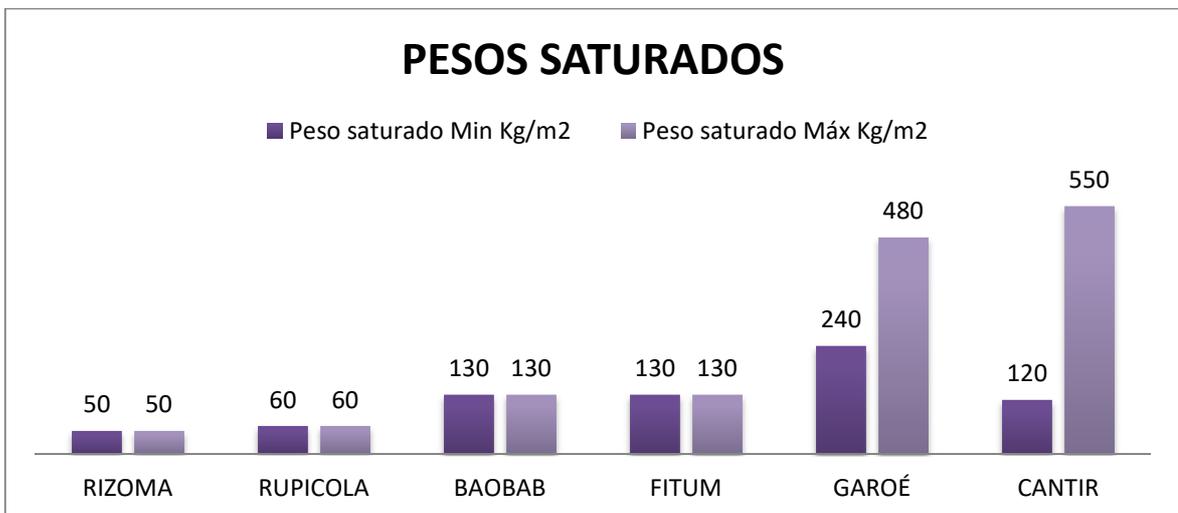
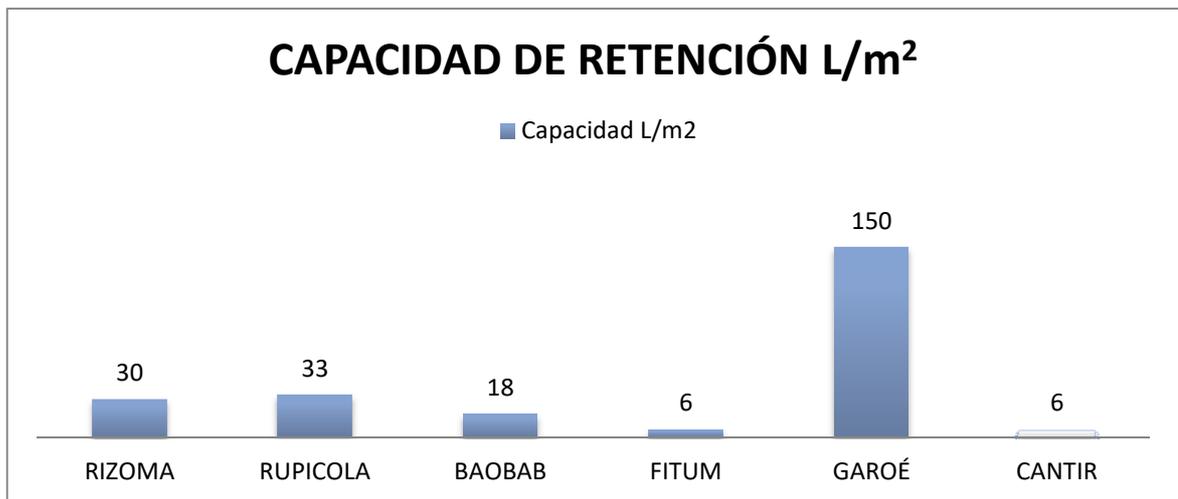
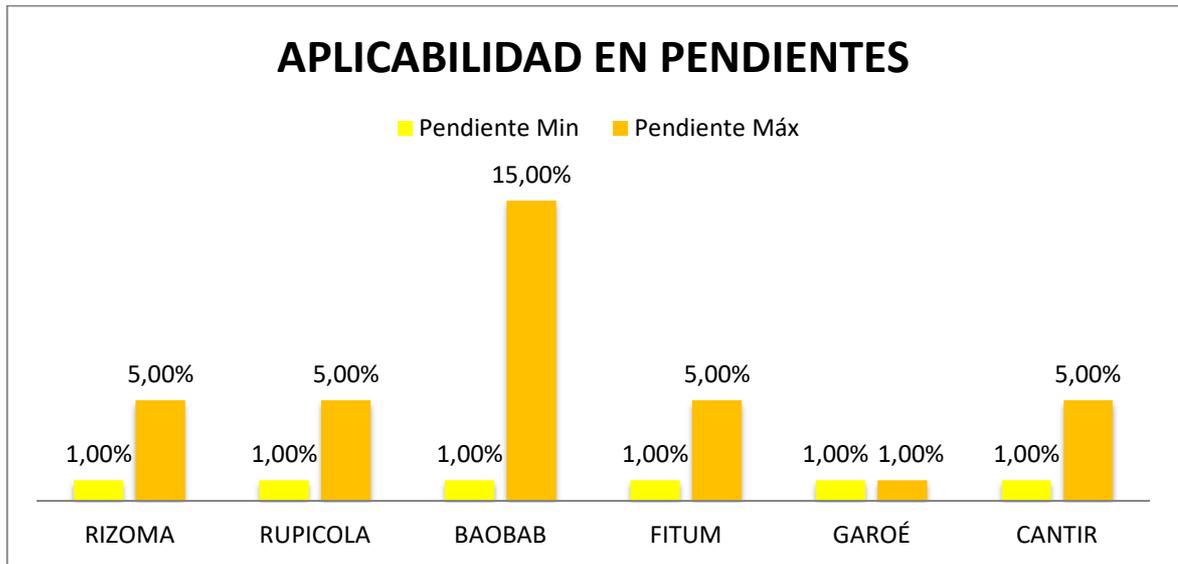


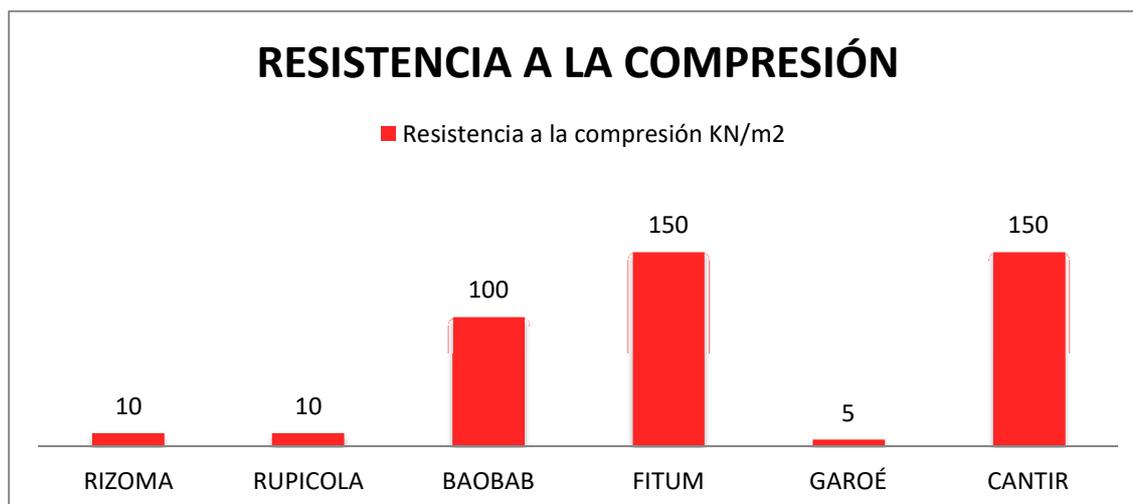
LEYENDA

- 8- Vegetación. Especies de crasas (Garoé_Cr), cespitosas (Garoé_Cp), Sedum (Garoé_Sm), gramíneas (Garoé_Gr), vivaces (Garoé_Vs), o arbustivas (Garoé_Ab).
- 7- Sobresustrato. Capa de grava volcánica o piedra pómez.
- 6- Sustrato. Mezcla de componentes orgánicos y componentes minerales granulares. Tipo y espesor en función del acabado vegetal.
- 5- Capa filtrante. GTX.F-200 -SG geotextil de gramaje 200 gr/m².
- 4- Membrana de conexión. MR-500-SG formada por Geotextil de gramaje 500 gr/m².
- 3- Capa aljibe. Caja de rejilla.
- 2- Capa separadora. GTX-100 -SG, geotextil de gramaje 100 gr/m².
- 1- Impermeabilización. Lámina de EPDM.

Cada una de las soluciones constructivas propuestas tienen unas características en relación de los espesores de los sustratos, aplicabilidad que tienen en función de la pendiente en la que se instalan, la capacidad de retención de agua de lluvia en litros por metro cuadrado, pesos saturados en kilos por metro cuadrado instalado y por último resistencia a la compresión (transitable o no transitable).







2.2.1.2. Pavimentos porosos

Los pavimentos porosos o permeables consisten en una capa de conglomerado de asfalto o concreto que permite la infiltración de escorrentía basada en grava diseñada específicamente para este propósito. Esta capa de grava permite el almacenamiento temporal del agua para infiltrarla o enviarla a los márgenes del firme, a través de un sistema de desagües. La alta permeabilidad de estos pavimentos se logra con gradaciones especiales, obteniendo porosidades de hasta 20%, en comparación con los valores de las firmas tradicionales que van del 2% al 3%. En cualquier caso, la porosidad del pavimento debe aumentar desde la superficie hasta su base, para evitar el atrapamiento de agua.

Estas técnicas proporcionan la capacidad de recargar los acuíferos y reducir el volumen de agua del diseño de la red de drenaje. Se mantienen y diseñan con un 35% de impermeabilización.

2.2.1.3. Pavimentos modulares

Los pavimentos modulares son sistemas conformados por una capa superficial compuesta por módulos de hormigón, ladrillo o plástico reforzado, que tienen una serie de aberturas rellenas con arena o tierra sobre las que se dispone de césped.

Su funcionamiento es similar al de los suelos porosos, ya que en su base hay una grava en la que se produce el almacenamiento temporal de la escorrentía para su posterior infiltración o drenaje.

Estos pavimentos, al igual que los porosos, se usan en áreas con baja intensidad de tráfico, estacionamientos, calles de áreas residenciales o carreteras de alta densidad sin la presencia de vehículos pesados. Las configuraciones más comunes se recogen en la siguiente figura.

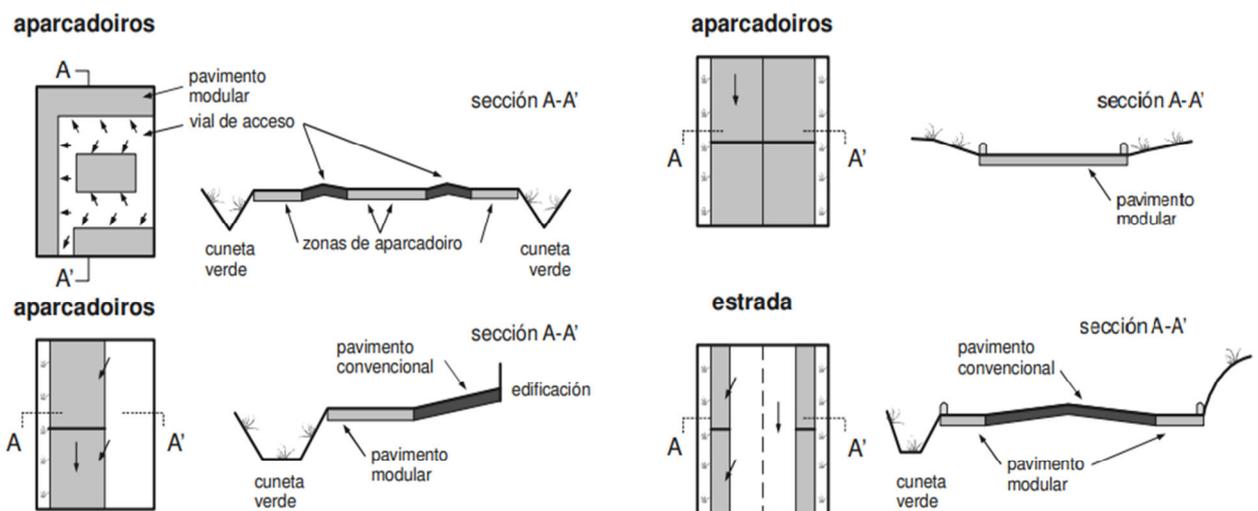


Ilustración 6. Detalle constructivo pavimentos modulares (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).

Un ejemplo de la aplicación de estos pavimentos para la reducción de los volúmenes de escorrentía radica en la "Gestión del agua y el uso eficiente del agua en la ciudad de Madrid". Esta orden establece unos porcentajes mínimos de superficie permeable y minimiza la superficie de pavimentación en las nuevas urbanizaciones de espacios públicos y sitios de construcción que incluyen espacios libres de parcela.

Según esta ordenanza, los suelos porosos y modulares tienen en cuenta las superficies permeables.

Los porcentajes mínimos de área permeable indicados son los siguientes:

- 20% en pavimentos de ancho superior a 1,5 m.
- 35% para plazas urbanas y áreas verdes
- 50% para bulevares y medidas.

2.2.2. SUDS LOCAL

2.2.2.1. Zanjas de infiltración.

Las zanjas de infiltración son dispositivos que consisten en una zanja excavada en el suelo y llena de material granular o un soporte sintético de alta porosidad. La infiltración al suelo se debe llevar a cabo dentro de un máximo de 2 días. Una de las principales ventajas de estos dispositivos es que ayudan a preservar el equilibrio hídrico, ya que proporcionan un volumen de recarga a los acuíferos locales. Debido a su propia naturaleza, estos dispositivos no pueden usarse en suelos poco profundos y siempre deben construirse sobre el nivel freático. Son tecnologías que no son adecuadas para áreas con cargas de contaminación que pueden contaminar el suelo (pesticidas, hidrocarburos, metales pesados). Además, los sólidos más gruesos, que pueden llenar el relleno granular, deben ser cuidados, por lo que deben diseñarse con pretratamiento como una zanja vegetal u otro dispositivo que elimine las partículas de decantación.

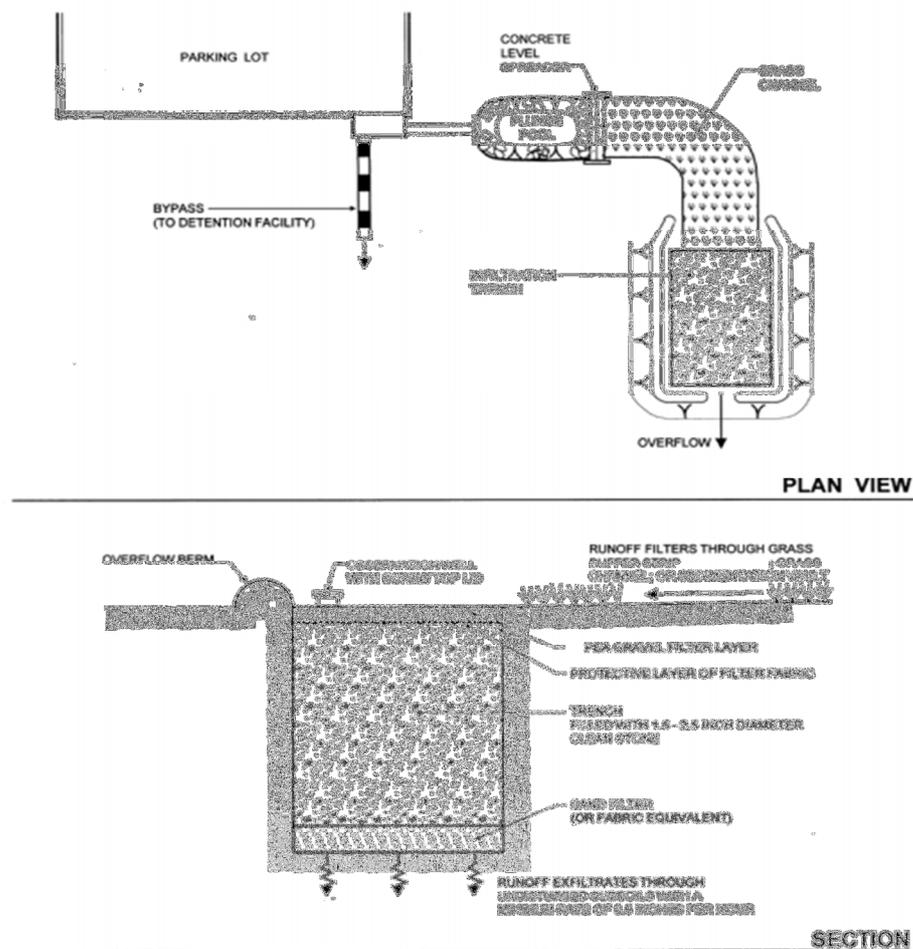


Ilustración 7. Detalle constructivo para zanjas de infiltración (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).

En algunos casos, las zanjas se construyen con una tubería perforada en su base, para conducir las aguas hacia los canales receptores o hacia la red de drenaje. Estas soluciones se aplican principalmente en los márgenes y en el medio de las autopistas o en suelos con baja capacidad de infiltración. En este caso, las zanjas se conocen como filtros de drenaje.

2.2.2.2. Pozos de infiltración.

Los pozos de infiltración son sistemas de infiltración de agua de los techos de viviendas. Al igual que las zanjas de infiltración, son sistemas que proporcionan una cierta recarga a los acuíferos. Estos sistemas se pueden hacer in situ, como se presenta en la imagen, o comprar prefabricados.

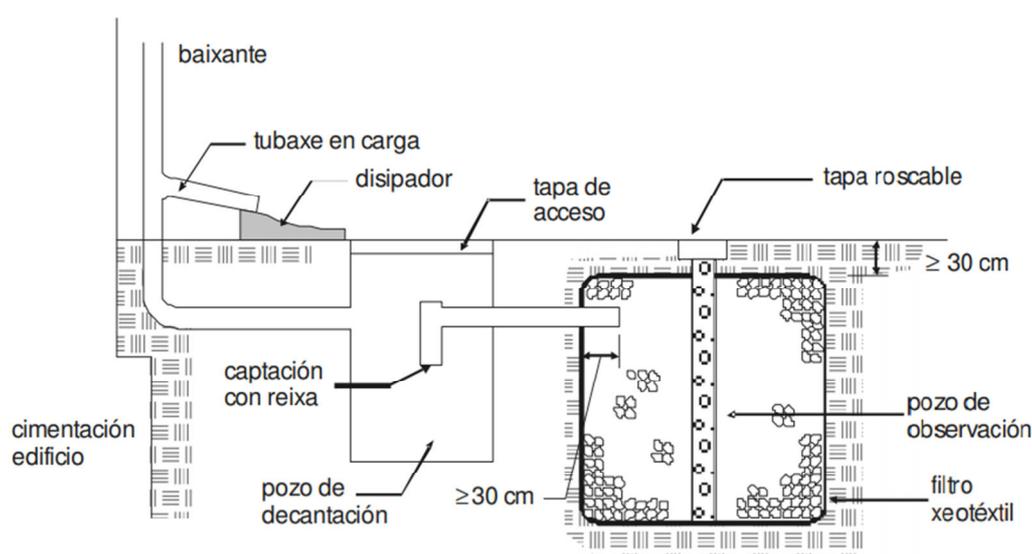


Ilustración 8. Detalle constructivo para pozos de infiltración (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).

2.2.2.3. Cunetas verdes

Las cunetas verdes son canales poco profundos y anchos cubiertas de césped pensadas para proporcionar cierto tratamiento de agua de la escorrentía urbana. Estos sistemas están diseñados exclusivamente para tratar la contaminación por lo que si se pretende laminar los caudales será necesario implementar otros SUDS en serie como un estanque.

En la base de las cunetas verdes hay un único filtro permeable y un filtro subterráneo. El objetivo es eliminar la contaminación por mecanismos de infiltración, absorción y degradación biológica. Sin embargo, con estas técnicas, no se pretende infiltrar agua en el suelo, simplemente pasándola a través de su sección.

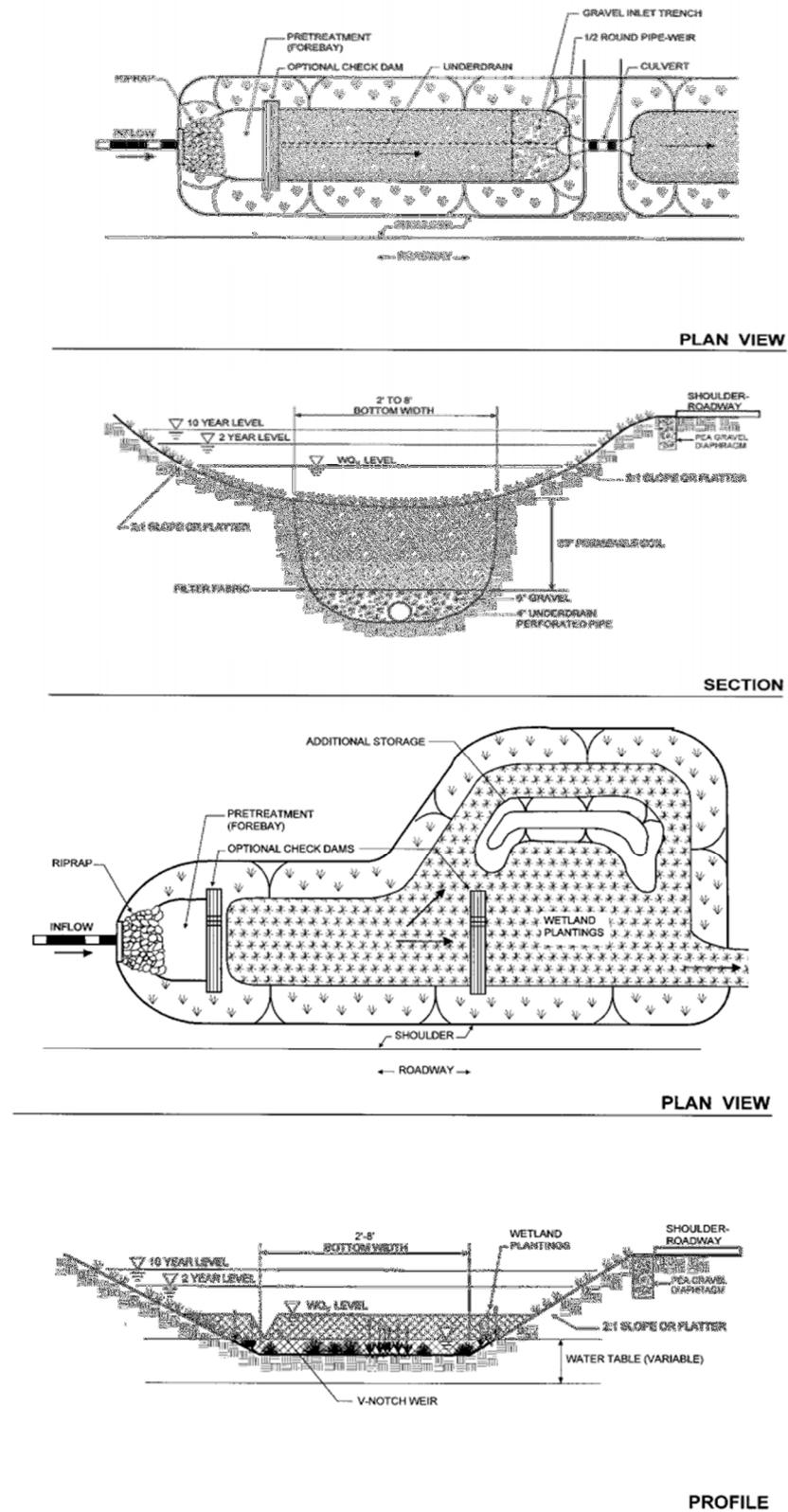


Ilustración 9. Detalle constructivo para cunetas verdes (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).

Se utilizan como sistemas de conducción de agua de lluvia a lo largo de carreteras y calles en áreas residenciales, en pequeñas áreas a prueba de agua como aparcamientos o a lo largo de la mediana o en las orillas de las autopistas

2.2.2.4. Zonas de biorretención

Las zonas de biorretención son estructuras deprimidas donde se almacena agua de pequeñas zonas impermeables como aparcamientos o intersecciones de carreteras.

Los sistemas de biorretención disponen de un suelo muy permeable sobre un dren de gravas que devuelve habitualmente el agua tratada.

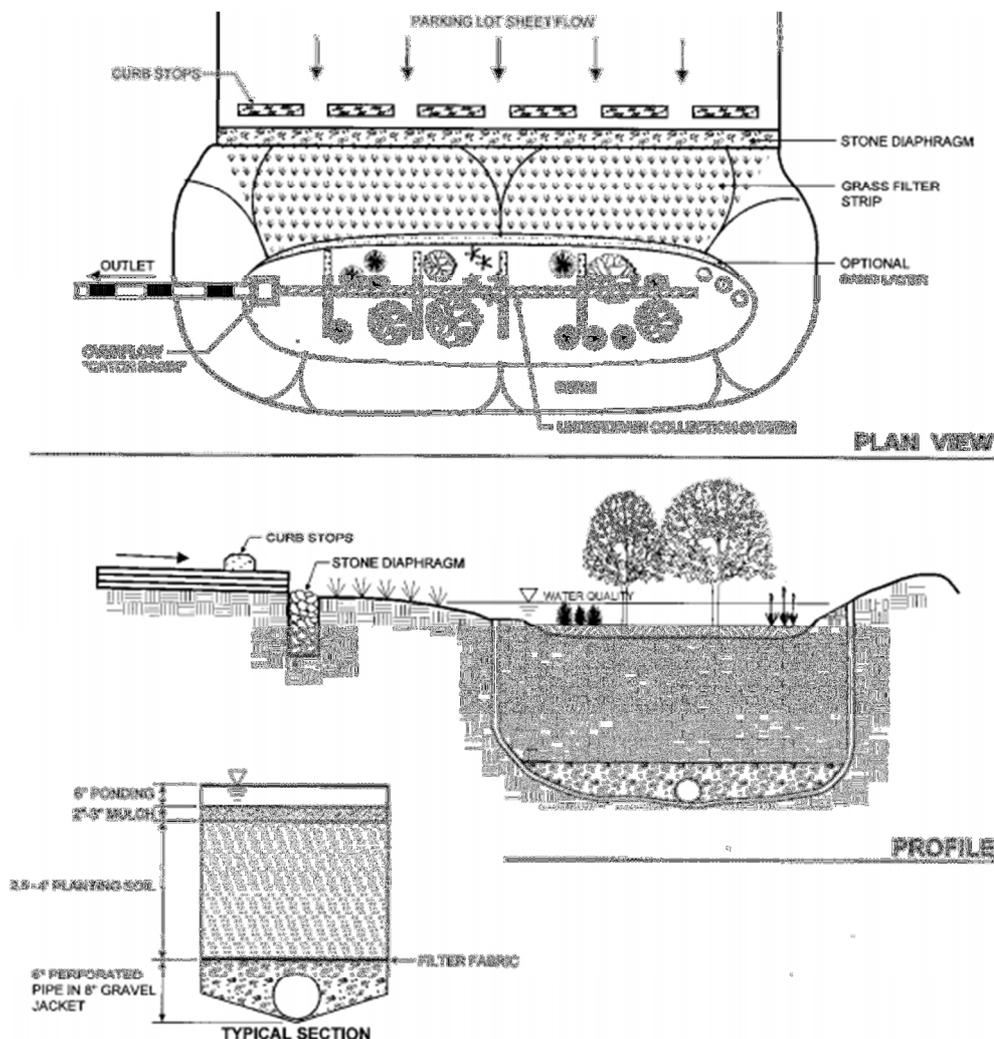


Ilustración 10. Detalle constructivo para zonas de biorretención (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).

