



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
AREA DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLE EN REDES FERROVIARIAS

AUTOR: Álvaro Álvarez Fernández

TUTOR: Luis Ángel Sañudo Fontaneda

COTUTOR: Felipe Pedro Álvarez Rabanal

SEPTIEMBRE, 2020

“Las montañas, los peñascos, las selvas y los ríos se dieron la tarea desde el principio del mundo, de cerrar el paso a los hombres y de obligar a los pueblos a permanecer aislados en medio de sus mitos, sus temores y sus anhelos siempre insatisfechos.

Hasta que las medidas y los números se incorporaron a la lucha y la inteligencia tuvo la oportunidad de encauzar el trabajo y las esperanzas de los trabajadores. Hasta que le nacieron puentes a los ríos y los instrumentos de precisión comenzaron a inaugurar el equilibrio. Hasta que el hierro y el acero estrenaron sus fuerzas, su sonido y su brillo. Hasta que las primeras escuelas de ingeniería comenzaron a ser madres de los primeros ingenieros.”

Carlos Castro Saavedra 1966

Resumen

Las redes ferroviarias son consideradas elementos vertebradores del territorio, cumpliendo con una función fundamental para el desarrollo social y económico. Sin embargo, estas infraestructuras son especialmente sensibles a las inundaciones producidas por eventos climáticos extremos, cada vez más frecuentes.

En este marco se plantea la utilización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), permitiendo los mismos adaptar las necesidades de drenaje, tanto actuales como futuras, salvaguardando las infraestructuras que componen la red ferroviaria.

La implementación de estos sistemas posibilita capturar y filtrar las escorrentías superficiales, permitiendo el control del volumen y el tratamiento de los contaminantes, pudiendo ser reutilizadas posteriormente, vertidas a cauces naturales o infiltradas al terreno para la recarga de acuíferos y mantenimiento de los niveles base.

Mientras que las ventajas de la aplicación de SUDS en la red de carreteras se encuentran presentes en numerosos artículos e investigaciones, la implementación de SUDS en el ámbito ferroviario es un campo sobre el que apenas se han realizado estudios científicos.

El objetivo final del presente documento es analizar la utilización de los SUDS dentro de las redes ferroviarias atendiendo a una serie de parámetros como son la carga contaminante, el control de la escorrentía, el estado de la infraestructura, la climatología, el objetivo final de las aguas o los costes económicos, particularizando el análisis de estos parámetros para cada elemento que conforma la red ferroviaria.

Una vez analizados todos los parámetros, se propone un árbol de decisión basado en un análisis multicriterio que sirva como apoyo o guía de recomendación a los técnicos que busquen la implantación de estas técnicas dentro de la red ferroviaria.

Por último, y de cara a facilitar la toma de decisiones de los profesionales del sector ferroviario en este campo, se implementa el árbol de decisión mediante html y Javascript en una aplicación web que actúa como asistente de diseño, recomendando la aplicación de una serie de SUDS a partir de unos parámetros de entrada indicados mediante una interfaz gráfica accesible desde múltiples dispositivos con acceso a internet.

Abstract

Railroad networks are considered backbones of the territory, fulfilling an essential function for social and economic development. Nevertheless, these infrastructures are highly sensitive to flooding produced by extreme climatic conditions, which are increasingly frequent due to the impact of climate change.

The use of Sustainable Drainage Systems (SuDS) is proposed within this framework, enabling the adaptation of drainage infrastructure to current and future requirements while preserving the railroad network.

The implementation of these systems allows capturing and filtering the surface run-off, enabling volume control and pollutant treatment, which can be subsequently reused, drained off into natural streams or infiltrated into the land for the recharge of aquifers and the maintenance of background levels.

While the advantages of SUDS application in road networks appear in numerous scientific publications, the study of the implementation of SuDS in the railroad network barely presents any research.

The final goal of the current document is to analyze the current scenario of SUDS related to the railroad network, considering a set of parameters such as the pollutant load, run-off control, infrastructure condition, climatology, the final function of the water managed through the SuDS or the economic costs, focusing on the analysis of these parameters for each element of the railroad infrastructure.

Once the parameters have been analyzed, a decision scheme that serves as support or recommendation guide for the technicians who look for the implementation of these techniques within the railroad network is presented.

Finally, the decision tree was implemented through HTML and JavaScript in a web application that functions as an assistant tool for the recommendation of a sequence of SUDS (treatment train). This tool feeds from a number of input parameters indicated through a graphic interface available from multiple devices with internet connection in order to be user friendly



Índice General

1	Objetivo y alcance.....	1
2	Introducción	2
2.1	Definición elementos red ferroviaria	2
2.1.1	Infraestructura lineal	2
2.1.2	Enclaves ferroviarios	3
2.2	Problemática del agua de lluvia en la infraestructura ferroviaria	5
2.2.1	Problemática del agua de lluvia en la infraestructura lineal	5
2.2.2	Problemática del agua de lluvia en el enclave ferroviario	6
2.3	Calidad de las aguas en la red ferroviaria	9
2.3.1	Calidad de las aguas en la infraestructura lineal.....	9
2.3.2	Calidad de las aguas en el enclave ferroviario	10
2.4	SUDS	11
2.4.1	Definición de SUD	11
2.4.2	Ventajas e inconvenientes de la aplicación de SUDS	13
3	Implementación de SUDS en la red ferroviaria.....	15
3.1	Introducción	15
3.2	Sistemas de drenaje actuales en la infraestructura ferroviaria	15
3.2.1	Sistemas de drenaje actuales en la infraestructura lineal.....	15
3.2.2	Sistemas de drenaje actuales en el entorno de la estación	16
3.3	Legislación	16
3.4	Definición de SUDS aplicables en entornos ferroviarios	20
3.4.1	Alcorques estructurales.....	20
3.4.2	Cubiertas verdes.....	24
3.4.3	Cunetas verdes	28
3.4.4	Depósitos	32
3.4.5	Depósitos de infiltración.....	36
3.4.6	Estanques de detención (húmedos)	40
3.4.7	Estanques de detención (secos)	44
3.4.8	Áreas de biorretención	48
3.4.9	Filtros de arena.....	52
3.4.10	Humedal artificial.....	55
3.4.11	Pavimentos permeables	59
3.4.12	Pozos de infiltración	63



3.4.13	Zanjas de infiltración.....	66
4	Desarrollo de la herramienta multicriterio de selección de SUDS para redes ferroviarias ..	70
4.1	Metodología de desarrollo de la herramienta	70
4.1.1	Carga contaminante	70
4.1.2	Control de la escorrentía	73
4.1.3	Estado de la infraestructura	75
4.1.4	Trenes de tratamiento y combinación de SUDS	76
4.1.5	Climatología.....	77
4.1.6	Objetivo	79
4.1.7	Economía.....	80
4.2	Valoración de los SUDS recomendados en cada elemento de la infraestructura	81
4.2.1	Infraestructura lineal	82
4.2.2	Enclave ferroviario.....	83
4.3	Diagramas de flujo para la selección	88
4.3.1	Funcionamiento del árbol de decisión.....	88
4.3.2	Infraestructura lineal	90
4.3.3	Apartadero.....	91
4.3.4	Cargadero	92
4.3.5	Estación	93
4.3.6	Apeadero	98
4.3.7	Terminal de mercancías.....	103
5	Elaboración de aplicación web	108
6	Conclusiones.....	113
7	Valoración económica del trabajo realizado.....	114
7.1	Informática	114
7.2	Personal.....	116
7.3	Gastos generales	116
7.4	Valoración económica del proyecto	116
	REFERENCIAS	117



Índice de figuras

Figura 1. Superestructura Ferroviaria (Fuente: Cadena SER 2020).....	2
Figura 2. Estación ferroviaria de Canfranc (Fuente: Distrito Castellana Norte Madrid).....	3
Figura 3. Apeadero Ferroviario del EL ROMANI (Fuente: Flickr)	4
Figura 4. Terminal de mercancías de Barcelona-Can Tunis (Fuente: Trenesmania)	4
Figura 5. Descarrilamiento tren Málaga - Sevilla (Fuente: El Periódico de Extremadura, 2019)....	5
Figura 6. Agua inutiliza la red Feve (Fuente: El Comercio, 2019).....	6
Figura 7. Inundaciones en Asturias (Fuente: La Nueva España, 2020).....	6
Figura 8. Efecto isla de calor (Fuente: ISGlobal)	7
Figura 9. Corte en la línea ferroviaria Castellón-Tarragona a su paso por Vinaròs debida a la gota fría (Fuente: El Periódico Mediterráneo, 2018)	8
Figura 10. Túnel del AVE anegado (Comunidad Valenciana 2019) (Fuente: Las provincias 2019). 8	
Figura 11. WSUD (Fuente: Toowoomba Region)	11
Figura 12. Efectos del tratamiento convencional del agua de lluvia (Fuente: Elaboración propia)	12
Figura 13. Pilares de diseño de los SUDS (Fuente: Elaboración propia adaptado de (Woods Ballard et al. 2015))	13
Figura 14. Ejemplo de aplicación Alcorque estructural (Fuente: Pinterest).....	20
Figura 15. Usos de los Alcorques estructurales (Fuente: Elaboración propia).....	21
Figura 16. Funciones Alcorques estructurales (Fuente: Elaboración propia).....	22
Figura 17. Absorción de contaminantes Alcorques estructurales (Fuente: Elaboración propia). 23	
Figura 18. Ejemplo de aplicación Cubiertas verdes (Fuente: Isopan)	24
Figura 19. Usos de las Cubiertas verdes (Fuente: Elaboración propia).....	25
Figura 20. Funciones Cubiertas verdes (Fuente: Elaboración propia)	26
Figura 21. Absorción de contaminantes en las Cubiertas verdes (Fuente: Elaboración propia).. 26	
Figura 22. Ejemplo de aplicación Cunetas vegetadas (Fuente: Pinterest)	28
Figura 23. Usos Cunetas verdes (Fuente: Elaboración propia)	29
Figura 24. Funciones Cunetas verdes (Fuente: Elaboración propia).....	30
Figura 25. Absorción de contaminantes Cunetas verdes (Fuente: Elaboración propia)	30
Figura 26. Ejemplo de aplicación Depósito (Fuente: El Mundo 2012)	32
Figura 27. Usos Depósitos (Fuente: Elaboración propia).....	33
Figura 28. Funciones Depósitos (Fuente: Elaboración propia)	34
Figura 29. Absorción de contaminantes Depósitos (Fuente: Elaboración propia).....	35
Figura 30. Ejemplo de aplicación Depósito de infiltración (Fuente: Pinterest)	36
Figura 31. Usos Depósitos de infiltración (Fuente: Elaboración propia).....	37
Figura 32. Funciones Depósitos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)	38
Figura 33. Absorción de contaminantes Depósitos de infiltración (Fuente: Elaboración propia) 39	
Figura 34. Ejemplo de aplicación Estanque de detención (húmedos) (Fuente: SuD Sostenible). 40	
Figura 35. Usos Estanques de detención (húmedos) (Fuente: Elaboración propia)	41
Figura 36. Funciones Estanques de detención (húmedos) (Fuente: Elaboración propia).....	42
Figura 37. Absorción de contaminantes Estanques de detención (húmedos) (Fuente: Elaboración propia)	43
Figura 38. Ejemplo de aplicación Estanque de detención (Seco) (Fuente: SuD Sostenible)	44
Figura 39. Usos Estanques de detención (secos) (Fuente: Elaboración propia)	45
Figura 40. Funciones Estanques de detención (secos) (Fuente: Elaboración propia).....	46



Figura 41. Absorción de contaminantes Estanques de detención (secos) (Fuente: Elaboración propia) 47

Figura 42. Ejemplo de aplicación Área de biorretención (Fuente: Pinterest) 48

Figura 43. Usos Área de biorretención (Fuente: Elaboración propia)..... 49

Figura 44. Funciones Áreas de biorretención (Fuente: Elaboración propia)..... 50

Figura 45. Absorción de contaminantes Áreas de biorretención (Fuente: Elaboración propia) .. 51

Figura 46. Usos Filtros de arena (Fuente: Elaboración propia) 52

Figura 47. Funciones Filtros de arena (Fuente: Elaboración propia) 53

Figura 48. Absorción de contaminantes Filtros de arena (Fuente: Elaboración propia) 54

Figura 49. Ejemplo de aplicación Humedal artificial (Fuente: Pinterest) 55

Figura 50. Usos Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia)..... 56

Figura 51. Funciones Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia) 57

Figura 52. Absorción de contaminantes Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia).... 58

Figura 53. Ejemplo de aplicación Pavimentos permeables (Fuente: Pinterest)..... 59

Figura 54. Usos Pavimentos permeables (Fuente: Elaboración propia) 60

Figura 55. Funciones Pavimentos permeables (Fuente: Elaboración propia) 61

Figura 56. Absorción de contaminantes Pavimentos permeables (Fuente: Elaboración propia) 62

Figura 57. Usos Pozos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)..... 63

Figura 58. Funciones Pozos infiltración (Fuente: Elaboración propia) 64

Figura 59. Absorción de contaminantes Pozos de infiltración (Fuente: Elaboración propia) 65

Figura 60. Ejemplo aplicación Zanjas filtrantes (Fuente: Pinterest)..... 66

Figura 61. Usos Zanjas de infiltración (Fuente: Elaboración propia)..... 67

Figura 62. Funciones Zanjas de infiltración (Fuente: Elaboración propia) 68

Figura 63. Absorción de contaminantes Zanjas de infiltración (Fuente: Elaboración propia)..... 69

Figura 64. Clasificación climática según Köppen (Fuente: Instituto Geográfico Nacional) 77

Figura 65. Índices de torrencialidad en España (Fuente (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo 1990)) 78

Figura 66. Árbol de decisión infraestructura lineal (Fuente: Elaboración propia). 90

Figura 67. Árbol de decisión apartadero (Fuente: Elaboración propia). 91

Figura 68. Árbol de decisión cargadero (Fuente: Elaboración propia)..... 92

Figura 69. Árbol de decisión estación (Fuente: Elaboración propia). 93

Figura 70. ES01 (Fuente: Elaboración propia)..... 94

Figura 71. ES02 (Fuente: Elaboración propia)..... 95

Figura 72. ES03 (Fuente: Elaboración propia)..... 96

Figura 73. ES04 (Fuente: Elaboración propia)..... 97

Figura 74. Árbol de decisión apeadero (Fuente: Elaboración propia)..... 98

Figura 75. AP01 (Fuente: Elaboración propia). 99

Figura 76. AP02 (Fuente: Elaboración propia). 100

Figura 77. AP03 (Fuente: Elaboración propia). 101

Figura 78. AP04 (Fuente: Elaboración propia). 102

Figura 79. Árbol de decisión terminal de mercancías (Fuente: Elaboración propia). 103

Figura 80. TM01 (Fuente: Elaboración propia). 104

Figura 81. TM02 (Fuente: Elaboración propia). 105

Figura 82. TM03 (Fuente: Elaboración propia). 106

Figura 83. TM04 (Fuente: Elaboración propia). 107

Figura 84. Código QR (Fuente: Elaboración propia)..... 108



Figura 85. Portada de la aplicación (izquierda versión móvil, derecha versión escritorio) (Fuente: Elaboración propia).	109
Figura 86. Resumen de la aplicación I (Fuente: Elaboración propia).	109
Figura 87. Resumen de la aplicación III (Fuente: Elaboración propia).	110
Figura 88. Resumen de la aplicación IV (Fuente: Elaboración propia).	110
Figura 89. Resumen aplicación V (Fuente: Elaboración propia).....	111
Figura 90. Resumen aplicación VI (Fuente: Elaboración propia).....	111
Figura 91. Resumen aplicación VII (Fuente: Elaboración propia).....	112



Índice de tablas

Tabla 1. Principales contaminantes producidos por el funcionamiento de la infraestructura ferroviaria (Burkhardt et al. 2008)	9
Tabla 2. Limitaciones de diseño Alcorques estructurales (Fuente: Elaboración propia).....	21
Tabla 3. Limitaciones de diseño Cubiertas verdes (Fuente: Elaboración propia).....	25
Tabla 4. Limitaciones de diseño Cunetas verdes (Fuente: Elaboración propia).....	29
Tabla 5. Limitaciones de diseño Depósitos (Fuente: Elaboración Propia).....	33
Tabla 6. Limitaciones de diseño Depósitos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)	37
Tabla 7. Limitaciones de diseño Estanques de detención (húmedos) (Fuente: Elaboración propia)	41
Tabla 8. Limitaciones de diseño Estanques de detención (Secos) (Fuente: Elaboración propia). 45	
Tabla 9. Limitaciones de diseño Áreas de biorretención (Fuente: Elaboración propia).....	49
Tabla 10. Limitaciones de diseño Filtros de arena (Fuente: Elaboración propia)	52
Tabla 11. Limitaciones de diseño Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia)	56
Tabla 12. Limitaciones de diseño Pavimentos permeables (Fuente: Elaboración propia)	60
Tabla 13. Limitaciones de diseño Pozos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)	64
Tabla 14. Limitaciones de diseño Zanjias de infiltración (Fuente: Elaboración Propia)	67
Tabla 15. Desempeño de los distintos tipos de SUDS frente a los distintos contaminantes (Fuente: adaptado de (Jiménez Ariza et al. 2019)).....	70
Tabla 16. Desempeño de los distintos SUDS en el control de la escorrentía (Fuente: adaptado de (Jiménez Ariza et al. 2019)).....	73
Tabla 17. Compatibilidad de los SUDS con estaciones secas.	78
Tabla 18. Valoración de los diferentes SUDS en función del riesgo de colmatación y los costes (Fuente: adaptado de (Jiménez Ariza et al. 2019))	80
Tabla 19. Aplicación de SUDS dentro de la infraestructura lineal (Fuente: Elaboración propia) .	82
Tabla 20. Aplicación de SUDS dentro de la Estación (Fuente: Elaboración propia)	83
Tabla 21. Aplicación de SUDS en Apartaderos (Fuente: Elaboración propia)	84
Tabla 22. Aplicación de SUDS en Apeaderos (Fuente: Elaboración propia)	85
Tabla 23. Aplicación de SUDS dentro en Cargaderos (Fuente: Elaboración propia)	86
Tabla 24. Aplicación de SUDS en Terminales de mercancías (Fuente: Elaboración propia)	87
Tabla 25. Valoración económica Hardware empleado.	115
Tabla 26. Valoración económica Software empleado.....	115
Tabla 27. Valoración económica tiempo empleado.....	116
Tabla 28. Valoración económica del trabajo realizado.	116
Tabla 29. Fuentes de las figuras y fecha de acceso a las mismas.....	119



1 Objetivo y alcance

El objetivo del presente trabajo consiste en analizar y estudiar la implantación de sistemas de drenaje sostenible (SUDS) en redes ferroviarias, haciendo referencia tanto a la infraestructura lineal como a las instalaciones o enclaves ferroviarios necesarios para el funcionamiento del sistema.

En este trabajo, se plantea la realización de una guía para la implementación de técnicas de drenaje sostenible que permitan imitar el ciclo hidrológico del agua mejorando el comportamiento hidráulico del sistema y la carga contaminante de las aguas procedentes de la escorrentía superficial.

En este proyecto se tratarán, de forma claramente diferenciada, la Infraestructura Lineal (Infraestructura y Superestructura) y los Enclaves Ferroviarios (estaciones, apartaderos, apeaderos, cargaderos y terminales de mercancías), dadas las diferencias existentes entre ambos apartados en geometría, situación y problemas asociados a los mismos.

El primer paso para la consecución de estos objetivos será el estudio de los problemas asociados a la gestión del agua de lluvia, tanto en cómo afectan estructuralmente al sistema como en los contaminantes que arrastran. Con esto se pretende contextualizar el problema de cara a proponer soluciones que permitan obtener mejoras tanto en el funcionamiento hidráulico de los sistemas como en la calidad de las aguas, a la par que lograr un enriquecimiento de la biodiversidad alineado con los objetivos fijados por la Agenda 2030 (Gobierno de España 2018)

Una vez definida la problemática a tratar, se analizarán los diferentes tipos de SUDS teniendo en cuenta su funcionamiento, finalidad, ventajas e inconvenientes de los mismos, de forma que permita evaluar posteriormente la posibilidad de su implantación en redes ferroviarias.

Tras la definición de los diferentes SUDS, se valorará la aplicación de cada uno de ellos dentro de los diferentes elementos de la red ferroviaria sometidos a análisis en función de distintos parámetros, como pueden ser la climatología de la zona de estudio, la población o el estado actual del sistema.

Por último, se desarrollará una herramienta gráfica que permita a los profesionales del sector ferroviario la toma de decisiones de una manera rápida y efectiva sobre la implementación de los SUDS en las diferentes áreas de la red ferroviaria en base a los distintos parámetros estudiados en este trabajo:

- Carga contaminante presente en las aguas de escorrentía.
- Control de las aguas de escorrentía.
- Estado de la infraestructura.
- Climatología.
- Destino final de las aguas (Infiltración, reutilización o vertido a cauce natural).
- Factores económicos.

2 Introducción

En este apartado se llevará a cabo una definición de los elementos del sistema sobre los que se pretende actuar, definiéndose a su vez las problemáticas asociadas al agua de lluvia acaecidas sobre los mismos.

Por último, se realizará una introducción a los SUDS como posible solución a estos problemas.

2.1 Definición elementos red ferroviaria

Como se mencionó con anterioridad, la elaboración de este trabajo considerará dos grandes ámbitos de actuación para las medidas propuestas, la infraestructura lineal y los enclaves ferroviarios. Esta segmentación se corresponde con las grandes diferencias que existen en las necesidades de gestión y tratamiento de las aguas de lluvia en ambos ámbitos.

La definición de los elementos que se van a analizar a continuación, así como su agrupación, vienen recogidos en las definiciones publicadas por Adif (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) en la declaración sobre la red (Adif 2020).

2.1.1 Infraestructura lineal

El primer ámbito de aplicación del proyecto corresponde a la infraestructura lineal compuesta principalmente por la superestructura.

La superestructura comprende la vía propiamente dicha, así como el conjunto de aparatos e instalaciones que garanticen la circulación de los trenes en condiciones de eficacia y seguridad.

La superestructura está compuesta en primer lugar por la vía con sus correspondientes componentes (Carril, traviesas, balasto, tirafondos y placas de asiento). A la vía como tal, es necesario sumarle los aparatos de vía, los cambios de aguja las señales, así como los elementos de electrificación del sistema.

Como se puede apreciar, este primer ámbito de aplicación corresponde a elementos con un carácter lineal, claramente extensivo y que transcurren por zonas no urbanizadas.

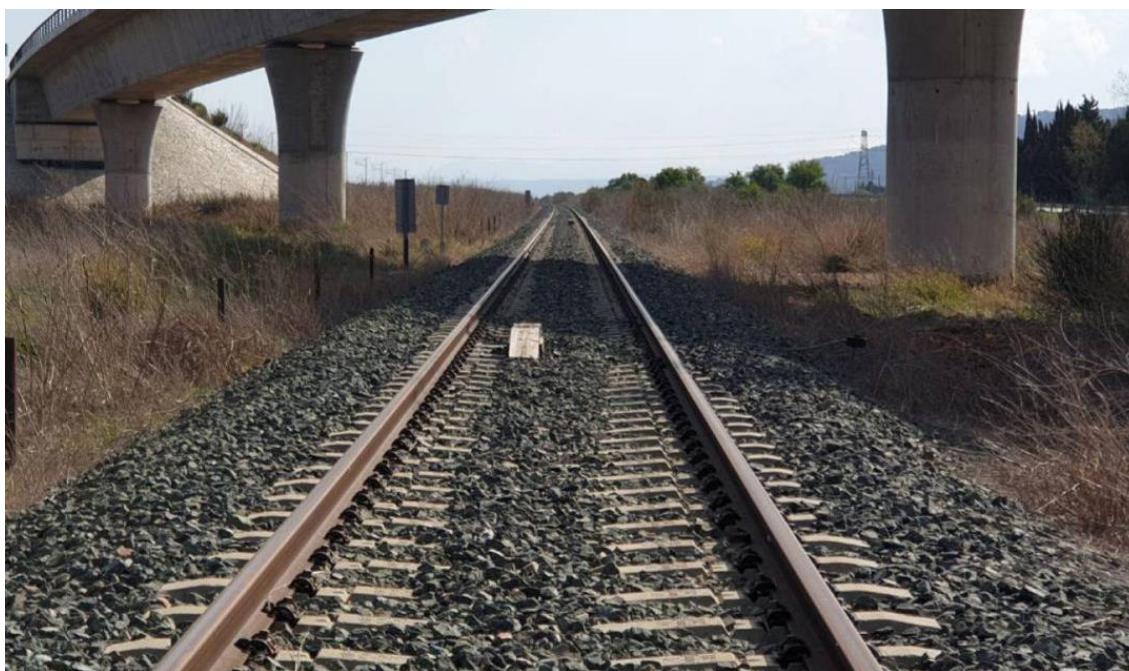


Figura 1. Superestructura Ferroviaria (Fuente: [Cadena SER 2020](#))

2.1.2 Enclaves ferroviarios

Por otro lado, el segundo ámbito de aplicación de los SUDS en la infraestructura ferroviaria corresponde a los enclaves ferroviarios, que constituyen las instalaciones necesarias para el funcionamiento del sistema, recibiendo diferentes denominaciones en función del nivel de prestaciones (estaciones, apeaderos, apartaderos, cargaderos y terminales de mercancía).