2.2.2.5. Zonas de biorretención

Los filtros de arena son estructuras de control de agua de lluvia que al cruzar varias capas de arena, mejora su calidad mediante sedimentación y filtración. En general, estos sistemas tienen dos cámaras, una de sedimentación, que favorece la eliminación de partículas flotantes, y las más gruesas, en una cámara de filtración compuesta por un lecho de arena.

Después de que el agua pasa a través de la infraestructura, va a la red de drenaje o al medio receptor. Estos sistemas requieren menos espacio que los sistemas de infiltración o retención, por lo que se aplican principalmente en áreas urbanas densas.

Existen varios tipos de filtros de arena:

- Filtros de superficie
- Filtros perimetrales
- Filtros subterráneos

Las diferencias entre estos tipos están en su disposición (superficial o subterránea), en el área de drenaje, la superficie del filtro y la cantidad de escorrentía que tratan. Las siguientes figuras presentan varios esquemas de los tipos de filtro más comunes.

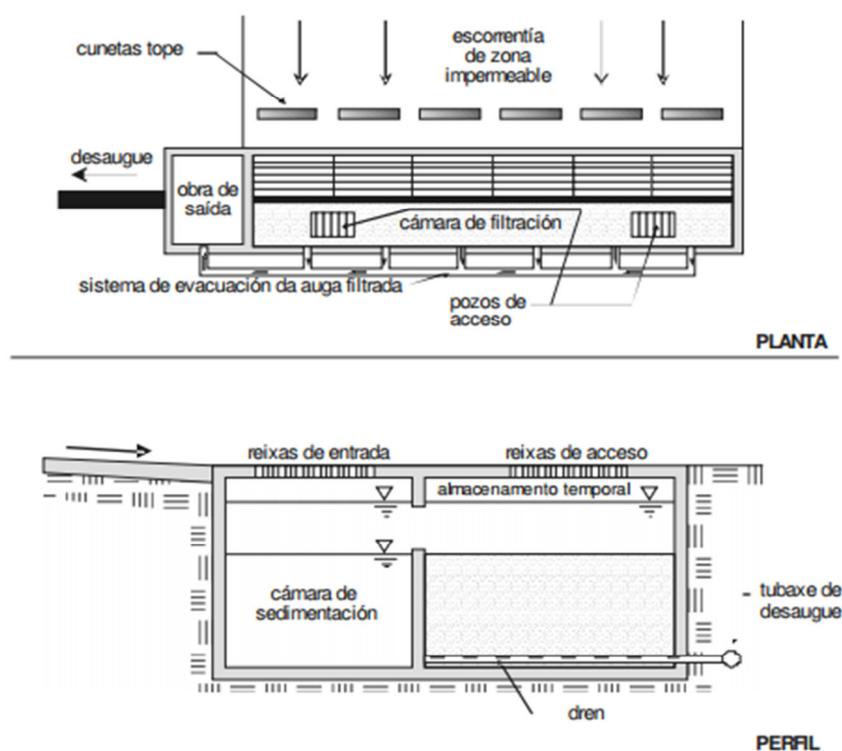


Ilustración 11. Detalle constructivo para filtros de arena 1 (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).

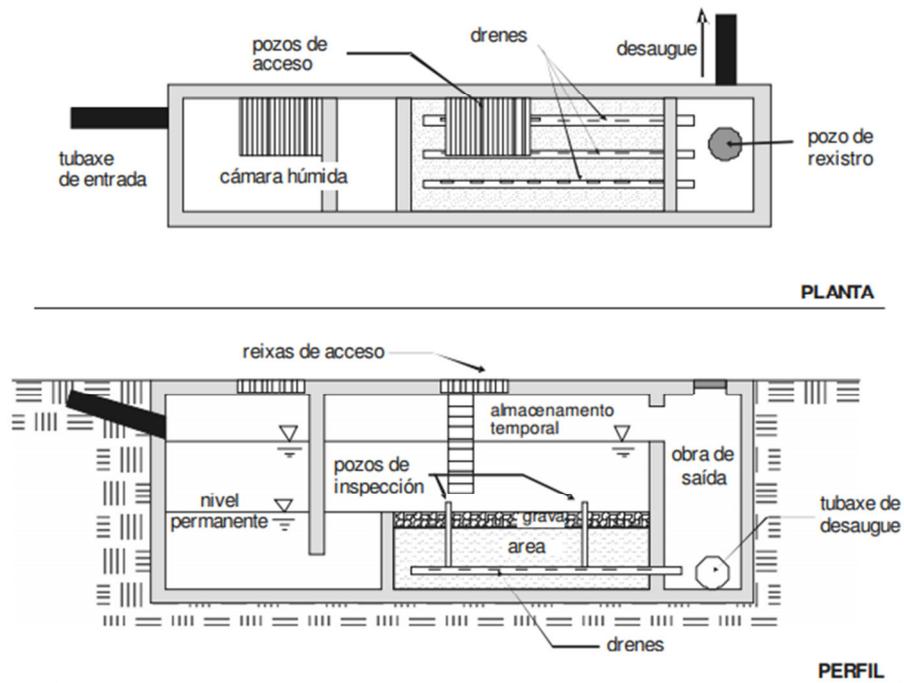


Ilustración 12. Detalle constructivo para filtros de arena 2 (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).

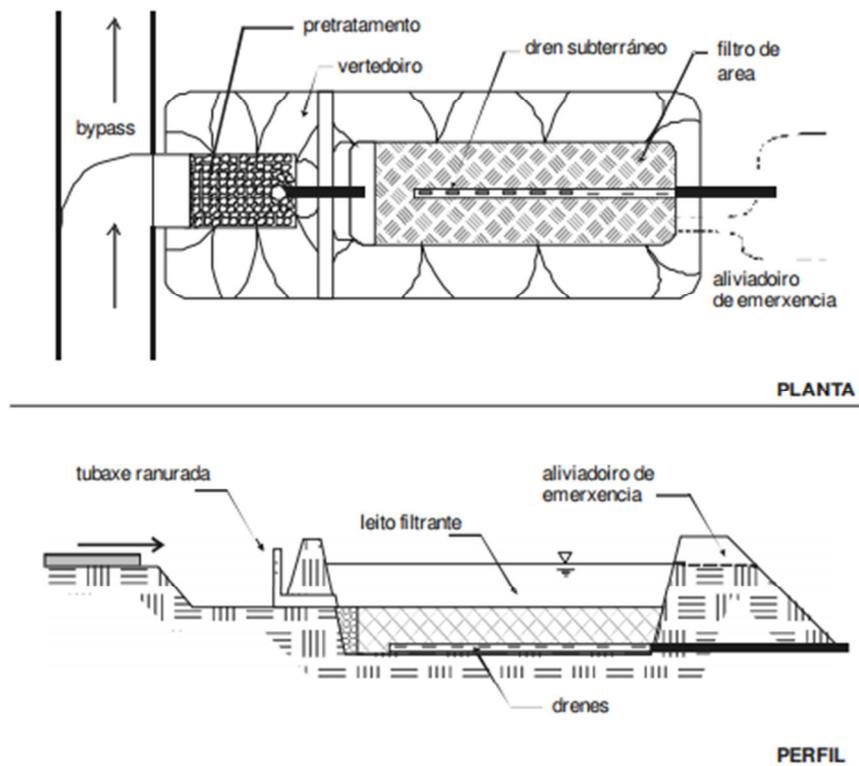


Ilustración 13. Detalle constructivo para filtros de arena 3 (Fuente: Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia Volumen 2).

2.2.3.SUDS REGIONAL

Los estanques y los humedales son componentes de SUDS que tienen un charco permanente de agua.

Las lagunas tienen una profundidad de agua variable (generalmente) de hasta 1,5 m. Este volumen de retención permite una mejor eliminación de los contaminantes presentes en la escorrentía, ya que favorece los procesos de sedimentación de las partículas y su degradación bioquímica al poseer vegetación y microorganismos. Además, este volumen de agua impide drásticamente la resuspensión de los sedimentos del lecho de los estanques. Tienen dos funciones principales:

1. Almacenar grandes volúmenes de agua temporalmente, ya que generalmente se ubican hacia la parte inferior del sitio y al final del drenaje sistema (o tren de administración)
2. Proporcione mejoras importantes en la calidad del agua, ya que el agua pasa lentamente a través de su vegetación. Los humedales a menudo se utilizan para proporcionar mejoras en la calidad del agua.

Por otro lado, los sistemas de humedales son estanques de aguas someras diseñados para reducir la contaminación movilizada por la escorrentía urbana. En estas infraestructuras, los procesos físicos, químicos y biológicos son los mismos responsables de eliminar contaminantes. Las características fundamentales de estos sistemas es que tienen plantas hidrofílicas que son responsables de la depuración de la contaminación presente en el agua de lluvia. Son técnicas con una buena integración del paisaje y tienen un hábitat variado. Los principales problemas que pueden presentar están asociados con olores y con la aparición de mosquitos.

La construcción y siembra de estos componentes debería maximizar el tiempo que toma pasar el agua a través de ellos para permitir el tratamiento de la contaminación. Donde el estanque o humedal debe proporcionar almacenamiento de atenuación, el nivel de almacenamiento se establece en un punto por encima del nivel de agua normal día a día. Cuando llueve, el nivel del agua en el estanque o humedal aumenta hasta el nivel de almacenamiento. La entrada debe construirse para eliminar los sedimentos remanentes en la escorrentía y la estructura de salida debe regular los flujos aguas abajo a los caudales y volúmenes diseñados / permitidos.

Se debe proporcionar una ruta para los flujos de excedencia en eventos de precipitación extrema. Los estanques siempre estarán revestidos, a menos que estén contruidos en un área con suelos arcillosos que se haya confirmado que son adecuados para retener el agua. El revestimiento puede ser una gama de materiales como caucho de butilo, láminas de bentonita o arcilla. Los páramos y los humedales son importantes para la biodiversidad, por lo que requieren una variedad de gradientes y niveles de agua cuidadosamente diseñados por encima y por debajo de la línea de flotación para proporcionar un amplio rango de hábitats. La plantación y los bancos poco profundos también son características clave para hacer que los estanques sean fáciles de mantener y que sean lo más seguros posible en lugares públicos. La construcción de un estanque o humedal atractivo y de alta calidad es fundamental para su aceptación por el público cuando se incluye dentro del espacio abierto público.

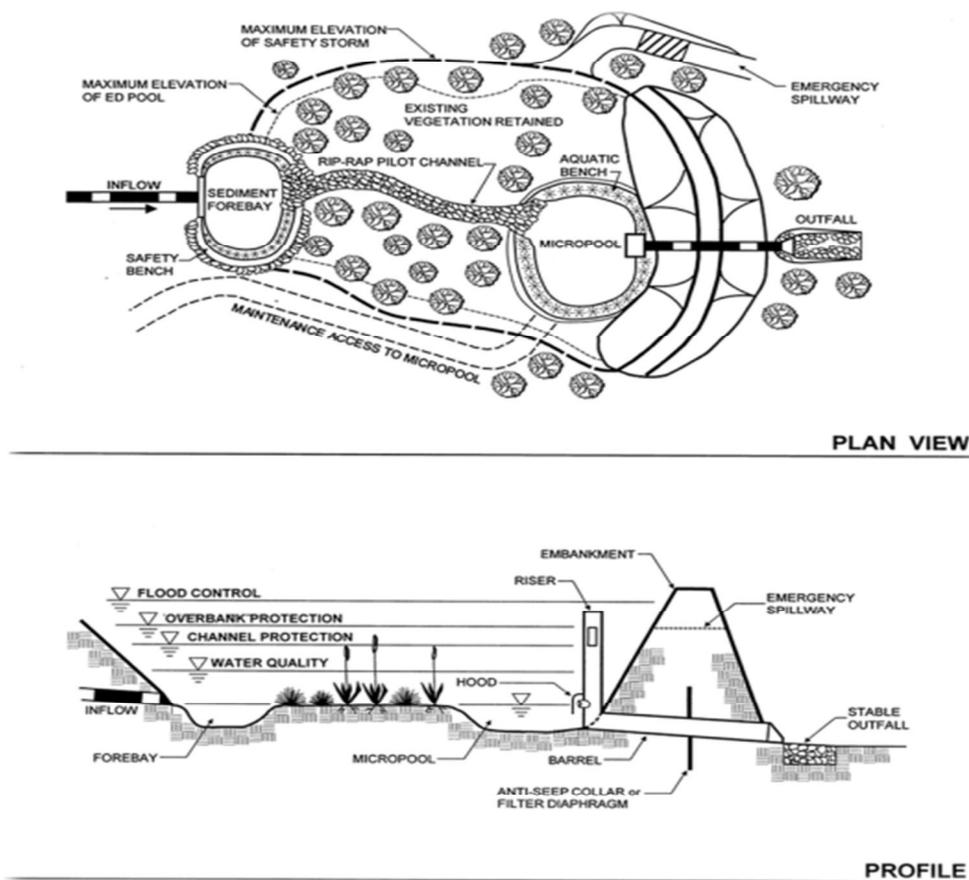


Ilustración 14. Ejemplo de implementación de estanques (Fuente: StormWater Management Design Manual)

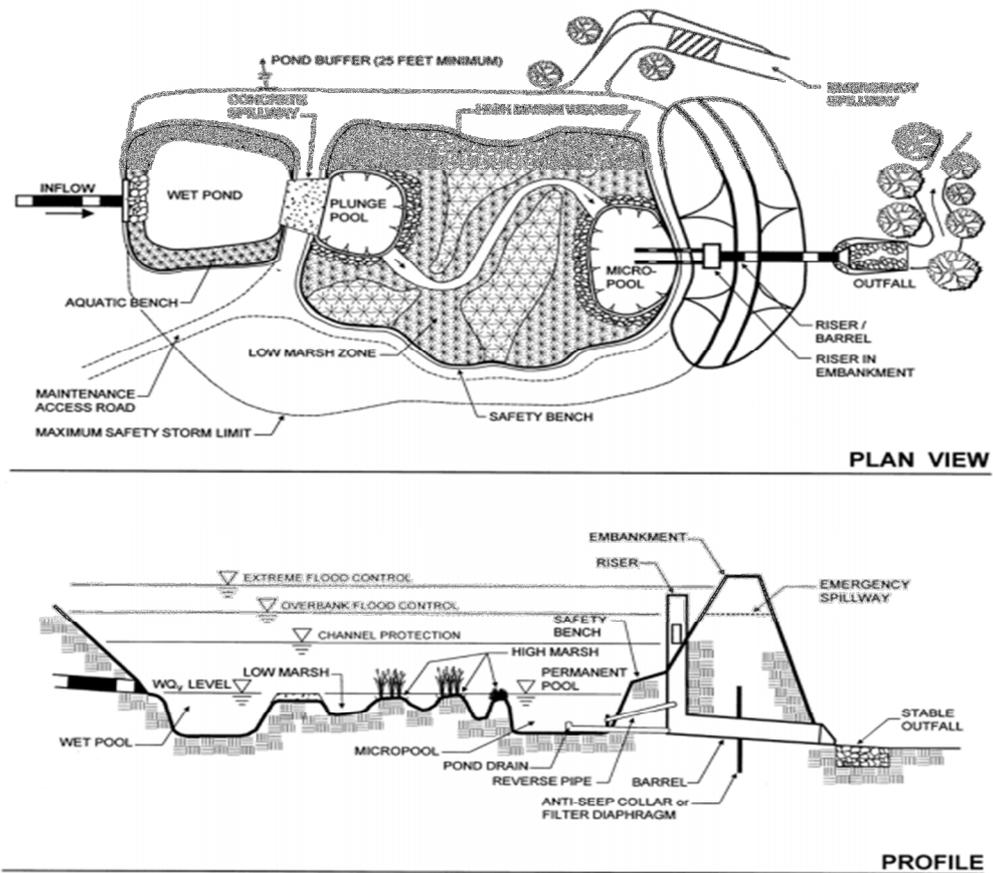


Ilustración 15. Ejemplo de implementación de humedales (Fuente: Stormwater Management Design Manual)

3. APLICABILIDAD DE LOS SUDS A CLIMAS MEDITERRÁNEOS

Como se ha comprobado en el apartado anterior "Tipologías de SUDS" existen una gran variedad de soluciones verdes a la hora de realizar sistemas de drenaje urbanos, sin embargo, algunas de ellas quedan obsoletas a la hora de su implementación en climatologías extremas como pueden ser las continentales o las mediterráneas. Si bien es cierto que en la zona Norte de la península ibérica encontramos un clima oceánico e el cual se pueden aplicar la totalidad de las soluciones anteriormente mencionadas, prácticamente el 80% del territorio de la península ibérica se encuentra en uno de estos dos climas citados con anterioridad, por lo que es muy importante definir cuáles son los SUDS apropiados.

Se opta por escoger el ejemplo de climatologías de Zaragoza y Murcia, caracterizadas por poseer un clima muy extremo para la vegetación debido a las escasas lluvias y sus altas temperaturas (Mediterráneo subárido y Mediterráneo árido)

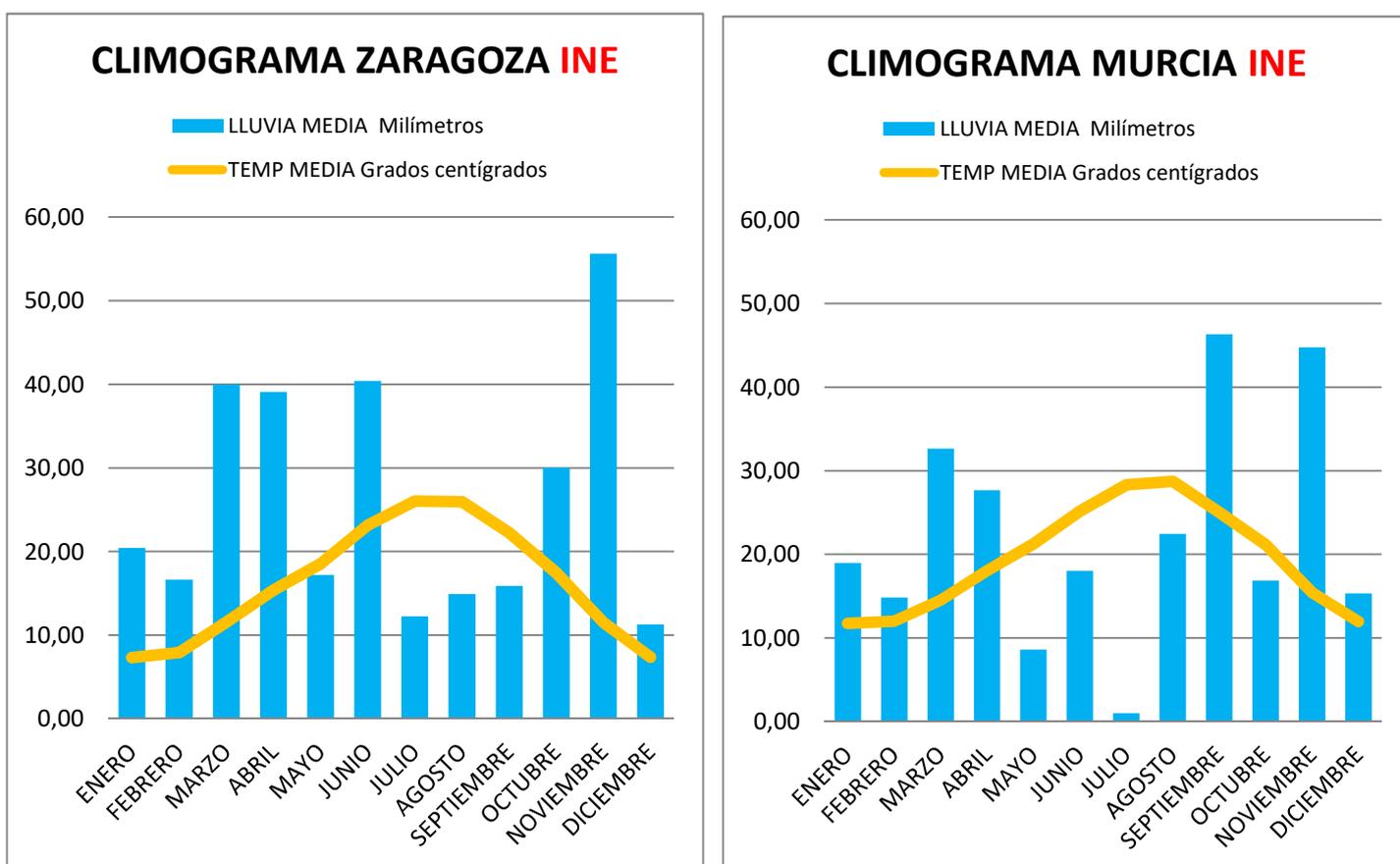


Ilustración 16. Climogramas áridos Zaragoza y Murcia (Fuente: INE, Elaboración Propia)

La aplicabilidad de los SUDS, tal cual han sido desarrollados en zonas donde el agua es una constante y no se sufren periodos de sequía extremos, es una quimera. En climas mediterráneos se tienen que optar por otras opciones más acorde con las temperaturas y las precipitaciones. De esta manera, se enumeran a continuación las mejores aplicaciones de SUDS adaptados a este clima.

3.1. SUDS EN ORIGEN

A nivel de SUDS en origen, encontrábamos varias soluciones para conseguir una primera retención y disminución de caudales punta y desplazamiento de los mismos, suavizando así, los periodos de inundación. Las técnicas de este tipo son las siguientes: Techos Verdes, Pavimentos modulares, Pavimentos porosos.

Pavimentos modulares:

Los pavimentos modulares son usados con una gran adecuación en climas húmedos dado el gran aporte visual y medioambiental que supone el crecimiento de vegetación entre las juntas del mismo. En climas mediterráneos este aspecto visual de vegetación se pierde al no tener una continuidad en las precipitaciones para conseguir este efecto. A pesar de esto, este tipo de solución podría llegar aplicarse olvidando la convencional capa vegetal entre juntas para paliar las carencias de vegetación.



Ilustración 17. Ejecución de pavimentos permeables modulares

A pesar de esto, este tipo de solución podría llegar aplicarse olvidando la convencional capa vegetal entre juntas dejando un sistema de adoquinado con huecos que permita el paso del agua y su infiltración en el medio. Estos adoquines porosos se encuentran actualmente en desuso debido a su alto coste de producción, siendo sustituidos actualmente por soluciones más baratas como los pavimentos continuos de hormigón poroso impreso, los cuales ofrecen acabados de estética semejante (Ecocreto, 2007).



Ilustración 18. De izquierda a derecha, Pavimentos permeable modular y pavimento permeable continuo.

Pavimentos Porosos continuos:

Los pavimentos porosos son una muy buena opción para climas con condiciones extremas como los que estamos analizando, estos sistemas no incluyen ningún tipo de vegetación por lo que son idóneos para una gran reducción de las escorrentías sea cual sea el clima en el que se usan. Dada la gran torrencialidad que caracteriza al clima mediterráneo en general, son una opción muy acertada. El único punto negativo es que no aporta ningún valor visual o paisajístico añadido, sin embargo, medioambientalmente hablando consiguen una reducción de los contaminantes procedentes de los primeros lavados de las carreteras y calles con las primeras lluvias.



Ilustración 19. Actuación de un pavimento permeable

Tejados Verdes:

En las tipologías de SUDS han sido presentadas diferentes soluciones para esta técnica. Sin embargo dos de ellas destacan por encima del resto para soportar grandes sequías sin la necesidad de aportar riego. Las siguientes propuestas han sido desarrolladas por la empresa Singular Green.

- **Sistema Baobab:**

El sistema Baobab consta de una serie de bandejas de polipropileno que almacenan una gran cantidad de agua que asciende progresivamente por capilaridad al sustrato. (Ver detalle).



Ilustración 20. Cubierta vegetal baobab en valencia con vegetación tipo sedum (Fuente: Singular Green).

Su capacidad de retención de agua de 18 litros/m² permite realizar cubiertas vegetales de bajo mantenimiento y sin riego, con distintos tipos de sustrato específicos para cada selección de vegetación.

La vegetación recomendada es de tipo extensivo, variedades de crasas o del género Sedum. Con los que se obtiene como resultado una cubierta de bajo mantenimiento. Para otras especies, como cespitosas, se recomienda, dependiendo del clima, la utilización de riego por goteo.

- **Sistema Garoé**

El árbol Garoé es capaz de captar el agua de la humedad de la niebla para abastecerse incluso con una precipitación nula, de ahí el nombre, de la gran capacidad de supervivencia que confiere este sistema Garoé a la vegetación que se implante.



Ilustración 21. Cubierta vegetal Garoé en Benidorm (Fuente: Singular Green)

La acumulación de agua de lluvia en cubierta mediante aljibe en el sistema Garoé presenta las siguientes ventajas:

- Aprovechamiento total del agua de lluvia recibida en la cubierta. Es de especial interés en zonas de clima mediterráneo con episodios de lluvias intensas y largos periodos de sequía.
- La absorción del agua del aljibe por capilaridad hacia el sustrato de la cubierta vegetal evita por completo la utilización de riego.
- Optimiza el comportamiento térmico de la cubierta atenuando por completo la diferencia térmica entre noche y día.

En el caso de climas con episodios intensos y continuados de lluvia el agua sobrante se puede almacenar en una aljibe complementario y devolverse a la cubierta cuando se necesita. Permite utilizar cualquier tipo de vegetación, con cualquier tipo de sustrato sin necesidad de riego.

3.2. SUDS LOCAL

Dentro de este tipo de soluciones se encuentran muchas opciones que no concuerdan con el clima mediterráneo, son muy típicas las cunetas verdes para este grupo de SUDS, pero sin embargo su aplicación es inviable. Esto es en gran medida contrastable en las altas necesidades de riego que tienen los parques proyectados en muchas ciudades como es el caso de Zaragoza y que necesitan de un riego constante. Por tanto, la imposibilidad de que crezca una cubierta de césped natural hace que esta opción sea descartada.

Pozos de infiltración, zanjas de infiltración y zonas de biorretención:

Una opción acertada para este tipo de clima son las zanjas y pozos de infiltración que pueden reducir las escorrentías superficiales en gran medida y su aplicación resulta sencilla. Este tipo de soluciones se pueden apreciar cada día más en las nuevas urbanizaciones de nuestras ciudades.

Las zonas de biorretención pueden adecuarse de muchas formas al clima mediante especies autóctonas resistentes a las sequías. Estas zonas amenizan y aportan un valor medioambiental muy importante además de reducir las escorrentías.

Un buen ejemplo de utilización de estos es la Regeneración urbana en el barrio de Les Roquetes, Barcelona. Aquí se transformó un parking convencional que generaba grandes escorrentías en uno subterráneo, dejando en la superficie, diferentes sistemas de drenaje urbanos sostenibles integrados perfectamente en el urbanismo.



Ilustración 22. Aplicación de SUDS en el barrio de Les Roquetes Barcelona

Filtros de arena:

Los filtros de arena ayudan mucho al pretratamiento de las aguas pluviales, actuando como filtro, hace que el agua resultante aumente mucho su calidad, sin embargo son estructuras que requieren de un mayor coste de mantenimiento.

Debido a que requieren un menor tamaño y disminuyen la contaminación del agua considerablemente, son muy utilizados en parkings como puede apreciarse en la siguiente fotografía.



Ilustración 23. Ejecución de un filtro de arena para reducción de escorrentías y contaminantes

Aunque este sistema no sea tan eficaz reduciendo las escorrentías, puede aplicarse en climas secos dado que existen opciones de filtros de arena que no requieren de vegetación alguna. Sin embargo en grandes episodios de lluvia, este sistema colapsará dado que tiene menor capacidad de retención que un pozo o una zanja filtrante.

3.3. SUDS REGIONAL

Dada las altas radiaciones características de los climas mediterráneos hay que poner especial atención la elección de los humedales o estanques a implementar en cada caso. Para ello se tienen que tener en cuenta muchos elementos intervinientes que no son objeto del estudio que se está llevando a cabo. Sin embargo, las conclusiones de los estudios que se hicieron en una planta de Mojacar para la experimentación con aguas residuales mediante humedales revelan que las altas radiaciones que se producen en este clima semi-árido, aumentaron las eficiencias de eliminación de Sólidos en suspensión y sustancias orgánicas. Las eficiencias de eliminación observadas en la planta de Viville (Francia), con un área de tratamiento neta de 4,2 m² por persona, se obtuvieron en la planta de Mojacar con un área de tratamiento de 0,8 m² por persona.

Esta radiación tiene un actúa como un arma de doble filo puesto que favorece por un lado las eliminaciones de sólidos en suspensión y sustancias orgánicas, pero sin embargo, se tiene que tener en cuenta que, si se producen altos episodios de evaporación, podría llegar a secar el humedal, por lo que tendría que evaluarse este factor en el diseño para el tratamiento de aguas pluviales que normalmente son generadas esporádicamente y con torrencialidad.

4. MODELIZACIÓN EN SWMM V.5.1

Storm Water Management Model (SWMM) es un modelo dinámico de simulación de lluvia-escorrentía-transporte que se utiliza para la simulación de eventos de lluvia en función de la cantidad y calidad de escorrentía principalmente en áreas urbanas.

El componente de escorrentía de SWMM opera en una colección de áreas de sub captación que reciben precipitación y generan tanto escorrentías como cargas contaminantes. La parte de enrutamiento de SWMM transporta esta escorrentía a través de un sistema de tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento / tratamiento, bombas y reguladores definido por el usuario.

SWMM rastrea la cantidad y la calidad de la escorrentía generada dentro de cada subcuenca, así como la velocidad, cantidad y calidad del agua en cada tubería durante un período de simulación compuesto por varios espacios de tiempo.

EPA SWMM es un software de dominio público que puede copiarse y distribuirse libremente.

La versión 5.1. de SWMM posee un paquete para el dimensionamiento y aplicación de SUDS. Dentro del apartado dedicado a la hidrología se encuentra un sub-apartado llamado LID Controls donde se encuentran 7 técnicas de aplicación diferentes:

1. Áreas de biorretención.
2. Jardines de lluvia.
3. Techados verdes.
4. Zanjas de infiltración.
5. Pavimentos permeables.
6. Depósitos de lluvia.
7. Cunetas verdes.

4.1. DISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE SUDS

En el siguiente apartado se analizará cada uno de las 7 técnicas mencionadas con anterioridad dentro del programa SWMM.

4.1.1. Áreas de biorretención.

Las células de retención biológica son depresiones que contienen vegetación cultivada en una mezcla de suelo diseñada sobre un lecho de drenaje de grava. Proporcionan almacenamiento, infiltración y evaporación tanto de la lluvia directa como de la escorrentía capturada de las áreas circundantes.

Las áreas de bioretención requieren de cuatro capas a configurar para tener el SUD deseado.

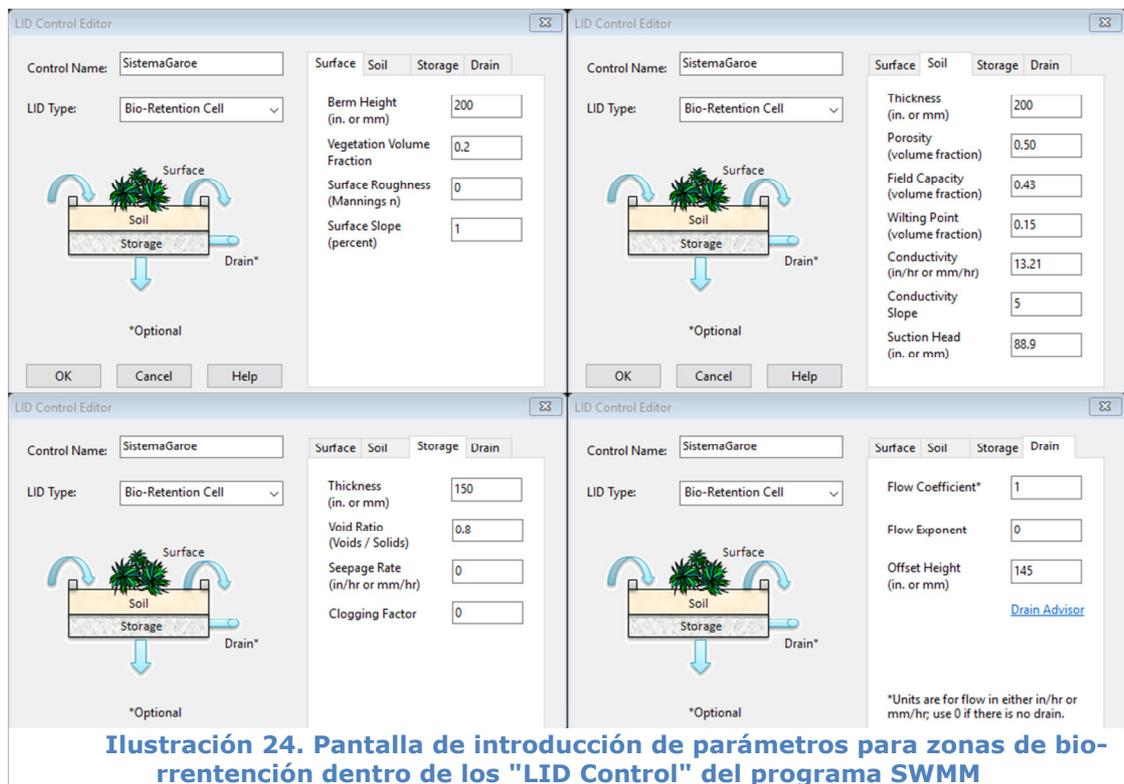


Ilustración 24. Pantalla de introducción de parámetros para zonas de biorretención dentro de los "LID Control" del programa SWMM

SUPERFICIE (SURFACE):

Altura de la berma (Berm Height): Cuando hay paredes o bermas confinadas, esta es la profundidad máxima a la que el agua puede acumularse sobre la superficie de la unidad antes de que se produzca el desbordamiento (en pulgadas o mm).

Fracción de volumen de vegetación (Vegetation Volume Fraction): La fracción del volumen dentro de la superficie de almacenamiento de profundidad llena de vegetación. Este es el volumen ocupado por los tallos y las hojas, no su cobertura de área de superficie. Normalmente, este volumen puede ignorarse, pero puede ser tan alto como 0,1 a 0,2 para un crecimiento vegetativo muy denso.

Rugosidad de la superficie (Surface Roughness): Los coeficientes de Manning para el flujo sobre tierra cubren la superficie del suelo, el pavimento, la superficie del techo o una cuneta vegetativa (consulte esta tabla para los valores sugeridos).

Surface	n
Smooth asphalt	0.011
Smooth concrete	0.012
Ordinary concrete lining	0.013
Good wood	0.014
Brick with cement mortar	0.014
Vitrified clay	0.015
Cast iron	0.015
Corrugated metal pipes	0.024
Cement rubble surface	0.024
Fallow soils (no residue)	0.05
Cultivated soils	
Residue cover < 20%	0.06
Residue cover > 20%	0.17
Range (natural)	0.13
Grass	
Short, prairie	0.15
Dense	0.24
Bermuda grass	0.41
Woods	
Light underbrush	0.40
Dense underbrush	0.80

Tabla 4. Tabla de rugosidades (Fuente: McCuen, R. et al. (1996), Hydrology, FHWA-SA-96-067, Federal Highway Administration, Washington, DC).

Pendiente de la superficie (Surface Slope): Pendiente de una superficie de techo, superficie de pavimento o cuneta vegetativa (porcentaje).

SUELO (SOIL):

Espesor de la capa del suelo (Thickness): El espesor de la capa de pavimento (pulgadas o mm). Los valores típicos son de 4 a 6 pulgadas (100 a 150 mm).

Porosidad (Porosity): Fracción del volumen vacío respecto al volumen total del suelo.

Capacidad de campo (Field Capacity): Volumen de agua de poro en relación con el volumen total después de que se haya permitido que el suelo drene completamente (como una fracción). Por debajo de este nivel, no se produce el drenaje vertical del agua a través de la capa del suelo.

Punto de marchitez (Wilting Point): Volumen de agua en los poros en relación con el volumen total para un suelo seco. El contenido de humedad del suelo no puede caer por debajo de este límite.

Conductividad hidráulica (Conductivity): Conductividad hidráulica para el suelo totalmente saturado. (in/hr or mm/hr).

Pendiente de conductividad (Conductivity Slope): Pendiente de la curva de log (conductividad) versus contenido de humedad del suelo (adimensional). Los valores típicos varían de 30 a 60. Se puede estimar a partir de un análisis de tamaño de grano de suelo estándar como 0.48 (% de arena) + 0.85 (% de arcilla).

Altura de succión (Suction Head): El valor promedio de la succión capilar del suelo a lo largo del frente de humedecimiento (pulgadas o mm). Este es el mismo parámetro que se usa en el modelo de infiltración de Green-Ampt.

Soil Texture Class	K	Ψ	ϕ	FC	WP
Sand	4.74	1.93	0.437	0.062	0.024
Loamy Sand	1.18	2.40	0.437	0.105	0.047
Sandy Loam	0.43	4.33	0.453	0.190	0.085
Loam	0.13	3.50	0.463	0.232	0.116
Silt Loam	0.26	6.69	0.501	0.284	0.135
Sandy Clay Loam	0.06	8.66	0.398	0.244	0.136
Clay Loam	0.04	8.27	0.464	0.310	0.187
Silty Clay Loam	0.04	10.63	0.471	0.342	0.210
Sandy Clay	0.02	9.45	0.430	0.321	0.221
Silty Clay	0.02	11.42	0.479	0.371	0.251
Clay	0.01	12.60	0.475	0.378	0.265

Tabla 5. Tabla parametrización del suelo (Fuente: Rawls, W.J. et al., (1983). J. Hyd. Engr., 109:1316.)

- **K** = Conductividad hidráulica (hydraulic conductivity, in/hr)
- **Ψ** = Succión (suction head, in.)
- **ϕ** = Fracción de la porosidad (porosity, fraction)
- **FC** = Fracción de la capacidad del suelo (field capacity, fraction)
- **WP** = Fracción del punto de marchitez en términos de humedad (wilting point, fraction)

ALMACENAMIENTO (STORAGE):

Altura del depósito (Thickness): Este es el espesor de una capa de grava o la altura de un barril de lluvia (pulgadas o mm). Las capas de piedra triturada y grava suelen tener un grosor de 6 a 18 pulgadas (150 a 450 mm), mientras que los barriles de lluvia de una sola familia varían en altura desde 24 a 36 pulgadas (600 a 900 mm).

Relación de vacío (Void Ratio): El volumen de espacio vacío relativo al volumen de sólidos en la capa. Los valores típicos van desde 0.5 a 0.75 para lechos de grava. Tenga en cuenta que la porosidad = relación de vacío / (1 + relación de vacío).

Tasa de filtración (Seepage Ratio): La velocidad a la que el agua se filtra hacia el suelo nativo debajo de la capa (en pulgadas / hora o mm / hora). Esto generalmente sería la conductividad hidráulica saturada de la subcuenca circundante si se utiliza la infiltración de Green-Ampt o la velocidad de infiltración mínima para Horton infiltración. Si hay un piso o forro impermeable debajo de la capa, use un valor de 0.

Factor de obstrucción (Clogging Ratio): Volumen total de escorrentía tratada que se tarda en obstruir completamente la parte inferior de la capa dividida por el volumen vacío de la capa. Úsese un valor de 0 para ignorar la obstrucción. La obstrucción reduce progresivamente la tasa de infiltración en proporción directa al volumen acumulado de escorrentía tratada y solo puede ser motivo de preocupación para trincheras de infiltración con fondos permeables y sin elementos inferiores. Consulte la página de la capa de pavimento para obtener más información sobre el factor de obstrucción.

DRENAJE (DRAIN):

Coeficiente de drenaje y exponente de drenaje (Flow Coefficient and Flow Exponent): El coeficiente de drenaje C y el exponente n determinan la tasa de flujo a través de un drenaje en función de la altura del agua almacenada por encima de la compensación del drenaje. La siguiente ecuación se usa para calcular este caudal (por unidad de área de la unidad LID):

$$Q = C h^n$$

Donde q es el flujo de salida (en / hr o mm / hr) y h es la altura del medio saturado sobre el drenaje (pulgadas o mm). Si la capa no tiene drenaje, establezca C en 0.

Un valor típico para n sería 0.5 (haciendo que el drenaje actúe como un orificio). Tenga en cuenta que las unidades de C dependen del sistema de unidades que se utilice, así como del valor asignado a n.

Altura de vertido (Offset Height): Esta es la altura de la línea de drenaje sobre la parte inferior de una capa de almacenamiento o barril de lluvia (pulgadas o mm).

4.1.2. Jardines de lluvia

Los jardines de lluvia son un tipo de celda de retención biológica que consiste solo en la capa de suelo diseñada sin lecho de grava debajo. Por tanto la capa drenante desaparece y solo se requieren de tres parámetros que controlar exactamente idénticos que los tres primeros en las Zonas de biorretención, salvo que en la definición del depósito sólo se puede como es lógico la tasa de infiltración del suelo

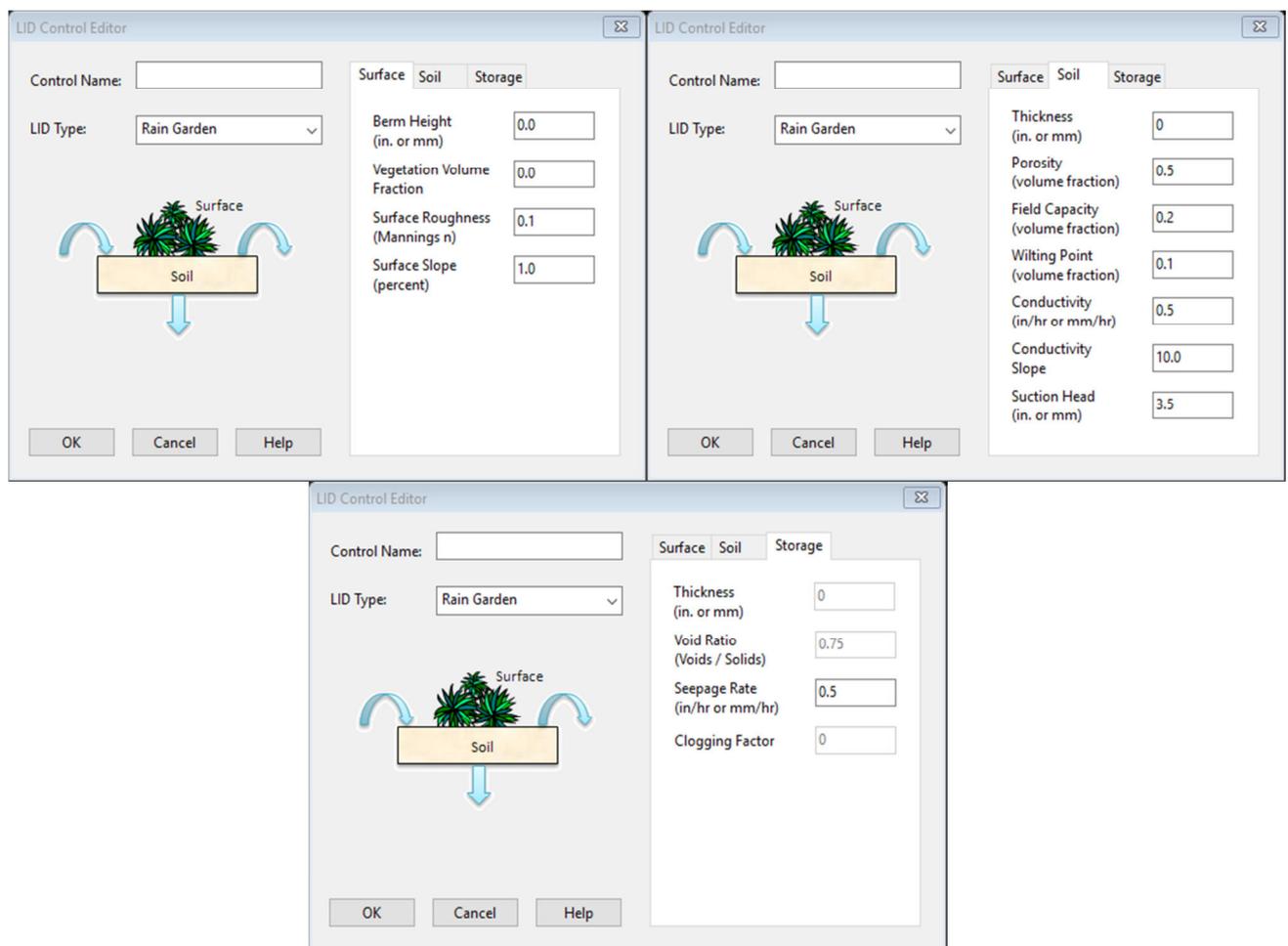


Ilustración 25. . Pantalla de introducción de parámetros para jardines de lluvia dentro de los "LID Control" del programa SWMM

4.1.3. Tejados verdes

Los techos verdes son otra variación de las celdas de retención biológica. Estos tejados, tienen una capa de suelo colocada sobre un material de esterilla de drenaje especial que transporta el exceso de lluvia fuera del techo. Este objetivo también se puede conseguir a partir de una correcta parametrización de una célula de biorretención como se veía en el primer apartado, teniendo en cuenta la permeabilización del fondo de su depósito y proponiendo una altura de drenaje desde una altura de depósito y sin límite en cuanto a caudal de vertido se refiere.

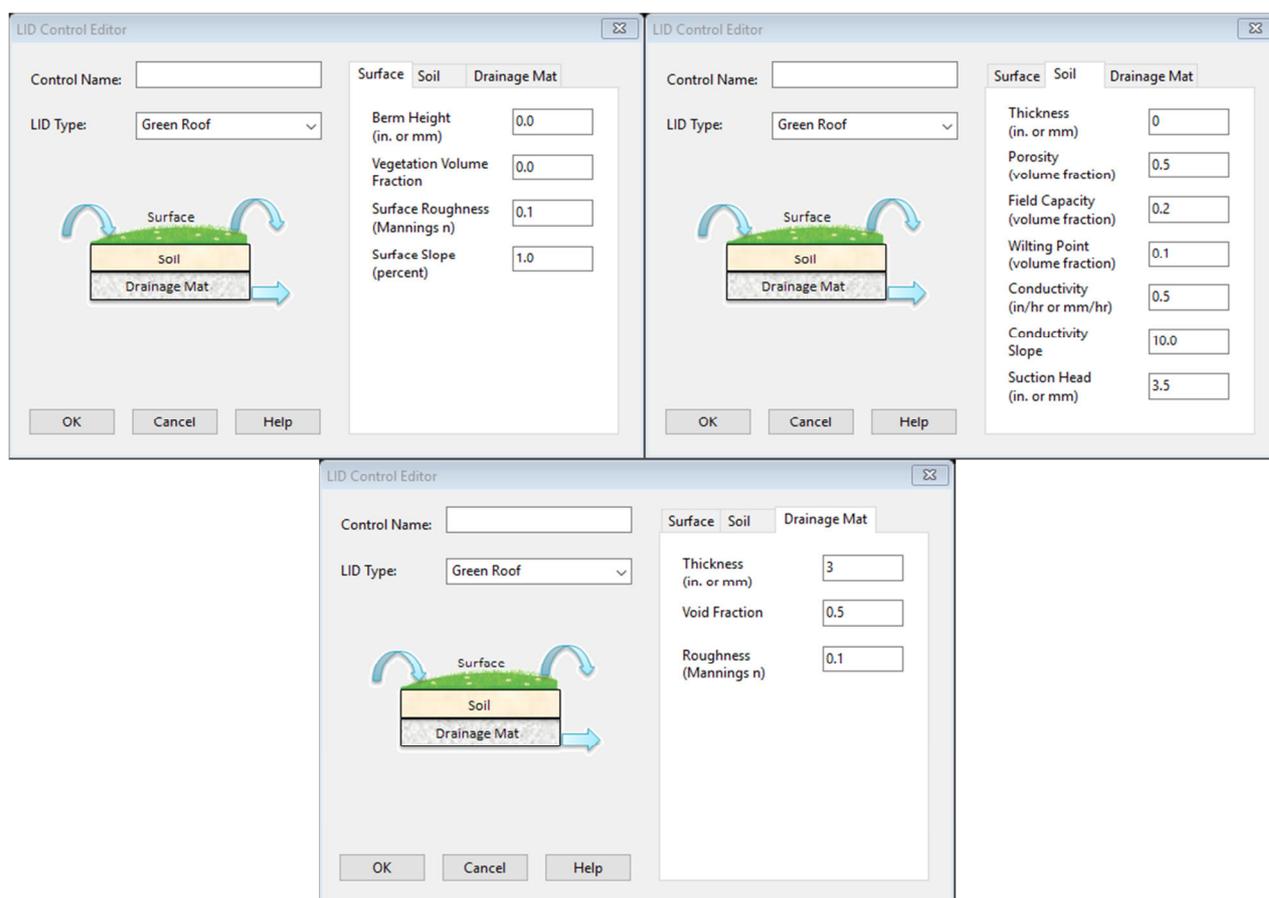


Ilustración 26. . Pantalla de introducción de parámetros para tejados verdes dentro de los "LID Control" del programa SWMM

4.1.4. Zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración son zanjas estrechas llenas de grava que interceptan la escorrentía de las áreas impermeables gracias a la acción de la pendiente de estas áreas. Proporcionan volumen de almacenamiento y tiempo adicional para que la escorrentía capturada se infiltre en el suelo nativo debajo.

Disponen de tres parámetros principales a diseñar dentro del programa que son idénticos a los que aparecen en los Suds de biorretención vistos anteriormente. La única diferencia es que no aparece el apartado de suelos dado que para este caso no existe.

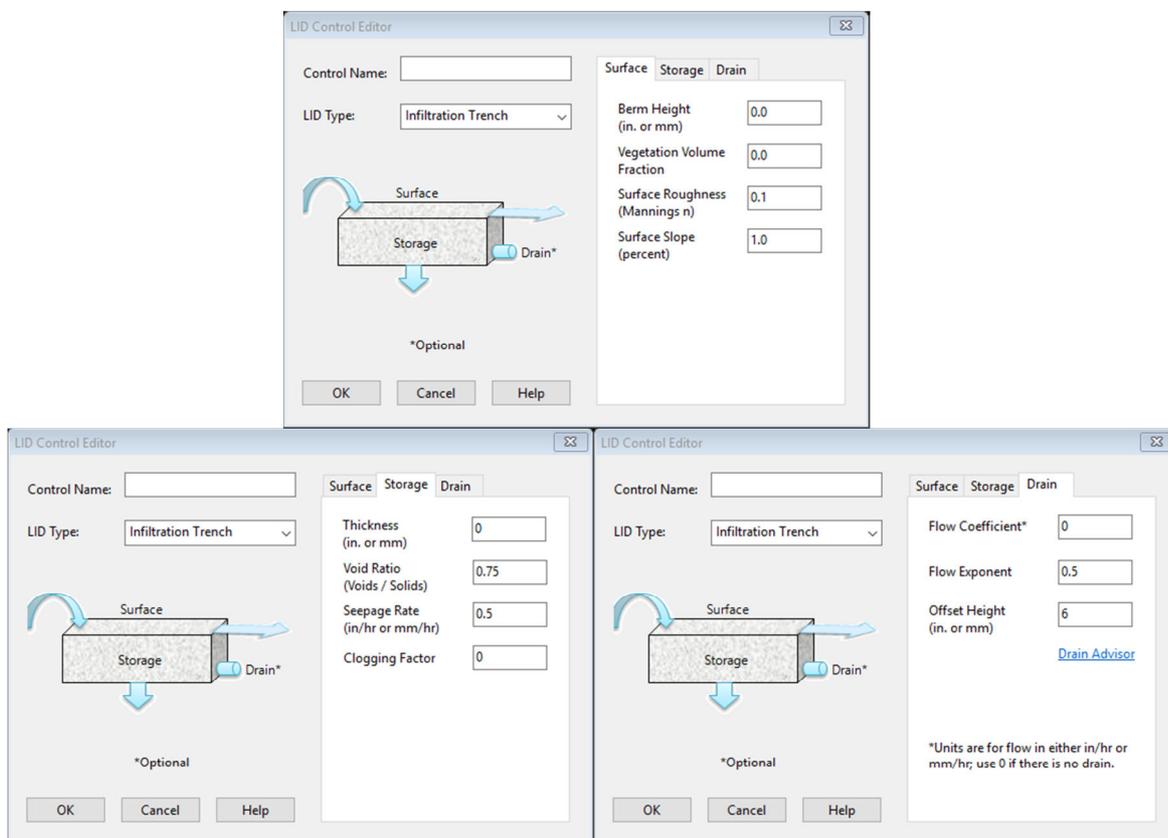


Ilustración 27. Pantalla de introducción de parámetros para tejados verdes dentro de los "LID Control" del programa SWMM

4.1.5. Pavimentos Permeables

Los sistemas de pavimento permeable continuo son áreas excavadas llenas de grava y pavimentadas con un hormigón poroso o una mezcla de asfalto. Los sistemas de pavimentación no continuos consisten en bloques de pavimentación impermeables sobre un lecho de gravas o arena sobre una gran capa de gravas que hace las veces de depósito.