2.1.2.1 Estación

La estación es el conjunto de instalaciones de vías y agujas desde las que se coordina el tráfico ferroviario, incluyendo el tráfico de viajeros y el de mercancías dando servicio a todos los tipos de usuarios de ferrocarril.



Figura 2. Estación ferroviaria de Canfranc (Fuente: [Distrito Castellana Norte Madrid](#))

2.1.2.2 Apartadero

Los apartaderos consisten en pequeñas estaciones con poco tráfico de viajeros cuyo objetivo fundamental es la regulación del tráfico ferroviario, permitiendo la realización de cruces de trenes, adelantamientos, etc.

2.1.2.3 Apeadero

Los apeaderos son dependencias con servicio exclusivo para la subida y bajada de viajeros, carecen de personal siendo habituales en los grandes núcleos de población.



Figura 3. Apeadero Ferroviario del EL ROMANI (Fuente: [Flickr](#))

2.1.2.4 Cargadero

Son instalaciones de vías para la carga y descarga de vagones con enlace a una línea mediante una o más agujas de plena vía.

2.1.2.5 Terminales de mercancías

Son estaciones cuyo objetivo principal es la prestación de servicios de mercancías. Las terminales de mercancías disponen de todas las instalaciones necesarias para la recepción, clasificación, formación y expedición de los trenes de mercancías convencionales que circulan entre ellas y otros destinos nacionales e internacionales.



Figura 4. Terminal de mercancías de Barcelona-Can Tunis (Fuente: [Trenesmania](#))

Como se puede apreciar, los enclaves ferroviarios a diferencia de la superestructura son elementos con un carácter puntual, situados por norma general en entornos urbanos.

2.2 Problemática del agua de lluvia en la infraestructura ferroviaria

En este apartado pasará a describirse la problemática asociada a las aguas de lluvia haciendo una diferenciación que será recurrente a lo largo del presente estudio entre los dos ámbitos de aplicación descritos anteriormente.

2.2.1 Problemática del agua de lluvia en la infraestructura lineal

Los sistemas de drenaje en la actualidad en la infraestructura lineal pueden resultar deficientes provocando interrupciones en el servicio o accidentes en periodos de grandes precipitaciones (Figura 5 y Figura 6).

Las precipitaciones pueden tener un efecto devastador sobre la infraestructura lineal. En el caso de las inundaciones leves, éstas pueden provocar fenómenos de surgencia o de contaminación del balasto, mientras que en los casos de inundaciones más graves estas pueden implicar la destrucción de la infraestructura.

Dado que las labores de rehabilitación o reparación de la vía tienden a producir cortes en el servicio y tiempos de reparación superiores a los de reparaciones de carreteras o elementos singulares, las labores de rehabilitación o reparación de la infraestructura lineal tienen asociados unos altos costes. Este fue el caso del temporal Gloria durante el año 2020, cuyas inundaciones provocaron el corte del servicio durante más de 6 meses en la línea ferroviaria entre Blanes y Malgrat, con un coste estimado de las reparaciones de más de 5 millones de euros (el Periódico 2020).

35 pasajeros heridos al descarrilar el tren Málaga-Sevilla por las lluvias

El convoy se salió de las vías a la altura de Arahal por una balsa de agua y lodo



Estado en que quedó la vía del ferrocarril tras el descarrilamiento. - EFE / RAÚL CARO

Figura 5. Descarrilamiento tren Málaga - Sevilla (Fuente: [El Periódico de Extremadura, 2019](#))

El agua inutiliza toda la red de Feve



La línea de Feve en Moreda discurre como un arroyo. / JESÚS MANUEL PARDO

Figura 6. Agua inutiliza la red Feve (Fuente: [El Comercio, 2019](#))

Como se puede comprobar se hace necesaria la toma de medidas que sean capaces de garantizar el correcto funcionamiento hidráulico del sistema con el fin de salvaguardar la infraestructura.

2.2.2 Problemática del agua de lluvia en el enclave ferroviario

Tal y como se describió en el apartado correspondiente, el enclave ferroviario hace referencia a una serie de instalaciones situadas en zonas urbanizadas siendo por tanto los problemas asociados al agua de lluvia los característicos de los entornos urbanos.

2.2.2.1 Aumento de las escorrentías superficiales

La impermeabilización de los entornos urbanos genera un aumento de las escorrentías superficiales provocando una rápida concentración del agua precipitada en breves periodos de tiempo generando inundaciones y avenidas.

La intensa lluvia ocasiona inundaciones en varios puntos de Asturias

Grado, Arriondas y Oviedo, entre las principales zonas afectadas por una tromba de madrugada

Arriondas (Parres), Grado / Belmonte, J. M. C. / L. Á. V. / M. R. | 11.05.2020 | 00:40

Figura 7. Inundaciones en Asturias (Fuente: [La Nueva España, 2020](#))

2.2.2.2 Contaminación Difusa

Las precipitaciones arrastran los contaminantes presentes en la atmosfera de las ciudades, a esto se suma que el agua al no quedar retenida en la superficie por la ausencia de fenómenos naturales de filtración e infiltración se realiza una limpieza de las superficies impermeables dando como resultado agua con cargas contaminantes de:

- Sólidos en suspensión.
- Materia orgánica.
- Metales pesados.
- Hidrocarburos.

2.2.2.3 Catalizador del cambio climático

La desnaturalización del suelo y su sustitución por firmes asfálticos en gran parte del entorno urbano aceleran el cambio climático empeorando la calidad del aire y fomentando la aparición del efecto isla de calor en la parte central de las ciudades, donde se alcanzan varios grados de temperatura más que en los alrededores.

Islas de calor y cómo nos afectan



Figura 8. Efecto isla de calor (Fuente: [ISGlobal](#))

También actúa como catalizador del cambio climático la pérdida del valor de agua de lluvia, siendo necesario su tratamiento en las estaciones de depuración (EDARs) para su posterior utilización o vertido a cauce natural con el coste energético que esto conlleva.

2.2.2.4 Falta de servicio

Los casos anteriores, con las carencias funcionales implícitas a la problemática existente, generan una falta de comodidad y seguridad en la sociedad lo que implica una serie de problemas sociales.



Figura 9. Corte en la línea ferroviaria Castellón-Tarragona a su paso por Vinaròs debida a la gota fría (Fuente: [El Periódico Mediterráneo, 2018](#))

El túnel del AVE se anega a su paso por la Font de la Figuera



La Font de la Figuera. El túnel del AVE totalmente anegado por el agua. / LP

Figura 10. Túnel del AVE anegado (Comunidad Valenciana 2019) (Fuente: [Las provincias 2019](#))

2.3 Calidad de las aguas en la red ferroviaria

La calidad de las aguas pluviales recogidas en las inmediaciones de las redes ferroviarias estará afectada por el uso de las mismas.

2.3.1 Calidad de las aguas en la infraestructura lineal

Los principales contaminantes presentes en las aguas de escorrentía superficial captadas en las inmediaciones de la infraestructura lineal se pueden encontrar los elementos indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales contaminantes producidos por el funcionamiento de la infraestructura ferroviaria (Burkhardt et al. 2008)

Sustancia	Emisión		Fuente de polución
	tn/año	g/km	
Hierro	2176	302000	Tirantes, vías, ruedas
Cobre	46,6	6480	Líneas de contacto, frenos
Zinc	19,8	2750	Galvanización
Manganeso	15,5	2170	Frenos GG, vías, ruedas
Cromo	6,9	960	Vías, frenos GG
Níquel	0,4	50	Ruedas
Vanadio	0,06	8,5	Ruedas
Plomo	0,003	0,5	Frenos S
Antimonio	0,003	0,5	Frenos S
Cadmio	0,002	0,3	Galvanización
Aglutinante	21	2900	Frenos C
Hidrocarburos	1357	176800	Traviesas de madera, pérdidas de lubricación, cambios de agujas, bridas de ruedas
Glifosato	3,9	540	Control de la vegetación

La tabla anterior (Tabla 1), es fruto de un estudio publicado en 2008 que recoge las emisiones de contaminantes más importantes de los ferrocarriles suizos por lo que se considera que los contaminantes producidos en España serán similares.

En general se puede apreciar como la gran mayoría de contaminantes fruto de la explotación de la red ferroviaria corresponden a metales pesados, por tanto, será de especial relevancia la implantación de SUDS o trenes de tratamiento capaces de controlar estos contaminantes.

Tiene especial relevancia el caso del Glifosato (N-fosfonometilglicina, C₃H₈NO₅P, CAS 1071-83-6), al tratarse de un herbicida de amplio espectro que está contaminando la mayoría de los cauces naturales españoles y estar considerado como una sustancia cancerígena.

Este herbicida está demostrado también que reduce la efectividad de los SUDS (Charlesworth et al. 2014).



2.3.2 Calidad de las aguas en el enclave ferroviario

Estas estarán sometidas a la misma carga contaminante que las infraestructuras lineales, si bien el carácter urbano de los diferentes enclaves ferroviarios añade a los anteriormente citados los contaminantes habituales en el entorno urbano.

2.3.2.1 *Sólidos en suspensión*

Los sólidos en suspensión están formados por partículas sólidas, de naturaleza heterogénea que llevan asociada una gran carga contaminante (Materia orgánica, nitrógeno, fosforo). Los sólidos en suspensión aparecen con gran frecuencia aportando turbidez al agua.

Las principales fuentes de estos contaminantes son:

- Aguas domésticas e industriales.
- Materiales sólidos erosionables de la cuenca urbana.
- Deposiciones atmosféricas en tiempo seco.

Los efectos de una elevada concentración de sólidos en suspensión en la escorrentía del medio receptor son:

- Un incremento de la turbidez reduciendo el paso de la luz y alterando el desarrollo de la vegetación (algas).
- La acumulación de fangos en zonas de fondo, lo que altera la morfología de los cauces.
- Afectaciones a la fauna y alteraciones estéticas del medio.

2.3.2.2 *Materia orgánica*

Está compuesta por elementos naturales como pueden ser proteínas, hidratos de carbono, aceites y grasas. A esto también le pueden acompañar elementos sintéticos como detergentes, pesticidas y disolventes orgánicos.

La aparición de materia orgánica en los cauces puede provocar graves problemas al hacer desaparecer el oxígeno en el medio receptor, pudiendo suponer la muerte para la fauna local, además de aportar color, sabor y olor al agua, cuando ésta no debería de tenerlos. Por último, pueden provocar la aparición de trihalometanos, sustancias con una elevada toxicidad.

Los parámetros utilizados para medir su presencia en masas de agua son la DBO (Demanda bioquímica de oxígeno) o DQO (Demanda química de oxígeno).

2.3.2.3 *Elementos patógenos*

Consisten en microorganismos y virus procedentes de los deshechos de las aves y animales domésticos que se acumulan en zonas impermeables. Los patógenos provocan la insalubridad de las aguas que los contiene, pudiendo provocar la transmisión de enfermedades.

2.3.2.4 *Nutrientes*

Dentro de estos elementos contaminantes están incluidos el fósforo, el nitrógeno y sus compuestos derivados. El problema asociado a la aparición de nutrientes en las escorrentías urbanas viene dado por promover la aparición de problemas de eutrofización.

2.3.2.5 Metales pesados

La principal característica de los metales pesados presentes en los cauces es su elevada toxicidad sobre microorganismos, plantas y animales (incluyendo el ser humano). Las concentraciones de metales pesados son muy variables, estando influenciadas por los usos de la cuenca urbana, la densidad del tráfico y las emisiones de industrias cercanas. Los metales pesados más problemáticos en las aguas de escorrentía son: As, Hg, Bo, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr y Zn, que además son altamente tóxicos.

2.3.2.6 Otros compuestos tóxicos

Se engloban dentro de este grupo los compuestos plásticos, aromáticos derivados del benceno, herbicidas, cloruros, hidrocarburos (gasolinas y otros derivados del petróleo).

2.4 SUDS

“El crecimiento de población que registran numerosas ciudades supondrá numerosos desafíos para ellas, en cuanto a atender las necesidades de sus habitantes tanto en vivienda, como en infraestructura, transporte y la provisión de servicios básicos.” (Department of Economic and Social Affairs 2014).

Por tanto, se hace necesaria la búsqueda de soluciones comprometidas con el medio ambiente que gestionen de manera eficiente el agua de lluvia protegiendo los acuíferos frente a la escorrentía urbana y sus contaminantes. Considerando tanto la población actual como la población horizonte, al ser las infraestructuras ferroviarias elementos clave en el desarrollo urbano e hitos dentro del urbanismo de las propias ciudades.

2.4.1 Definición de SUD

El diseño urbano sensible al agua WSUD (por sus siglas en inglés Sensitive Urban Design) es el proceso de integrar la gestión del ciclo del agua en el entorno urbano ya construido a través del planteamiento y del diseño urbano (Ashley et al. 2015).

WATER SENSITIVE URBAN DESIGN

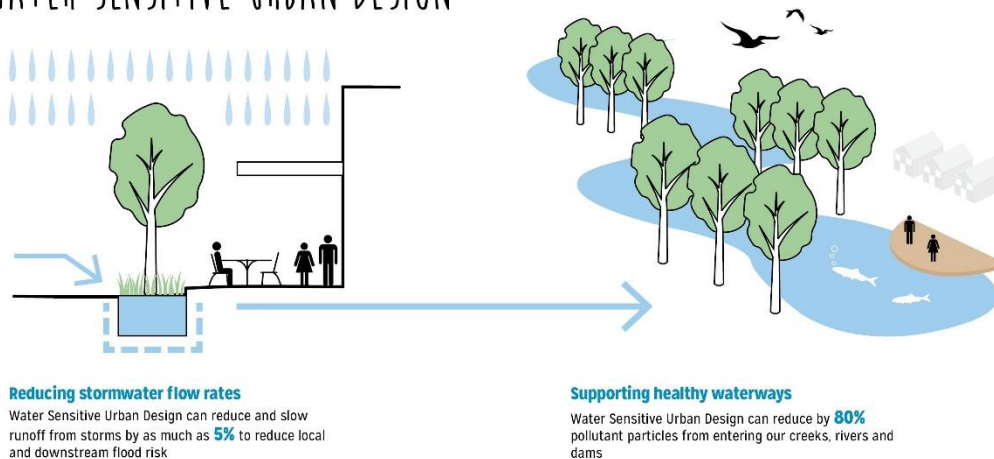


Figura 11. WSUD (Fuente: [Toowoomba Region](#))

El aumento de las zonas impermeables mencionado anteriormente conduce a una alteración del ciclo hidrológico, donde la ausencia de procesos hidrológicos como son la infiltración y la filtración lleva a un sobredimensionamiento de los sistemas de saneamiento urbanos, así como de las estaciones de tratamiento de agua que deben a su vez tratar aguas afectadas por contaminación difusa (contaminantes que son arrastrados por el agua producto del aumento de la escorrentía).

Con las medidas que se propondrán a lo largo de este documento se busca paliar los efectos producidos por una mala gestión del agua de lluvia. Estos efectos pueden clasificarse a su vez en 3 grandes grupos (Sociales, Medio Ambientales y Económicos).



Figura 12. Efectos del tratamiento convencional del agua de lluvia (Fuente: Elaboración propia)

Los efectos producto de este tratamiento convencional son los siguientes:

Sociales:

- Inseguridad ciudadana.
- Incomodidad (charcos, cortes de circulación etc.).
- Falta de estética.
- Pérdida del valor del agua de lluvia.

Medio Ambientales:

- Ruptura del ciclo natural del agua.
- Aumento de la contaminación física, química y térmica.
- Falta de estética.
- Pérdida del valor del agua de lluvia.

Económicos:

- Volúmenes de agua cada vez mayores.
- Mantenimiento de infraestructuras de drenaje.
- Reparación de daños causados por inundaciones.
- Compensaciones.

El drenaje convencional tiene una visión claramente jerarquizada, donde prima la cantidad, posteriormente la calidad, y por último el servicio.

En comparativa, el diseño urbano sensible al agua plantea una visión de igualdad entre las características anteriores.

Con ese fin las propuestas que se analizarán y propondrán a lo largo de este TFM estarán basadas en los cuatro pilares del diseño de los SUDS (Cantidad, Calidad, Comodidad y Biodiversidad).

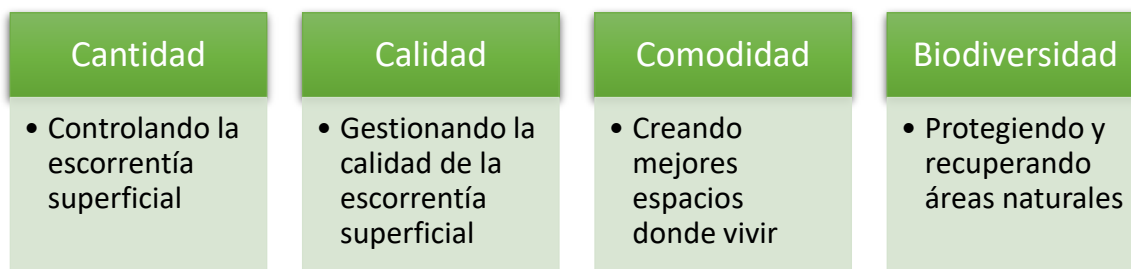


Figura 13. Pilares de diseño de los SUDS (Fuente: Elaboración propia adaptado de (Woods Ballard et al. 2015))

2.4.2 Ventajas e inconvenientes de la aplicación de SUDS

A continuación, pasarán a describirse las principales ventajas e inconvenientes de la utilización de los SUDS.

2.4.2.1 Ventajas

En cuanto a las ventajas sobre la utilización de estos sistemas podemos agrupar las mismas en 5 grandes grupos.

2.4.2.1.1 Ventajas hidrológicas

- Prevención contra inundaciones.
- Mantenimiento o restauración del flujo natural en corrientes urbanas.
- Menor interferencia en los regímenes naturales de las masas de agua receptoras, tanto en calidad como en cantidad.
- Recarga de acuíferos subterráneos, restituyendo el flujo subterráneo hacia los cursos naturales.

2.4.2.1.2 Ventajas paisajísticas

- Creación de entornos naturales con un alto valor paisajístico.
- Mejora de la calidad estética de las zonas urbanas, aumentando el valor de las zonas residenciales.

2.4.2.1.3 Ventajas ambientales

- Mejora la calidad de las aguas de escorrentía.
- Reducción de los contaminantes que llegan al medio receptor.
- Enriquecimiento de la biodiversidad.
- Menor interferencia en los regímenes naturales de las masas de agua receptoras.
- Reducción del efecto isla de calor.
- Hacer frente a los efectos del cambio climático mediante la prevención de las inundaciones y la recogida del agua de lluvia.
- Protección de las corrientes urbanas de vertidos accidentales y pérdidas de tuberías.



2.4.2.1.4 Ventajas sociales y urbanas

- Protección frente a inundaciones.
- Permite el desarrollo urbano en espacios con el sistema de alcantarillado colapsado.
- Soluciona la incapacidad hidráulica de la red de colectores convencionales debida al rápido crecimiento urbano de una zona, evitando la necesidad de desdoblamiento de la red.
- Aportan un alto valor estético al entorno.

2.4.2.1.5 Ventajas económicas

- Se consideran sistemas de drenaje pluviales de bajo coste, al requerir una menor inversión inicial.
- Disminuyen las pérdidas económicas producidas por las inundaciones.
- Al pasar el agua de precipitación a considerarse como un recurso disponible se reducen los gastos en sistemas de captación.
- Incrementa el valor añadido del entorno.
- Reduce los costes de funcionamiento de las depuradoras, al disminuir los caudales a tratar por las mismas.

2.4.2.2 Inconvenientes

La relativa novedad de estos sistemas conlleva la existencia de inconvenientes por ausencia de conocimientos como pueden ser:

- Algunas mejoras necesitan ser probadas a lo largo de amplios periodos de tiempo.
- Falta de práctica por parte de los proyectistas.
- Puede generar desconfianza por parte de la población por desconocimiento.
- Falta de práctica a la hora de ejecutar por parte de las empresas de construcción.
- Necesidad de un mantenimiento específico.
- Escasez de modelos prácticos de desarrollo de estas técnicas.
- Al ser sistemas novedosos pueden requerir de monitorización y análisis de los datos.
- No se tienen indicadores de rendimiento a largo plazo.



3 Implementación de SUDS en la red ferroviaria

En este apartado se realizará un análisis de los sistemas de drenaje utilizados en la actualidad en las redes ferroviarias, para posteriormente introducir los posibles SUDS a emplear.

3.1 Introducción

La implementación de SUDS pretende recuperar los procesos hidrológicos dentro del entorno de las infraestructuras ferroviarias, siendo capaces de captar el agua, tratarla y posteriormente reutilizarla, infiltrarla para la recarga de acuíferos o verterla a un cauce natural.

3.2 Sistemas de drenaje actuales en la infraestructura ferroviaria

3.2.1 Sistemas de drenaje actuales en la infraestructura lineal

Actualmente la normativa de aplicación a las obras de drenaje por parte de ADIF es la NAP 1-2-0.3 Norma ADIF Plataforma CLIMATOLOGÍA, HIDROLOGÍA Y DRENAJE, primera edición de Julio de 2015. En ella se especifica lo siguiente:

“La Instrucción 5.2-I.C. "Drenaje Superficial" de la Dirección General de Carreteras se considera en términos generales la guía fundamental para el diseño y dimensionado de las obras de desagüe. En los apartados siguientes se introducen, sin embargo, algunas modificaciones a los criterios y recomendaciones de dicha Instrucción aconsejadas por las peculiaridades de las líneas ferroviarias, a la vez que se hacen otras consideraciones complementarias.” (Adif 2015).

Estas modificaciones tienen que ver en su mayor parte con una serie de requisitos más conservadores en cuanto a periodos de retorno, dado que el balasto puede verse gravemente afectado en caso de inundación y los tiempos de reposición del servicio son mayores en la infraestructura ferroviaria que en la red de carreteras.

No obstante, esta anotación en la instrucción de ferrocarriles no hace más que evidenciar las muchas similitudes entre la infraestructura ferroviaria y la red de carreteras siendo por tanto un claro ejemplo de la aplicabilidad de SUDS, estando por ejemplo demostrado que la aplicación de sistemas como humedales o estanques (siempre que la geometría lo permita) resulta de gran eficacia para la retención y tratamiento de la contaminación (Highways Agency 2018; Woods Ballard et al. 2015).

Por otro lado, la implementación de SUDS con la finalidad de captar y trasladar el agua también ha demostrado ser de gran eficacia en su implementación en carreteras. Estos sistemas requieren de poco espacio, proporcionando a su vez un pretratamiento que mejoraría la calidad de las aguas (Pittner and Allerton 2001). El tratamiento de la contaminación en las cunetas verdes se centra en la interacción entre los contaminantes, la vegetación y los suelos. En estos casos se ha demostrado que los sedimentos y los metales se eliminan significativamente de las aguas pluviales (Stagge et al. 2012).



3.2.2 Sistemas de drenaje actuales en el entorno de la estación

En la actualidad las obras de drenaje en el entorno de las estaciones de ferrocarril son convencionales, tal y como se mencionó en la introducción, con los problemas que esto supone:

- Contaminación difusa.
- Mal uso de los sistemas de limpieza de las ciudades.
- Falta de mantenimiento del mobiliario urbano.
- Pérdida de calidad del agua.
- Colapso de sumideros.

3.3 Legislación

Las principales leyes y textos normativos de aplicación son:

En el ámbito europeo:

- Directiva 2000/60/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Directiva 2007/60/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.

En el ámbito estatal:

- Ley de Aguas: Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas.
- Ley de Costas: RD 876/2014, de 10 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento General de la Ley de Costa y Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y modificación de la Ley 22/1988, de Costas.
- Reglamento de Dominio Público Hidráulico: RD 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico que se desarrolla los títulos preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas y sus modificaciones: RD 606/2003, de 23 de mayo; RD 9/2008, de 11 de enero; RD 1290/2012, de 7 de septiembre y RD 638/2016, de 9 de diciembre.
- Evaluación y gestión de riesgos de inundación: RD 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.
- Plan Hidrológico Nacional: Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional y sus modificaciones: RD-Ley 2/2004, de 18 de junio y Ley 11/2005, de 22 de junio.
- Vertidos: Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas y Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido.
- Protección civil: Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil, además de las correspondientes resoluciones: Resolución de 2 de agosto de 2011, por la que se aprueba el Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones y Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de Interior por la que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones.



- Ley del suelo: Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana y Real Decreto 2159/1978, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Planeamiento para el desarrollo y aplicación de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana.