Para este tipo de sistema de drenaje existen 5 variables a la hora de su parametrización.

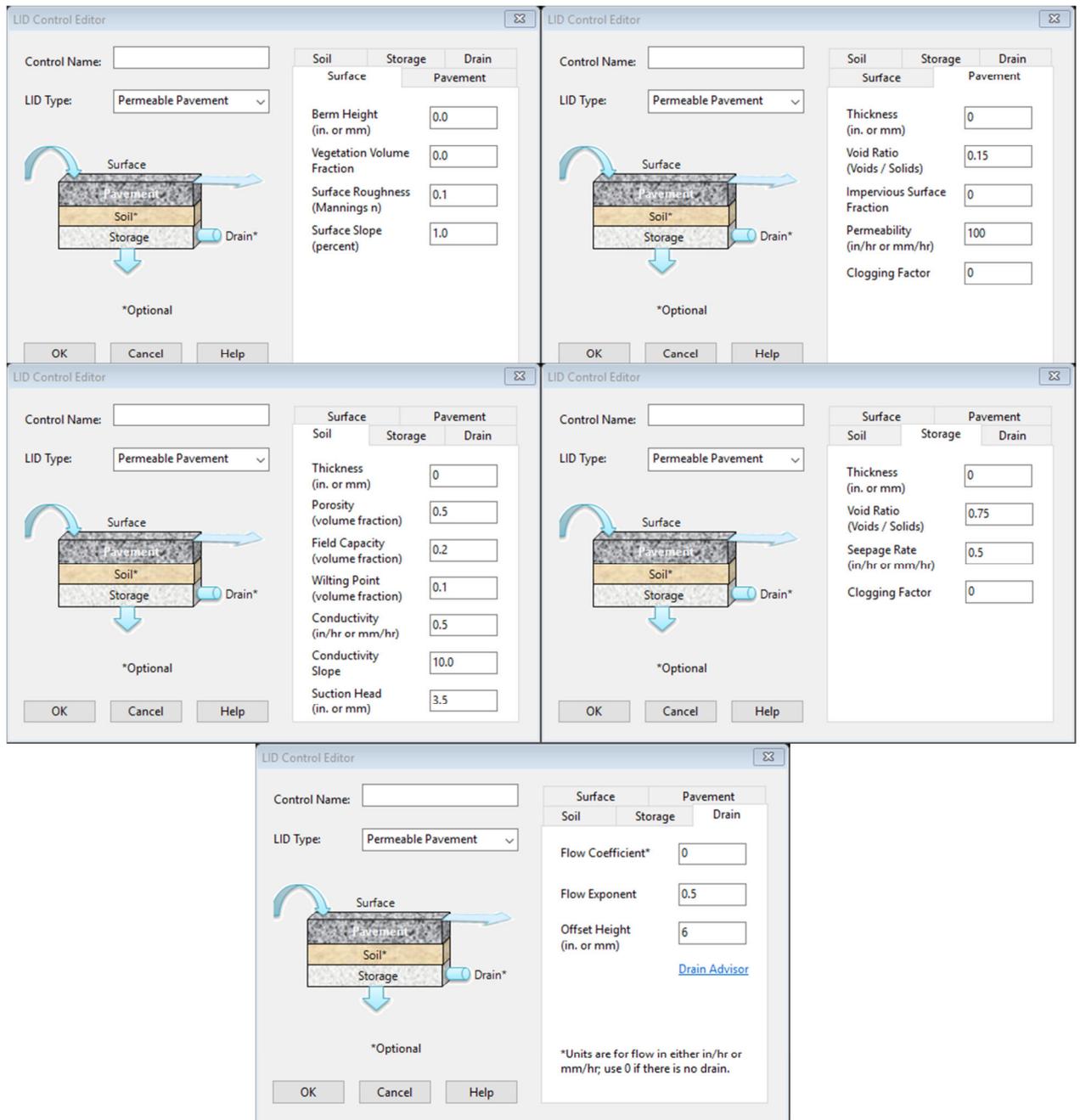


Ilustración 28. Pantalla de introducción de parámetros para pavimentos permeables dentro de los "LID Control" del programa SWMM

En este elemento de drenaje aparece un nuevo elemento como es el pavimento el cual tiene las siguientes características en su parametrización

PAVIMENTO (PAVEMENT):

El espesor de la capa de pavimento (Thickness). Los valores típicos son de 4 a 6 pulgadas (100 a 150 mm).

Relación de vacío (Void Ratio): El volumen de espacio vacío en relación con el volumen de sólidos en el pavimento para sistemas continuos o para el material de relleno utilizado en sistemas modulares. Los valores típicos para los pavimentos son 0.12 a 0.21.

Fracción de superficie impermeable (Impervious Surface ratio): Relación del material pavimentado impermeable respecto del área total para sistemas modulares; 0 para sistemas de pavimento poroso continuo.

Permeabilidad (Permeability): Permeabilidad del hormigón o asfalto utilizado en sistemas continuos o conductividad hidráulica del material de relleno (grava o arena) utilizado en sistemas modulares (en / h o mm / hr). La permeabilidad del nuevo hormigón poroso o asfalto es muy alta (por ejemplo, cientos de in / hr) pero puede disminuir con el tiempo debido a la obstrucción por partículas finas en la escorrentía.

Factor de obstrucción (Clogging Factor): Número de volúmenes de la capa de pavimento sin escurrir de escorrentía tratada que se necesita para obstruir completamente el pavimento. Use un valor de 0 para ignorar la obstrucción. La obstrucción reduce progresivamente la permeabilidad del pavimento en proporción directa al volumen acumulado de escorrentía tratada.

Si uno tiene una estimación de la cantidad de años que Yclog tarda en obstruir fraccionadamente el sistema en un grado Fclog, entonces el Factor de obstrucción (CF) se puede calcular como:

$$CF = Yclog * Pa * (1 + CR) * (1 + VR) / (VR * (1 - ISF) * T * Fclog$$

Donde Pa es la cantidad de lluvia anual sobre el sitio, CR es la relación de captura del pavimento (área que contribuye a la escorrentía dividida por el área del pavimento en sí), VR es la Relación de Vacío del sistema, ISF es la Fracción de Superficie Impermeable y T Es el espesor de la capa de pavimento.

Como ejemplo, supongamos que se necesitan 5 años para obstruir completamente un sistema de pavimento poroso continuo que atiende a un área donde la precipitación anual es de 36 pulgadas / año. Si el pavimento tiene un espesor de 6 pulgadas, tiene una relación de vacío de 0.2 y captura la escorrentía solo de su propia superficie (de modo que CR = 0), entonces el factor de obstrucción es $5 \times 36 \times 1 \times (1 + 0.2) / 0.2 / 1 / 6/1 = 180$.

4.1.6. Cunetas verdes

Las cunetas vegetativas son canales o áreas deprimidas con lados inclinados cubiertos de hierba y otra vegetación. Ralentizan el transporte de la escorrentía recolectada y le dan más tiempo para infiltrarse en el suelo nativo que se encuentra debajo.

Solo tienen un elemento a parametrizar, la superficie, que atiende a las mismas características que aparecían en la superficie de las células de biorretención en el primer apartado.

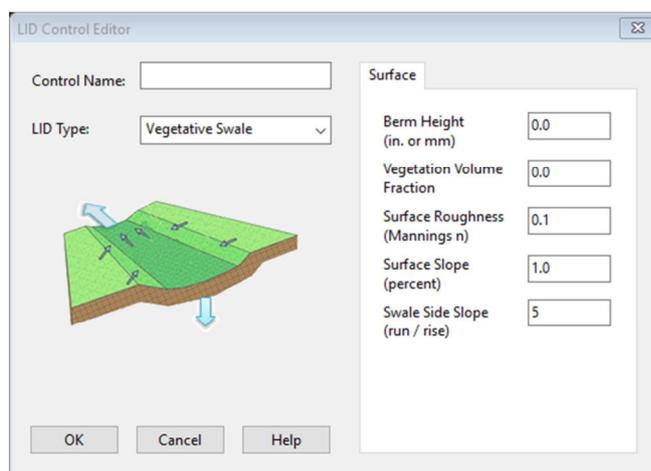


Ilustración 29. Pantalla de introducción de parámetros para pavimentos permeables dentro de los "LID Control" del programa SWMM.

4.2. UBICACIÓN, CASO DE ESTUDIO Y RED DE DRENAJE.

La zona de estudio se ubica en una zona urbana no consolidada en la provincia de Zaragoza, en el barrio de Miralbueno con las siguientes características:

- 262,75 Hectáreas de superficie
- 100.000 Habitantes equivalentes
- 28500 viviendas

La zona se encuentra delimitada por las siguientes infraestructuras, al oeste con la Z-40, al norte con una zona urbanizada consolidada de este mismo barrio de Miralbueno, al este con la Ronda Ibón de Plan y al sur con la carretera de Madrid.

La urbanización y la red de drenaje se han basado en la red propuesta y diseñada por Andrea Yesenia en su trabajo fin de grado "Modelización de Low Impacts Developments a través de una nueva versión del software SWMM". La impermeabilización de la urbanización ha sido aumentada por lo que ha sido necesario un recálculo de la red hasta que los colectores nunca

vieran su capacidad superada en más de un 90% su capacidad para una lluvia de diseño con un periodo de retorno de 10 años.

4.3. ELABORACIÓN DE LAS LLUVIAS DE DISEÑO

Las lluvias de diseño se calcularán para un periodo de retorno a corto plazo 2 años, a medio plazo 10 años y a largo plazo 50 años. Los datos escogidos son las precipitaciones máximas anuales para periodos de 24 horas desde 1950 en el aeropuerto de Zaragoza. Es decir, se obtienen 69 datos del dato máximo caído en un día para cada uno de los años:

Nº AÑO	AÑO HIDRÁULICO	PRECIPITACIÓN (mm)
1	1950	46.4
2	1951	37.8
3	1952	32.2
4	1953	44.7
5	1954	66.4
6	1955	32.3
7	1956	44.2
8	1957	39.9
9	1958	33.0
10	1959	51.7
11	1960	32.6
12	1961	36.1
13	1962	34.1
14	1963	35.3
15	1964	16.1
16	1965	22.2
17	1966	23.6
18	1967	29.2
19	1968	67.3
20	1969	32.7

Nº AÑO	AÑO HIDRÁULICO	PRECIPITACIÓN (mm)
21	1970	35.5
22	1971	36.1
23	1972	52.2
24	1973	23.3
25	1974	44.4
26	1975	31.5
27	1976	24.1
28	1977	28.0
29	1978	17.5
30	1979	60.7
31	1980	31.5
32	1981	42.5
33	1982	41.9
34	1983	39.6
35	1984	43.6
36	1985	31.2
37	1986	64.5
38	1987	43.0
39	1988	24.7
40	1989	17.8
41	1990	57.7
42	1991	51.7
43	1992	24.0
44	1993	23.7
45	1994	17.2
46	1995	23.1
47	1996	36.3

Nº AÑO	AÑO HIDRÁULICO	PRECIPITACIÓN (mm)
48	1997	57.9
49	1998	21.7
50	1999	36.6
51	2000	45.4
52	2001	30.8
53	2002	70.8
54	2003	35.3
55	2004	35.2
56	2005	34.6
57	2006	25.0
58	2007	43.2
59	2008	28.2
60	2009	22.3
61	2010	28.1
62	2011	31.5
63	2012	49.8
64	2013	38.4
65	2014	25.5
66	2015	54.2
67	2016	30.2
68	2017	39.2
69	2018	47.6

Tabla 6. Serie de precipitaciones históricas desde el año 1950 procedente del aeropuerto de Zaragoza

Para el cálculo de las precipitaciones para cada periodo de retorno se ha seguido el método de distribución estadística de Gumbel. Que asocia una precipitación para un periodo de retorno escogido. Las fórmulas de la distribución son las siguientes:

$$P_{24}(T) = X + (\sigma * K)$$

Dónde:

- X es la media de las precipitaciones anteriormente expuestas en la tabla.
- σ es la variancia de las precipitaciones anteriormente expuestas en la tabla.
- K (T,N): Depende del tamaño de la muestra y del periodo de retorno escogido para su cálculo. Para su cálculo es necesario determinar el valor de estas funciones:
 - $K(T,N) = (Y_t + Y_n) \div S_n$
 - Y_n para 69 muestras tienen un valor de 0,55453
 - S_n para 69 muestras tienen un valor de 1,18440
 - $Y_t = \ln(\ln(T/(T-1)))$

Los resultados de la distribución reflejan la siguiente evolución para las precipitaciones en función del periodo de retorno.

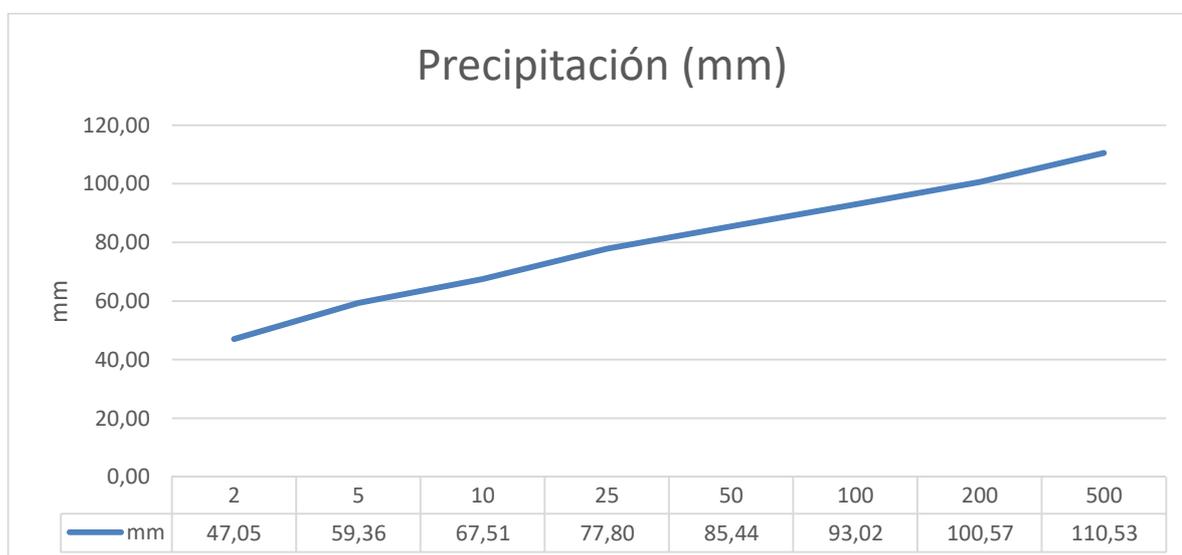


Ilustración 30. Evolución de las precipitaciones máximas diarias en función de los tiempos de retorno para las que han sido calculadas.

Las curvas IDF asociadas para cada periodo de retorno son las que se muestran a continuación en la siguiente tabla, para su obtención se utilizó la siguiente formulación. Se han escogido unos intervalos de 5 minutos durante 1 hora.

$$ID = I_{24} * \left(\frac{I_1}{I_{24}} \right)^{\frac{28^{0,1} - D^{0,1}}{28^{0,1} - 1}}$$

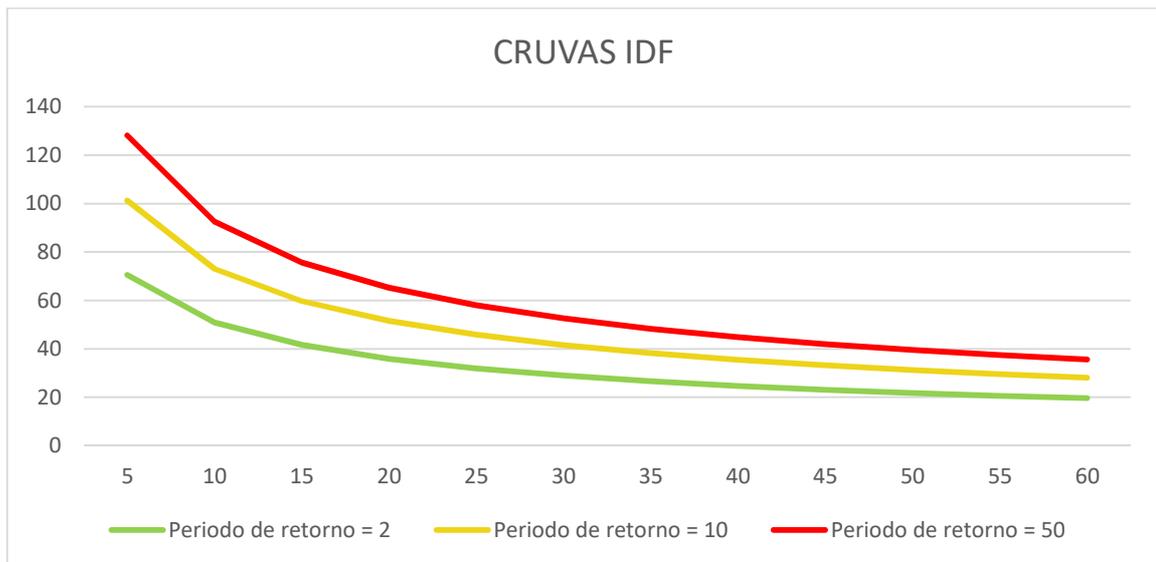


Ilustración 31. Curvas IDF para T2, T10 y T50

Gracias a estas curvas IDF y mediante el método de los bloques alternados obtenemos las lluvias de diseño para cada uno de los periodos de retorno deseados.

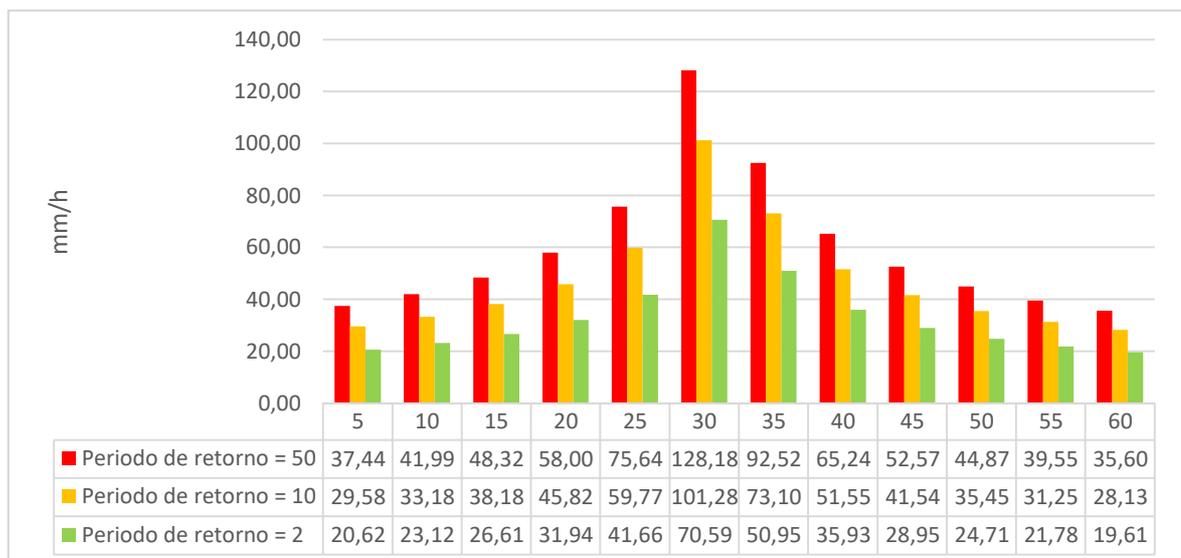


Ilustración 32. Distribución de la lluvia de diseño a partir de las curvas IDF mediante el método de bloques alternados.

4.4. ELECCIÓN DE LOS PARAMETROS PARA LOS SUDS A IMPLEMENTAR

PARAMETROS	Celdas de Bio-retención	Sistema garoé	Zanja de infiltración
Altura de la berma (Berm Height):	100	100	50
Fracción de volumen de vegetación (Vegetation Volume Fraction)	0,15	0,15	0
Rugosidad de la superficie (Surface Roughness):	0,13	0,13	0,02
Pendiente de la superficie (Surface Slope):	1	1	1
Pendiente de talud (Swale Side Slope):			
El espesor de la capa de pavimento (Thickness).			
Relación de vacío (Void Ratio):			
Fracción de superficie impermeable (Impervious Surface ratio):			
Permeabilidad (Permeability):			
Factor de obstrucción (Clogging Factor):			
Espesor de la capa del suelo (Thickness):	600	200	
Porosidad (Porosity):	0,453	0,453	
Capacidad de campo (Field Capacity):	0,19	0,19	
Punto de marchitez (Wilting Point):	0,085	0,085	
Conductividad hidráulica (Conductivity):	10,922	10,922	
Pendiente de conductividad (Conductivity Slope):	36,2	36,2	
Altura de succión (Suction Head) :	109,982	109,982	
Altura (Thickness):			
Relación de vacío (Void Ratio):			
Rugosidad de la malla (Surface Roughness):			
Altura del depósito (Thickness):	300	150	400
Relación de vacío (Void Ratio):	0,65	0,9	0,65
Tasa de filtración (Seepage Ratio):	10	0	20
Factor de obstrucción (Clogging Ratio):	0	0	0
Coefficiente de drenaje (Flow Coefficient):	0	1	5,566
exponente de drenaje (Flow Exponent):	0	0	0,5
Altura de vertido (Offset Height) :	0	145	0

Tabla 7. Parametrización para celdas de biorretención, tejado verde con sistema garoé y zanjas de infiltración (Elaboración propia a partir de los parámetros recomendados por el programa SWMM 5.1 y los condicionantes de diseño)

PARAMETROS	Cunetas verdes	Pavimentos porosos Continuos	Falso SUD CARRETERA
Altura de la berma (Berm Height):	1000	10	100
Fracción de volumen de vegetación (Vegetation Volume)	0,15	0	0
Rugosidad de la superficie (Surface Roughness):	0,13	0,015	0,011
Pendiente de la superficie (Surface Slope):	1	2	2
Pendiente de talud (Swale Side Slope):	3		
El espesor de la capa de pavimento (Thickness).		125	125
Relación de vacío (Void Ratio):		0,2	0,05
Fracción de superficie impermeable (Impervious Surface)		0	0,999
Permeabilidad (Permeability):		100	1
Factor de obstrucción (Clogging Factor):		0	0
Espesor de la capa del suelo (Thickness):		150	150
Porosidad (Porosity):		0,437	0,437
Capacidad de campo (Field Capacity):		0,062	0,062
Punto de marchitez (Wilting Point):		0,024	0,024
Conductividad hidráulica (Conductivity):		120,396	120,396
Pendiente de conductividad (Conductivity Slope):		48	48
Altura de succión (Suction Head) :		49,022	49,022
Altura (Thickness):			
Relación de vacío (Void Ratio):			
Rugosidad de la malla (Surface Roughness):			
Altura del depósito (Thickness):		400	400
Relación de vacío (Void Ratio):		0,65	0,65
Tasa de filtración (Seepage Ratio):		10	10
Factor de obstrucción (Clogging Ratio):		0	0
Coefficiente de drenaje (Flow Coefficient):		0	0
exponente de drenaje (Flow Exponent):		0	0
Altura de vertido (Offset Height) :		0	0

Tabla 8. Parametrización para cunetas verdes, pavimentos porosos y falso SUD consistente en una carretera convencional impermeable (Elaboración propia a partir de los parámetros recomendados por el programa SWMM 5.1 y los condicionantes de diseño).

4.5. DISCRETIZACIÓN DE ZONAS PARA LA APLICACIÓN DE LOS SUDS.

La urbanización dispone de dos áreas bien diferenciadas en función de su impermeabilidad. En la siguiente imagen se distinguen zonas de viviendas en azul y zonas vegetadas/ajardinadas en color verde.

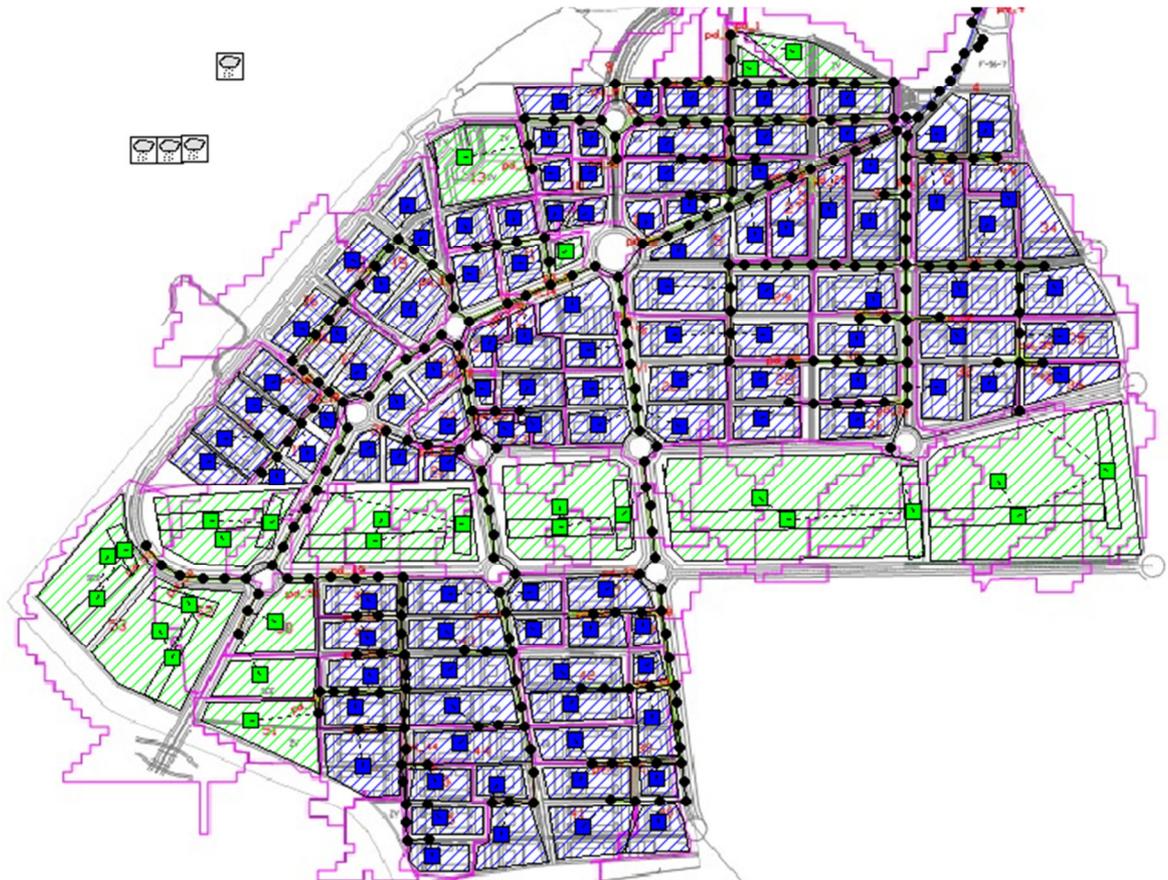


Ilustración 33. Diferenciación de zonas según su permeabilidad. En azul zonas de viviendas, en verde zonas vegetadas

De un estudio de la urbanización y determinando gráficamente mediante aplicaciones GIS las zonas en las que se van a implementar las zonas con técnicas de drenaje urbano sostenible, se discretizan varias zonas, que se presentan a continuación:

- Zonas ajardinadas dentro de las zonas de viviendas a sustituir por áreas de biorretención
- Pavimentación convencional de calles en zona de viviendas a sustituir por pavimentos permeables.