En el ámbito autonómico o regional:

- Planes hidrológicos y planes de gestión del riesgo de inundación de las demarcaciones: RD 701/2015, de 17 de julio y RD 1/2016 y RD 11/2016, de 8 de enero, por los que se aprueban los distintos planes hidrológicos de las demarcaciones y RD 18/2016, RD 19/2016, RD 20/2016, RD 21/2016, de 15 de enero, y RD 159/2016 de 15 de abril, por el que se aprueban los planes de gestión del riesgo de inundación de las demarcaciones.
- Protección civil: Los planes especiales de protección civil ante el riesgo de inundaciones elaborados por las comunidades autónomas y homologados por la Comisión Nacional de Protección Civil se pueden consultar en la web de protección civil: <http://www.proteccioncivil.es/riesgos/inundaciones/planes>.
- Planes de Ordenación del Territorio de ámbito supramunicipal.
- Planes Generales de Ordenación Urbana (P.G.O.U.) de cada municipio o mancomunidades o, en su defecto, normas subsidiarias de ordenación urbana.
- Planes Parciales, Planes de Reforma Interior (P.R.I.) y Planes Especiales de Reforma Interior (P.E.P.R.I.) de los distintos municipios.
- Normativas y ordenanzas municipales en materia de urbanismo y gestión del agua.

Normativa específica de ferrocarriles:

- NAP 0-1-0.0 Nomenclatura de estructuras, túneles y obras de drenaje para proyectos de plataforma. Enero de 2016.
- NAP 1-2-0.3 Climatología, Hidrología y Drenaje. Julio de 2015.
- NAP 1-2-1.1 Reposición de servidumbres y servicios afectados. Julio de 2020.
- NAP 2-3-0.0 Obras complementarias de la plataforma. Julio de 2015.
- NAP 6-2-5.1 Apeos de vía. Enero 2020.
- NAV 2-1-1.0 Obras de tierra. - Drenaje y saneamiento. Noviembre 1980.
- Ley 38/2015 de 29 de septiembre, del sector ferroviario.
- Real Decreto 1544/2007, de 23 de noviembre, por el que se regulan las condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación para el acceso y utilización de los modos de transporte para personas con discapacidad (Versión consolidada).
- Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (Versión consolidada).
- Real Decreto 505/2007 de 20 de abril, por el que se aprueban las condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación de las personas con discapacidad para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados y edificaciones (Versión consolidada).
- Real Decreto 173/2010 de 19 de febrero, por el que se modifica el código técnico de la edificación, aprobado por el real decreto 314/2006, de 17 de marzo, en materia de accesibilidad y no discriminación de las personas con discapacidad.
- Orden VIV/561/2010 de 1 de febrero, por la que se desarrolla el documento técnico de condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados.



Normativa de carreteras:

- Norma 5.2-IC. Drenaje Superficial (Orden FOM/298/2016 de 15 de febrero).

Con el fin de promover los SUDS, es fundamental la existencia de normativas en las que vengán recogidos. Siendo el desconocimiento y la ausencia de legislación un gran hándicap dentro de la implementación de estos sistemas.

Es necesaria la introducción de los SUDS en todos los niveles de la normativa urbanística:

- Plan territorial (comunidades autónomas y confederaciones hidrográficas).
- Plan General de Ordenación Urbana (Término municipal).
- Ordenanzas municipales (localidad).

A nivel territorial tenemos por un lado algunas comunidades autónomas que han desarrollado ya sus normativas, manuales o instrucciones técnicas teniendo en consideración a los SUDS:

- Instrucciones Técnicas para Obras Hidráulicas en Galicia, elaboradas por la “Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras”, junto con “Aguas de Galicia”. Estas instrucciones, aunque no son de obligado cumplimiento, ofrecen una visión detallada de cómo abordar una legislación sobre SUDS. En el apartado I “diseño de redes” del segundo volumen se detalla un capítulo sobre Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (SAN-1/4). Su finalidad es determinar dónde es necesario el uso de Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible, y definir estas técnicas. Adicionalmente, en el capítulo “SAN-2/2 Diseño de depósitos en sistemas unitarios”, se detallan los elementos principales que componen los depósitos, y sus criterios de mantenimiento y limpieza.
- Plan de Acción Territorial sobre prevención del riesgo de inundación en la Comunidad Valenciana, Patricova, en su anexo I establece las condiciones de adecuación de las edificaciones y urbanización, con mención expresa al fomento de SUDS.

Estando por otro lado las confederaciones hidrográficas algunas de las cuales ya han considerado los SUDS a través de sus planes hidrológicos:

- Confederación Hidrográfica del Cantábrico: Plan hidrológico parte española de la DH del cantábrico Oriental (2015 – 2021) y Plan hidrológico de la DH del Cantábrico Occidental (2015-2021). Los artículos que hacen referencia a los SUDS son el artículo 11 Planes dependientes: Sequías e inundaciones, en el apartado 11.2.5, donde se establece el programa de medidas mediante SUDS para evitar las inundaciones; el artículo 44 Drenaje en las nuevas áreas a urbanizar y de las vías de comunicación del “Capítulo VII Protección del dominio público hidráulico y dominio público marítimoterrestre y calidad de las aguas”, y el artículo 54 Autorizaciones de vertido al dominio público hidráulico.
- Confederación Hidrográfica del Duero: Plan hidrológico parte española de la DH del Duero (2015 – 2021). En el capítulo VII: “Medidas de protección de las masas de agua”, el artículo 33.3 Vertidos de aguas pluviales hace referencia a la utilización de SUDS.
- Normativa del Plan hidrológico de demarcación hidrográfica de Galicia-Costa (2015-2021). En el capítulo VII: “Protección contra las inundaciones”, el artículo 37 Criterios para el diseño del drenaje en las nuevas áreas a urbanizar y el artículo 44 Medidas para la utilización del dominio público hidráulico especifican la necesidad de utilizar SUDS en los nuevos desarrollos urbanísticos.
- Normativa del Plan hidrológico insular de El Hierro. En el Capítulo 4 “Ordenación y protección del dominio público hidráulico y del dominio público marítimo-terrestre”, el



Artículo 93 Criterios de drenaje en las nuevas áreas a urbanizar y de las vías de comunicación (ND) se hace referencia a la implantación de SUDS en las nuevas urbanizaciones.

- Normativa del Plan hidrológico del Miño-Sil establece que los planes de las CCAA e instrumentos de planeamiento urbanístico deberán analizar las condiciones de drenaje superficial del territorio, tanto de las aguas caídas en su ámbito de actuación como de las cuencas vertientes que le afecten (art. 49, riesgo de inundación y planificación territorial y urbanística).

A nivel de Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) algunos ejemplos de planes urbanísticos que recogen SUDS en su ordenamiento son:

- PGOU de la ciudad de Santander. En el Capítulo 6 “Condiciones Ambientales”, dentro del Título 4 “Condiciones Generales de la Edificación” existe un artículo íntegramente dedicado a los SUDS. Además, se hace referencia a los SUDS en las disposiciones adicionales séptima y octava.
- PGOU de Ferreiras, en Menorca. En el apartado “Objetivos y criterios de ordenación” del documento Memoria de Gestión del PGOU especifica que se han de incorporar al Plan Parcial medidas encaminadas a la ejecución de obras de canalización con capacidad suficiente y alternativa para la gestión de las aguas pluviales como estanques de laminación y SUDS.
- PGOU de Tudela. En el capítulo 6.6.7 Infraestructuras básicas establece que uno de los objetivos para conseguir mejorar la sostenibilidad ambiental es la gestión sostenible del agua de lluvia mediante SUDS. Hace referencia a la utilización de pavimentos filtrantes y vegetados, a la instalación de depósitos de reutilización, al filtrado del agua mediante SUDS, y a los beneficios medioambientales frente a los drenajes tradicionales (disminución del caudal de la escorrentía y su carga contaminante, laminación de las puntas de caudal vertido a cauce, utilización del agua de lluvia etc.).

Y a nivel de ordenanzas municipales son algunas ciudades las que ya incluyen referencias a los SUDS en documentos oficiales:

- Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid (2006).
- Ordenanza de Saneamiento del Ayuntamiento de Valencia (2016).
- Ordenanza del Medio Urbano Sostenible en el término municipal de Rivas Vaciamadrid, Madrid (2014).
- Ordenanza Municipal sobre el Ahorro de Agua en Eskoriatza, Guipúzcoa (2009).
- Documento adaptado. Estudio de eficacia del Plan General de Ordenación Urbana de Mundaka, (2013).

3.4 Definición de SUDS aplicables en entornos ferroviarios

“Los SUDS son un conjunto de técnicas enmarcadas en una filosofía de desarrollo urbano sostenible, que tratan de laminar la avenida de agua de lluvia y retener los contaminantes arrastrados en ella, además de preservar las condiciones naturales de los lugares donde se implantan, permitiendo revalorizar y/o recuperar áreas urbanas mejorando su desarrollo estético” (Sañudo-Fontaneda 2014).

En este punto, se pasará a una descripción de manera simplificada de algunos de los SUDS más empleados en la actualidad, teniendo en cuenta sus ventajas e inconvenientes, de cara a un análisis posterior a lo largo del presente trabajo.

3.4.1 Alcorques estructurales

3.4.1.1 Descripción

Los alcorques estructurales o alcorques de infiltración consisten en la elaboración de huecos en el pavimento donde ubicar un árbol, así como el suelo que lo rodea, sin interferir sobre servicios urbanos cercanos.

El suelo que rodea el árbol permite el desarrollo del árbol albergando temporalmente los caudales de escorrentía. Esto permite la infiltración del agua al terreno o, en caso de no ser posible, su transferencia al siguiente elemento del sistema de drenaje.



Figura 14. Ejemplo de aplicación Alcorque estructural (Fuente: [Pinterest](#))

3.4.1.2 Usos

En el siguiente gráfico se puede comprobar como su utilización está recomendada como elemento destinado a la infiltración, la detención y el riego, no siendo apto para la recolección ni el transporte (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 15. Usos de los Alcorques estructurales (Fuente: Elaboración propia)

3.4.1.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a los alcorques estructurales:

- La pendiente estará limitada a como máximo un 10% (Strecker et al. 2010).
- El nivel freático estará situado como mínimo a un metro (City of Edmoton 2011).
- El ratio de infiltración será como mínimo de 7 [mm/h] (Department of Defense USA 2010).
- Las cimentaciones cercanas deben de estar situadas como mínimo a 2 metros de distancia (Jiménez Ariza et al. 2019).

Tabla 2. Limitaciones de diseño Alcorques estructurales (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m ²)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
10	-	1	7	2	-	-	-	-

3.4.1.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de los alcorques estructurales, entre las que destacan una capacidad de filtración media, así como un bajo control del volumen y la descarga (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado destaca su nivel medio de mantenimiento así como sus costes también medios tanto para la implantación como para el mantenimiento (Strecker et al. 2010).

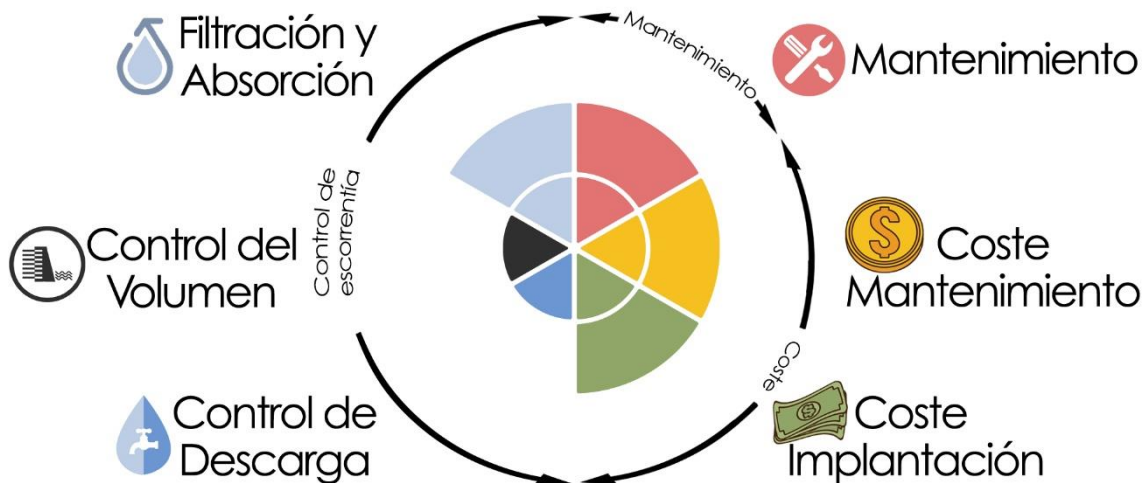


Figura 16. Funciones Alcorques estructurales (Fuente: Elaboración propia)

3.4.1.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de los alcorques estructurales para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013; Jiménez Ariza et al. 2019).

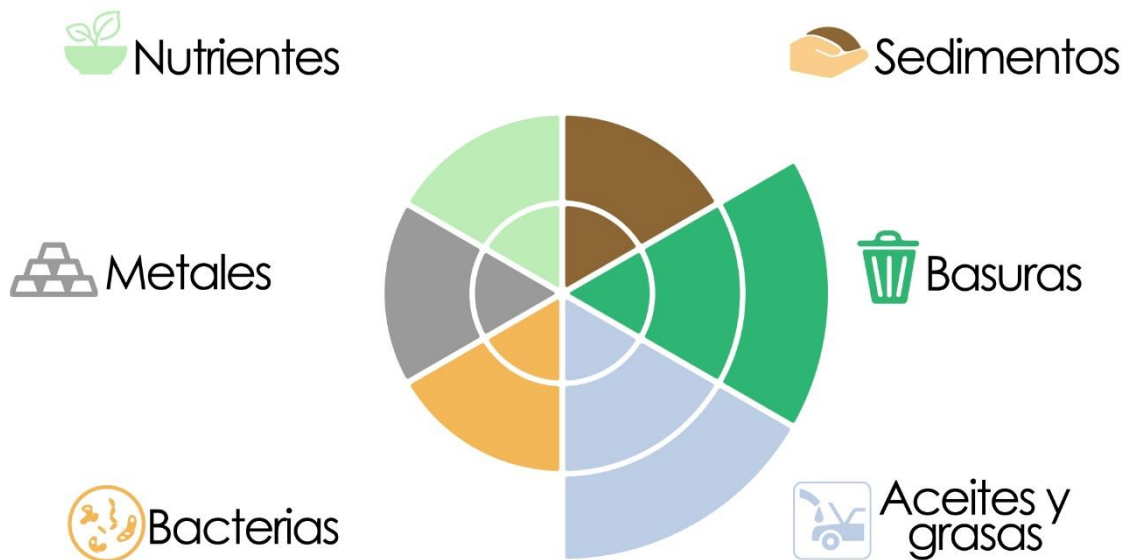


Figura 17. Absorción de contaminantes Alcorques estructurales (Fuente: Elaboración propia).

3.4.1.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.1.6.1 Ventajas

- Favorece el desarrollo radicular de los árboles fomentando su crecimiento.
- Aumenta la seguridad de los peatones al ejercer como barrera frente al tráfico rodado cuando así se disponga, y también al evitar que las raíces rompan el pavimento en busca de agua y aire como en los alcorques convencionales.
- Estética.
- Mejora de la calidad del aire.
- Amortiguación del ruido.
- Creación de hábitats naturales.

3.4.1.6.2 Inconvenientes

- Baja reducción del volumen de escorrentía.
- Coste de instalación superior a un alcorque tradicional.
- Ubicación limitada por la posible presencia de servicios urbanos.
- Puede requerir la instalación de una membrana lateral que evite el paso del agua al viario.

3.4.2 Cubiertas verdes

3.4.2.1 Descripción

Las cubiertas verdes son un tipo de cubierta que se caracteriza por emplear la vegetación como envolvente de la estructura con la finalidad de mejorar sus propiedades térmicas e hidrológicas.

El principal beneficio del empleo de cubiertas verdes es la reducción de los efectos hidrológicos en las ciudades, donde las cubiertas suponen un 40% de las zonas impermeables.

A esto se deben añadir otra serie de beneficios como pueden ser:

- Eficacia probada en diferentes climas.
- Generan oxígeno y mejoran la calidad del aire.
- Reducen el efecto isla de calor.
- Promueven la biodiversidad.
- Almacenan el calor del interior cuando la temperatura exterior es baja.
- Aíslan de las temperaturas elevadas del exterior.

Dentro de las cubiertas verdes/azules podemos distinguir 3 tipos:

- Cubiertas ecológicas extensivas.
- Cubiertas ecológicas intensivas.
- Terraza jardín semi-intensiva.



Figura 18. Ejemplo de aplicación Cubiertas verdes (Fuente: [Isopan](#))

3.4.2.1.1 Cubierta ecológica extensiva

Este tipo de cubierta tiene unos requerimientos de conservación mínimos, utilizando especies de bajo porte, de tipo herbáceo o musgoso. Por tanto, el espesor del sustrato es inferior a 15 centímetros, siendo la que menor sobrecarga estructural implica ($50-150 \text{ kg/m}^2$). Las bajas sobrecargas estructurales la hacen especialmente indicada para rehabilitaciones.

3.4.2.1.2 Cubierta ecológica intensiva

En este tipo de cubierta requiere un mantenimiento periódico, al situarse en la misma vegetación de alto porte como arbustos y pequeños árboles. Esta vegetación de mayor porte requiere de una capa más profunda de sustrato incrementando los requerimientos estructurales ($>300 \text{ Kg/m}^2$) por tanto este tipo de cubierta está enfocado a nuevas construcciones.

3.4.2.1.3 Terraza jardín semi-intensiva

En este caso se trata de una solución intermedia entre las dos anteriores, que incluye vegetación de bajo porte con unas mayores necesidades de mantenimiento que en las cubiertas vegetales extensivas, al emplearse variedades vegetales con una menor resistencia. Los espesores de sustrato empleados en esta tipología de cubiertas verdes se sitúan próximos a los 20 cm lo que aporta sobrecargas medias (150-300 kg/m²).

3.4.2.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente su utilización está recomendada como elemento destinado a la detención y el riego, no siendo apto para la infiltración, el transporte ni la recolección (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 19. Usos de las Cubiertas verdes (Fuente: Elaboración propia)

3.4.2.3 Limitaciones de diseño

Como se puede comprobar en la siguiente tabla, las cubiertas verdes no sufren limitaciones de diseño salvo en el caso de las pendientes máximas, pudiendo adaptarse a la geometría de la cubierta siempre que la estructura lo permita.

Tabla 3. Limitaciones de diseño Cubiertas verdes (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m ²)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
70 *	-	-	-	-	-	-	-	-

* Sujeto a especificaciones aportadas por los diversos fabricantes, los ingenieros de ZinCo (empresa española dedicada a la instalación de cubiertas verdes) han conseguido diseñar soluciones excepcionales para cubiertas con inclinaciones superiores al 70% mediante el empleo de un sistema llamado Georaster. (ZinCo n.d.).

3.4.2.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de las cubiertas verdes, Entre las que destaca el alto control del volumen, el control de la descarga moderado y la baja capacidad de filtración y absorción (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado, tendrán un nivel de mantenimiento moderado, con un coste asociado bajo. El coste de implantación por el contrario será elevado (Strecker et al. 2010).

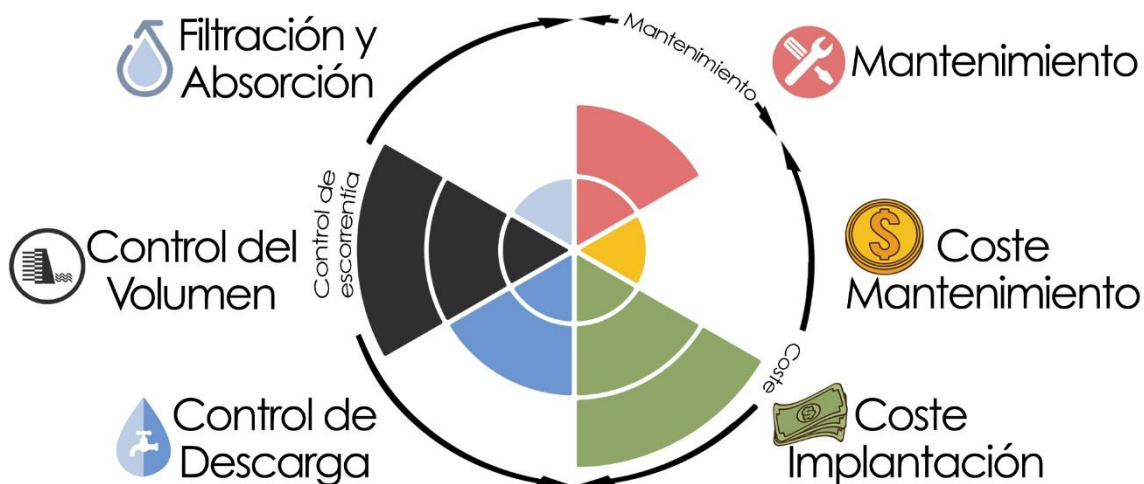


Figura 20. Funciones Cubiertas verdes (Fuente: Elaboración propia)

3.4.2.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de las cubiertas verdes para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013).

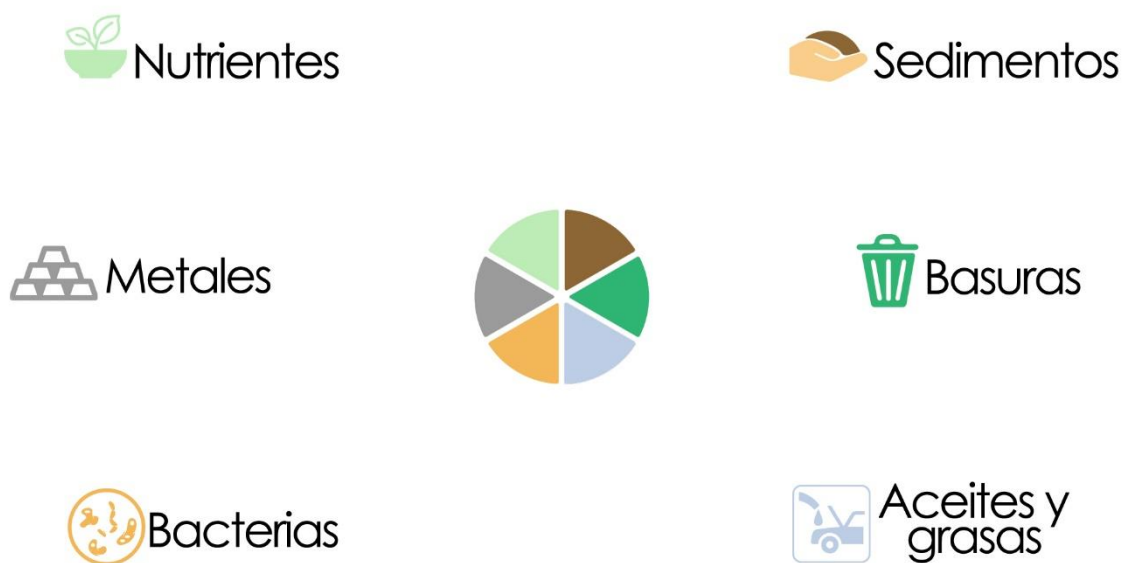


Figura 21. Absorción de contaminantes en las Cubiertas verdes (Fuente: Elaboración propia).



3.4.2.6 *Ventajas e inconvenientes*

3.4.2.6.1 *Ventajas*

- Disminuyen los volúmenes de escorrentía.
- Reducen el área impermeable.
- El agua precipitada es en parte devuelta a la atmósfera tanto por evaporación como por transpiración.
- Contribuye a la resiliencia climática, mejora la calidad del aire, reduce el efecto isla de calor.
- Alto valor ecológico, estético y de recreo.

3.4.2.6.2 *Inconvenientes*

- Mayor carga estructural sobre la cubierta.
- Mayores costes de construcción y mantenimiento.
- En función de la climatología de la zona de estudio puede ser necesario el uso de sistemas de riego.
- Captan y tratan únicamente la escorrentía de la cubierta sobre la que se instalan.

3.4.3 Cunetas verdes

3.4.3.1 Descripción

Sistema de drenaje de carácter lineal, consistente en una depresión en el terreno que permite la captación y el transporte del agua de lluvia. A través del canal generado, el agua es conducida mientras que los sólidos en suspensión y los contaminantes se van sedimentando, lo que previene su entrada a los cursos del agua.

Las cunetas verdes están formadas por dos tipologías fundamentales, las cunetas verdes con césped (*Grass swales*) y cunetas verdes vegetadas (*Vegetative swales or bioswales*), siendo las más efectivas para la eliminación de contaminantes las cunetas verdes vegetadas.

Sin embargo, la variabilidad y combinación de tipologías complica la clasificación apareciendo cunetas secas y húmedas (cuando se busca la presencia del agua mediante la implementación de un fondo impermeable).



Figura 22. Ejemplo de aplicación Cunetas vegetadas (Fuente: [Pinterest](#))

3.4.3.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la infiltración y transporte, pudiéndose utilizar en menor medida como elemento de detención. Por otro lado, no es apto para la recolección ni el riego (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 23. Usos Cunetas verdes (Fuente: Elaboración propia)

3.4.3.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a las cunetas verdes:

- Las cunetas verdes deberán de tener una inclinación comprendida entre el 1 y el 10% (City of Los Angeles 2011; Strecker et al. 2010).
- El nivel freático deberá estar situado a 1,5 metros de ellas (Strecker et al. 2010).
- El ratio de infiltración deberá de ser de al menos 13 [mm/h] (City of Edmoton 2011).
- Las cimentaciones cercanas se situaran como mínimo a 4 metros (Toronto and Region Conservation Authority and Credit Valley Conservation Authority 2010).

Tabla 4. Limitaciones de diseño Cunetas verdes (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m2)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
10	1	1,5	13	4	-	-	-	-

3.4.3.4 Funcionamiento

En el siguiente grafico se pueden comprobar algunas características de las cunetas verdes, entre las que destacan la baja capacidad para el control de la escorrentía (Filtración y absorción, Control del volumen y control de la descarga) (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013). También se pueden destacar el bajo mantenimiento requerido o los bajos costes de implantación y mantenimiento (Strecker et al. 2010).

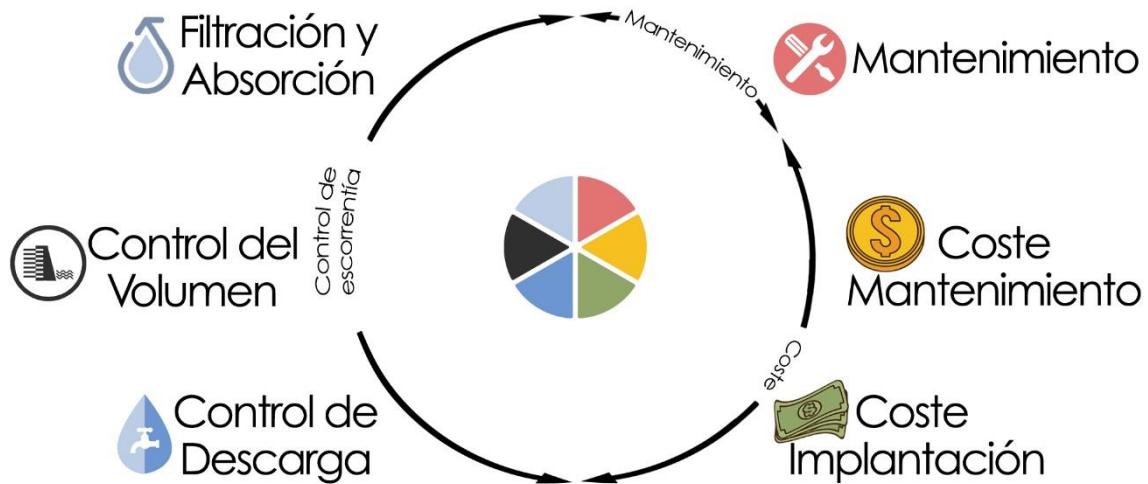


Figura 24. Funciones Cunetas verdes (Fuente: Elaboración propia)

3.4.3.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de las cunetas verdes para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013; Debo and Reese 2003; Revitt et al. 2003).



Figura 25. Absorción de contaminantes Cunetas verdes (Fuente: Elaboración propia)



3.4.3.6 *Ventajas e inconvenientes*

3.4.3.6.1 *Ventajas*

- Economía, tanto la construcción como el mantenimiento tiene un coste inferior con respecto a los métodos convencionales de conducción de aguas de lluvia.
- Sistema muy efectivo para la dispersión del flujo de la precipitación a través de un gran área o distancia.
- Gran eficiencia en la eliminación de contaminantes sólidos.
- Elemento integrador de la naturaleza en el entorno urbano.
- Gran aplicabilidad debido a la componente estética que aportan al entorno.
- Aplicación muy clara en el drenaje de carreteras en sustitución de las tradicionales cunetas de hormigón (de ahí su nombre).

3.4.3.6.2 *Inconvenientes*

- Tratamiento de un área limitada.
- Requieren de una buena planificación y diseño, con una pendiente adecuada que evite los posibles riesgos de inundación.

3.4.4 Depósitos

3.4.4.1 Descripción

Los depósitos son sistemas sencillos de acumulación de aguas, tienen por objetivo interceptar las escorrentías producidas en tejados u otras superficies impermeables para su posterior reutilización en usos que no requieran de agua potable como riego o limpieza de coches.

Por su tipología puede distinguirse entre los que están en superficie, que tienden a funcionar por gravedad y los que están enterrados, para los que es necesario el uso de un sistema de bombeo.

Por su material de construcción podemos encontrarnos con prefabricados de polipropileno y ejecutados in-situ generalmente de hormigón.



Figura 26. Ejemplo de aplicación Depósito (Fuente: [El Mundo 2012](#))

3.4.4.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la detención, la recolección y el riego, no siendo apto para la infiltración ni el transporte (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 27. Usos Depósitos (Fuente: Elaboración propia)

3.4.4.3 Limitaciones de diseño

Como se muestra en la siguiente tabla, no existen limitaciones geométricas para la implantación de los depósitos, adaptándose a las limitaciones y posibilidades del entorno.

Tabla 5. Limitaciones de diseño Depósitos (Fuente: Elaboración Propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m ²)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
-	-	-	-	-	-	-	-	-

* Como se mencionó anteriormente los depósitos no están sujetos a restricción alguna en cuanto a geometría o cualquier otro parámetro indicado en la tabla anterior, pudiendo ejecutarse el mismo in-situ si las opciones prefabricadas no se adaptan correctamente a las necesidades.

3.4.4.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de los depósitos entre las que destacan la nula capacidad de filtración y absorción, y el medio control del volumen y la descarga (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado, el mantenimiento es bajo si bien los costes asociados al mismo, así como los de implantación son medios (Strecker et al. 2010).

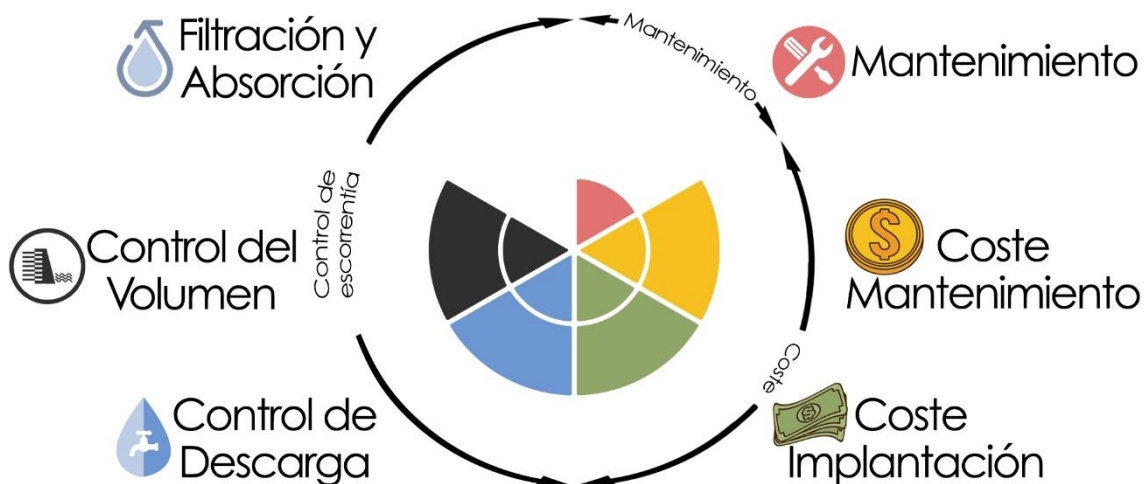


Figura 28. Funciones Depósitos (Fuente: Elaboración propia)

3.4.4.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se puede comprobar como los depósitos tienen una capacidad nula para tratar los contaminantes presentes en las aguas de escorrentía (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013).



Nutrientes



Sedimentos



Metales



Basuras



Bacterias



Aceites y grasas

Figura 29. Absorción de contaminantes Depósitos (Fuente: Elaboración propia)

3.4.4.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.4.6.1 Ventajas

- Reducción de la factura del agua.
- Mejora operativa en el sistema de alcantarillado al impedir que aguas relativamente limpias entren al sistema.
- Puede resultar visualmente atractivo y estar integrado en el desarrollo.
- Componente de “edificios verdes” que puede mejorar la calificación en determinadas certificaciones.

3.4.4.6.2 Inconvenientes

- Capacidad de almacenamiento limitada.
- Puede ser necesario el empleo de una bomba.
- Debe haber una fuente de agua alternativa para garantizar la demanda.
- Nulo tratamiento del agua.

3.4.5 Depósitos de infiltración

3.4.5.1 Descripción

Este tipo de sistema de drenaje consiste en una depresión del terreno con el objetivo de actuar como zona de embalse superficial donde almacenar el agua hasta su posterior infiltración.

Al permitir el almacenamiento temporal en forma de lámina de agua por encima de la superficie del terreno los depósitos de infiltración pueden ser utilizados en cuencas de mayor tamaño que los pozos o zanjas de infiltración alcanzando las 10 hectáreas. Esta característica permite su utilización como final de cadena, no solo como control en origen.



Figura 30. Ejemplo de aplicación Depósito de infiltración (Fuente: [Pinterest](#))

La lámina de agua constara de poca profundidad y carácter temporal, estando previsto que desaparezca aproximadamente dos días después de finalizar el aporte de agua.

La llegada de agua a los depósitos de infiltración puede ser en lámina desde los taludes, canalizada desde la superficie o mediante el empleo de tuberías enterradas.

3.4.5.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la detención e infiltración, no siendo apto para la recolección, el transporte ni el riego (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 31. Usos Depósitos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

3.4.5.3 Limitaciones de diseño

A continuación se mostrarán con los condicionantes de diseño referentes a los depósitos de infiltración:

- La pendiente será inferior al 3% (Woods-Ballard et al. 2007).
- La distancia al nivel freático será superior a 1,2 metros (Center for Watershed Protection 2000).
- El ratio de infiltración será superior a 13 [mm/h] (Center for Watershed Protection 2000).
- La distancia a cimentaciones cercanas será superior a 6 metros (Virginia Department of Transportation 2013).
- El área mínima será de 45 metros cuadrados (Jiménez Ariza et al. 2019).
- La relación Largo – Ancho será 2:1 (Urban Drainage and Flood Control District 2010).
- Los largos y anchos mínimos serán de 9 y 5 metros respectivamente (Jiménez Ariza et al. 2019).

Tabla 6. Limitaciones de diseño Depósitos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m ²)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
3	-	1,2	13	6	45	2:1	5	9

3.4.5.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas funciones de los depósitos de infiltración, entre las que destaca su alto control del volumen, así como su capacidad de filtración y absorción moderada a la par que el control de la descarga (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado, nos encontramos ante un mantenimiento elevado con unos costes asociados también elevados mientras que el coste de implantación será medio (Jiménez Ariza et al. 2019).

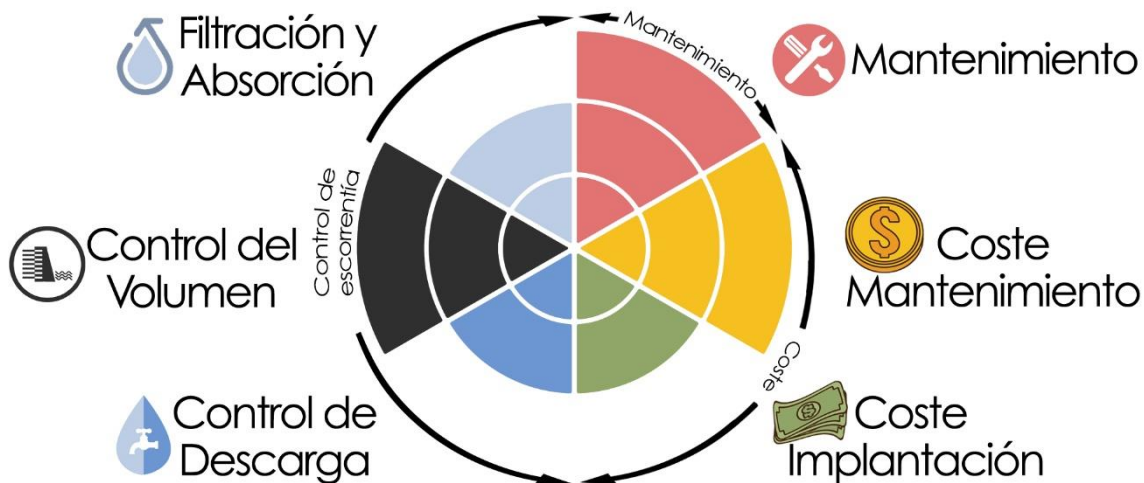


Figura 32. Funciones Depósitos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

3.4.5.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de los depósitos de infiltración para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013; Revitt et al. 2003).

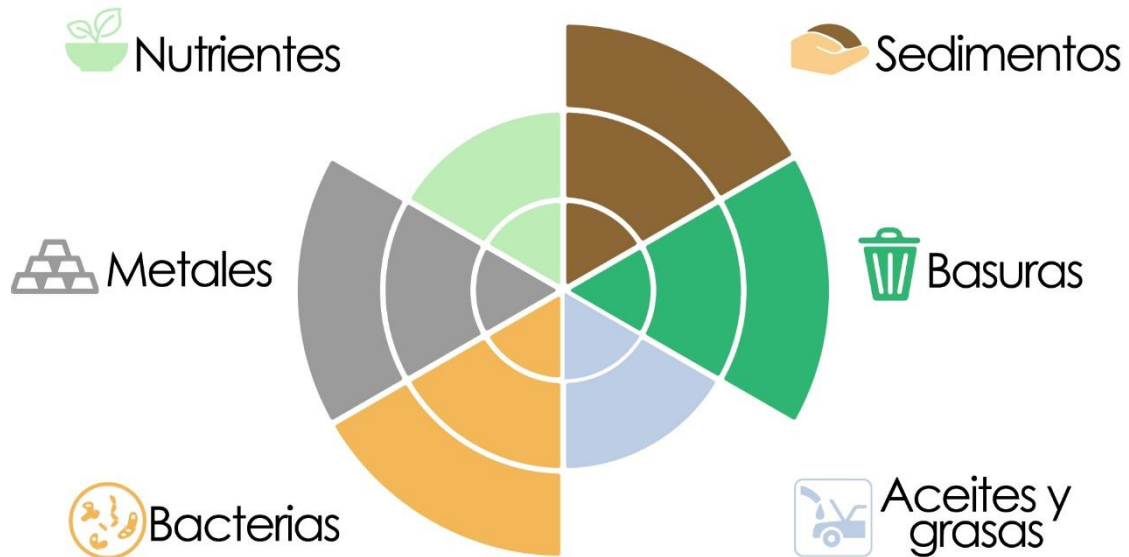


Figura 33. Absorción de contaminantes Depósitos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

3.4.5.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.5.6.1 Ventajas

- Laminación de las avenidas.
- Localización de posibles inundaciones.
- Alimentación de acuíferos.
- Hábitat para distintas especies animales y vegetales.
- Usos secundarios cuando no esté presente la lámina de agua.

3.4.5.6.2 Inconvenientes

- Alto consumo de área lo que no permite la implementación en grandes cuencas.
- Posibilidad de colmatación.
- Requiere un mantenimiento que garantice la higiene.

3.4.6 Estanques de detención (húmedos)

3.4.6.1 Descripción

Los estanques de detención (húmedos) son un sistema urbano de drenaje sostenible que consiste fundamentalmente en una depresión vegetada del terreno con el objetivo de interceptar y almacenar el agua de lluvia.

En el caso de los estanques de detención húmedos se busca un tratamiento cualitativo de las aguas, diseñándose los mismos con el objetivo de obtener una mejora en la calidad de las mismas, mediante la sedimentación de sólidos, la absorción de contaminantes por parte la vegetación o la actividad biológica.



Figura 34. Ejemplo de aplicación Estanque de detención (húmedos) (Fuente: [SuD Sostenible](#))

3.4.6.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado exclusivamente a la detención, no siendo apto para el resto de los usos (Jiménez Ariza et al. 2019).

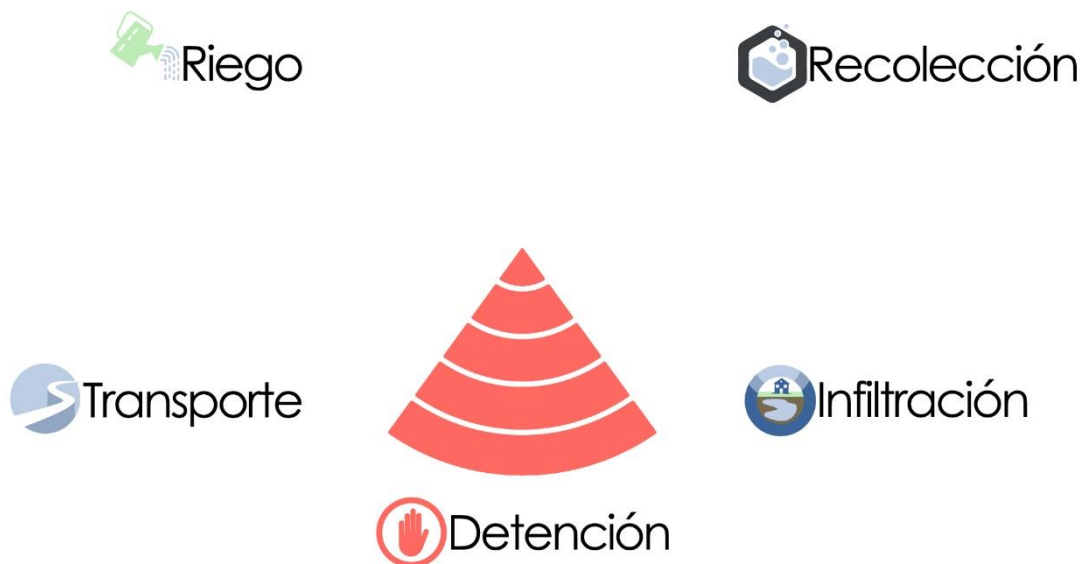


Figura 35. Usos Estanques de detención (húmedos) (Fuente: Elaboración propia)

3.4.6.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a los estanques de detención (húmedos):

- La pendiente será inferior al 15 % (Strecker et al. 2010).
- La distancia al nivel freático será superior a 1,3 metros (Center for Watershed Protection 2000).
- La distancia a cimentaciones cercanas será superior a 6 metros (Virginia Department of Transportation 2013).
- El área del depósito de detención (húmedo) será al menos de 150 metros cuadrados (Revitt et al. 2003).
- La relación entre el largo y el ancho será 2:1 (Revitt et al. 2003).
- Los largos y anchos mínimos serán de 20 y 8 metros respectivamente (Revitt et al. 2003).

Tabla 7. Limitaciones de diseño Estanques de detención (húmedos) (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m ²)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
15	-	1,3	-	6	150	2:1	8	20

3.4.6.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de los estanques de detención (húmedos) entre las que destaca su alto control de la descarga y su bajo control del volumen, la filtración y absorción (Jiménez Ariza et al. 2019; Venner et al. 2013).

Por otro lado, nos encontramos con un mantenimiento medio con un coste asociado también medio, mientras que el coste de implantación es alto (Strecker et al. 2010).

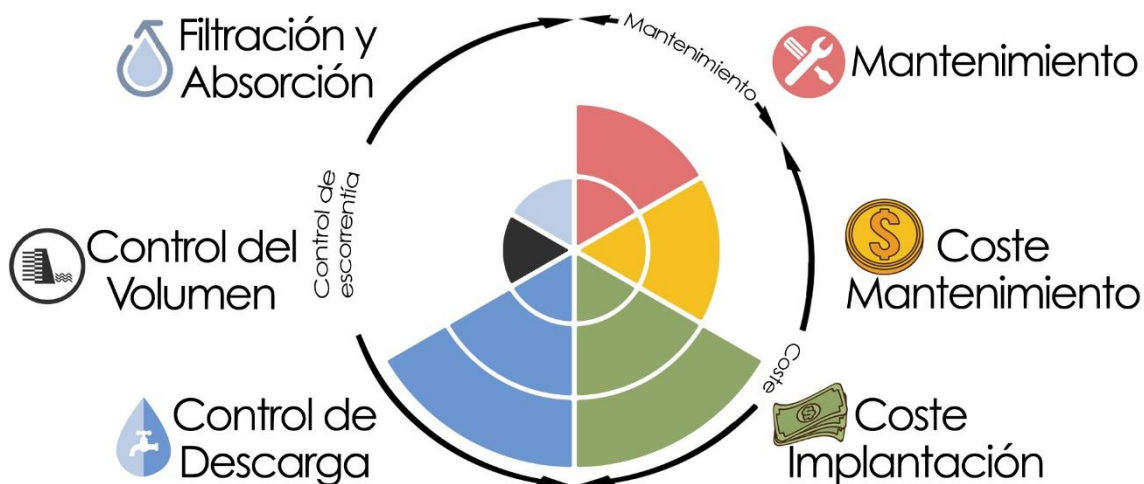


Figura 36. Funciones Estanques de detención (húmedos) (Fuente: Elaboración propia)

3.4.6.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de los estanques de detención (húmedos) para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Debo and Reese 2003; Fletcher et al. 2004; Revitt et al. 2003).

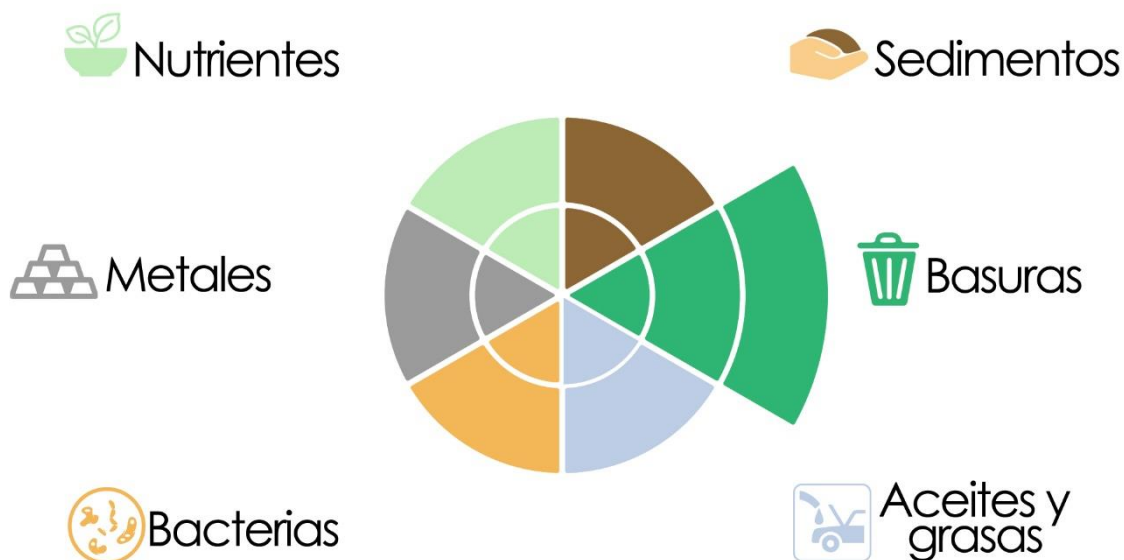


Figura 37. Absorción de contaminantes Estanques de detención (húmedos) (Fuente: Elaboración propia)

3.4.6.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.6.6.1 Ventajas

- Llama el pico del hidrograma.
- Eliminación de sedimentos.
- Utilización para usos alternativos en periodos estivales.
- Espacio verde como soporte para la vegetación y cierta fauna.
- Defensa frente al vertido de sólidos en suspensión.
- Valor añadido a zonas residenciales.

3.4.6.6.2 Inconvenientes

- Requieren de cuencas superiores a 4 hectáreas.
- Riesgo de colmatación en los sumideros de salida.
- La falta de mantenimiento puede resultar en molestias para los vecinos.

3.4.7 Estanques de detención (secos)

3.4.7.1 Descripción

Al igual que en el caso de los estanques de detención húmedos, nos encontramos ante un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible consistente fundamentalmente en una depresión vegetada del terreno con el objetivo de interceptar y almacenar el agua de lluvia.

Cuando el diseño del estanque de detención es seco, este tiene un carácter cuantitativo. El objetivo fundamental es almacenar el agua durante los periodos de lluvia, permitiendo posteriormente una liberación lenta del agua evitando posibles inundaciones y generando un efecto laminador del cauce.

Este almacenamiento puede suponer variaciones pronunciadas en el nivel del agua por lo que es necesario considerar a la hora del diseño el funcionamiento del depósito tanto en seco como con un determinado nivel de agua. Si el terreno lo permite, se puede buscar infiltrar parte del agua al mismo con los beneficios que esto aporta.