- Techados convencionales a sustituir por techados verdes en zona de viviendas
- Zonas ajardinadas dentro de las zonas verdes o parques en las que se introducirán cunetas verdes y zanjas de infiltración
- Pavimentación convencional en zonas verdes o parques a sustituir por pavimentos permeables.

Como se puede apreciar en el plano adjunto, la urbanización se divide en dos zonas, zonas verdes con unos ratios de impermeabilidad muy bajos y zonas de edificación donde los porcentajes de impermeabilidad son muy elevados. Hay que tener en cuenta que la aplicación de los SUDS en el programa SWMM se implementan como un porcentaje dentro de una cuenca de aportación por lo que no se puede tratar a dos tipos de cuencas de la misma manera en orden de introducir los porcentajes de aplicación de SUDS. Además de motivos de impermeabilidad, tal y como se aprecia en los planos, las zonas verdes tienen tres sistemas de SUDS aplicados y las zonas edificables, constan de otras tantas:

- Zonas verdes: Cunetas verdes, Zanjas de infiltración, Pavimentos permeables.
- Zonas de viviendas: Zonas de biorretención, Techados verdes, Pavimentos permeables.

Como se ha descrito con anterioridad la cuenca global se divide en dos zonas diferenciadas dadas las características de su impermeabilidad. Los porcentajes de aplicación se aplicarán con diferenciación en cada una de las dos zonas. La discretización de las diferentes zonas que se describen en el siguiente subapartado han sido obtenidas mediante aplicaciones GIS y atienden al diseño previo de urbanización.

4.5.1. Distribución en zona de viviendas

Por la distribución en las áreas de viviendas encontramos el siguiente patrón de distribución. En la situación inicial sin ninguna aplicación de SUDS, la superficie impermeable ocupa el 90 % y sólo existen pequeñas zonas permeables consistentes en zonas ajardinadas convencionales.

Para una futura situación final, y con la aplicación de SUDS, el porcentaje de zonas acupadas por áreas impermeables se reduce al ocupado por las carreteras convencionales 20%. Un 70 %, antes ocupado por las cubiertas y pavimentos convencionales, son sustituidas por tejados verdes y pavimentos permeables, logrando de esta manera alcanzar un 80 % del area total de zonas permeables en las zonas de viviendas.

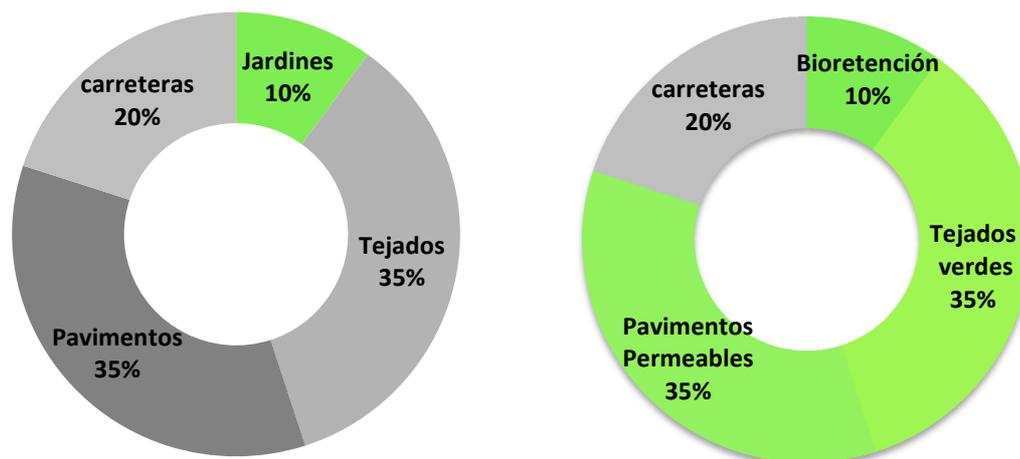


Ilustración 34. Gráficos de distribución de las diferentes áreas dentro de las zonas de viviendas. A la izquierda situación inicial a la derecha situación Final

4.5.2. Distribución en zonas verdes o vegetadas

Las áreas verdes poseen prácticamente la totalidad de su superficie con características permeables 91%, sólo se consideran como zonas permeables aquellas ocupadas por los caminos de acceso e interiores de los parques 9%.

Las actuaciones que se realizan en estas zonas son las de adecuación de los pavimentos y caminos convencionales, sustituyéndolos por unos con capacidad permeable. Además de introducirán cunetas verdes y zanjas de infiltración con la intención de garantizar la máxima de las infiltraciones en dichas zonas y que sirvan como amortiguadores principales de las escorrentías en sus vertidos a la red general.

Situación Final

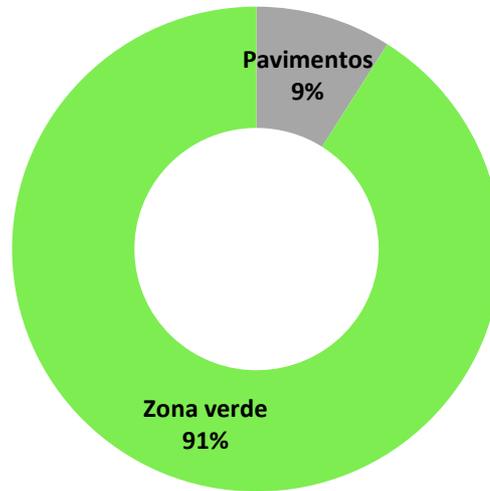


Ilustración 35. Gráficos de distribución de las diferentes áreas dentro de las zonas verdes (situación inicial).

Situación Final

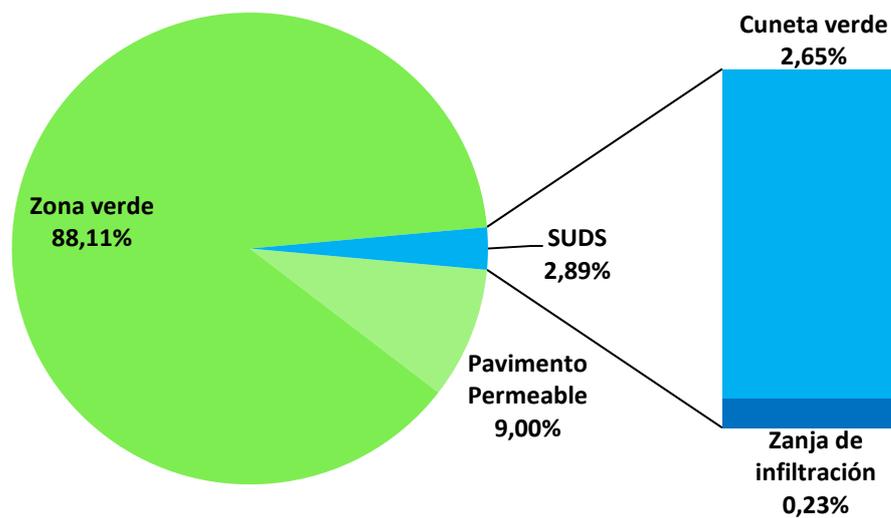


Ilustración 36. Gráficos de distribución de las diferentes áreas dentro de las zonas verdes (situación final).

4.6. MODELO DE CÁLCULO EJECUTADO

Hay dos enfoques diferentes para colocar los controles LID dentro de una subcuenca:

1. colocar uno o más controles en una subcuenca existente que desplazará una cantidad igual de área sin LID de la subcuenca
2. crear una nueva subcuenca dedicada exclusivamente a una sola práctica LID.

El primer enfoque permite colocar una combinación de LID en una subcuenca, cada una de las cuales trata una porción diferente de la escorrentía generada a partir de la fracción sin LID de la subcuenca. Hay que tener en cuenta que bajo esta opción, las LID de la subcuenca actúan en paralelo; no es posible hacer que actúen en serie (es decir, hacer que la salida de un control LID se convierta en la entrada a otra LID). Además, después de la colocación de la LID, las propiedades de Porcentaje impermeable y Ancho de la subcuenca pueden requerir un ajuste para compensar la cantidad del área de la subcuenca original que ahora se ha reemplazado por las LID (consulte la figura a continuación).

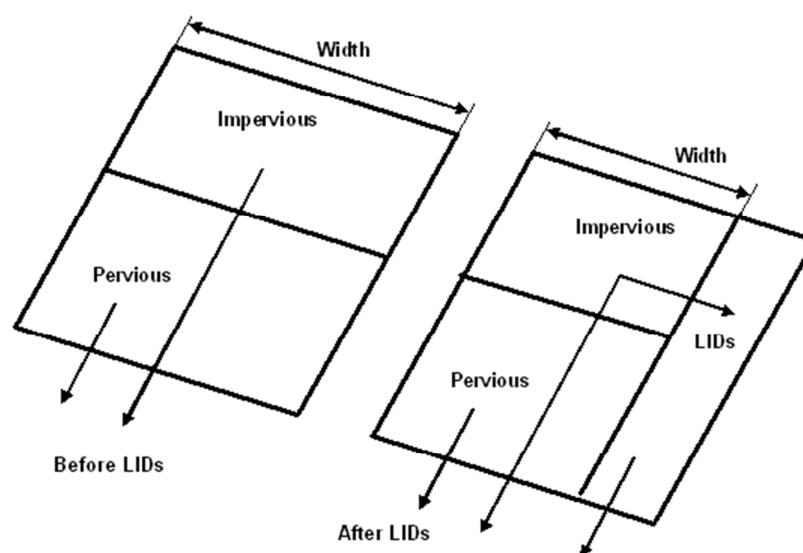


Ilustración 37. Cálculo realizado por el programa SWMM para el módulo de SUDs/LIDs.

En el modelo planteado, se consideran las dos opciones de cálculo:

Las zonas de viviendas se tratarán con un cálculo en paralelo introduciendo los SUDS en función de los porcentajes presentados en el apartado anterior para cada una de las subcuencas. Como se comentaba con anterioridad las áreas de aplicación de SUDs en subcuencas ya diseñadas aplican dicha superficie tanto en zona permeable como en impermeable.

Esto desvirtuaría por completo el cálculo que fuéramos a realizar puesto que existen zonas impermeables como las de las carreteras que en la situación futura seguirán sin ninguna variación y con dicha aplicación estaríamos considerando parte de las mismas como SUDs. Para ello, el programa cuenta con más opciones de aplicación, determinando si el SUD propuesto se pretende utilizar en un área impermeable. Con esta opción y conociendo los porcentajes de aplicación podemos simular un cálculo en paralelo sin ninguna desvirtuación de nuestro modelo.

Para ello, habrá que modelizar un falso sistema de drenaje que actuará como si de una carretera normal se tratara para poder introducirlo únicamente en zona impermeable. Esto, junto a la aplicación de los SUDs de pavimentos permeables y tejados verdes, aplicados también en zonas anteriormente impermeables hacen que el 90 % inicial quede completamente cubierto. Esto es de gran importancia dado que los sistemas de bioretención, que suponen el 10 %, sustituirán las zonas ajardinadas (zonas permeables dentro de la subcuenca) ya que solo quedan zonas permeables en nuestro modelo que ocupar.

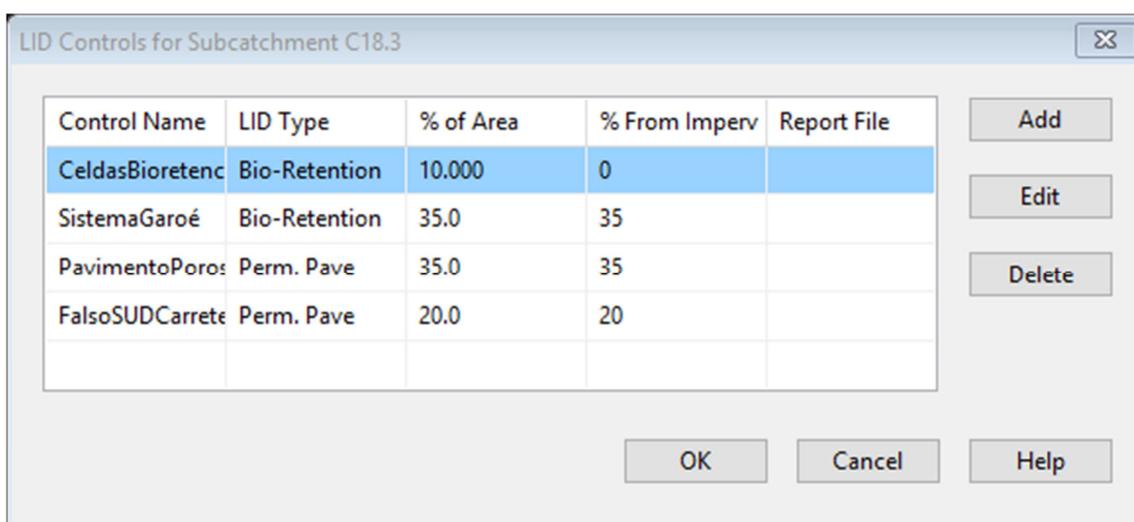


Ilustración 38. Ventana de introducción de ocupación de SUDs dentro de una subcuenca

Para las zonas verdes, dada su envergadura y la tipología de SUDs a instalar, se aplicara un cálculo híbrido, es decir un primer cálculo en paralelo recogiendo las escorrentías de la cuenca donde se aplican los pavimento permeables, introduciéndolos en aquellas zonas anteriormente impermeables, y un segundo cálculo, recogiendo dichas escorrentías y llevándolas mediante una cuneta verde hasta una zanja de infiltración que vierta a la red general. La distribución de los LIDS será por tanto la siguiente.

CUENCA DE APORTACIÓN		SITUACIÓN INICIAL	
ID	100%	9%	91%
	AREA	Pavimentos Convencionales	Zona verde
C1.1	21390	1925,1	19464,9
C11.1	9670	870,3	8799,7
C13.1	38490	3464,1	35025,9
C2.1	11080	997,2	10082,8
C48.2	25190	2267,1	22922,9
C50.1	26780	2410,2	24369,8
C51.1	30990	2789,1	28200,9
C52.1	61680	5551,2	56128,8
C53.1	44890	4040,1	40849,9
C129	57470	5172,3	52297,7
C130	76950	6925,5	70024,5
C131	80770	7269,3	73500,7
C132	141000	12690	128310
C133	150500	13545	136955

Ilustración 39. Tabla justificativa sobre las superficies iniciales de las zonas verdes

CUENCA DE APORTACIÓN		SITUACIÓN FINAL					
ID	100%	Porcentaje Variable					
	AREA	Pavimentos permeables		Zona verde menos cuneta y zanja	Cuenca en Paralelo total	Cuneta verde	Zanja Infiltración
C1.1	21390						
C11.1	9670						
C13.1	38490						
C2.1	11080						
C48.2	25190						
C50.1	26780						
C51.1	30990						
C52.1	61680	5551,2	9,27%	54364,325	59915,525	1416	348,47
C53.1	44890	4040,1	9,31%	39350,633	43390,733	1200	299,26
C129	57470	5172,3	9,31%	50410,35	55582,65	1600	287,35
C130	76950	6925,5	9,42%	66632,125	73557,625	3200	192,37
C131	80770	7269,3	9,40%	70098,775	77368,075	3200	201,92

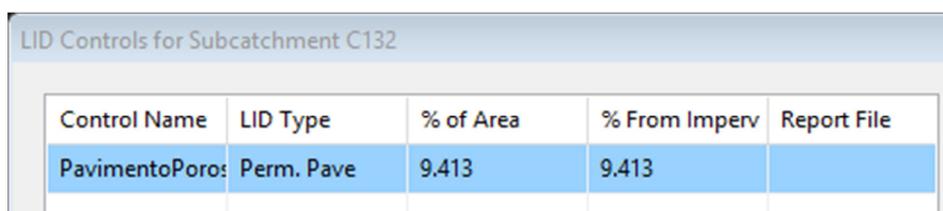
CUENCA DE APORTACIÓN		SITUACIÓN FINAL					
ID	100%	Porcentaje Variable					
	AREA	Pavimentos permeables		Zona verde menos cuneta y zanja	Cuenca en Paralelo total	Cuneta verde	Zanja Infiltración
C132	141000	12690	9,41%	122122	134812	6000	188
C133	150500	13545	9,26%	132654	146199	4000	301

Ilustración 40. Tabla justificativa sobre las superficies finales con aplicación de SUDs de las zonas verdes

Solo se ha actuado con la implementación de SUDs en aquellas parcelas con mayor superficie marcadas en verde en las tablas anteriores.

Como se hace un cálculo híbrido, era necesario restar la superficie ocupada por los SUDs al área inicial permeable dividiendo la cuenca en tres partes:

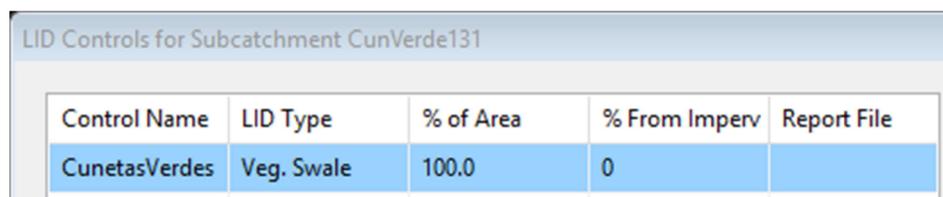
- Cuenca inicial modificada: A la cuenca original se le deducen las áreas ocupadas por las zanjas de infiltración y las cunetas verdes. El área solo ha sido deducida a las zonas originalmente permeables, dando como resultado una distribución donde los SUDs permeable a instalar ocupen exactamente la misma superficie que en su estado original.



Control Name	LID Type	% of Area	% From Imperv	Report File
PavimentoPoroso	Perm. Pave	9.413	9.413	

Ilustración 41. Ventana de aplicación de áreas ocupadas por SUDs (Pavimento permeable)

- Cunetas verdes, se introduce una nueva cuenca con un 100 % de la superficie dedicada al SUD de este tipo.



Control Name	LID Type	% of Area	% From Imperv	Report File
CunetasVerdes	Veg. Swale	100.0	0	

Ilustración 42. Ventana de aplicación de áreas ocupadas por SUDs (Cuneta Verde)

- Zanjas de infiltración, se introduce una nueva cuenca con un 100 % de la superficie dedicada al SUD de este tipo.

LID Controls for Subcatchment ZanjInf131				
Control Name	LID Type	% of Area	% From Imperv	Report File
ZanjasInfiltració	Infil. Trench	100.0	0	

Ilustración 43. Ventana de aplicación de áreas ocupadas por SUDs (Zanja infiltración)

El recorrido de la lluvia caída sobre la cuenca modificada se tratará mediante un cálculo en paralelo, posteriormente verterá sobre la cuenca nueva dedicada a cuneta verde, esta, a su vez, sobre la zanja de infiltración y esta última, sobre la red general.

Gracias a esta interconexión de SUDs se consigue realizar un cálculo continuo, ya que las cunetas verdes y las zanjas de infiltración no deben trabajar en paralelo, ya que sólo se tendría en cuenta la lluvia que cae sobre ellas y no el transporte que además realizan en situaciones reales.

4.7. RESULTADOS OBTENIDOS LLUVIAS DE DISEÑO

De la serie de datos recogidos en la tubería T300 a partir de la cual se recogen todas las escoorrentías producidas en el modelo, se presentan los siguientes gráficos donde en el eje Y se muestran los caudales en CMS circulantes en dicha tubería y en el eje X el tiempo de la simulación.

4.7.1.Reducción de escoorrentía

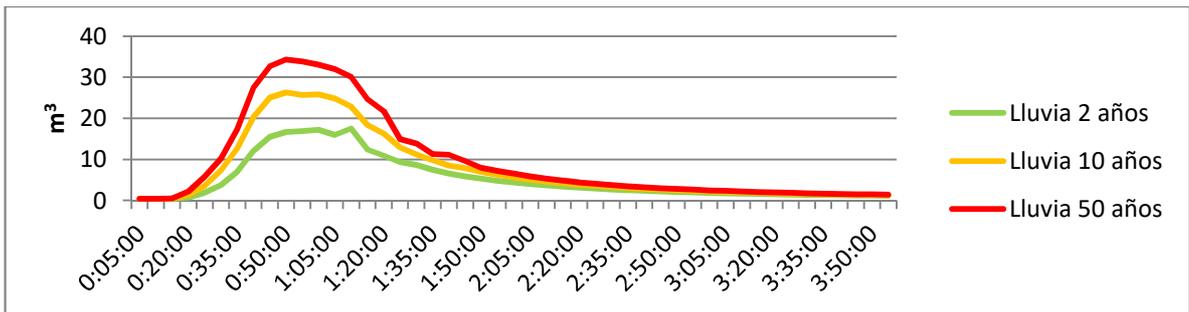


Ilustración 44. Gráfico de evolución de las escoorrentías sin aplicación de SUDs (CMS/m³)

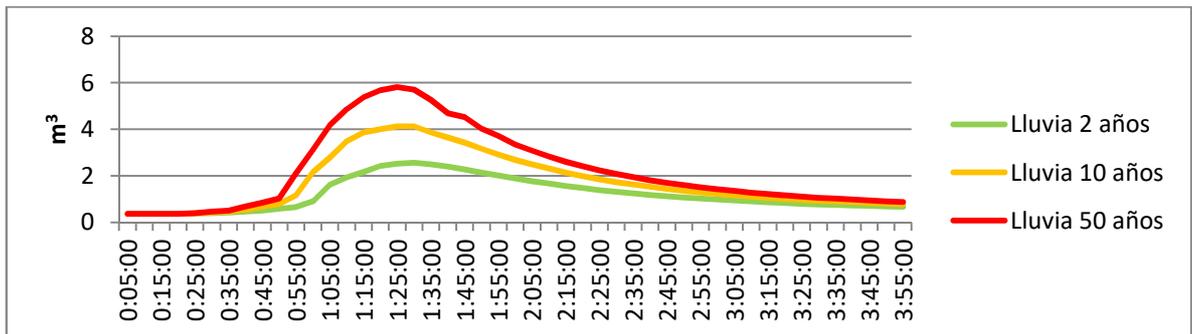


Ilustración 45. Gráfico de evolución de las escoorrentías con aplicación de SUDs (CMS/m³)

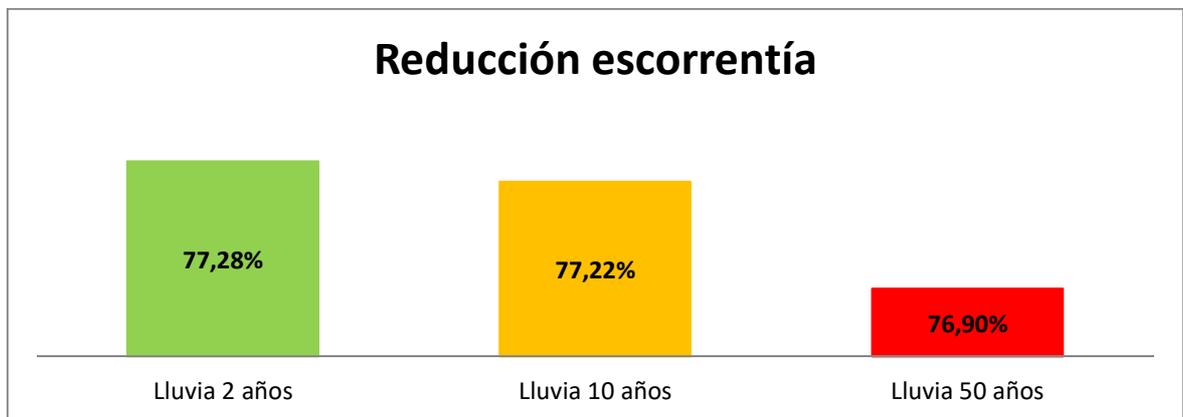


Ilustración 46. Gráfico reducción (CMS/m³)

4.7.2.Reducción de contaminantes

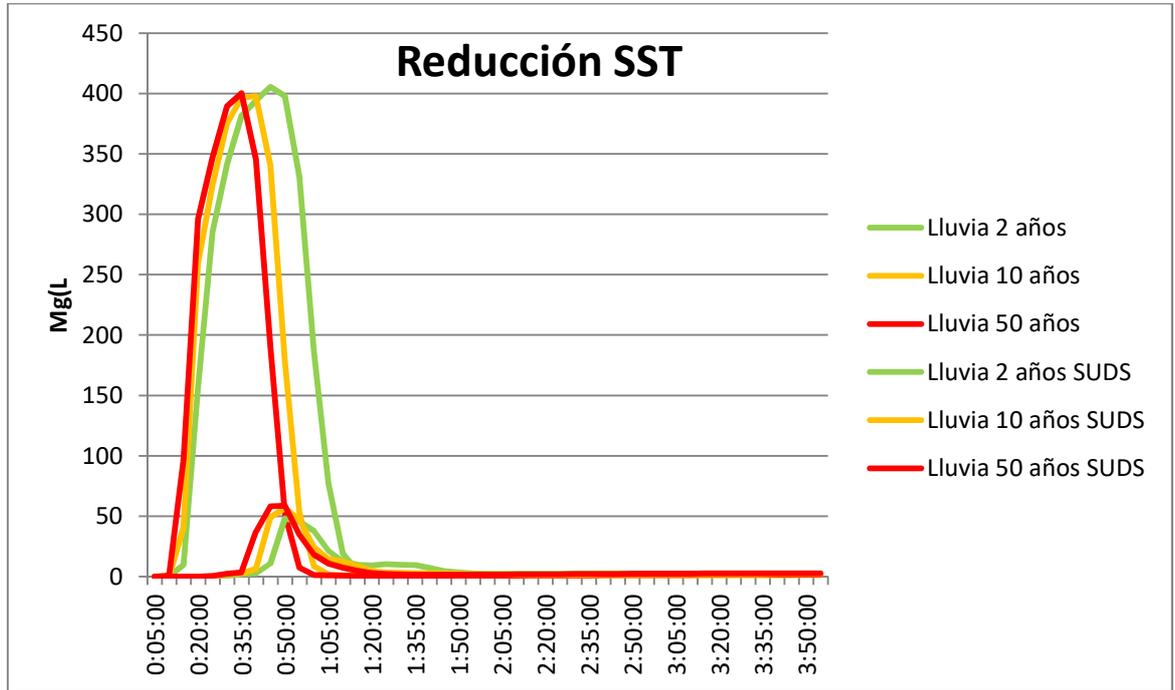


Ilustración 47. Gráfico de evolución de concentración de contaminantes sólidos en suspensión (Mg/L).

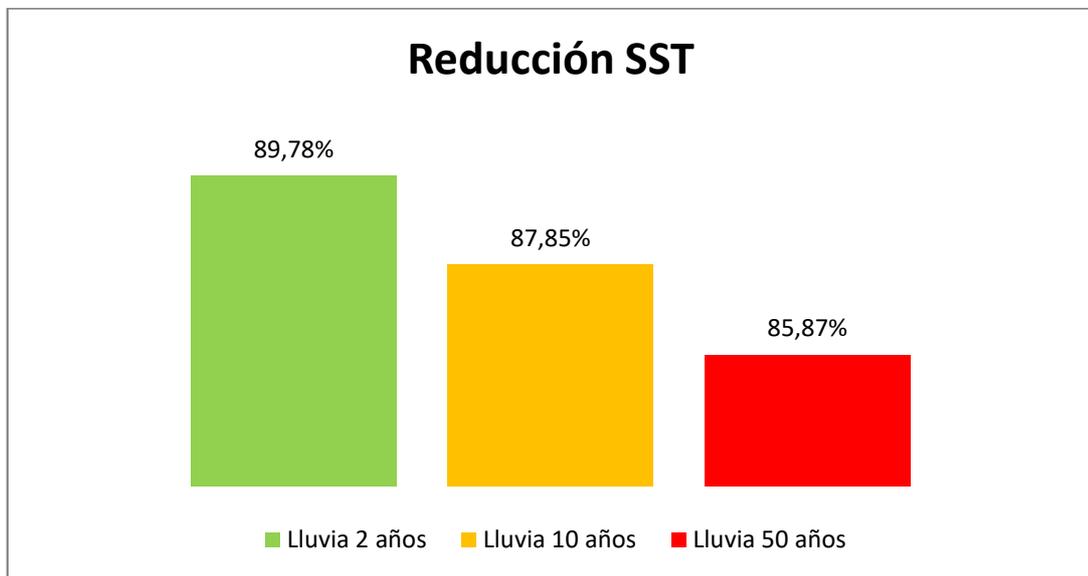


Ilustración 48. Reducción de sólidos en suspensión.

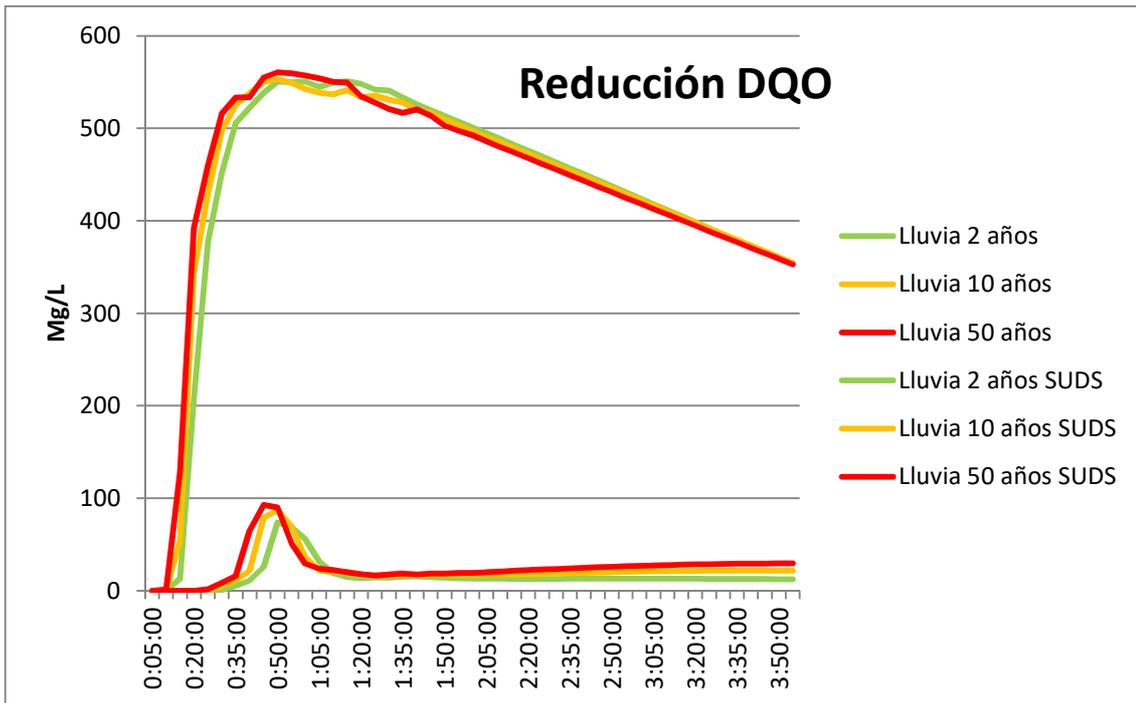


Ilustración 49. Gráfico de evolución de concentración de demanda química de oxígeno (Mg/L).

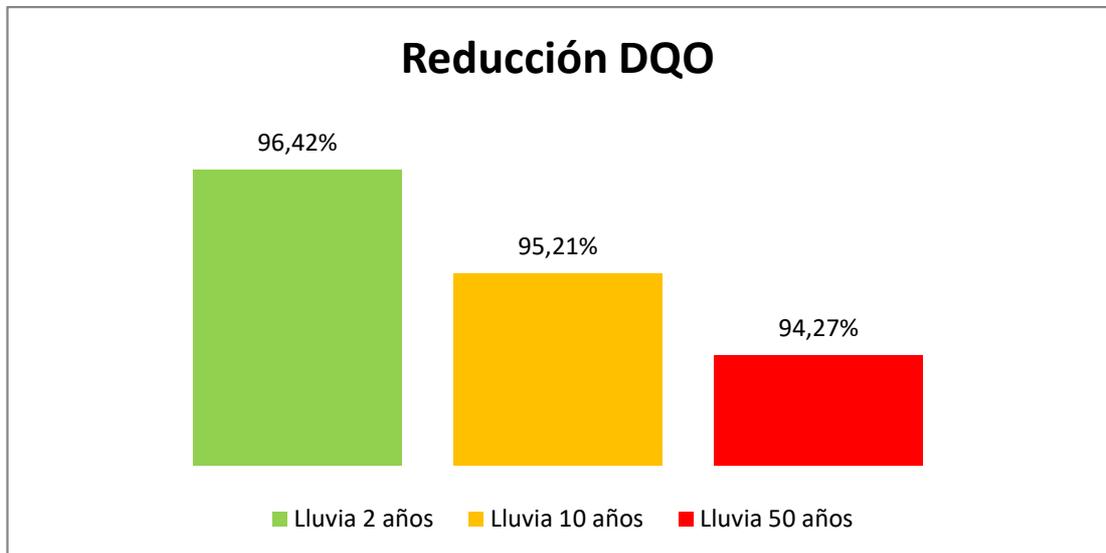


Ilustración 50. Reducción de la demanda química de oxígeno.

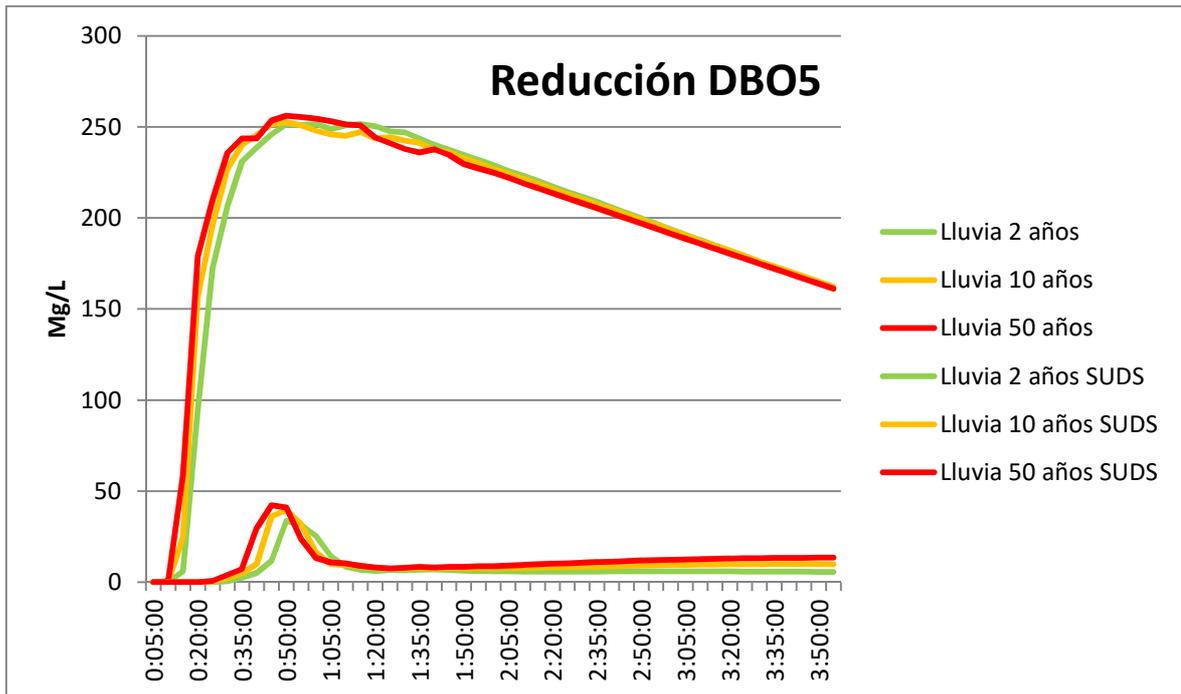


Ilustración 51. Gráfico de evolución de concentración de demanda bioquímica de oxígeno (Mg/L).

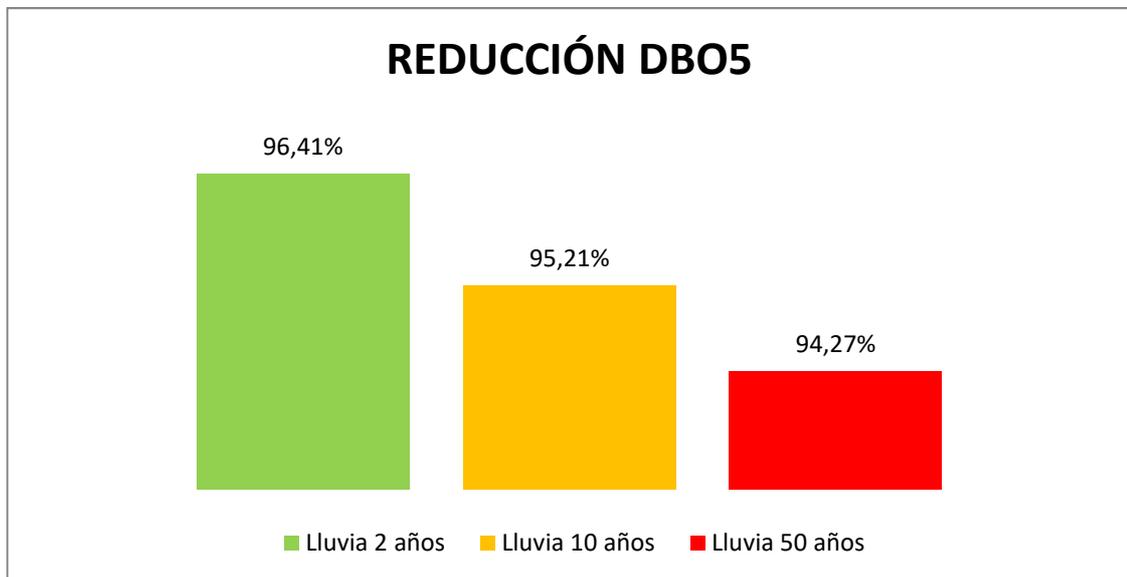


Ilustración 52. Reducción de la demanda bioquímica de oxígeno.

4.8. RESULTADOS OBTENIDOS LLUVIAS CONTINUAS

En estas simulaciones se ha considerado una lluvia continua relativa al año 2013 procedente de la serie de datos histórica del aeropuerto de Zaragoza.

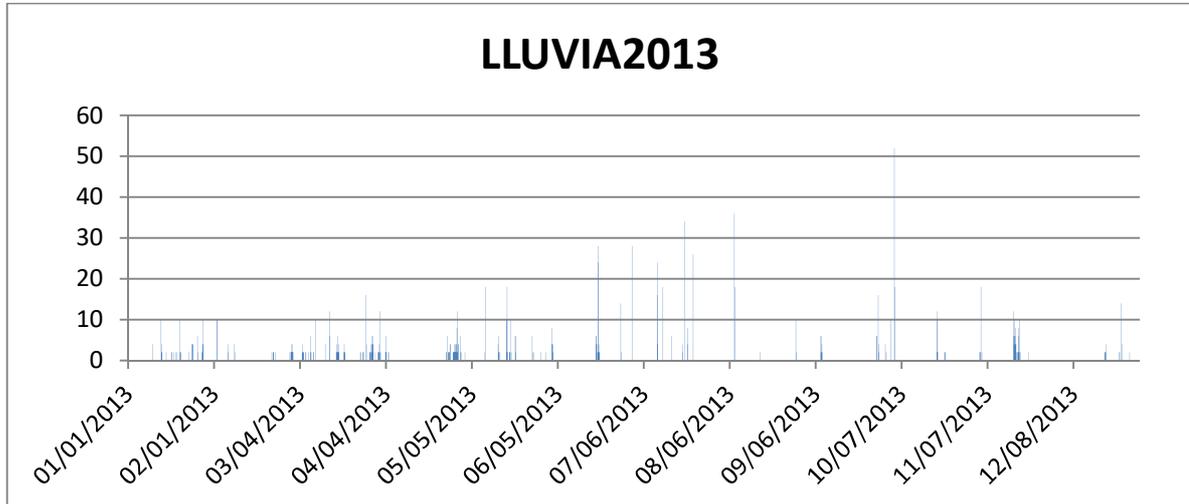


Ilustración 53. Lluvia continua 2013. Serie histórica del aeropuerto de Zaragoza.

Dado que las lluvias continuas históricas tienen por norma general menores intensidades de precipitación que las lluvias de diseño, por lo que los efectos de mejora serán más notorios. Tal como se veía en las lluvias de diseño analizadas con anterioridad la reducción de escorrentía aumenta en tanto en cuanto la lluvia tiene una menor intensidad o tiempo de retorno asociado.

Del análisis de los datos de las simulaciones para lluvias continuas se obtienen los siguientes porcentajes de reducción de la escorrentía y contaminantes.

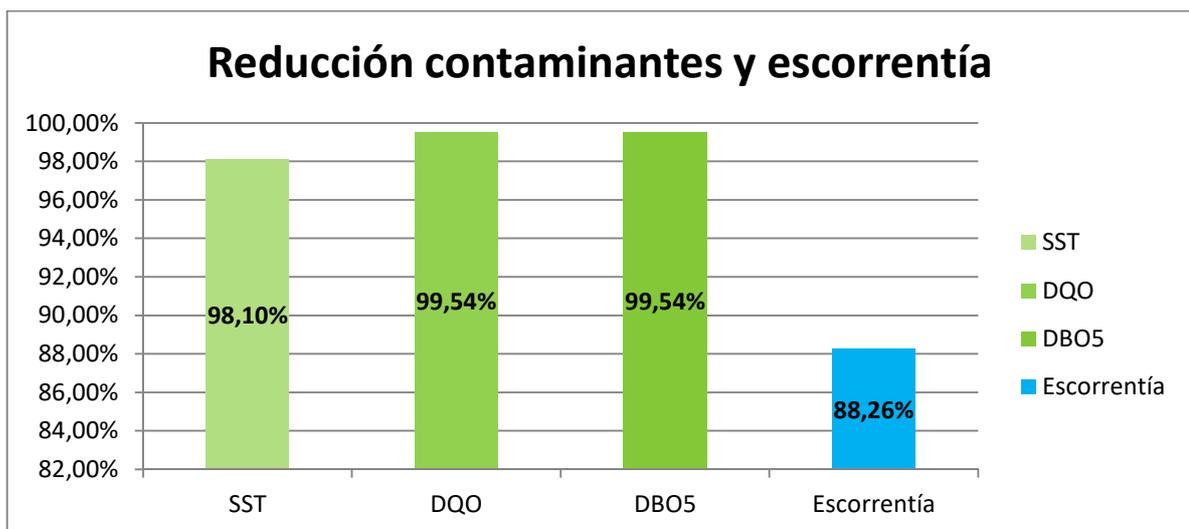


Ilustración 54. Reducción para una lluvia continua de sólidos en suspensión, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y escorrentía.

5. MODELIZACIÓN EN ES2TORMED.

La herramienta de soporte de decisiones E²STORMED es un software que respalda el proceso de toma de decisiones en la gestión de aguas pluviales urbanas. Usando esta herramienta, se pueden comparar las ventajas y desventajas de diferentes escenarios de drenaje y se pueden definir diferentes criterios de decisión para elegir la mejor opción para la gestión de aguas pluviales urbanas. E²STORMED fomenta la toma de decisiones basadas no solo en criterios financieros, sino también en criterios energéticos, ambientales y sociales. Este software ha sido desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (España) con la asistencia de la Universidad de Abertay Dundee dentro del proyecto E²STORMED: Mejora de la eficiencia energética en el ciclo del agua mediante el uso de la gestión innovadora de aguas pluviales en ciudades inteligentes del Mediterráneo.

El objetivo del proyecto es mejorar la eficiencia energética en el ciclo urbano del agua y en los edificios mediante la promoción del uso de soluciones innovadoras de aguas pluviales, como los sistemas de drenaje sostenible (SuDS) en las ciudades mediterráneas.

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar esta Herramienta de Apoyo a la Decisión para alentar a las autoridades locales a tomar decisiones mejor informadas. Esta herramienta se puede utilizar para comparar criterios financieros, energéticos y ambientales para mejorar la gestión de las aguas pluviales urbanas. El proyecto E²STORMED fue financiado por el Programa MED de la Unión Europea y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Está liderado por la Universidad Politécnica de Valencia y otros ocho socios del proyecto participan desde España, Italia, Reino Unido, Croacia, Montenegro, Grecia y Malta.

5.1. ANALISIS DEL PROGRAMA E2STORMED

El programa funciona gracias a la creación de diferentes escenarios generados por el usuario para su posterior análisis y comparación, la intención es realizar el mismo modelaje realizado con el programa SWMM. Para ello, se definirán los elementos comunes de precipitación temperaturas, costes, etc., y se diseñará un primer escenario que se identifica con la situación inicial de la urbanización sin la aplicación de SUDs y un segundo escenario con la situación final tras la aplicación de los mismos.

Al introducir los datos generales encontramos dos pestañas una para las precipitaciones y otra para las temperaturas, ambas para su introducción mensual media.

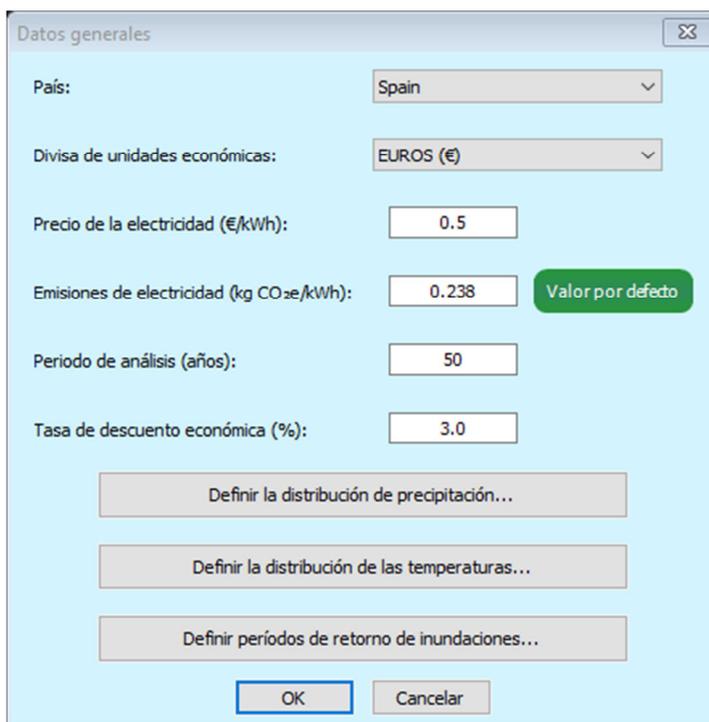
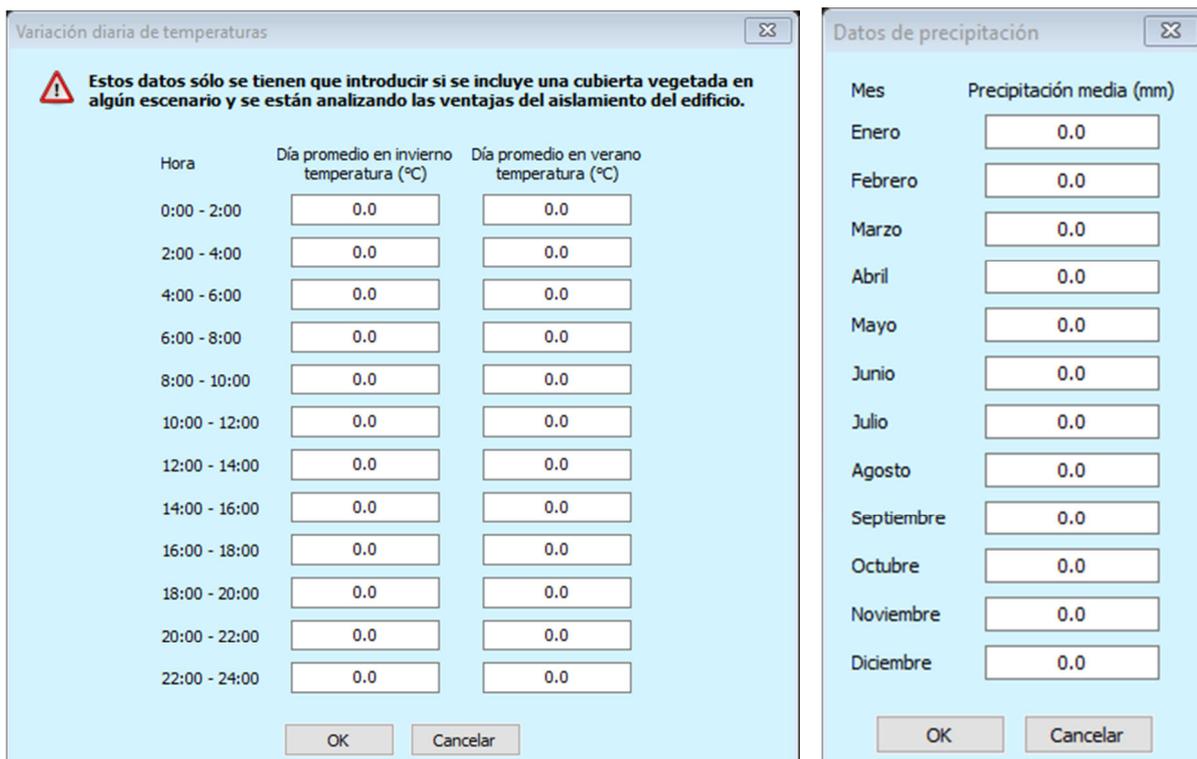


Ilustración 55. Ventana de introducción de datos generales E2STORMED



Variación diaria de temperaturas

Estos datos sólo se tienen que introducir si se incluye una cubierta vegetada en algún escenario y se están analizando las ventajas del aislamiento del edificio.

Hora	Día promedio en invierno temperatura (°C)	Día promedio en verano temperatura (°C)
0:00 - 2:00	0.0	0.0
2:00 - 4:00	0.0	0.0
4:00 - 6:00	0.0	0.0
6:00 - 8:00	0.0	0.0
8:00 - 10:00	0.0	0.0
10:00 - 12:00	0.0	0.0
12:00 - 14:00	0.0	0.0
14:00 - 16:00	0.0	0.0
16:00 - 18:00	0.0	0.0
18:00 - 20:00	0.0	0.0
20:00 - 22:00	0.0	0.0
22:00 - 24:00	0.0	0.0

Datos de precipitación

Mes	Precipitación media (mm)
Enero	0.0
Febrero	0.0
Marzo	0.0
Abril	0.0
Mayo	0.0
Junio	0.0
Julio	0.0
Agosto	0.0
Septiembre	0.0
Octubre	0.0
Noviembre	0.0
Diciembre	0.0

Ilustración 56. Introducción de temperaturas medias y precipitaciones medias.

Como no se están analizando las capacidades de aislamiento de las cubiertas verdes la tabla de las temperaturas no será completada.

Una vez que se han definido los datos generales para el análisis hidrológico, se deben definir los escenarios como se ha comentado con anterioridad (1) y sobre estos se irán introduciendo los diferentes elementos de drenaje que lo componen (2).

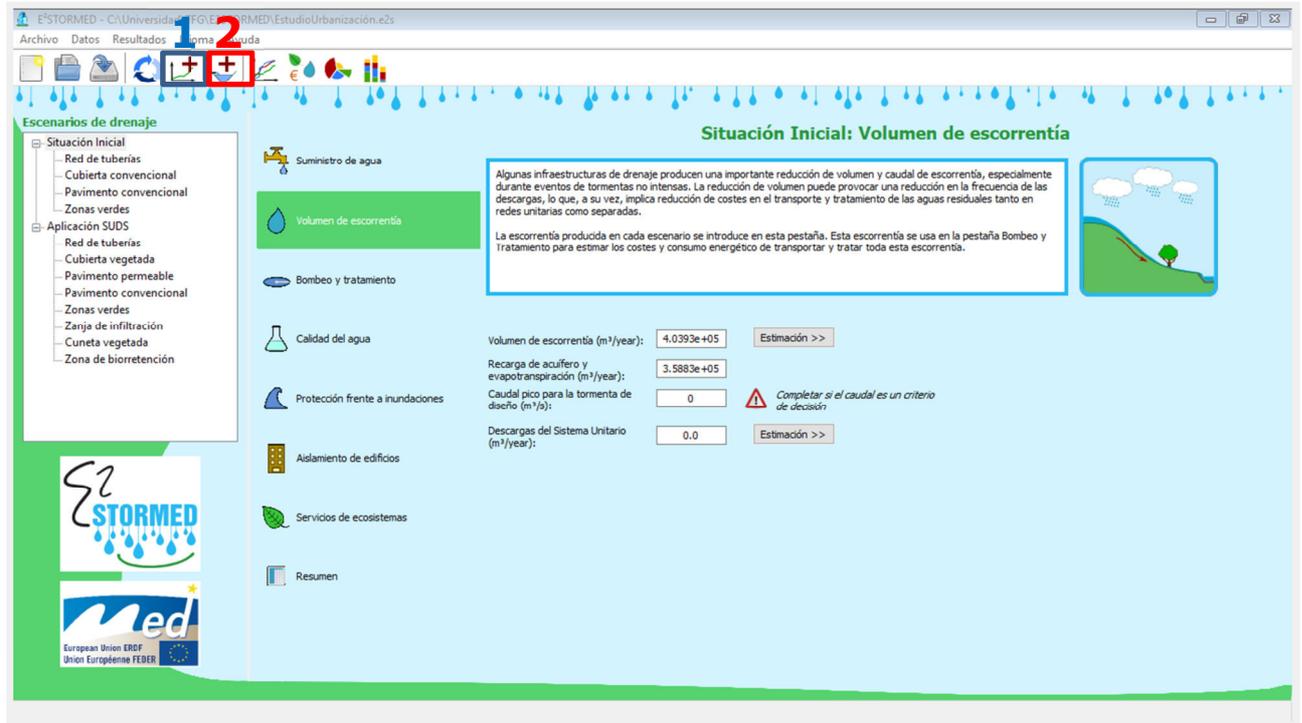


Ilustración 57. Vista general y botones para generar los escenarios.