Figura 38. Ejemplo de aplicación Estanque de detención (Seco) (Fuente: [SuD Sostenible](#))

3.4.7.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la infiltración, la detención y en muy baja medida la recolección y el riego, no siendo apto para el transporte (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 39. Usos Estanques de detención (secos) (Fuente: Elaboración propia)

3.4.7.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a los estanques de detención (secos):

- Las pendientes estarán comprendidas entre el 1 y el 15% (Riverside County Flood Control and Water Conservation District 2011; Strecker et al. 2010).
- La distancia al nivel freático será al menos de 3 metros (Strecker et al. 2010).
- El ratio de infiltración será superior a 7 [mm/h] (Riverside County Flood Control and Water Conservation District 2011).
- La distancia a cimentaciones cercanas será superior a los 6 metros (Riverside County Flood Control and Water Conservation District 2011).
- El área mínima contara con una superficie de 45 metros cuadrados (Jiménez Ariza et al. 2019).
- La relación Largo – Ancho será 2:1 (Urban Drainage and Flood Control District 2010).
- El largo y ancho mínimo será de 9 y 5 metros respectivamente (Jiménez Ariza et al. 2019).

Tabla 8. Limitaciones de diseño Estanques de detención (Secos) (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m2)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
15	1	3	7	6	45	2:1	5	9

3.4.7.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de los estanques de detención (secos) entre las que nos encontramos una baja capacidad de filtración y absorción, acompañada de una baja capacidad para controlar los volúmenes de escorrentía siendo el control de la descarga medio (Jiménez Ariza et al. 2019; Venner et al. 2013).

Por otro lado, los requerimientos de mantenimiento, así como los costes, son también medios (Strecker et al. 2010).

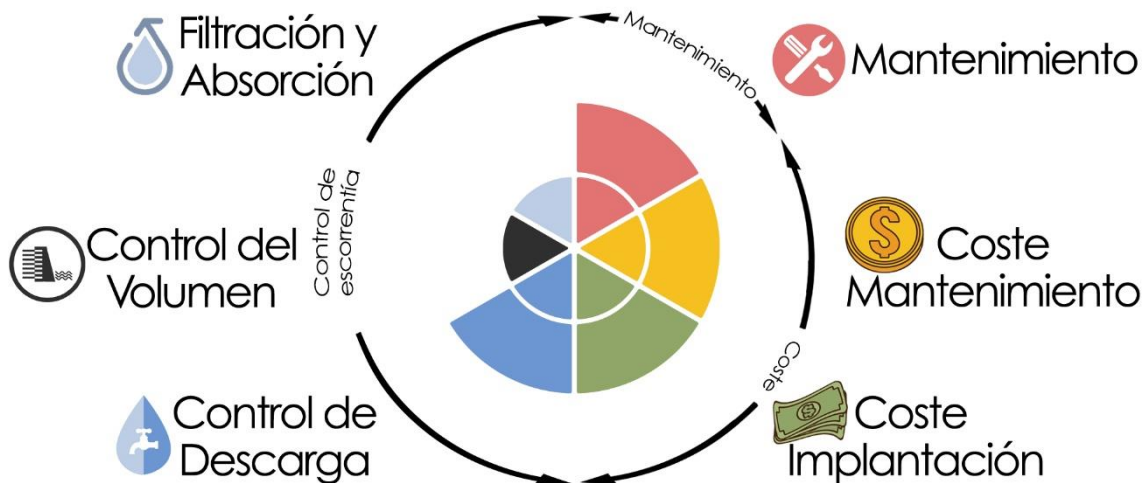


Figura 40. Funciones Estanques de detención (secos) (Fuente: Elaboración propia)

3.4.7.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de los estanques de detención (secos) para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Debo and Reese 2003; Fletcher et al. 2004; Jiménez Ariza et al. 2019; Revitt et al. 2003).

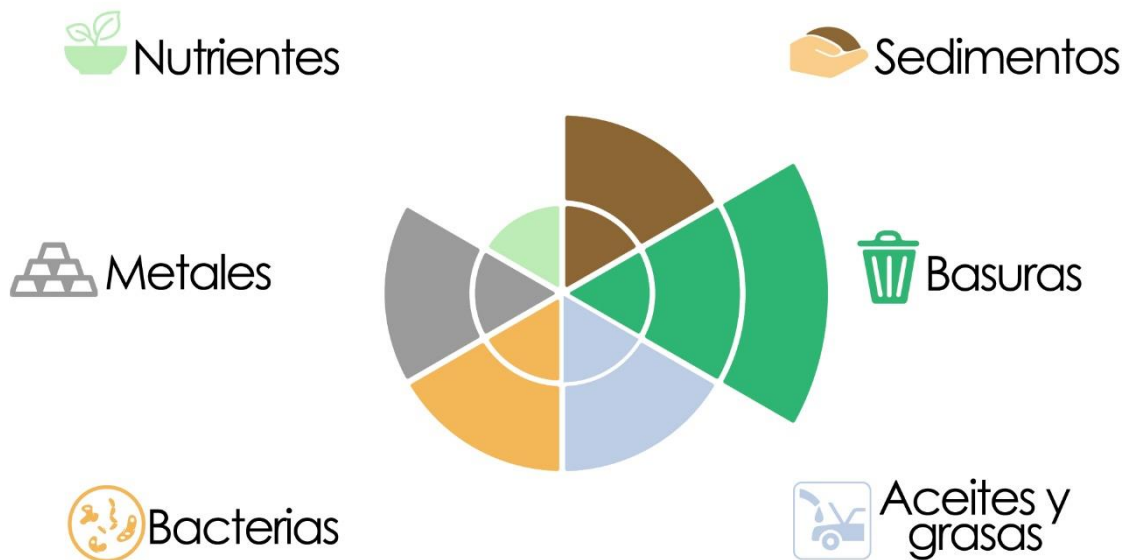


Figura 41. Absorción de contaminantes Estanques de detención (secos) (Fuente: Elaboración propia)

3.4.7.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.7.6.1 Ventajas

- Laminar el pico del hidrograma.
- Eliminación de sedimentos.
- Utilización para usos alternativos en periodos estivales.
- Espacio verde como soporte para la vegetación y cierta fauna.
- Defensa frente al vertido de sólidos en suspensión.
- Valor añadido a zonas residenciales.

3.4.7.6.2 Inconvenientes

- Requieren de cuencas superiores a 4 hectáreas.
- Riesgo de colmatación en los sumideros de salida.
- La falta de mantenimiento puede resultar en molestias para los vecinos.
- Capacidad de eliminación de contaminantes limitada.

3.4.8 Áreas de biorretención

3.4.8.1 Descripción

En este caso nos encontramos ante una técnica de drenaje urbano cuyo principal objetivo es el control de la calidad de las aguas antes de su vertido al medio natural.

Las áreas de biorretención son zonas con una leve depresión, con una capa muy permeable situada bajo un filtro orgánico y un dren colector de arena o gravilla. La presencia de vegetación favorece la eliminación de la contaminación.

La variedad de mecanismos presentes para la eliminación de la contaminación propicia que esta técnica tenga un gran rendimiento:

- En la zona de detención se facilita la infiltración, evaporación y sedimentación de las partículas.
- El filtro orgánico favorece el crecimiento de microorganismos que eliminan hidrocarburos y materia orgánica.
- En el suelo filtrante se eliminan hidrocarburos, materia orgánica, metales, y nutrientes.
- La vegetación favorece la remoción de contaminantes y la estabilización del suelo.
- El agua tratada sale por el sistema de drenes.



Figura 42. Ejemplo de aplicación Área de biorretención (Fuente: [Pinterest](#))

3.4.8.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la infiltración, la detención y el riego, no siendo apto para la recolección ni el transporte (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 43. Usos Área de biorretención (Fuente: Elaboración propia)

3.4.8.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a las áreas de biorretención:

- La pendiente máxima será del 10% (Strecker et al. 2010).
- La distancia al nivel freático será superior a 1,8 metros (City of Edmoton 2011).
- El ratio de infiltración será superior a 7 [mm/h] (Department of Defense USA 2010).
- La distancia a cimentaciones cercanas será superior a 6 metros (Virginia Department of Transportation 2013).

Tabla 9. Limitaciones de diseño Áreas de biorretención (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m2)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
10	-	1,8	7	6	-	-	-	-

3.4.8.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de las áreas de biorretención, entre las que destaca la alta capacidad de filtración y absorción, un control medio de los volúmenes de escorrentía y un bajo control de la descarga (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado, nos encontramos con un requisito de mantenimiento medio al igual que los costes tanto de implantación como de mantenimiento (Strecker et al. 2010).

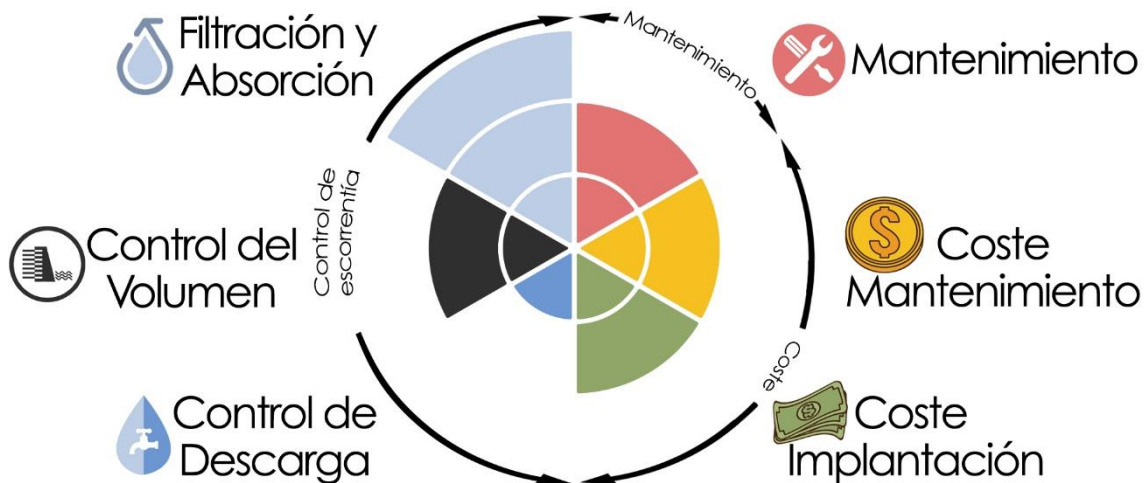


Figura 44. Funciones Áreas de biorretención (Fuente: Elaboración propia)

3.4.8.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de las áreas de biorretención para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013; Debo and Reese 2003; Liu et al. 2014, 2017).

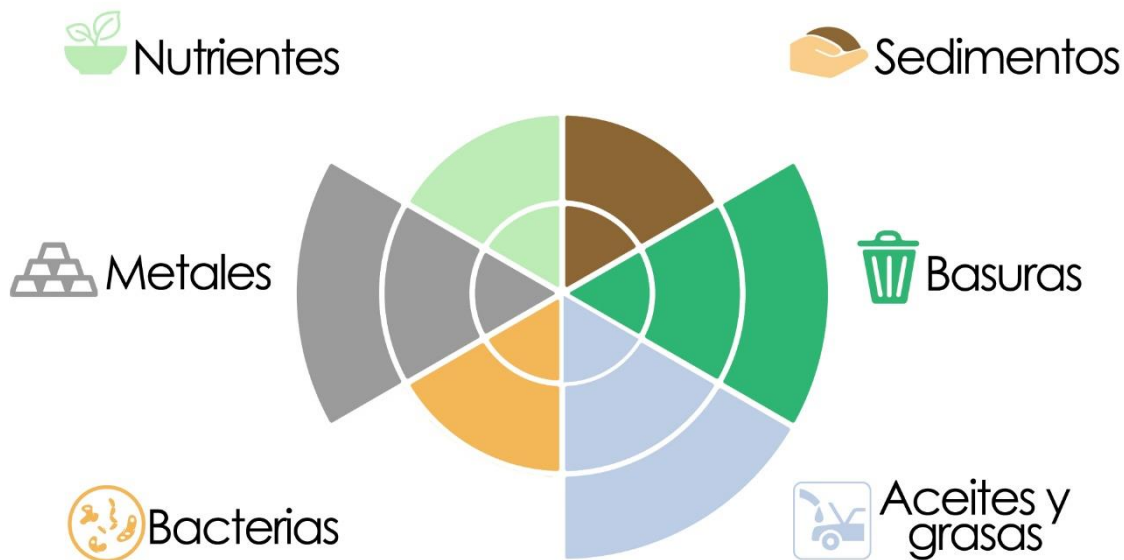


Figura 45. Absorción de contaminantes Áreas de biorretención (Fuente: Elaboración propia)

3.4.8.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.8.6.1 Ventajas

- Reducción de los volúmenes de escorrentía.
- Alta capacidad de eliminación de contaminantes.
- Diseño flexible adaptable al entorno.
- Alto valor estético.

3.4.8.6.2 Inconvenientes

- Se recomienda la utilización de algún tipo de pretratamiento.
- Flujos concentrados pueden necesitar una consideración especial en el diseño.

3.4.9 Filtros de arena

3.4.9.1 Descripción

En los filtros de arena se lleva a cabo la filtración y sedimentación de las aguas procedentes de la escorrentía urbana. La mejora en la calidad de las aguas viene dada por el paso de las aguas a través de varias capas de arena.

Generalmente constan de dos cámaras, siendo la primera la encargada de la eliminación de flotantes y sedimentos pesados, mientras que en la segunda tiene lugar la filtración a través de un lecho de arena. Opcionalmente, puede existir una tercera cámara para la descarga.

3.4.9.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la infiltración y la detención, no siendo apto para la recolección, el transporte ni el riego (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 46. Usos Filtros de arena (Fuente: Elaboración propia)

3.4.9.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a los filtros de arena:

- Las pendientes deberán estar comprendidas entre el 1 y el 5 % (Riverside County Flood Control and Water Conservation District 2011; Strecker et al. 2010).
- La distancia al nivel freático deberá de ser superior a 1,5 metros (Strecker et al. 2010).
- El ratio de infiltración será superior a 13 [mm/h] (Center for Watershed Protection 2000).
- La distancia a cimentaciones cercanas será superior a 1,5 metros (Urban Drainage and Flood Control District 2010).

Tabla 10. Limitaciones de diseño Filtros de arena (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m ²)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
5	1	1,5	13	1,5	-	-	-	-

3.4.9.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de los filtros de arena, entre las que destaca la alta capacidad de absorción o los bajos controles sobre los volúmenes de escorrentía y sobre la descarga (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado, este tipo de sistema de drenaje tiene asociados unos altos mantenimientos que implican un alto coste de mantenimiento y un coste medio de implantación (Strecker et al. 2010).

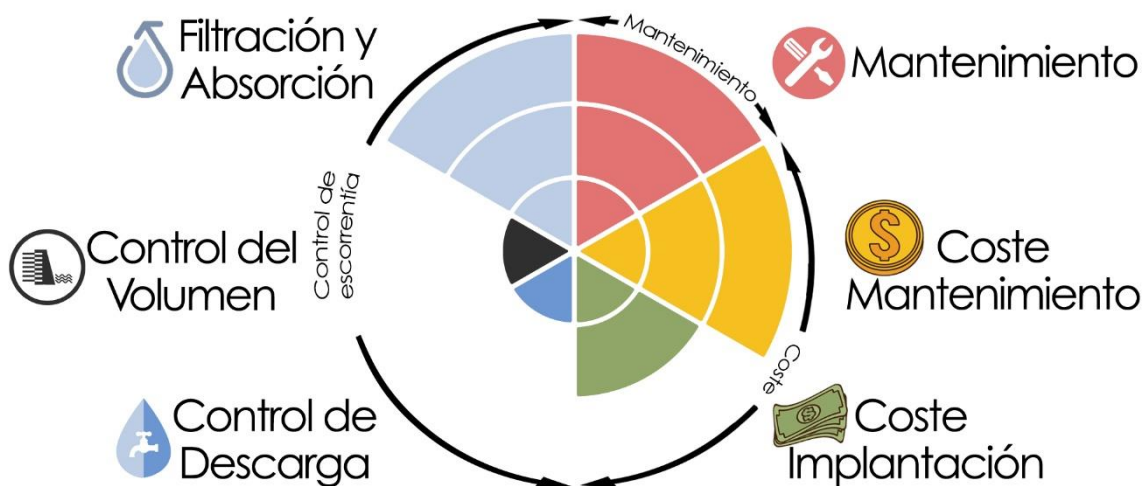


Figura 47. Funciones Filtros de arena (Fuente: Elaboración propia)

3.4.9.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de los filtros de arena para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013; Debo and Reese 2003; Fletcher et al. 2004).

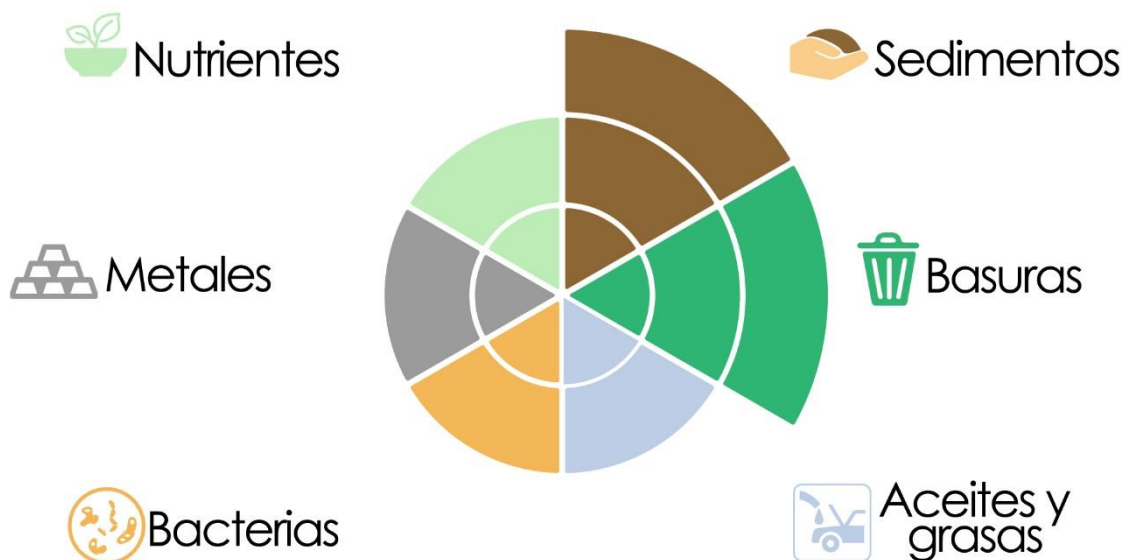


Figura 48. Absorción de contaminantes Filtros de arena (Fuente: Elaboración propia)

3.4.9.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.9.6.1 Ventajas

- Mejora sustancial en la calidad de las aguas de escorrentía filtradas.

3.4.9.6.2 Inconvenientes

- Pueden obstruirse bajo la presencia de limos o arcillas.
- No se pueden situar en las inmediaciones de edificios salvo que exista por medio una membrana impermeable.
- No pueden funcionar en presencia de obras en las inmediaciones.

3.4.10 Humedal artificial

3.4.10.1 Descripción

Se definen los humedales como áreas de tierra ocasional o permanentemente cubiertas de agua con distintas profundidades. Estos pueden ser de origen natural o artificial, y se caracterizan por ser el hábitat de una gran diversidad de plantas y animales.

Los humedales están compuestos por estanques y lagos de poca profundidad, en combinación con zonas pantanosas y están cubiertos en su mayor parte por vegetación acuática.



Figura 49. Ejemplo de aplicación Humedal artificial (Fuente: [Pinterest](#))

Se clasifican en humedales de superficie libre en los que nos encontramos ante una superficie poco profunda donde el agua a tratar está expuesta a la atmósfera. Y humedales de cama sumergida con vegetación o flujo subsuperficial donde el agua a tratar no está expuesta a la atmósfera si no que se trata de un área de material permeable que enraíza el sistema de vegetación.

3.4.10.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la detención y el riego. No siendo apto para la recolección, la infiltración ni el transporte (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 50. Usos Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia)

3.4.10.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a los humedales artificiales:

- La pendiente estará comprendida entre el 1 y el 15% (City of Santa Rosa 2011; Strecker et al. 2010).
- La distancia al nivel freático será al menos de 1,3 metros (Center for Watershed Protection 2000).
- La distancia a cimentaciones cercanas será superior a 6 metros (Virginia Department of Transportation 2013).
- Contará con un área superior a 1000 metros cuadrados (Center for Watershed Protection 2000; Debo and Reese 2003).
- La relación entre el largo y el ancho será al menos de 3:1 (Woods-Ballard et al. 2007).
- El largo y el ancho serán al menos de 56 y 18 metros respectivamente (Jiménez Ariza et al. 2019).

Tabla 11. Limitaciones de diseño Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m ²)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
15	1	1,3	-	6	1000	3:1	18	56

3.4.10.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de los humedales artificiales, entre las que destacan su alto control sobre la descarga, su capacidad media de filtración y absorción y su bajo control sobre la descarga (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado, destacan sus altos requerimientos de mantenimiento, lo que genera unos costes asociados también altos, así como un alto coste medio de implantación (Strecker et al. 2010).

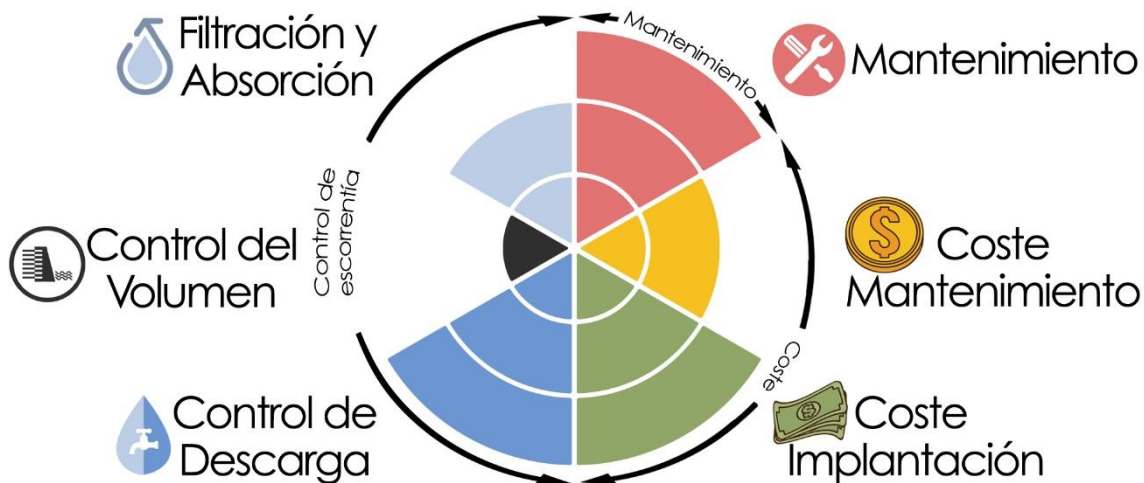


Figura 51. Funciones Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia)

3.4.10.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de los humedales artificiales para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013; Debo and Reese 2003; Fletcher et al. 2004; Revitt et al. 2003).

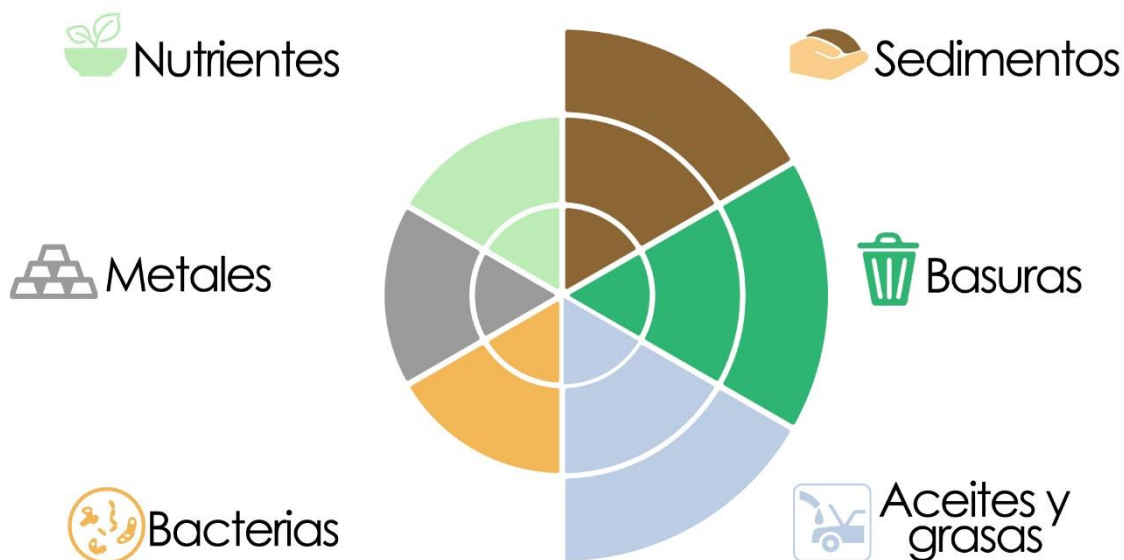


Figura 52. Absorción de contaminantes Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia)

3.4.10.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.10.6.1 Ventajas

- Control de las inundaciones.
- Mejora de la calidad de las aguas.
- Sedimentación de las partículas sólidas.
- Eliminación de contaminantes.
- Incremento y mejora de la diversidad biológica.
- Atenuación del flujo y laminación del pico de precipitación.
- Mejora del valor estético.
- Coste de mantenimiento bajo.

3.4.10.6.2 Inconvenientes

- Difícil mantenimiento ante condiciones de flujo muy variables.
- Gran requerimiento de espacio.
- Bajo rendimiento en la eliminación de contaminantes en una primera etapa desde la construcción.
- Alto coste de construcción.

3.4.11 Pavimentos permeables

3.4.11.1 Descripción

Un pavimento permeable consiste en una estructura formada por múltiples capas con la capacidad de captar e infiltrar el agua de lluvia a través de las mismas, siendo de esta forma capaz de reducir la carga contaminante presente en la escorrentía superficial.

Una superficie permeable es aquella que permite la infiltración del agua. A su vez, la misma puede ser apta para el tráfico rodado, en cuyo caso se denominará pavimento permeable o firme permeable si todas las capas de la sección resistente permiten el paso del agua.



Figura 53. Ejemplo de aplicación Pavimentos permeables (Fuente: [Pinterest](#))

3.4.11.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la infiltración o a la detención, no siendo apto para la recolección, el transporte ni el riego (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 54. Usos Pavimentos permeables (Fuente: Elaboración propia)

3.4.11.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a los pavimentos permeables:

- Las pendientes estarán comprendidas entre 0,5 y 5 metros (City of Edmoton 2011; Strecker et al. 2010).
- La distancia al nivel freático será al menos de 3 metros (Faha et al. 2009).
- El ratio de infiltración será superior a 13 [mm/h] (City of Edmoton 2011).
- La distancia a cimentaciones cercanas será de al menos 6 metros (Virginia Department of Transportation 2013).

Tabla 12. Limitaciones de diseño Pavimentos permeables (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m2)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
5	0,5	3	13	6	-	-	-	-

3.4.11.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de los pavimentos permeables, como son el alto control de los volúmenes de escorrentía, o la capacidad media tanto para la filtración y absorción como para el control de la descarga (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado, tiene unos requisitos de mantenimiento medios pero unos altos costes tanto de implantación como de mantenimiento (Strecker et al. 2010).

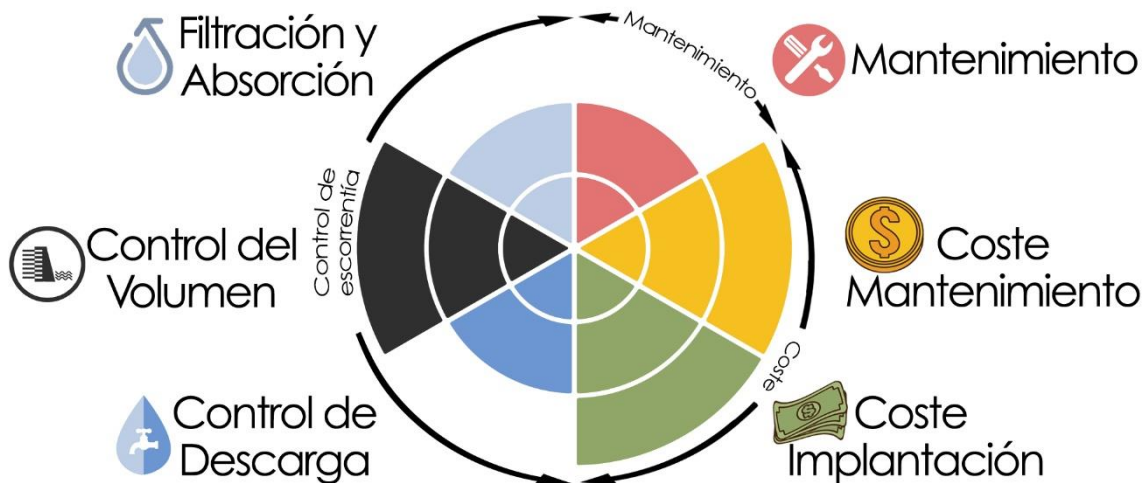


Figura 55. Funciones Pavimentos permeables (Fuente: Elaboración propia)

3.4.11.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de los pavimentos permeables para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013; Debo and Reese 2003; Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 56. Absorción de contaminantes Pavimentos permeables (Fuente: Elaboración propia)

3.4.11.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.11.6.1 Ventajas

- Reducción de los volúmenes de escorrentía superficial.
- Reducción del porcentaje de superficie impermeable.
- Aumento del tiempo de concentración gracias a la laminación que proporciona el paso del agua por las distintas capas.
- Mejora la calidad del agua al filtrarla.
- Reducción de la carga contaminante presente en la escorrentía superficial.

3.4.11.6.2 Inconvenientes

- No son apropiados para zonas con tráfico de vehículos pesados ni zonas donde existan muchos árboles.
- Riesgo de colmatación, lo que puede reducir su permeabilidad.
- No se puede dirigir la escorrentía de áreas vegetadas hacia el firme permeable.

3.4.12 Pozos de infiltración

3.4.12.1 Descripción

En este caso nos encontramos ante un dispositivo de drenaje que consiste en pozos subterráneos con el objetivo de recoger y almacenar el agua de lluvia hasta que se produce la infiltración de esta al terreno.

El funcionamiento de estos sistemas de drenaje consiste en la captación de las aguas procedentes de la escorrentía superficial bien por superficie o mediante el empleo de una tubería enterrada. Una vez en el interior bien sea del pozo comienza la infiltración al terreno a través de toda el área de la excavación, pero fundamentalmente por la parte inferior.

En los casos en los que el tiempo de infiltración sea elevado, se puede disponer del agua almacenada para usos alternativos como riego y servicios.

3.4.12.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la infiltración o a la detención, no siendo apto para la recolección, el transporte ni el riego (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 57. Usos Pozos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

3.4.12.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a los pozos de infiltración:

- La pendiente será como máximo del 15% (Toronto and Region Conservation Authority and Credit Valley Conservation Authority 2010).
- La distancia al nivel freático será al menos de 1 metro (Woods-Ballard et al. 2007).
- El ratio de infiltración será superior a 13 [mm/h] (Center for Watershed Protection 2000).
- La distancia a cimentaciones cercanas será superior a 6 metros (Virginia Department of Transportation 2013).

Tabla 13. Limitaciones de diseño Pozos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m2)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
15	-	1	13	6	-	-	-	-

3.4.12.4 Funcionamiento

En el siguiente grafico se pueden comprobar algunas características de los pozos de infiltración, entre las que destaca su alta capacidad para el control de los volúmenes de escorrentía, o su capacidad media tanto para la filtración y absorción como para el control de la descarga (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado, tanto los requisitos de mantenimiento como los costes son medios (Jiménez Ariza et al. 2019).

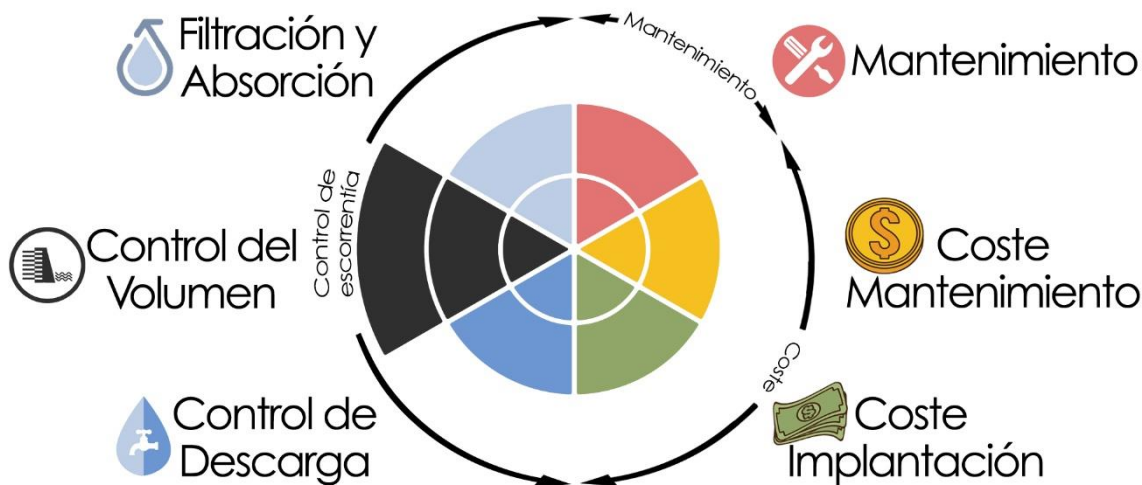


Figura 58. Funciones Pozos infiltración (Fuente: Elaboración propia)

3.4.12.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de los pozos de infiltración para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013).

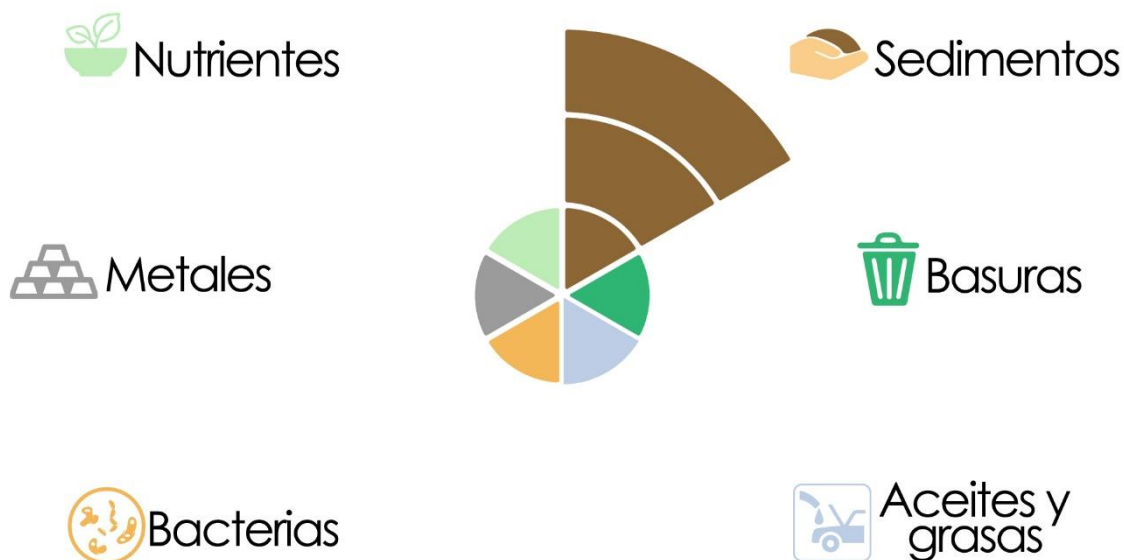


Figura 59. Absorción de contaminantes Pozos de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

3.4.12.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.12.6.1 Ventajas

- Reduce la cantidad de escorrentía superficial.
- Mejora la calidad del agua infiltrada.
- Incrementa los volúmenes de agua subterránea.
- Requiere de poca superficie para su implantación.
- Adaptación al entorno.

3.4.12.6.2 Inconvenientes

- Sensibilidad a la colmatación y bloqueos, por lo que no son aptos para escorrentías con sólidos en suspensión.
- Pueden requerir de excavaciones importantes.

3.4.13 Zanjas de infiltración

3.4.13.1 Descripción

Las zanjas de infiltración son un sistema de drenaje análogo a los pozos de infiltración en cuanto a funcionamiento.

La distinción entre pozo y zanja de infiltración es una cuestión meramente geométrica, hablándose de pozo cuando la dimensión predominante es la profundidad y de zanja cuando la dimensión fundamental es la longitud.



Figura 60. Ejemplo aplicación Zanjas filtrantes (Fuente: [Pinterest](#))

3.4.13.2 Usos

Como se puede comprobar en el gráfico siguiente, su utilización está recomendada como elemento destinado a la infiltración, la detención y el transporte, no siendo apto para la recolección ni el riego (Jiménez Ariza et al. 2019).



Figura 61. Usos Zanjas de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

3.4.13.3 Limitaciones de diseño

A continuación, se mostrarán los condicionantes de diseño referentes a las zanjas de infiltración:

- La pendiente estará comprendida entre el 1 y el 5 % (Riverside County Flood Control and Water Conservation District 2011; Strecker et al. 2010).
- El nivel freático debe situarse como mínimo a 3 metros (Riverside County Flood Control and Water Conservation District 2011).
- El ratio de infiltración será superior a 7 [mm/s] (Center for Watershed Protection 2000).
- La distancia a cimentaciones cercanas será superior a 6 metros (Virginia Department of Transportation 2013).

Tabla 14. Limitaciones de diseño Zanjas de infiltración (Fuente: Elaboración Propia)

Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Min
Pendiente (%)		Distancia NF	Ratio infiltración	Distancia cimentación	Área (m ²)	Relación Largo-Ancho	Ancho (m)	Largo (m)
5	1	3	7	6	-	-	-	-

3.4.13.4 Funcionamiento

En el siguiente gráfico se pueden comprobar algunas características de las zanjas de infiltración, entre las que destacan las altas capacidades tanto para el control del volumen y la descarga como para la filtración y absorción (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013).

Por otro lado, nos encontramos con unas necesidades de mantenimiento elevadas y unos costes tanto de implantación como de mantenimiento medios (Strecker et al. 2010).

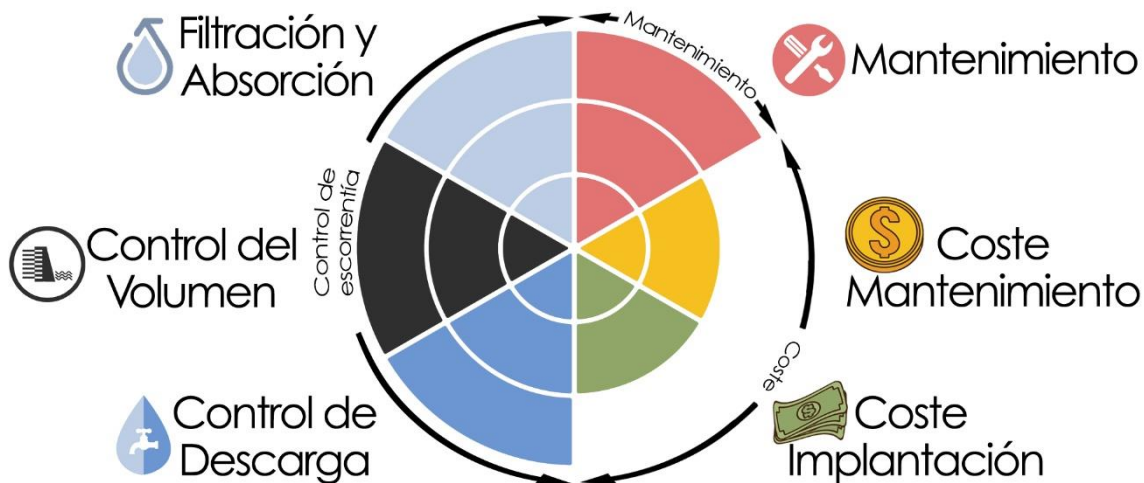


Figura 62. Funciones Zanjas de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

3.4.13.5 Absorción de contaminantes

En la siguiente figura se muestra el desempeño de las zanjas de infiltración para tratar las aguas de escorrentía frente a 6 clases de contaminantes (Boston Water and Sewer Commission and Geosyntec Consultants 2013; Debo and Reese 2003; Revitt et al. 2003).



Figura 63. Absorción de contaminantes Zanjas de infiltración (Fuente: Elaboración propia)

3.4.13.6 Ventajas e inconvenientes

3.4.13.6.1 Ventajas

- Reduce la cantidad de escorrentía superficial.
- Mejora la calidad del agua infiltrada.
- Incrementa los volúmenes de agua subterránea.
- Requiere de poca superficie para su implantación.
- Adaptación al entorno.

3.4.13.6.2 Inconvenientes

- Sensibilidad a la colmatación y bloqueos, por lo que no son aptos para escorrentías con sólidos en suspensión.
- Pueden requerir de excavaciones importantes.

4 Desarrollo de la herramienta multicriterio de selección de SUDS para redes ferroviarias

En este apartado pasará a desarrollarse el sistema para la selección de SUDS en las redes ferroviarias en base a una serie de parámetros.

4.1 Metodología de desarrollo de la herramienta

A continuación, se describirán los parámetros que se emplearán para el desarrollo de la herramienta de selección de SUDS y su importancia en el diseño.

4.1.1 Carga contaminante

En este apartado se procederá a analizar la carga contaminante presente en las aguas dentro de la red ferroviaria y su impacto en la elección de los sistemas de drenaje sostenibles.

La siguiente tabla recoge los valores indicados en anteriormente respecto al desempeño de los SUDS frente a los contaminantes (Boston Water and SewerCommission and Geosyntec Consultants 2013; Debo and Reese 2003; Fletcher et al. 2004; Jiménez Ariza et al. 2019; Liu et al. 2014, 2017; Revitt et al. 2003; Venner et al. 2013).

Tabla 15. Desempeño de los distintos tipos de SUDS frente a los distintos contaminantes (Fuente: adaptado de (Jiménez Ariza et al. 2019))

	Nutrientes	Metales	Bacterias	Sedimentos	Aceites y grasas	Basuras
Alcorques estructurales	Media	Media	Media	Media	Alta	Alta
Cubiertas verdes	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Cunetas verdes	Media	Media	Baja	Media	Media	Media
Depósitos	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula
Depósitos de infiltración	Media	Alta	Alta	Alta	Media	Alta
Estanques de detención (húmedos)	Media	Media	Media	Media	Media	Alta
Estanques de detención (Secos)	Baja	Media	Media	Media	Media	Alta
Áreas de biorretención	Media	Alta	Media	Media	Alta	Alta
Filtros de arena	Media	Media	Media	Alta	Media	Alta
Humedal artificial	Media	Media	Media	Alta	Alta	Alta
Pavimentos permeables	Baja	Media	Media	Alta	Alta	Media
Pozos de infiltración	Baja	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja
Zanjas de infiltración	Media	Alta	Alta	Alta	Media	Alta

Como se puede extraer de la tabla anterior, la capacidad de tratamiento de los SUDS varía en función del tipo de contaminante presente en el agua, siendo por tanto importante la determinación de los contaminantes presentes en cada elemento de la red ferroviaria de cara a plantear un sistema de drenaje o un tren de tratamiento capaz de mejorar la calidad del agua hasta niveles aceptables.



4.1.1.1 Infraestructura lineal

Los contaminantes presentes en la infraestructura lineal son los descritos en la Tabla 1, donde se puede comprobar que la gran mayoría de contaminantes presentes en las aguas recogidas en el entorno de la infraestructura lineal son metales pesados. Por tanto, será necesaria la utilización de SUDS, bien sea de forma independiente o formando parte de un tren de tratamiento, capaces de gestionar altas cargas de metales pesados, siendo los más recomendables con tal fin los siguientes:

- Depósitos de infiltración.
- Áreas de biorretención.
- Zanjas de infiltración.

4.1.1.2 Enclave ferroviario

Los contaminantes presentes en los enclaves ferroviarios pueden verse afectados por su tipología.

4.1.1.2.1 Estación

En las estaciones y su entorno, los contaminantes serán los característicos del entorno urbano, con especial presencia de contaminación difusa, basuras, sedimentos, aceites y grasas, siendo por tanto los SUDS más recomendables los siguientes:

- Depósitos de infiltración.
- Alcorques estructurales.
- Estanques de detención (húmedos).
- Estanques de detención (secos).
- Humedales artificiales.
- Pavimentos permeables.
- Zanjas de infiltración.

4.1.1.2.2 Apartadero

Los apartaderos presentarán una carga de contaminantes similar a la presente en la infraestructura lineal, al tratarse de una infraestructura complementaria destinada a facilitar la circulación de los trenes. Por tanto, destacará la presencia de metales, siendo los SUDS más apropiados atendiendo a la carga contaminante son los siguientes:

- Depósitos de infiltración.
- Área de biorretención.
- Zanjas de infiltración.



4.1.1.2.3 Apeadero

El caso de los apeaderos se corresponde a un punto intermedio entre la infraestructura lineal y las estaciones. Por tanto, en los mismos se recomienda plantear un sistema de drenaje que permita el tratamiento de los contaminantes de ambos entornos, o en caso de no ser posible la instalación de un tren de tratamiento que si lo permita.

Los SUDS más adecuados para las aguas urbanas son:

- Depósitos de infiltración.
- Alcorques estructurales.
- Estanques de detención (húmedos).
- Estanques de detención (secos).
- Humedales artificiales.
- Pavimentos permeables.
- Zanjas de infiltración.

Y para las aguas procedentes de las vías:

- Depósitos de infiltración.
- Área de biorretención.
- Zanjas de infiltración.

4.1.1.2.4 Cargadero

Por sus características, los cargaderos actuarán con una parte más de la infraestructura lineal, siendo los contaminantes característicos los mismos que los de la infraestructura lineal y los SUDS correspondientes para el tratamiento de las aguas los siguientes:

- Depósitos de infiltración.
- Área de biorretención.
- Zanjas de infiltración.

Por otro lado, también se encontrarán en estas zonas otra clase de contaminantes, como pueden ser polvo derivado de la carga de áridos y otros sedimentos. Estos contaminantes por sus características pueden ser tratados en los sistemas de drenaje mencionados anteriormente.

4.1.1.2.5 Terminales de mercancías

De cara al tratamiento de las terminales de mercancías se recomendará la utilización de SUDS, capaces de tratar los contaminantes propios de la infraestructura lineal, así como los propios de los vehículos o elementos auxiliares. Por ello, se recomienda la implantación de sistemas que permitan el tratamiento de metales, así como aceites y grasas. De manera adicional se podría plantear la instalación de un depósito de detención con la finalidad de ser capaz de contener un posible vertido de sustancias contaminantes protegiendo el entorno.

Por tanto, los SUDS más recomendables son los siguientes:

- Depósitos de infiltración.
- Área de biorretención.
- Zanjas de infiltración.
- Pavimentos permeables.
- Estanques de detención (húmedos).
- Estanques de detención (secos).

4.1.2 Control de la escorrentía

Como se mencionó a lo largo de este trabajo, el control de la escorrentía es un parámetro básico a la hora de proyectar los SUDS, evitando mediante el mismo inundaciones que puedan suponer cortes en el servicio, faltas de comodidad o en el peor de los casos, comprometer la infraestructura ferroviaria.

Se han clasificado los SUDS estudiados en este trabajo en base a su capacidad para gestionar la escorrentía superficial. La clasificación realizada viene recogida en la siguiente tabla:

Tabla 16. Desempeño de los distintos SUDS en el control de la escorrentía (Fuente: adaptado de (Jiménez Ariza et al. 2019))

	Filtración y adsorción	Control de volumen	Control de descarga
Alcorques estructurales	Media	Bajo	Bajo
Cubiertas verdes	Baja	Alto	Medio
Cunetas verdes	Baja	Bajo	Bajo
Depósitos	Nula	Medio	Medio
Depósitos de infiltración	Media	Alto	Medio
Estanques de detención (húmedos)	Baja	Bajo	Alto
Estanques de detención (secos)	Baja	Bajo	Medio
Áreas de biorretención	Alta	Medio	Bajo
Filtros de arena	Alta	Bajo	Bajo
Humedal artificial	Media	Bajo	Alto
Pavimentos permeables	Media	Alto	Medio
Pozos de infiltración	Media	Alto	Medio
Zanjas de infiltración	Alta	Alto	Alto

De la tabla anterior, nos centraremos fundamentalmente en la capacidad de los SUDS para controlar los volúmenes, buscando alternativas que nos permitan gestionar los grandes volúmenes de escorrentía que en otro caso pudieran acarrear problemas para el servicio o la infraestructura.

4.1.2.1 Infraestructura lineal

Dentro de la infraestructura lineal es de vital importancia una correcta gestión de la escorrentía que permita salvaguardar la misma frente a las posibles inundaciones y los posibles costes asociados a las mismas.

Se buscará por tanto la implantación de elementos capaces de laminar las grandes avenidas, siendo los más favorables:

- Depósitos de infiltración.
- Pozos de infiltración.
- Zanjas de infiltración.

4.1.2.2 Enclave ferroviario

Dentro del enclave ferroviario no solo se buscará con el control de las avenidas salvaguardar la infraestructura o garantizar el servicio si no que se primara también el confort de los usuarios.



4.1.2.2.1 Estación

Los SUDS aplicables en el entorno de la estación que generarían un alto control sobre las escorrentías superficiales son los siguientes:

- Cubiertas verdes.
- Depósitos de infiltración.
- Pavimentos permeables.
- Pozos de infiltración.
- Zanjas de infiltración.

4.1.2.2.2 Apartadero

Al igual que en el caso de la gestión de los contaminantes, la gestión de la escorrentía superficial en el caso de los apartaderos se asemeja a la de la infraestructura lineal, siendo por tanto los elementos utilizados los mismos:

- Depósitos de infiltración.
- Pozos de infiltración.
- Zanjas de infiltración.

4.1.2.2.3 Apeadero

En el caso de los apartaderos, se consideran los mismos como estaciones de pequeña magnitud con más relevancia de las vías que en el caso de las estaciones, por tanto, para la gestión de las escorrentías se plantea el uso de los SUDS sugeridos para ambos escenarios:

- Cubiertas verdes.
- Depósitos de infiltración.
- Pavimentos permeables.
- Pozos de infiltración.
- Zanjas de infiltración.