Cada escenario tiene unos datos generales donde se pueden añadir parámetros de suministro de agua, Volumen de escorrentía generada, datos sobre posibles bombeos y tratamientos de aguas, calidad del agua, episodios de inundación, aislamiento de edificios y factores medioambientales. De todos estos parámetros se van a considerar sólo tres:

- Volumen de escorrentía
- Calidad del agua
- Servicios de ecosistemas

5.1.1. Volumen de escorrentía

En este apartado de datos generales dentro de un escenario nos encontramos con la siguiente pantalla.

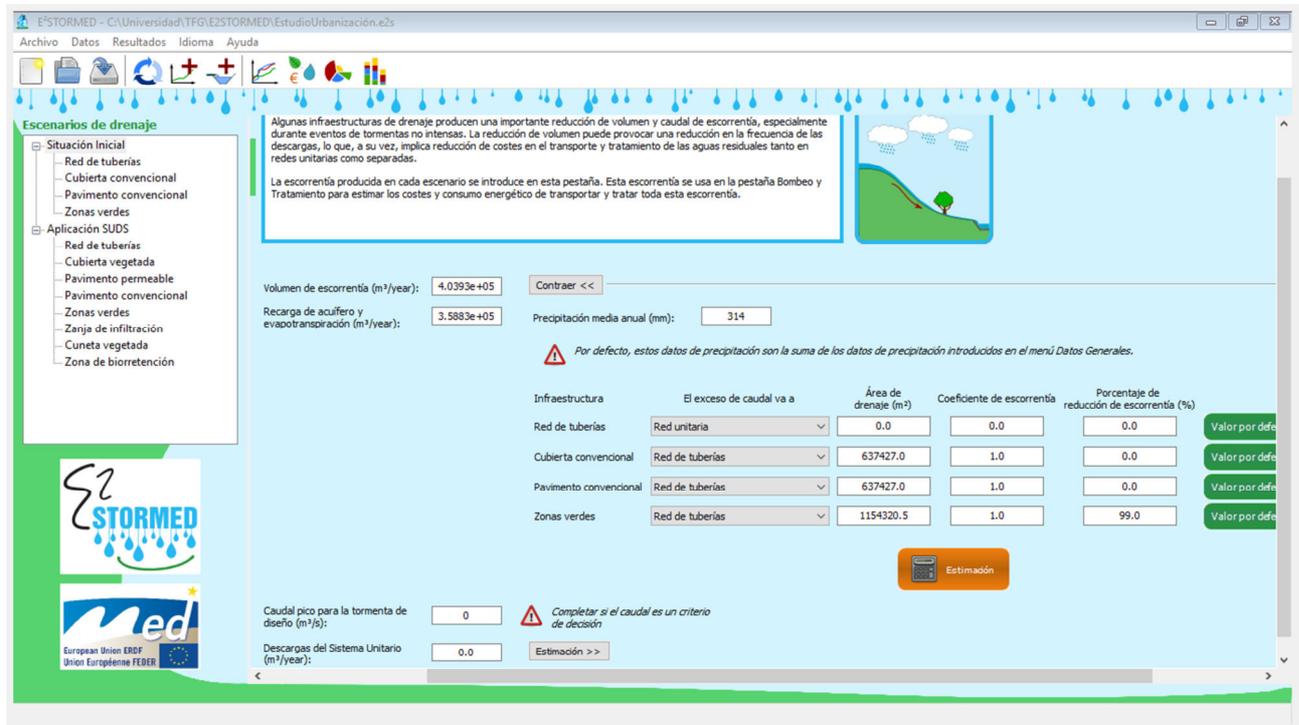


Ilustración 58. Pantalla para la introducción del volumen de escorrentía

Encontramos un apartado para la introducción de la escorrentía generadas en función de cada uno de los elementos que hemos introducido previamente. En la imagen se puede apreciar que para el escenario al inicio sin aplicación de SUDs hemos introducido la red de tuberías, pavimentos convencionales, tejados convencionales y zonas verdes. Estas zonas aparecen en esta pantalla para introducir el área de aportación de la escorrentía, el coeficiente de escorrentía y el porcentaje de reducción de la misma. Los datos de las áreas tienen total correlación con los aplicados en SWMM, los porcentajes de reducción se aplican los valores por defecto que aporta el programa y para los coeficientes de escorrentía se utiliza la siguiente tabla para lluvias largas. La estimación es calculada con la siguiente formula.

$$V = (I + R/1000 \cdot A \cdot C) \cdot \frac{(100 - \%red)}{100}$$

Donde la V es la escorrentía total, R es la lluvia total del año, A es el área de aportación, C es el coef. De escorrentía y %red es el porcentaje de reducción de escorrentía.

Type of surface	Runoff coefficients	
	Typical range	Recommended value
Asphalt	0.7-0.95	0.8
Concrete	0.8-0.95	0.9
Brick	0.7-0.85	0.8
Roofs	0.75-0.9	0.85
Pervious Concrete	0.1-0.3	0.2
Paving Stones	0.1-0.7	0.4
Grass Pavers	0.15-0.6	0.35
Lawns and grass:		
sandy soil, slope < 2%	0.05-0.1	0.08
sandy soil, slope > 2%	0.15-0.2	0.17
heavy soil, slope < 2%	0.13-0.17	0.15
heavy soil, slope > 2%	0.25-0.35	0.3
Landscaping	0.15-0.3	0.2
Crushed Aggregate	0.15-0.3	0.25

Ilustración 59. Coeficientes de escorrentía recomendados en E2STORMED (SFPUC 2009)

Infraestructura	El exceso de caudal va a	Área de drenaje (m ²)	Coefficiente de escorrentía
Red de tuberías	Red unitaria	0.0	0.0
Cubierta convencional	Red de tuberías	662232.0	0.85
Pavimento convencional	Red de tuberías	1110566.0	0.9
Zonas verdes	Red de tuberías	896143.0	0.4

Ilustración 60. Coeficientes escogidos para los diferentes elementos intervinientes en la red para la situación inicial sin SUDs

En tanteos posteriores se han modificado los coeficientes de escorrentía para intentar ajustar los datos obtenidos por el E2STORMED a los obtenidos con el SWMM, sin embargo se ha determinado su inviabilidad dado que aun que se propongan coeficientes muy cercanos a la unidad en la totalidad de las infraestructuras sigue sin acercarse a los valores de escorrentía del SWMM ciertamente más altos. La solución es aplicar una lluvia media superior en el E2STORMED, dado que el año 2013 analizado en el SWMM se encuentra por encima de la media histórica.

Infraestructura	El exceso de caudal va a	Área de drenaje (m ²)	Coefficiente de escorrentía
Red de tuberías	Red unitaria	0.0	1.0
Cubierta vegetada	Red de tuberías	662231.5	0.4
Pavimento permeable	Red de tuberías	732148.0	0.2
Pavimento convencional	Red de tuberías	378418.0	0.8
Zonas verdes	Cuneta vegetada	684499.109	0.4
Zanja de infiltración	Red de tuberías	727.356	0.4
Cuneta vegetada	Zanja de infiltración	20616.0	0.85
Zona de biorretención	Red de tuberías	189209.0	0.2

Ilustración 61. Coeficientes escogidos para los diferentes elementos intervinientes en la red para la situación final con SUDs

Con estos datos y la precipitación media introducida al inicio estima unos valores de escorrentía anuales para el escenario. El procedimiento ha sido el mismo para ambos escenarios.

5.1.2. Calidad del agua

En este apartado se introducen los datos relativos a la calidad del agua, al realizarse bajo criterios meramente cualitativos y no se cuantifica es de relativa importancia los datos obtenidos en dicho apartado. Se han considerado valores medios en cuanto a la calidad de agua se refiere y para la sensibilidad del medio receptor en ambos escenarios. Este apartado no calcula y solo sirve para dar un valor cualitativo a la hora de la toma de decisiones por lo que el módulo analizado en SWMM tiene una mayor fiabilidad.

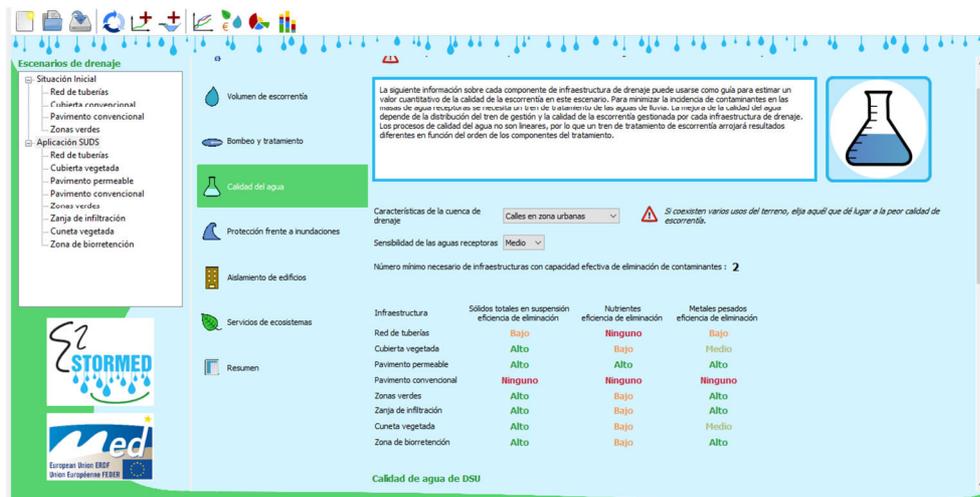


Ilustración 62. Pantalla de introducción de datos cualitativos de calidad de agua

5.1.3. Servicios de ecosistemas

En este apartado se consideran parámetros tanto cuantitativos de reducción de emisiones de CO₂ y cualitativos en función de las ventajas que aporta al medio cada uno de las infraestructuras introducidas.

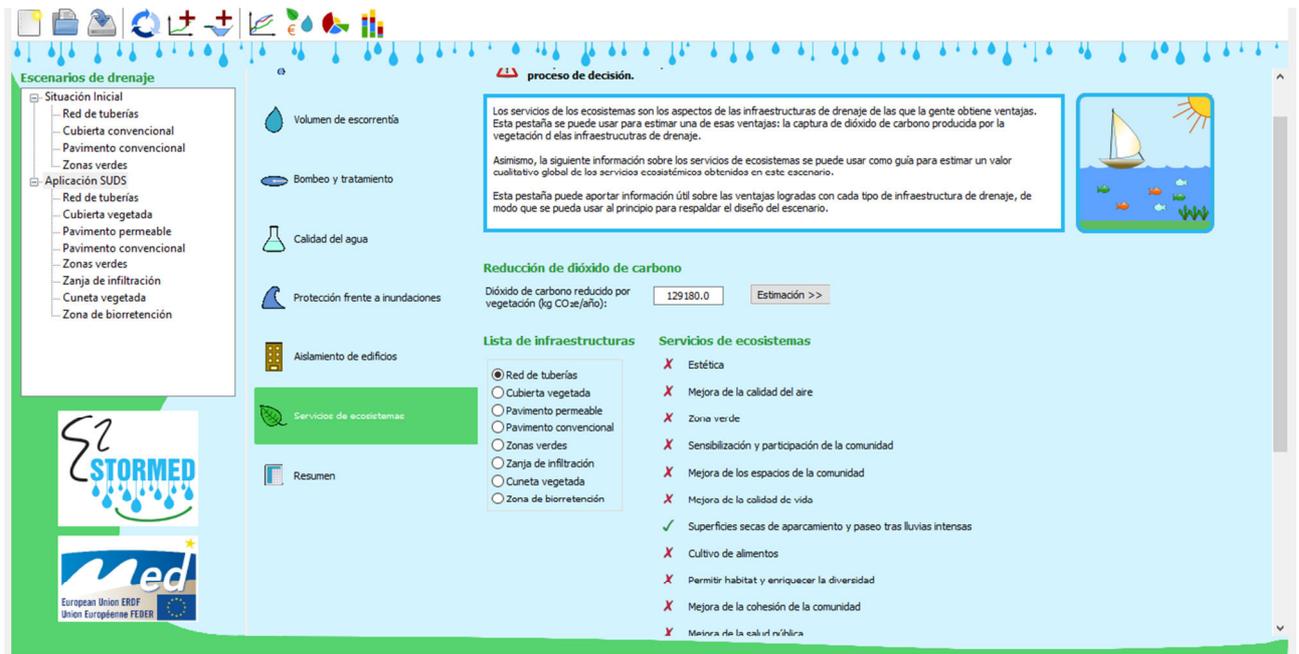


Ilustración 63. Pantalla de introducción de datos para servicios de ecosistemas

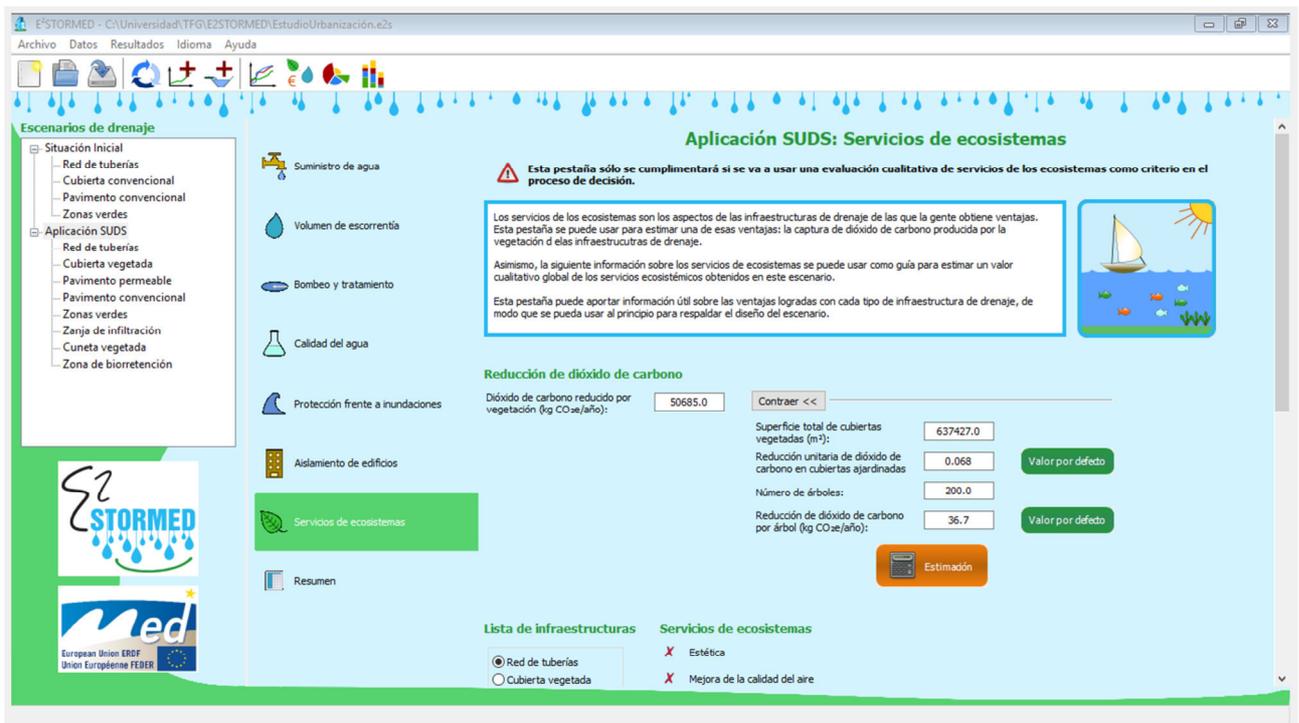


Ilustración 64. Pantalla de introducción de datos reducción de dióxido de carbono.

Para realizar una estimación sobre el efecto reductivo en emisiones de la vegetación se introducen datos de superficie ocupadas por la misma una reducción de dióxido de carbono unitaria por superficie. De la misma manera se realiza un cálculo idéntico con el número de árboles.

5.1.4. Infraestructuras dentro de los diferentes escenarios.

Se escogen dos escenarios diferentes a analizar, uno al inicio y sin aplicación de SUDs alguna, y, otro, en una situación futura con la aplicación de SUDs. Los escenarios a analizar poseen las siguientes infraestructuras.

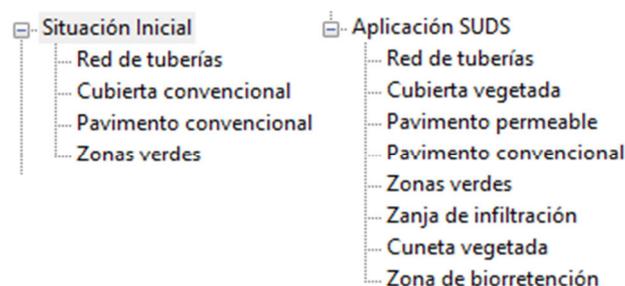


Ilustración 65. Infraestructuras por escenarios.

Las diferentes infraestructuras se encuentran perfectamente detalladas y explicadas en el manual del usuario. Tanto en la propia interfaz del programa como en el manual se aconseja utilizar los valores por defecto. Se adjunta a la presente memoria las fichas descriptivas de todos los elementos.

5.2. RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSIONES DEL PROGRAMA

El programa E2STORMED es un programa que únicamente funciona con un modelo hidrológico. Dicho programa no presenta cálculos hidráulicos y por lo tanto los resultados obtenidos con el programa no son comparables con los de un cálculo obtenido por SWMM. La primera diferenciación se encuentra en la introducción de las lluvias. En SWMM puede diseñarse lluvias de diseño o lluvias continuas. Esto es de vital importancia para el análisis y existe una gran diferencia entre introducir una lluvia continua real como se hizo en SWMM o introducir los datos medios de precipitación en E2STORMED.

Otra gran deficiencia del programa es la reducción de escorrentía en términos absolutos realizada por el E2STORMED, ya que se introducen porcentajes de reducción de escorrentía globales para cada una de las infraestructuras. En SWMM se consideran las saturaciones de los suelos y se tienen en cuenta dentro del cálculo para conseguir un mayor realismo en la reducción de las escorrentías.

Estas dos diferencias hacen que el primer paso para un análisis de la aplicación de SUDs sea incompatible, puesto que las lluvias introducidas no pueden ser iguales al tratarse de precipitaciones medias y ya que las reducciones de escorrentía no atienden a ningún cálculo específico y se limita a reducirla en función de un porcentaje que además puede errar al no considerar la variabilidad de la reducción en función de las lluvias acontecidas.

5.2.1.Reducción de las escorrentías

De los resultados de escorrentía se obtiene que para una situación inicial sin la aplicación de SUDs genera 669.210 m^3 en todo el año y para la situación final con la aplicación de los SUDs se alcanzan los 151.700 m^3 . La reducción por tanto es de un 77,33 %.

5.2.2. Costes de construcción

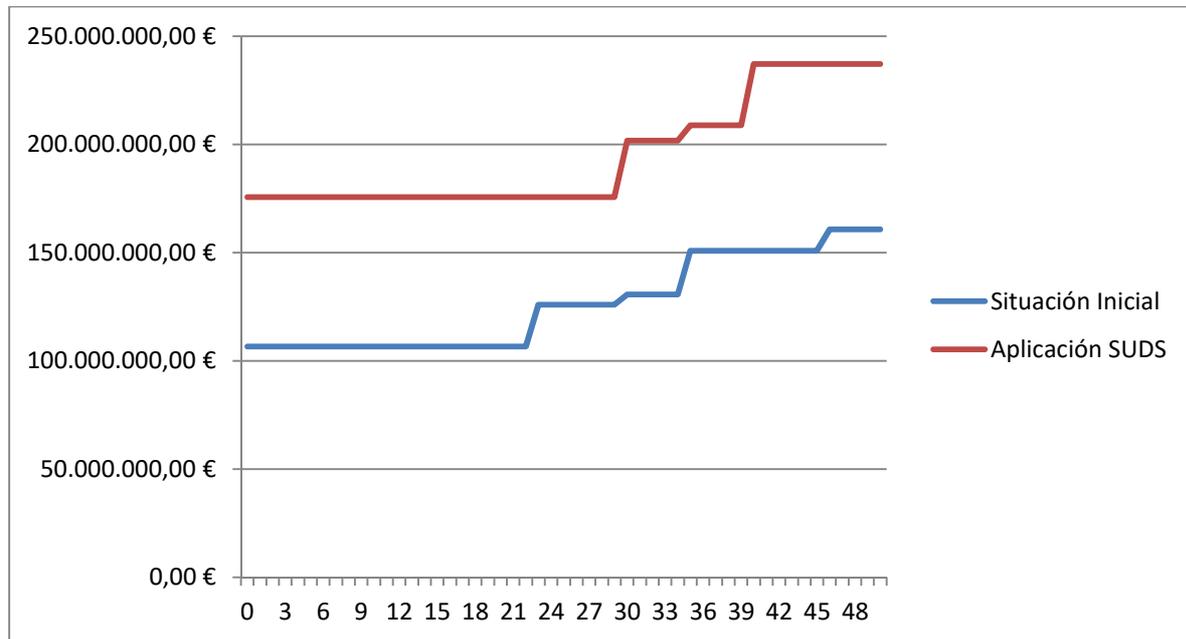


Ilustración 66. Gráfico de la evolución de los costes de construcción

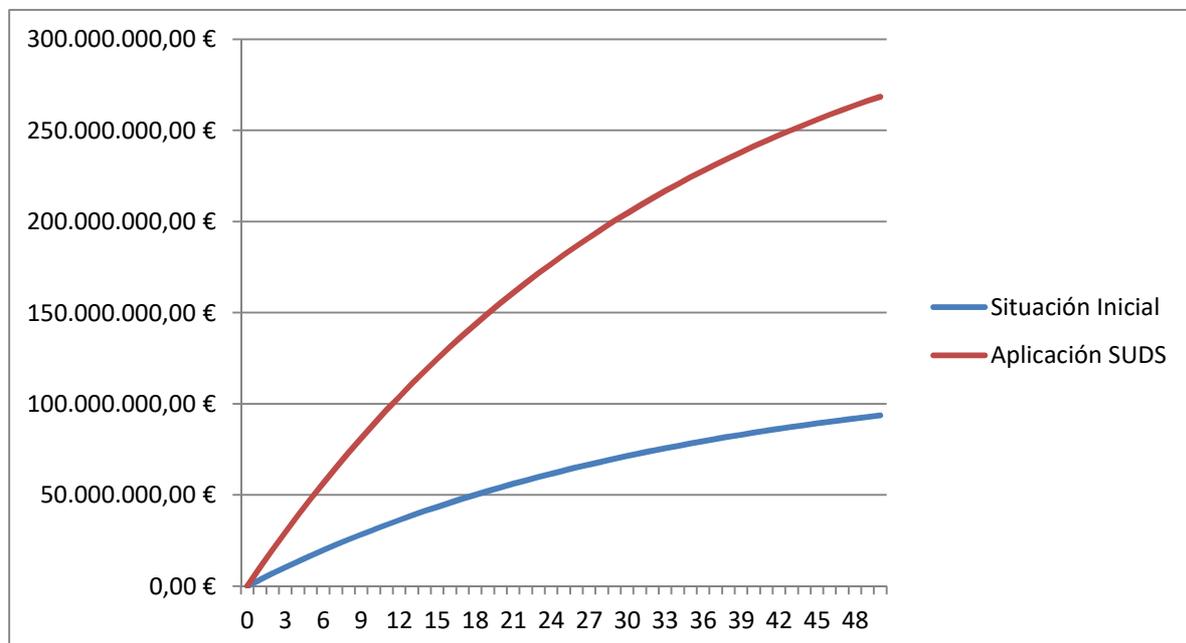


Ilustración 67. Gráfico de la evolución de los costes de mantenimiento

5.2.3. Emisiones de CO₂

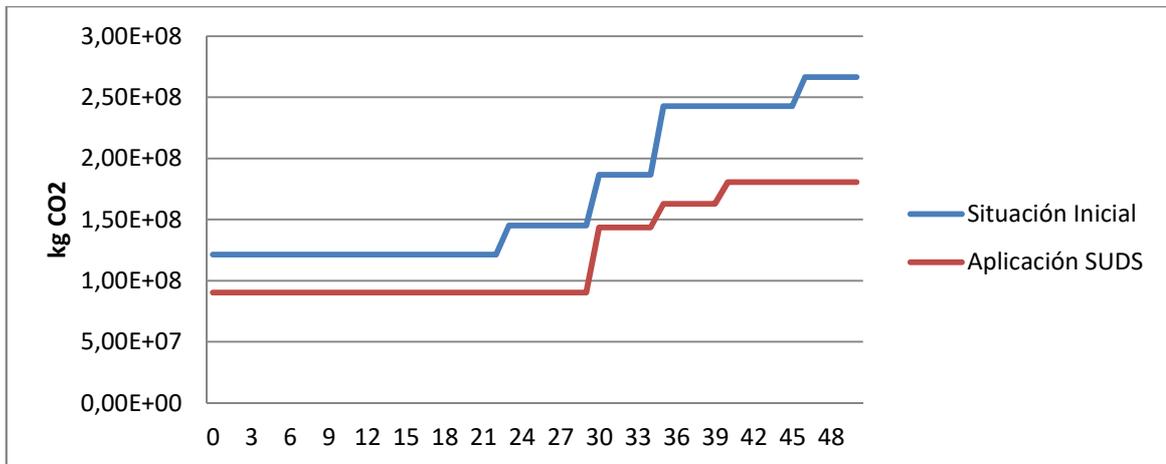


Ilustración 68. Gráfico de la evolución de las emisiones durante la construcción

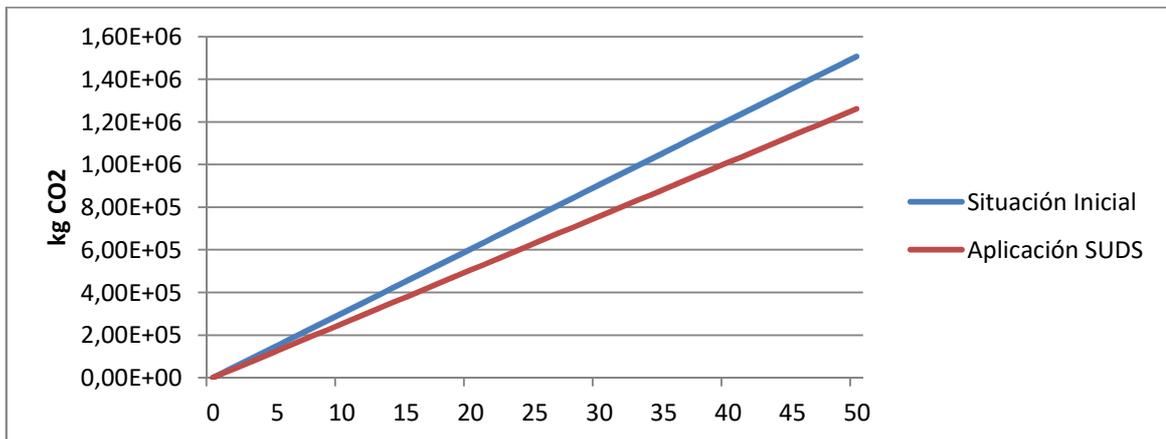


Ilustración 69. Gráfico de la evolución de las emisiones durante el mantenimiento