4.1.2.2.4 Cargadero

En el caso de los cargaderos el control de la escorrentía se realizará de manera similar al realizado sobre el trazado ferroviario, siendo por tanto recomendables los siguientes sistemas de drenaje:

- Depósitos de infiltración.
- Pozos de infiltración.
- Zanjas de infiltración.

4.1.2.2.5 Terminales de mercancías

Por último, en las terminales de mercancías se plantea la utilización de los siguientes elementos para la gestión de las escorrentías:

- Depósitos de infiltración.
- Pavimentos permeables.
- Pozos de infiltración.



4.1.3 Estado de la infraestructura

El estado de la infraestructura es un parámetro relevante a tener en cuenta a la hora de valorar que tipología de SUDS se pueden implementar, tanto para la elección de unos frente a otros como para el tipo a proyectar.

En este apartado se considerarán dos hipótesis. Por un lado, la ejecución de una nueva infraestructura, y por otro la rehabilitación de una infraestructura existente.

4.1.3.1 *Infraestructura lineal*

Dentro de la infraestructura lineal, no tiene especial relevancia encontrarse ante una rehabilitación o un nuevo proyecto y, por tanto, este parámetro no se considerará.

4.1.3.2 *Enclave ferroviario*

En el enclave ferroviario sí que cobra sentido la distinción entre obra nueva y rehabilitación, como se mostrara en los siguientes puntos.

4.1.3.2.1 Estación

El empleo de SUDS en el entorno de la estación estará ligado al estado de la misma. Si es una estación que todavía no se ha construido pueden proyectarse todo tipo de SUDS. Sin embargo, en caso de rehabilitación deberán de considerarse una serie de factores:

- Las cubiertas verdes, si bien pueden resultar una gran alternativa, se limitarán a cubiertas verdes extensivas, dado su menor requerimiento estructural.
- Los pavimentos permeables quedaran restringidos a actuaciones en las que se plantee la renovación de los firmes de las estaciones, buscándose alternativas si estos estuvieran en buen estado.
- Se adaptarán los SUDS a los condicionantes geométricos existentes en cada caso y a la existencia de espacio para su instalación.

4.1.3.2.2 Apartadero

Al igual que en el caso de la infraestructura lineal, en el caso de los apartaderos encontrarse ante una obra nueva o una remodelación de una obra existente no tendrá especial relevancia a la hora de decidir qué tipología de SUDS implementar.

4.1.3.2.3 Apeadero

En este caso nos encontramos ante un elemento análogo a las estaciones, y por lo tanto las recomendaciones serán las mismas:

- Las cubiertas verdes si bien pueden resultar una gran alternativa se limitarán a cubiertas verdes extensivas dado su menor requerimiento estructural.
- Los pavimentos permeables quedaran restringidos a actuaciones en las que se plantee la renovación de los firmes de las estaciones, buscando alternativas si estos estuvieran en buen estado.
- Se adaptarán los SUDS a los condicionantes geométricos existentes en cada caso y a la existencia de espacio para su instalación.

4.1.3.2.4 Cargadero

En el caso de los cargaderos, la instalación de SUDS estará limitada a la geometría y espacios disponibles en el caso de una rehabilitación, pudiendo disponerse con mayor libertad en el caso de proyectos de nueva construcción.



4.1.3.2.5 Terminales de mercancías

En las terminales de mercancías la implantación de SUDS sufre limitaciones similares a lo que ocurre en las estaciones, teniendo que valorarse la sustitución de firmes por pavimentos permeables si fuera necesario actuar sobre los mismos o buscar alternativas.

También, al igual que en los cargaderos, la disposición de los sistemas de drenaje estará condicionada por los elementos existentes en el caso de las rehabilitaciones.

4.1.4 Trenes de tratamiento y combinación de SUDS

Los casos de aplicación anteriormente estudiados sólo contemplan la utilización de SUDS como elementos individuales, siendo una de sus principales funciones su aplicación como trenes de tratamiento.

De esta forma pueden implantarse combinaciones de SUDS que en conjunto ofrezcan un mejor desempeño que su aplicación de manera individual.

En este apartado pasarán a describirse algunos trenes de tratamiento que se consideran de especial relevancia en la red ferroviaria.

4.1.4.1 *Infraestructura lineal*

Una gran alternativa dentro de la infraestructura lineal sería la combinación de un sistema de drenaje para la captación y conducción del agua, como puede ser una cuneta verde, que realiza un tratamiento medio de las aguas, en combinación con un sistema de tratamiento posterior, como podría ser un área de biorretención.

4.1.4.2 *Enclave ferroviario*

Dentro de los enclaves ferroviarios, se determinarán una serie de SUDS cuyo funcionamiento en conjunto determinará en si un tren de tratamiento, es decir, la utilización por ejemplo de una cubierta verde para la captación de las aguas implicará el paso de estos caudales captados a otro sistema de drenaje que continuará con el tren de tratamiento. Esto enlaza con el destino final del agua y se plantearán los trenes de tratamiento en función del resto de parámetros de este análisis.

4.1.5 Climatología

En lo referente a la climatología se considerarán dos parámetros fundamentales, por un lado, la clasificación climática según Köppen (Instituto Geográfico Nacional and Atlas Nacional de España 2010):



Figura 64. Clasificación climática según Köppen (Fuente: [Instituto Geográfico Nacional](#))

Como se puede comprobar en la figura anterior, se clasifica España en diferentes tipos de clima, si bien predominan cuatro:

- Cfb: Clima templado sin estación seca con verano suave.
- Csb: Clima templado con verano seco y suave.
- Csa: Clima templado con verano seco y caluroso.
- Bsk: Clima estepario frío.

A pesar de ser éstos los tipos de clima predominantes en el conjunto de España, sí que aparecen otra serie de ellos puntualmente. La importancia de esta clasificación climática de cara a la selección del tipo de SUD a emplear viene dada por la existencia o no de estaciones secas.

Las estaciones secas pueden imposibilitar o encarecer la utilización de determinados tipos de SUDS que, por cuestiones de vegetación, requieran de una lámina de agua permanente.

La posibilidad de aplicar SUDS en las estaciones secas viene recogida en la siguiente tabla:

Tabla 17. Compatibilidad de los SUDS con estaciones secas.

	Con estación seca	Sin estación seca
Alcorques estructurales	Sí	Sí
Cubiertas verdes	Sí	Sí
Cunetas verdes	Sí	Sí
Depósitos	Sí	Sí
Depósitos de infiltración	Sí	Sí
Estanques de detención (húmedos)	No	Sí
Estanques de detención (secos)	Sí	Sí
Áreas de biorretención	No	Sí
Filtros de arena	Sí	Sí
Humedal artificial	No	Sí
Pavimentos permeables	Sí	Sí
Pozos de infiltración	Sí	Sí
Zanjas de infiltración	Sí	Sí

También se considerará el índice de torrencialidad, puesto que para el control de la escorrentía resulta más útil saber la torrencialidad de las precipitaciones que la media anual de las mismas. Para la elección de los SUDS a aplicar en base a la torrencialidad se empleara la clasificación que se puede visualizar en la Figura 65, extraída de la instrucción de carreteras del apartado correspondiente a drenaje superficial (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo 1990).

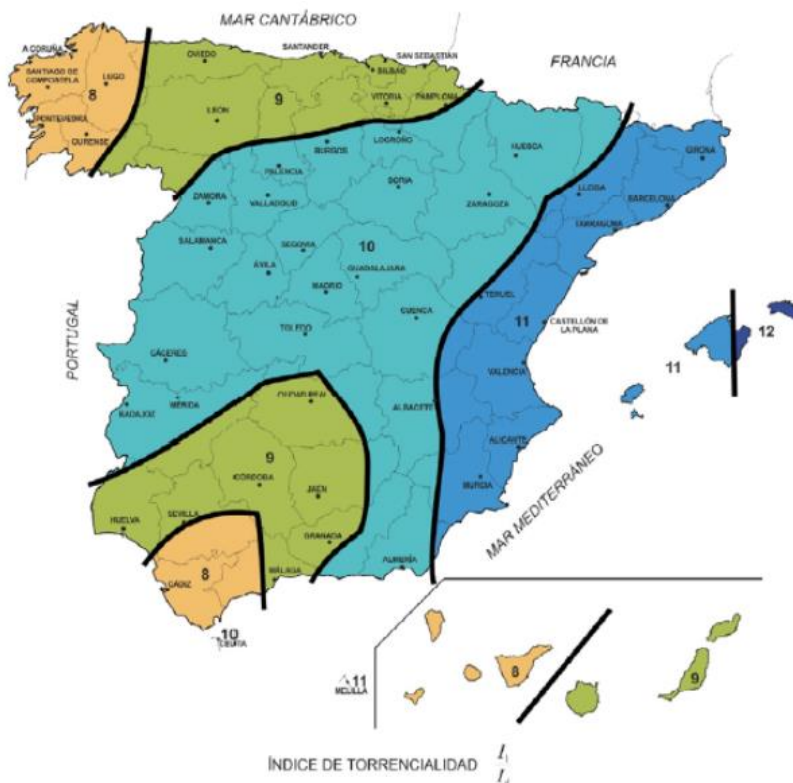


Figura 65. Índices de torrencialidad en España (Fuente (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo 1990))



En la figura anterior aparecen representados los índices de torrencialidad presentes en el territorio español, con valores comprendidos entre 8 y 12. Estando los más altos en la zona del levante y Baleares donde aparecen fenómenos como las gotas frías que producen numerosas inundaciones.

De cara al estudio de la aplicación de SUDS se considerará baja torrencialidad los valores comprendidos entre 8 y 10 (ambos incluidos), mientras que a partir de 10 se considerará alta torrencialidad.

De este modo en las zonas con índices de torrencialidad más altos se recomienda el empleo de elementos auxiliares que permitan un gran control de los volúmenes de escorrentía en episodios como los mencionados. El empleo de estanques de detención permitiría su utilización como zonas verdes gran parte del año pudiendo almacenar grandes volúmenes de agua cuando fuera necesario salvaguardando no solo la infraestructura lineal si no también el entorno.

4.1.6 Objetivo

De cara a la elección de SUDS dentro de cada apartado de la infraestructura, será necesario conocer el destino final de las aguas, aplicando SUDS o Trenes de tratamiento que permitan alcanzar este objetivo.

Los objetivos posibles son 3:

- Infiltración al terreno: con este se buscará la recarga de acuíferos permitiendo el mantenimiento de los caudales base y una reducción en los costes de tratamiento de las aguas residuales, así como una mejora de la calidad.
- Almacenamiento para su reutilización: de especial relevancia en entornos urbanos, donde las aguas procedentes de la escorrentía pueden ser utilizadas como agua para la limpieza de las calles y el riego de jardines suponiendo un gran ahorro anual para los ayuntamientos.
- Vertido a cauces naturales: una vez se realiza un tratamiento de las aguas por parte de los SUDS, éstas pueden ser vertidas a cauces naturales.

En base al destino final de las aguas se determinará la tipología de SUDS a emplear.

4.1.7 Economía

Por último, se valorará también la perspectiva económica de cada uno de los sistemas potenciales de ser implementados. En base a este criterio, en la siguiente tabla se recogen las diferentes alternativas acompañadas de una valoración sobre el nivel de mantenimiento requerido, así como el coste tanto de implantación como de mantenimiento.

Tabla 18. Valoración de los diferentes SUDS en función del riesgo de colmatación y los costes (Fuente: adaptado de (Jiménez Ariza et al. 2019))

	Mantenimiento y riesgo de colmatación	Coste de implantación	Coste de mantenimiento
Alcorques estructurales	Medio	Medio	Medio
Cubiertas verdes	Medio	Alto	Bajo
Cunetas verdes	Bajo	Bajo	Bajo
Depósitos	Bajo	Medio	Medio
Depósitos de infiltración	Alto	Medio	Alto
Estanques de detención (húmedos)	Medio	Alto	Medio
Estanques de detención (Secos)	Medio	Medio	Medio
Áreas de biorretención	Medio	Medio	Medio
Filtros de arena	Alto	Medio	Alto
Humedal artificial	Alto	Alto	Medio
Pavimentos permeables	Medio	Alto	Alto
Pozos de infiltración	Medio	Medio	Medio
Zanjas de infiltración	Alto	Medio	Medio



4.2 Valoración de los SUDS recomendados en cada elemento de la infraestructura

En este apartado se presentarán una serie de tablas valorando la capacidad de implantación de los diferentes elementos descritos anteriormente en base a los criterios desarrollados.

4.2.1 Infraestructura lineal

Tabla 19. Aplicación de SUDS dentro de la infraestructura lineal (Fuente: Elaboración propia)

	Carga contaminante	Control de la escorrentía	Estado		climatología		Objetivo			Economía		
			Nuevo	rehabilitación	Con época seca	Sin época seca	Infiltración	Reutilización	Vertido a cauce natural	Nivel de mantenimiento	Coste mantenimiento	Coste implantación
Alcorques estructurales	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cubiertas verdes	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cunetas verdes	Media	Bajo	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	Si	Si	Bajo	Bajo	Bajo
Depósitos	Nula	Medio	No aplica	No aplica	Si	Si	No	Si	No	Bajo	Medio	Medio
Depósitos de infiltración	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Alto	Medio	Alto
Estanques de detención (húmedos)	Media	Bajo	No aplica	No aplica	No	Si	No	Si	Si	Medio	Alto	Medio
Estanques de detención (Secos)	Media	Bajo	No aplica	No aplica	Si	Si	No	Si	Si	Medio	Medio	Medio
Áreas de biorretención	Alta	Medio	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Filtros de arena	Media	Bajo	No aplica	No aplica	Si	Si	No	No	Si	Alto	Medio	Alto
Humedal artificial	Media	Bajo	No aplica	No aplica	No	Si	Si	No	Si	Alto	Alto	Medio
Pavimentos permeables	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Pozos de infiltración	Baja	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Zanjas de infiltración	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	Si	Si	Alto	Medio	Medio
Cuneta verde + Área biorretención	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio

4.2.2 Enclave ferroviario

4.2.2.1 Estación

Tabla 20. Aplicación de SUDS dentro de la Estación (Fuente: Elaboración propia)

	Carga contaminante	Control de la escorrentía	Estado		Climatología		Objetivo			Economía		
			Nuevo	rehabilitación	Con época seca	Sin época seca	Infiltración	Reutilización	Vertido a cauce natural	Nivel de mantenimiento	Coste mantenimiento	Coste implantación
Alcorques estructurales	Alta	Bajo	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Cubiertas verdes	Baja	Alto	Intensivas	Extensivas	Si	Si	Si	Si	Si	Medio	Alto	Bajo
Cunetas verdes	Media	Bajo	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Bajo	Bajo	Bajo
Depósitos	Nula	Medio	Si	Si	Si	Si	No	Si	No	Bajo	Medio	Medio
Depósitos de infiltración	Alta	Alto	Si	Variable	Si	Si	Si	No	No	Alto	Medio	Alto
Estanques de detención (húmedos)	Media	Bajo	Si	Variable	No	Si	No	Si	Si	Medio	Alto	Medio
Estanques de detención (Secos)	Media	Bajo	Si	Variable	Si	Si	No	Si	Si	Medio	Medio	Medio
Áreas de biorretención	Alta	Medio	Si	Variable	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Filtros de arena	Alta	Bajo	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	Alto	Medio	Alto
Humedal artificial	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Pavimentos permeables	Alta	Alto	Si	Variable	Si	Si	Si	Si	Si	Medio	Alto	Alto
Pozos de infiltración	Baja	Alto	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Zanjas de infiltración	Alta	Alto	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Alto	Medio	Medio

4.2.2.2 Apartadero

Tabla 21. Aplicación de SUDS en Apartaderos (Fuente: Elaboración propia)

	Carga contaminante	Control de la escorrentía	Estado		Climatología		Objetivo			Economía		
			Nuevo	rehabilitación	Con época seca	Sin época seca	Infiltración	Reutilización	Vertido a cauce natural	Nivel de mantenimiento	Coste mantenimiento	Coste implantación
Alcorques estructurales	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cubiertas verdes	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cunetas verdes	Media	Bajo	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	Si	Si	Bajo	Bajo	Bajo
Depósitos	Nula	Medio	No aplica	No aplica	Si	Si	No	Si	No	Bajo	Medio	Medio
Depósitos de infiltración	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Alto	Medio	Alto
Estanques de detención (húmedos)	Media	Bajo	No aplica	No aplica	No	Si	No	Si	Si	Medio	Alto	Medio
Estanques de detención (Secos)	Media	Bajo	No aplica	No aplica	Si	Si	No	Si	Si	Medio	Medio	Medio
Áreas de biorretención	Alta	Medio	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Filtros de arena	Media	Bajo	No aplica	No aplica	Si	Si	No	No	Si	Alto	Medio	Alto
Humedal artificial	Media	Bajo	No aplica	No aplica	No	Si	Si	No	Si	Alto	Alto	Medio
Pavimentos permeables	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Pozos de infiltración	Baja	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Zanjas de infiltración	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	Si	Si	Alto	Medio	Medio
Cuneta verde + Área biorretención	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio

4.2.2.3 Apeadero

Tabla 22. Aplicación de SUDS en Apeaderos (Fuente: Elaboración propia)

	Carga contaminante	Control de la escorrentía	Estado		climatología		Objetivo			Economía		
			Nuevo	Rehabilitación	Con época seca	Sin época seca	Infiltración	Reutilización	Vertido a cauce natural	Nivel de mantenimiento	Coste mantenimiento	Coste implantación
Alcorques estructurales	Media	Bajo	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Cubiertas verdes	Baja	Alto	Intensivas	Extensivas	Si	Si	Si	Si	Si	Medio	Alto	Bajo
Cunetas verdes	Media	Bajo	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Bajo	Bajo	Bajo
Depósitos	Nula	Medio	Si	Si	Si	Si	No	Si	No	Bajo	Medio	Medio
Depósitos de infiltración	Alta	Alto	Si	Variable	Si	Si	Si	No	No	Alto	Medio	Alto
Estanques de detención (húmedos)	Media	Bajo	Si	Variable	No	Si	No	Si	Si	Medio	Alto	Medio
Estanques de detención (Secos)	Media	Bajo	Si	Variable	Si	Si	No	Si	Si	Medio	Medio	Medio
Áreas de biorretención	Alta	Medio	Si	Variable	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Filtros de arena	Media	Bajo	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	Alto	Medio	Alto
Humedal artificial	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Pavimentos permeables	Alta	Alto	Si	Variable	Si	Si	Si	Si	Si	Medio	Alto	Alto
Pozos de infiltración	Baja	Alto	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Zanjas de infiltración	Alta	Alto	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Alto	Medio	Medio

4.2.2.4 Cargadero

Tabla 23. Aplicación de SUDS dentro en Cargaderos (Fuente: Elaboración propia)

	Carga contaminante	Control de la escorrentía	Estado		Climatología		Objetivo			Economía		
			Nuevo	Rehabilitación	Con época seca	Sin época seca	infiltración	Reutilización	Vertido a cauce natural	Nivel de mantenimiento	Coste mantenimiento	Coste implantación
Alcorques estructurales	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cubiertas verdes	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cunetas verdes	Media	Bajo	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	Si	Si	Bajo	Bajo	Bajo
Depósitos	Nula	Medio	No aplica	No aplica	Si	Si	No	Si	No	Bajo	Medio	Medio
Depósitos de infiltración	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Alto	Medio	Alto
Estanques de detención (húmedos)	Media	Bajo	No aplica	No aplica	No	Si	No	Si	Si	Medio	Alto	Medio
Estanques de detención (Secos)	Media	Bajo	No aplica	No aplica	Si	Si	No	Si	Si	Medio	Medio	Medio
Áreas de biorretención	Alta	Medio	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Filtros de arena	Media	Bajo	No aplica	No aplica	Si	Si	No	No	Si	Alto	Medio	Alto
Humedal artificial	Media	Bajo	No aplica	No aplica	No	Si	Si	No	Si	Alto	Alto	Medio
Pavimentos permeables	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	Si	Si	Medio	Alto	Alto
Pozos de infiltración	Baja	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Zanjas de infiltración	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	Si	Si	Alto	Medio	Medio
Cuneta verde + Área biorretención	Alta	Alto	No aplica	No aplica	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio

4.2.2.5 Terminal de mercancías

Tabla 24. Aplicación de SUDS en Terminales de mercancías (Fuente: Elaboración propia)

	Carga contaminante	Control de la escorrentía	Estado		climatología		Objetivo			Economía		
			Nuevo	Rehabilitación	Con época seca	Sin época seca	infiltración	Reutilización	Vertido a cauce natural	Nivel de mantenimiento	Coste mantenimiento	Coste implantación
Alcorques estructurales	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cubiertas verdes	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Cunetas verdes	Media	Bajo	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Bajo	Bajo	Bajo
Depósitos	Nula	Medio	Si	Si	Si	Si	No	Si	No	Bajo	Medio	Medio
Depósitos de infiltración	Alta	Alto	Si	Variable	Si	Si	Si	No	No	Alto	Medio	Alto
Estanques de Detención (húmedos)	Media	Bajo	Si	Variable	No	Si	No	Si	Si	Medio	Alto	Medio
Estanques de detención (Secos)	Media	Bajo	Si	Variable	Si	Si	No	Si	Si	Medio	Medio	Medio
Áreas de biorretención	Alta	Medio	Si	Variable	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Filtros de arena	Media	Bajo	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	Alto	Medio	Alto
Humedal artificial	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Pavimentos permeables	Alta	Alto	Si	Variable	Si	Si	Si	Si	Si	Medio	Alto	Alto
Pozos de infiltración	Baja	Alto	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio
Zanjas de infiltración	Alta	Alto	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Alto	Medio	Medio
Cuneta verde + Área biorretención	Alta	Alto	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Medio	Medio	Medio



4.3 Diagramas de flujo para la selección

Con el objetivo de realizar una interpretación gráfica de las tablas del apartado 4.2 se elabora un árbol de decisión que contempla 540 casos de aplicación de SUDS dentro de las redes ferroviarias.

Dado el tamaño del árbol de decisión generado, y de cara a facilitar su empleo, se decide su división en otros árboles de menor tamaño, siendo la primera división en función de la parte de la red en la que se pretenden implementar los SUDS (Infraestructura lineal, Estaciones, Apartaderos, Apeaderos, Cargaderos o Terminales de Mercancías).

4.3.1 Funcionamiento del árbol de decisión

En el desarrollo de los diagramas se tomarán una serie de decisiones que se indicarán a continuación.

4.3.1.1 *Estado de la Infraestructura*

Este paso estará presente dentro de los árboles de decisión correspondientes a las estaciones, los apeaderos y las terminales de mercancías. En estos elementos de la red, tiene relevancia encontrarnos ante una obra nueva o una rehabilitación, apareciendo por tanto la opción de determinar este parámetro de cara a hacer una recomendación adecuada sobre que SUDS emplear.

4.3.1.2 *Objetivo Final de las Aguas*

El objetivo final de las aguas será un parámetro a determinar en los 6 árboles de decisión propuestos en el presente documento, diferenciando por tanto el destino final de las aguas entre reutilización, infiltración o vertido a un cauce natural.

4.3.1.3 *Zona climática*

La zona climática se determinará en base a la clasificación de Köppen (Figura 64), de esta clasificación se extrae que la práctica totalidad del territorio español está comprendido dentro de cuatro tipos de clima (Cfd, Csa, Csb y Bsk). Sin embargo, y con la finalidad de poder ser utilizado universalmente, se plantea la posibilidad de seguir adelante indicando si la zona de estudio tiene estación seca o no.

Por ejemplo, en caso de que la zona de estudio no se corresponda con los 4 tipos de clima generales, o si se desconoce la zona climática concreta, solo se deberá responder a la pregunta sobre si existe estación seca o no.

4.3.1.4 *Torrencialidad*

La torrencialidad es un parámetro clave a la hora de determinar qué tipos de SUDS emplear dentro de la red ferroviaria. A lo largo de este documento se ha decidido agrupar este parámetro en dos categorías, baja torrencialidad para los territorios con un índice de torrencialidad según la Instrucción de carreteras menor o igual a 10, y alta torrencialidad cuando este sea mayor de 10. Estos valores están recogidos en la (Figura 65).

4.3.1.5 *Renovación de pavimentos*

La instalación de pavimentos permeables acostumbra a ser una solución muy utilizada dentro de los SUDS. Sin embargo, se trata de una medida con un alto coste que dentro de las rehabilitaciones solo se recomienda cuando sea necesario llevar a cabo una renovación de estos por el mal estado de estos.



4.3.1.6 Disponibilidad de espacio

En el caso de no ser posible la instalación de un pavimento permeable en algunos elementos de la red ferroviaria, dentro de las renovaciones será importante considerar la disponibilidad de espacio (generalmente, en caso de disponer de espacio suficiente, se pueden plantear medidas como cunetas verdes). En caso de carecer del espacio necesario, se buscarán alternativas que supongan un menor consumo de superficie.