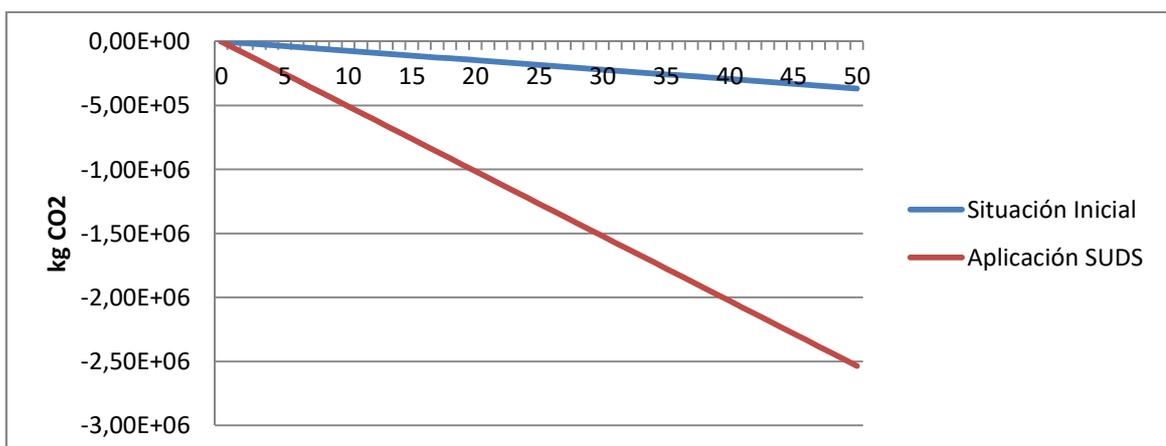


Ilustración 70 Gráfico de la evolución de la reducción de Kg CO₂

5.2.4. Resultados para toma de decisiones

El programa cuenta con un sistema para la toma de decisiones que consiste en escoger una serie de criterios para puntuar los escenarios. Los criterios pueden ser generados o escogidos entre datos calculados, pudiéndose escoger entre criterios económicos, medioambientales, cuantitativos, de calidad de las aguas, energéticos y de contaminantes

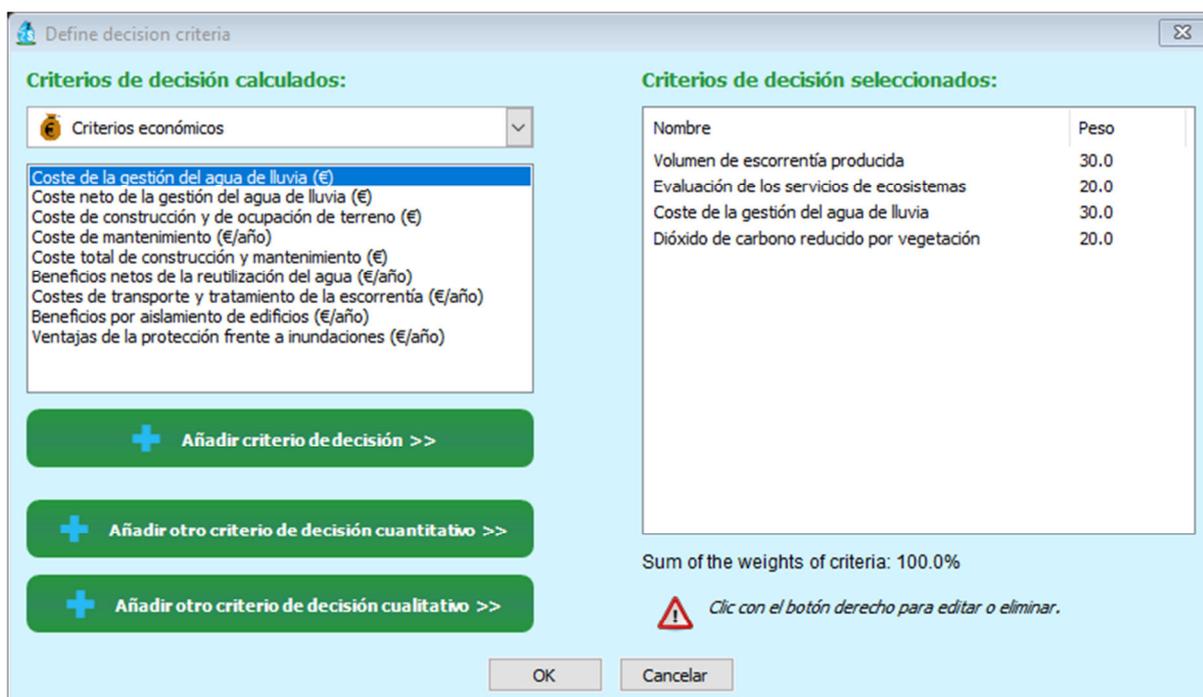


Ilustración 71. Ventana para selección de los criterios ponderados

Para la evaluación de nuestra propuesta se deciden los criterios de selección que se encuentran en la ilustración anterior. Bajo estos criterios se obtiene la siguiente valoración ponderada. En dicha ponderación se incluyen los criterios de volumen de escorrentía generada, evaluación de los ecosistemas, coste de la gestión del agua de lluvia y dióxido de carbono reducido por la vegetación. Como se puede apreciar en el gráfico acumulado la aplicación con SUDs genera mayor beneficios medioambientales, pero sin embargo el coste de la gestión del agua de lluvia es mayor y su puntuación por tanto es nula. Aún con este hecho se considera como la mejor opción tanto por sus reducciones en escorrentía generada y por sus beneficios medioambientales en términos de emisiones de CO₂ y evaluación global de los ecosistemas.

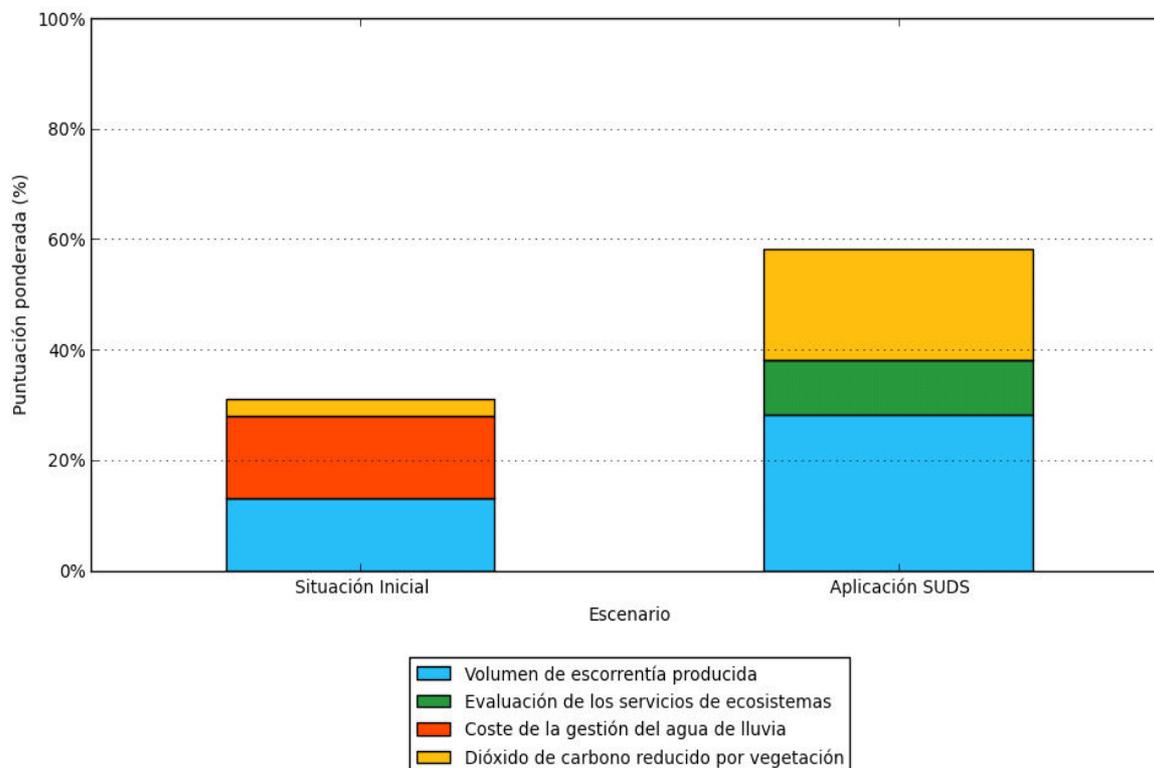


Ilustración 72. Valoración ponderada bajo los criterios escogidos.

5.1. PARAMETRIZACIÓN Y COMPARATIVA CON SWMM

En el apartado anterior se ha analizado el mismo escenario de aplicación de SUDs que en el programa SWMM, sin embargo existen grandes diferencias en la situación inicial (974.502 en SWMM y 669.210 en E2STORMED), en cuanto a la reducción de las escorrentías y el valor total de las mismas para la simulación de un año.

El valor es muy parecido en la situación final con la aplicación de SUDs, pero esto no quiere decir que el resultado sea válido. Existen dos diferencias sustanciales que se pueden resumir de la siguiente manera:

- Gran variabilidad en situaciones de alta impermeabilidad (situación inicial sin SUDs)
- Diferencias en cuanto a poder de reducción de los SUDs de los diferentes programas.

La gran variabilidad entre los dos modelos al inicio sin aplicación de SUDs se debe principalmente a dos razones. El programa E2STORMED aplica coeficientes de escorrentía más bajos que los escogidos en el modelo en SWMM para los pavimentos y tejados convencionales, este hecho hace que, en una situación inicial en el que el 90 % de las superficies son impermeables, hace que se creen diferencias bastante grandes y prácticamente la totalidad de lo precipitado en SWMM se convierta en escorrentía. El segundo hecho diferenciador para esta primera situación es la elección de la lluvia escogida en cada uno de los programas. Si bien el E2STORMED utiliza valores medios, el SWMM considera una lluvia continua histórica que en nuestro caso contaba con datos cada 10 minutos durante el año 2013. Esta diferencia es la que más podría llegar a diferenciar los dos modelos por dos motivos. El primero sería que una serie diezminutal de un año en concreto, puede estar por encima o por debajo de la media, por lo que la lluvia caída en los diferentes modelos es diferente. Para el caso de estudio, la serie de 2013 se encuentra por encima de los valores medios, por lo que obviamente la escorrentía generada será mayor. Esta característica junto a la diferente elección de coeficientes de escorrentía por cada uno de los programas consigue que exista una diferencia de un 31 % en la situación primera sin aplicación de SUDs.

Posteriormente y con la aplicación de SUDs los datos de escorrentía se acercan (114.408 en SWMM y 151.700 en E2STORMED) con una diferenciación entre ambos de un 24%. Sin embargo si atendemos a los cambios respecto a la situación inicial los coeficientes de reducción entre un modelo y otro no son comparables (88,26% para SWMM y un 77,33 % para E2STORMED). Esta variabilidad en cuanto a poder de reducción de las escorrentías por los dos programas se debe a la diferenciación del modelo de cálculo. Por un lado se observa que el programa E2STORMED calcula la escorrentía generada como la suma de las precipitaciones medias mensuales generando una lluvia anual media aplicada sobre las superficies introducidas, y sobre estas, se aplican reducciones meramente porcentuales en función del coeficiente de escorrentía y el poder de reducción del SUD en cuestión. Por otro lado, el programa SWMM considera la lluvia por intervalos y realiza un cálculo en cada espacio de tiempo según se le aplique (10 minutos para el caso de estudio). Esto hace que el análisis sea mucho más complejo y se realice un análisis completo tanto hidráulico como hidrológico por cada intervalo de tiempo, pudiendo de esta manera, considerar una lluvia tras un tiempo de sequía y por tanto aumentar la eficacia de la reducción de la escorrentía. Este hecho es de gran importancia en zonas con episodios de precipitación aislados como ocurre en climas mediterráneos o áridos, por lo que no es de extrañar que el modelo realizado al tener dicho tipo de lluvia y considerar estos parámetros, reduzca la escorrentía en mayor medida.

En el modelo generado en E2STORMED se ha conseguido una reducción de un 77,33 % de la escorrentía total del año, obteniendo un resultado final de 151.700 m³.

En el modelo generado en SWMM para una lluvia continua se ha conseguido una reducción del 88,26 %, obteniendo una escorrentía final anual de 114.408 m³.

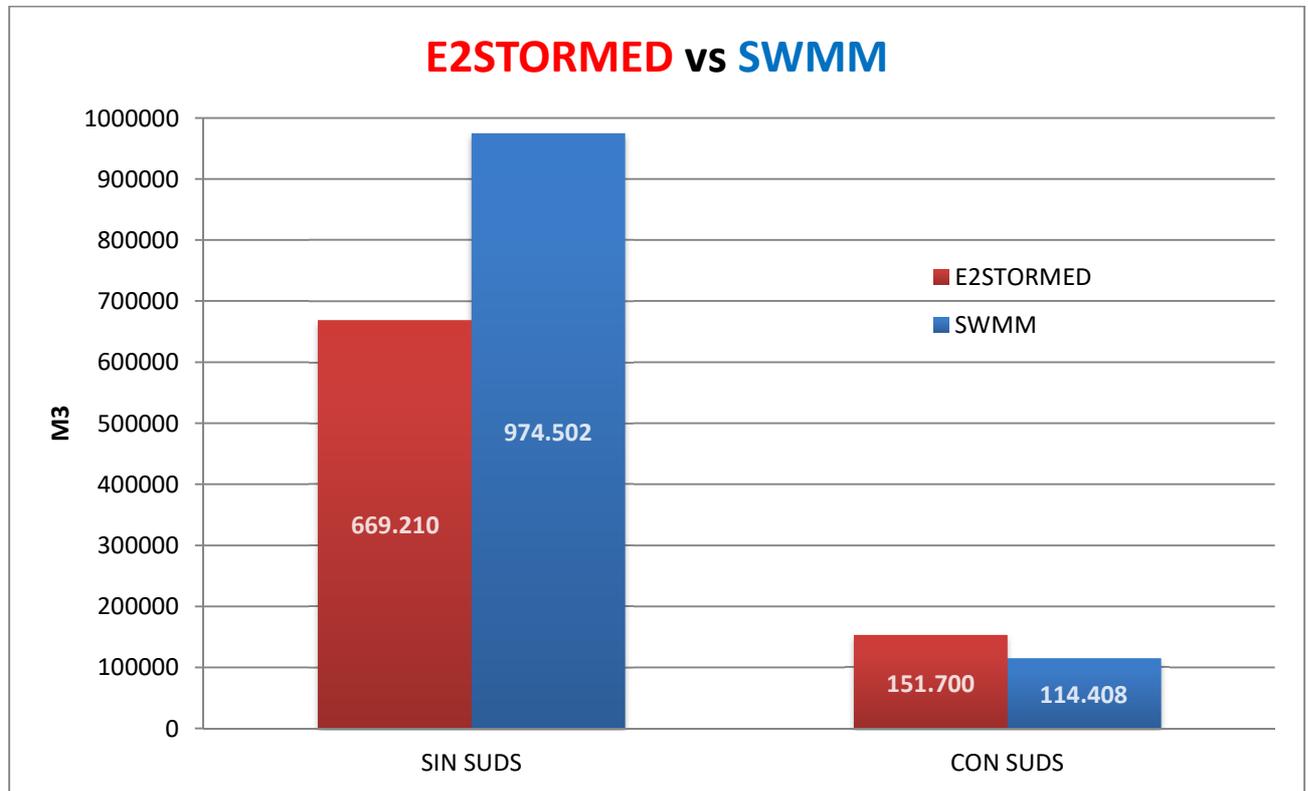


Ilustración 73. Gráfico comparativo de los resultados obtenidos para una anualidad.

6. CONCLUSIONES

Los sistemas de drenaje urbano sostenibles son elementos con gran arraigo en países del norte de Europa, sin embargo su aplicación en países con climas mediterráneos se haya dilatado en el tiempo. En el 2015 se crea el programa E2STORMED gracias al apoyo de fondos europeos como respuesta para difundir y dar a conocer las técnicas de drenaje urbano sostenible e intentar que se produzca un aumento en su uso en zonas mediterráneas.

Tras un análisis del programa se concluye que:

- La herramienta está limitada en cuanto al cálculo dado que los resultados se basan en una lluvia anual media y no se considera la variabilidad que tienen los SUDs en función de los tiempos secos y húmedos que hubieran podido experimentar antes de una precipitación.
- Los valores medios introducidos en E2STORMED podrán estar por encima o por debajo de los valores introducidos en la serie continua en el programa SWMM
- Los coeficientes del E2STORMED se consideran conservadores, por lo que se generarán menos escorrentías.

Dadas estas características se considera como programa de cálculo para la aplicación de SUDs el SWMM al poseer un sistema de cálculo que analiza por intervalos la situación de la cuenca en todo momento y puede predecir los efectos de tiempos secos.

A favor del programa E2STORMED puede deducirse su sencillez y su buena herramienta para comparar escenarios en función de los criterios como pueden ser coste de la instalación, coste de la energía, reducciones de CO₂, etc., siendo de gran utilidad para estudios preliminares estimativos y su presentación de manera sencilla ante una sociedad objetivo.

El programa E2STORMED es por tanto un programa para decisiones políticas como el mismo programa comenta y nunca debe usarse como herramienta de cálculo.

Sin duda alguna la aplicación de los SUDs en la urbanización estudiada **tiene un efecto muy positivo sobre las reducciones de escorrentías finales (88,26%)**. Gracias a esto se puede ajustar los diámetros de la red necesarios para su evacuación, la energía consumida por posibles bombeos para el tratamiento de las aguas y reducir los vertidos directos en episodios de grandes precipitaciones.

Los SUDs también **consiguen reducir los contaminantes en gran medida (98%)**, por lo que se puede considerar que esta mejora en la calidad del agua conseguirá reducir los trata-

mientos posteriores de depuración **ahorrando una gran cantidad de** energía y costes de inversión.

Medioambientalmente hablando la implementación de los SUDs conseguiría **una mejora en cuanto a reducción de contaminación por CO₂** y conseguiría una ciudad más verde, limpia y respetuosa con el medio ambiente.

Reflexión del autor:

Los efectos de los SUDs están a día de hoy más que comprobados, sin embargo, en países mediterráneos donde se producen grandes periodos de sequía seguidos de lluvias con una gran torrencialidad, hace que el mantenimiento de estas soluciones "verdes" pueda verse comprometido. Es por tanto de vital importancia, que, la aplicación monitorizada de estos sistemas de drenaje sostenibles empiece a ser una realidad, para que, de esta manera, sea posible contrastar los aciertos y errores de la teoría en su implementación práctica.

Los beneficios medioambientales de los SUDs y su grandes capacidades tanto reductoras como laminadoras de escorrentía, hacen que, estas soluciones sean el mejor aliado para una sociedad que percibe diariamente los efectos nocivos para la salud provocados por la alta contaminación aérea de las grandes ciudades, e incluso, los graves riesgos para la vida de las personas derivados de los episodios de lluvias torrenciales de los que también se deducen pérdidas económicas de gran consideración. Todo esto requiere de un compromiso político e institucional tanto para difundir y dar a conocer este tipo de sistemas, como para promover e incentivar dicha tecnología con un objetivo claro, crear ciudades más respetuosas con el medio ambiente y más amigables para los ciudadanos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Woods Ballard, B, Wilson, Udale-Clarke, H, Illman, S, Scott, T, Ashley, R ,Kellagher, R, Ciria, **The SuDs Manual**, Griffin Court, 15 Long London, Uk.
- Illman S, Wilson S, Ciria. **Guidance on the construction of SuDS**. Griffin Court, 15 Long London, Uk.
- Anta J, Puertas J, Suarez J, del Río H, Hernandez D. **Gestión de las aguas pluviales en ámbito urbano. Las técnicas de Drenaje Urbano Sostenible**. Departamento de Obras. EPE Aguas de Galicia 2012.
- Puertas, J.; suárez, J. y anta, J. **Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano**, monografía M-98, CEDEX, 600 p., 2008.
- Fuentes A. **Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles. Una alternativa de Futuro**, Universidad de Sevilla, 2 de julio de 2015.
- Consellería de medio ambiente territorio e infraestructuras. **Instruccions Técnicas para obras hidráulicas en Galicia Vol 2**. Primera Edición del 2011
- Department of Environmental Conservation , **New York State Stormwater Management Design Manual**, Enero de 2015.
- Bonilla A, **Cubiertas Vegetales**, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, Junio 2014.
- Rodríguez Antonio, **Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles. Hacia una gestión integral del ciclo urbano del agua**, E.T.S.A.M. Junio 2017.
- Singular Green, **Dossier Técnico Tejados Verdes**, 2017.
- Yesenia Andrea, **Modelización de Low Impacts a través de la nueva versión del software SWMM (V.5.1.)**, EUPLA, 30 junio 2015.
- R. Gómez Cerezo, M.L. Suárez, M.R. Vidal-Abarca. **The performance of a multi-stage system of constructed wetlands for urban wastewater treatment in a semiarid region of SE Spain**, 2001.
- **National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas**
- Christine Zimmer, **Low impact development Construction Guide**, 2012.

- **Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano.** CEDEX (2009).
- **Urban Stormwater BMP performance monitoring. American Society of Civil Engineering, U.S.Environmental Protection Agency.** ASCE-EPA. (2002).
- EPA, Lewis A.Rossman, Wayne C. Huber, **Storm Water Management Reference Manual Volumen III-Water Quality,** Julio 2016.
- EPA, Lewis A.Rossman, **Storm Water Mngement Model User´s Manual Version 5.1,** Septiembre 2015.
- Urban Water Journal, Tim D. Fletcher, William Shuster, William F. Hunt, Richard Ashley, David Butler, Scott Arthur, Sam Trowsdale, Sylvie Barraud, Annette Semadeni-Davies, Jean-Luc BertrandKrajewski, Peter Steen Mikkelsen, Gilles Rivard, Mathias Uhl, Danielle Dagenais & Maria Viklander , **SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage,** Taylor & Francis 21 abril 2015.

Zaragoza 26 de junio de 2019

El alumno redactor del proyecto

Fdo: Javier Mur Satué



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

DOCUMENTO N° 2

PLANOS

**ANÁLISIS DEL SOFTWARE E2STORMED PARA
EL DISEÑO DE SISTEMAS DE DRENAJE UR-
BANO SOSTENIBLE Y APLICACIÓN EN UN CAA-
SO DE ESTUDIO**

Autor: Javier Mur Satué

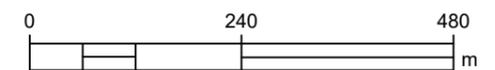
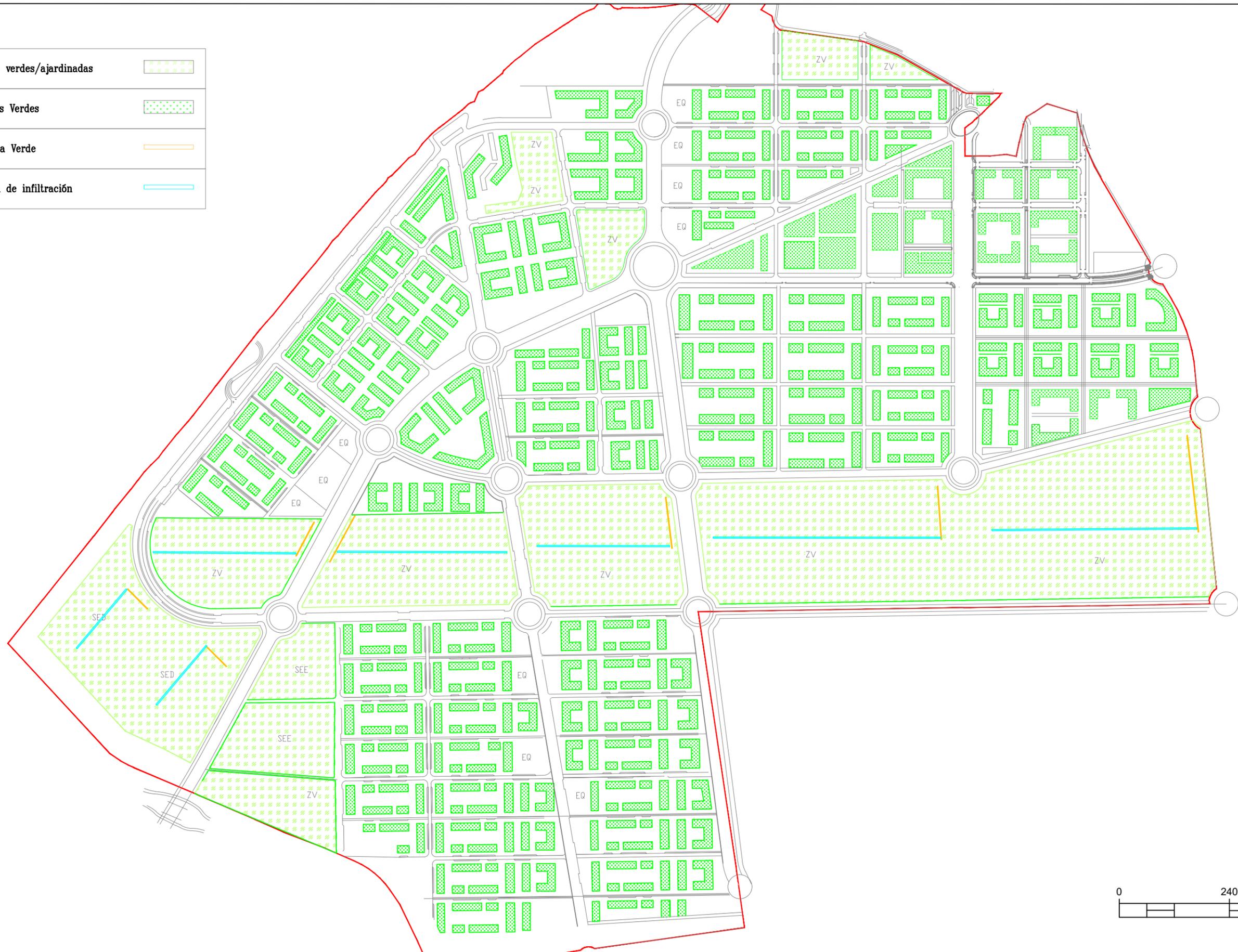
Nº	Denominación	Número de hojas
1	URBANIZACIÓN	1

Zaragoza a 26 de Junio 2019

El alumno redactor del proyecto

Fdo: Autor: Javier Mur Satué

Zonas verdes/ajardinadas	
Tejados Verdes	
Cuneta Verde	
Zanja de infiltración	



Escuela Universitaria Politécnica - La Almunia Centro adscrito Universidad Zaragoza	TRABAJO FIN DE GRADO GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	Firma del alumno	Fecha	Título del proyecto	Núm. proyecto	Denominación del plano	Escala	Núm. de plano	
		Fdo: Javier Mur Satué	07-2019	URBANIZACIÓN	1	PLANO DE PLANTA	1:8000	1	
								Hoja 001 de 1	