4.3.2 Infraestructura lineal

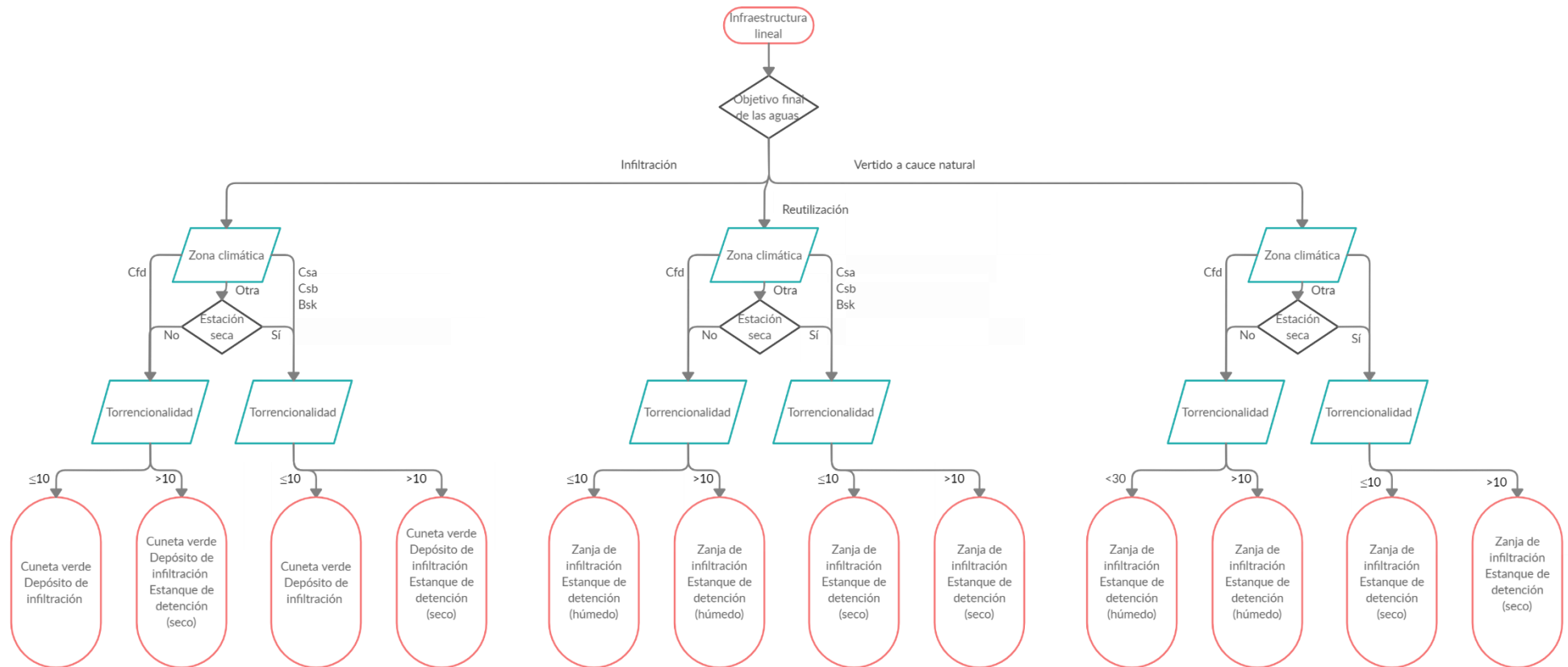


Figura 66. Árbol de decisión infraestructura lineal (Fuente: Elaboración propia).

4.3.3 Apartadero

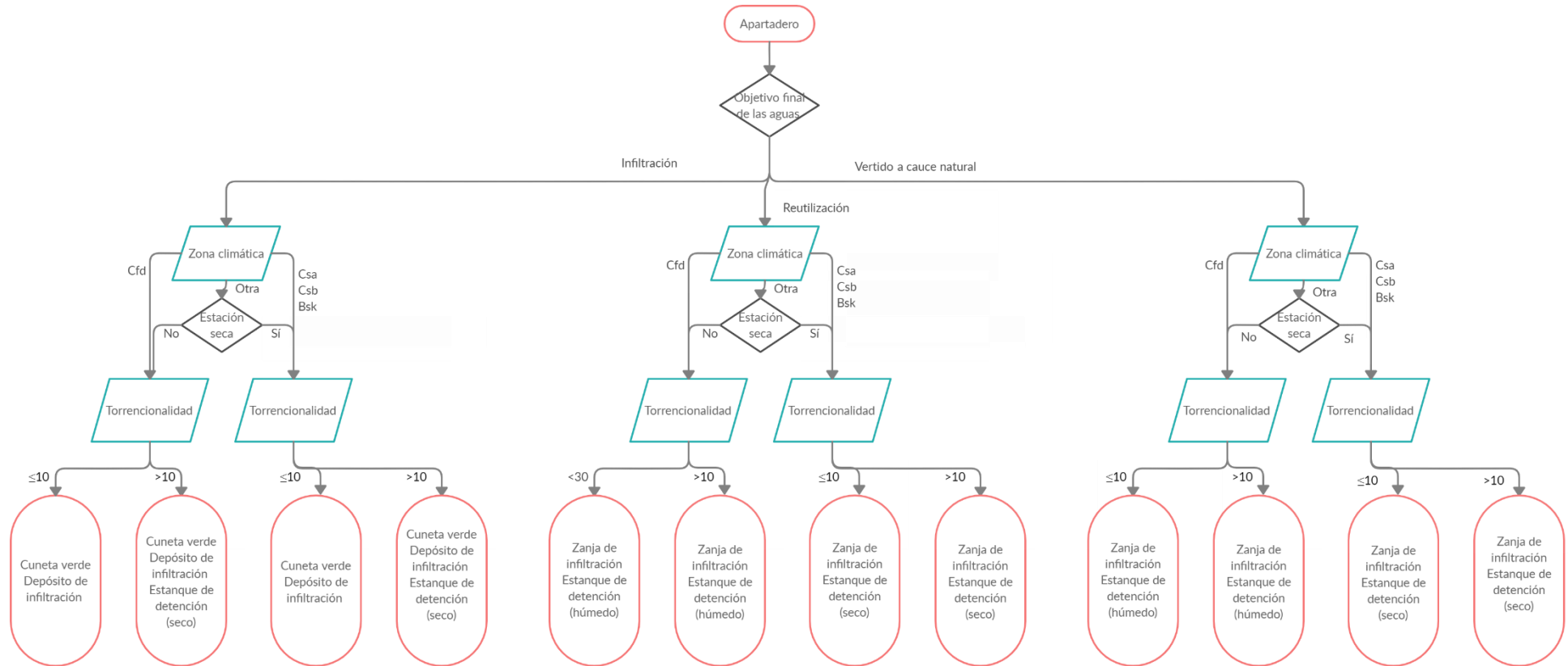


Figura 67. Árbol de decisión apartadero (Fuente: Elaboración propia).

4.3.4 Cargadero

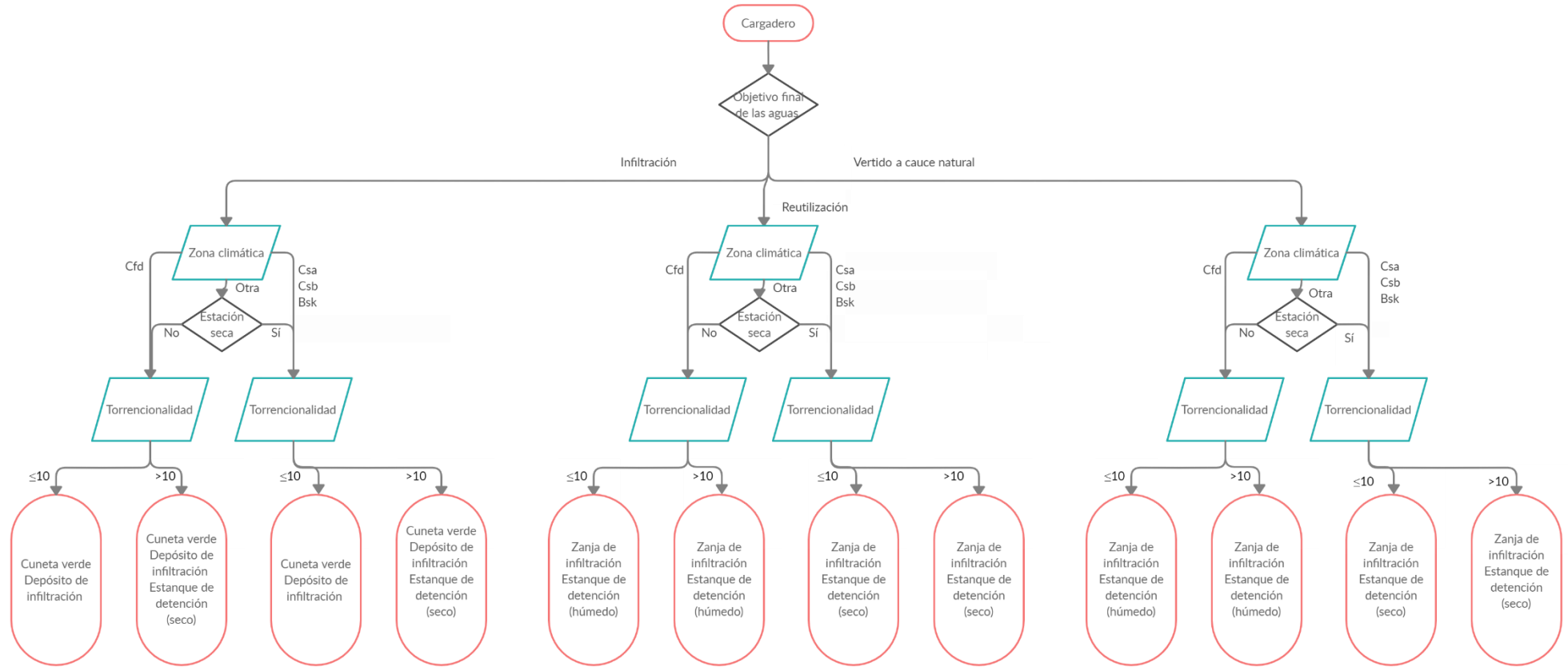


Figura 68. Árbol de decisión cargadero (Fuente: Elaboración propia).

4.3.5 Estación

Dado el gran tamaño de este apartado se decide dividir el mismo en las figuras que se indican a continuación:

Se deberá utilizar la figura ES01 en caso de obra nueva y las figuras ES02 ES03 y ES04 en caso de rehabilitaciones. Dentro de rehabilitaciones la figura ES02 comprenderá las actuaciones que tienen como objetivo la infiltración del agua, ES03 para la reutilización del agua y ES04 para el vertido a cauce natural.

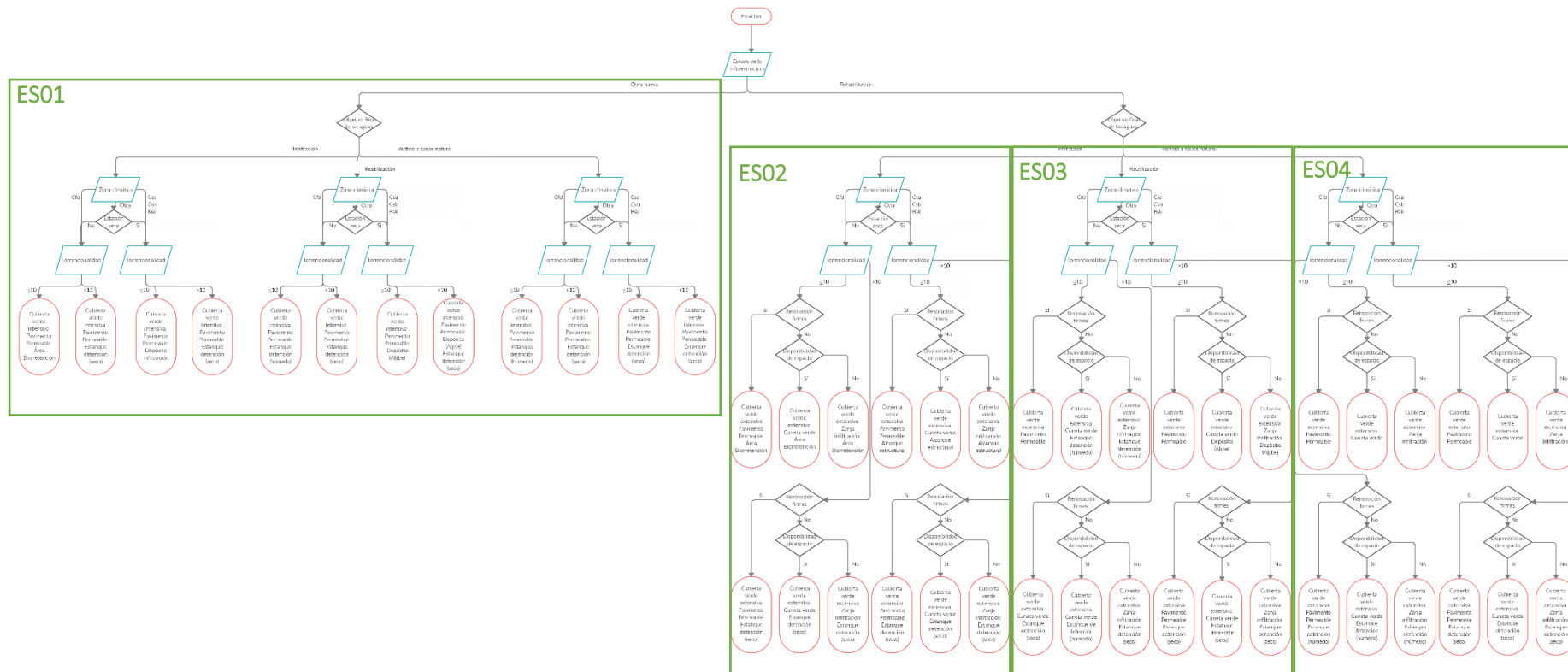


Figura 69. Árbol de decisión estación (Fuente: Elaboración propia).

ES01: Fragmento del árbol de decisión correspondiente a la estación en caso de obra nueva.

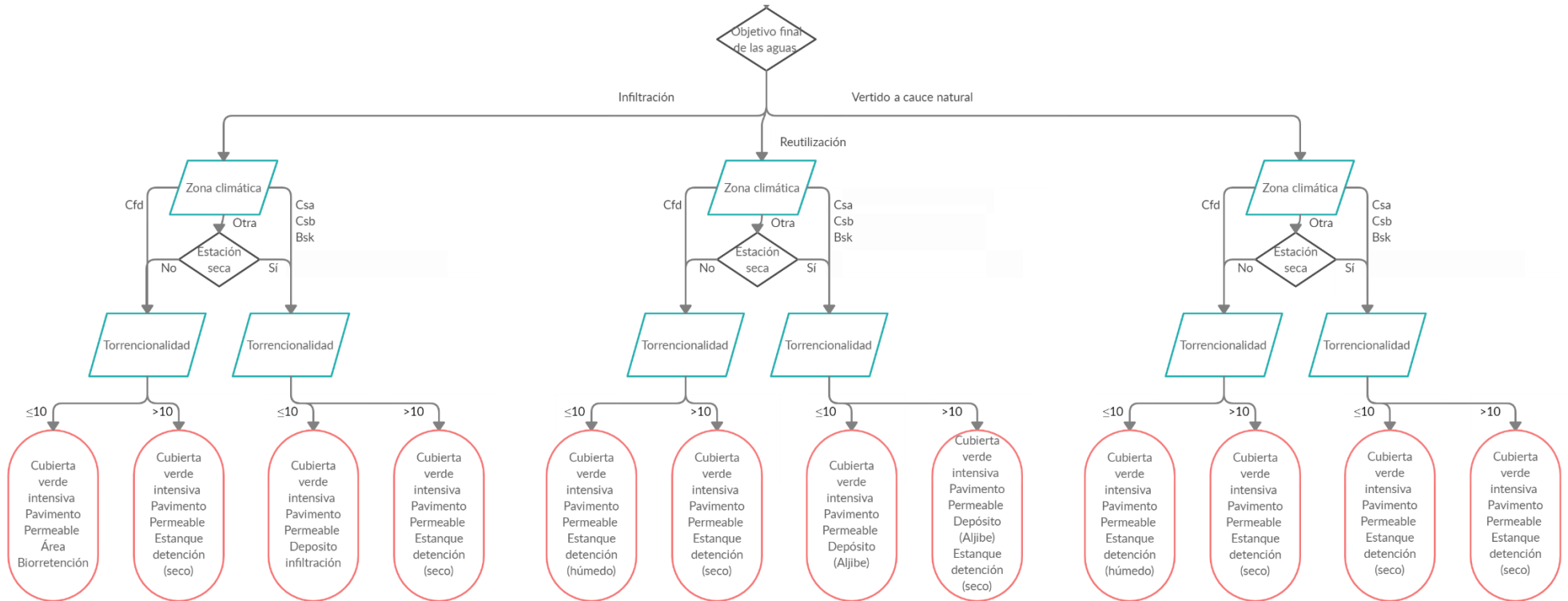


Figura 70. ES01 (Fuente: Elaboración propia).

ES02: Fragmento del árbol de decisión correspondiente a la estación en caso de rehabilitación cuyo objetivo es la infiltración de las aguas.

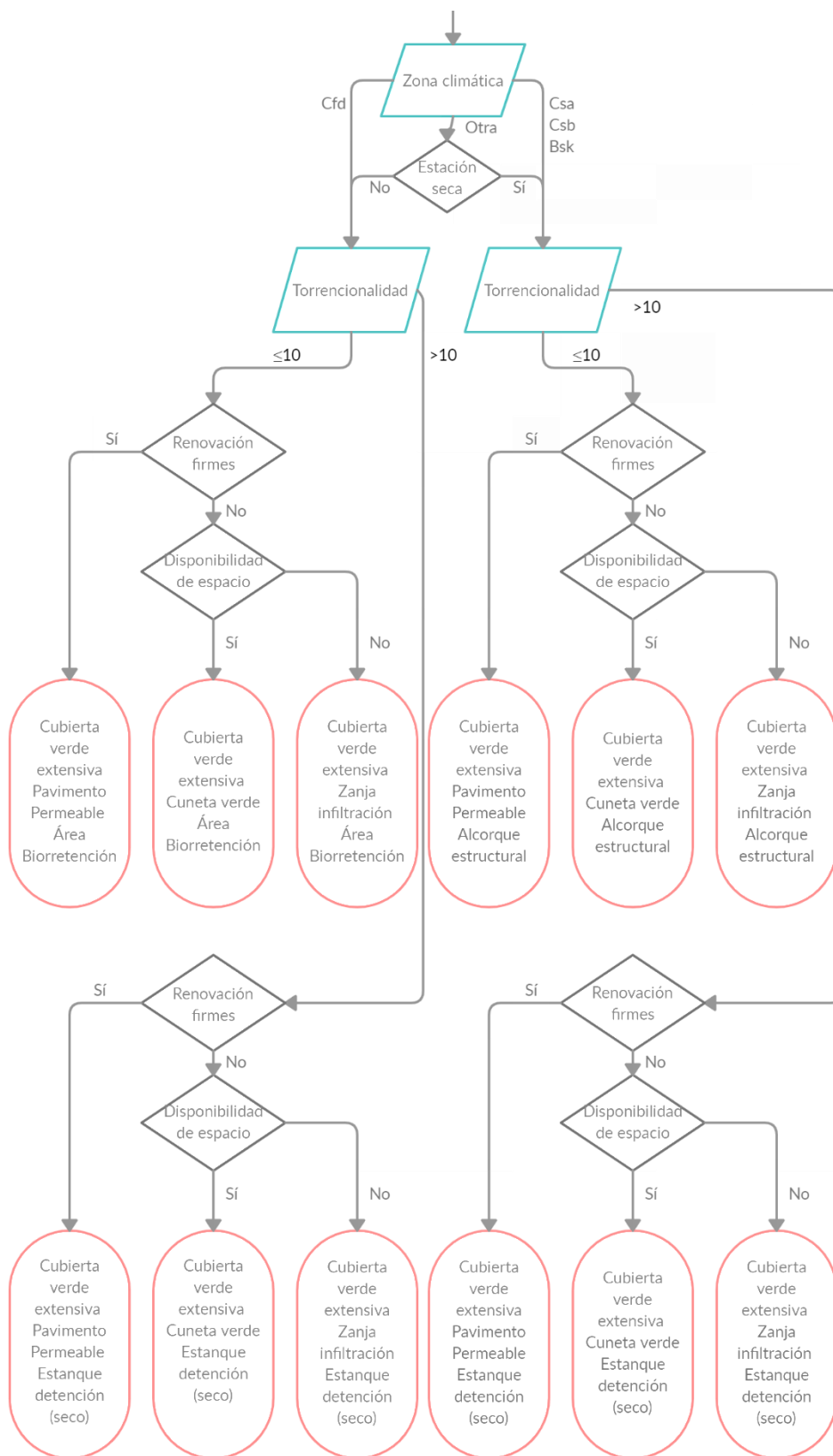


Figura 71. ES02 (Fuente: Elaboración propia).

ES03: Fragmento del árbol de decisión correspondiente a la estación en caso de rehabilitación cuyo objetivo es la reutilización de las aguas.

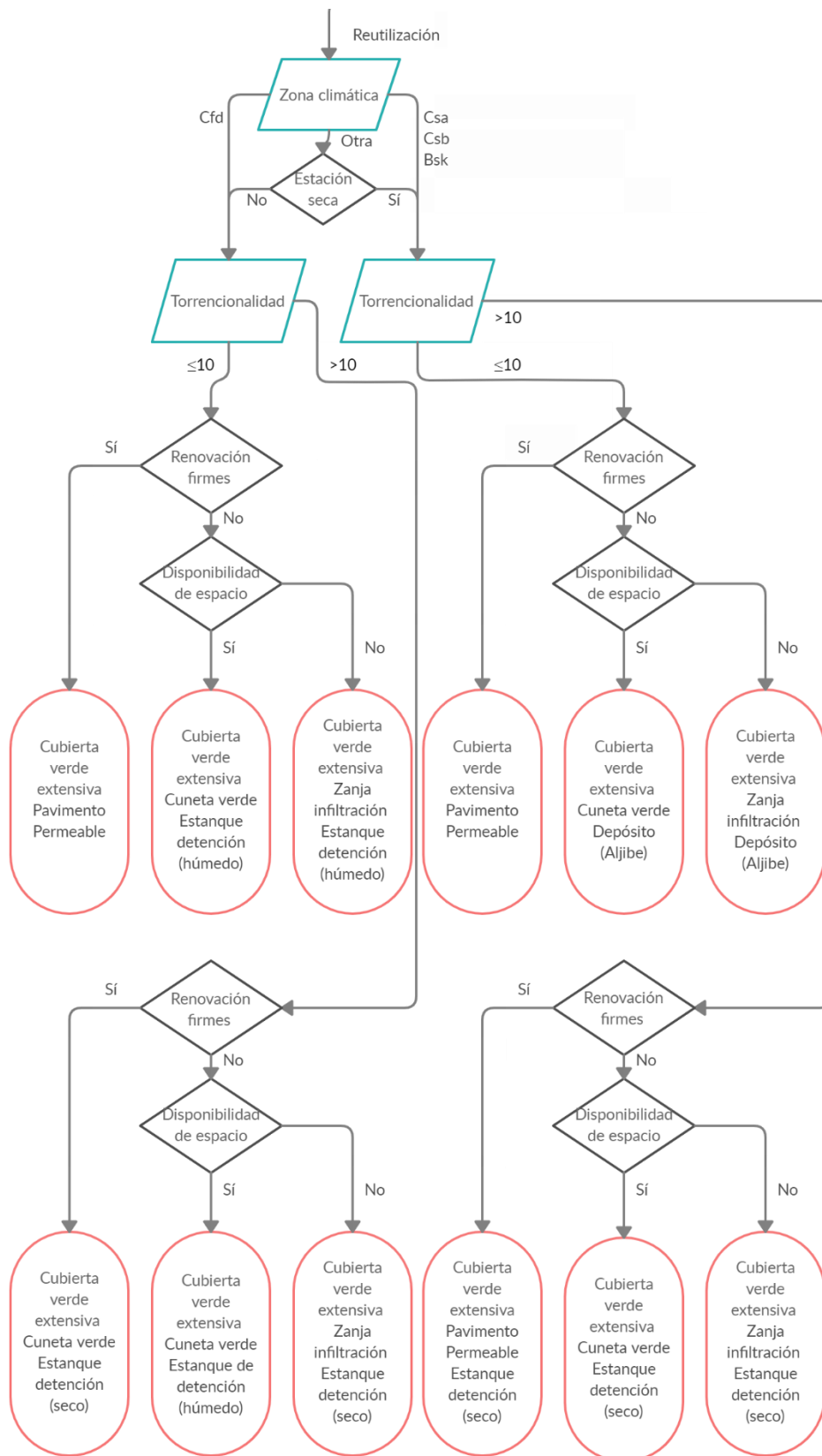


Figura 72. ES03 (Fuente: Elaboración propia).

ES04: Fragmento del árbol de decisión correspondiente a la estación en caso de rehabilitación con el objetivo de vertido a cauce natural de las aguas.

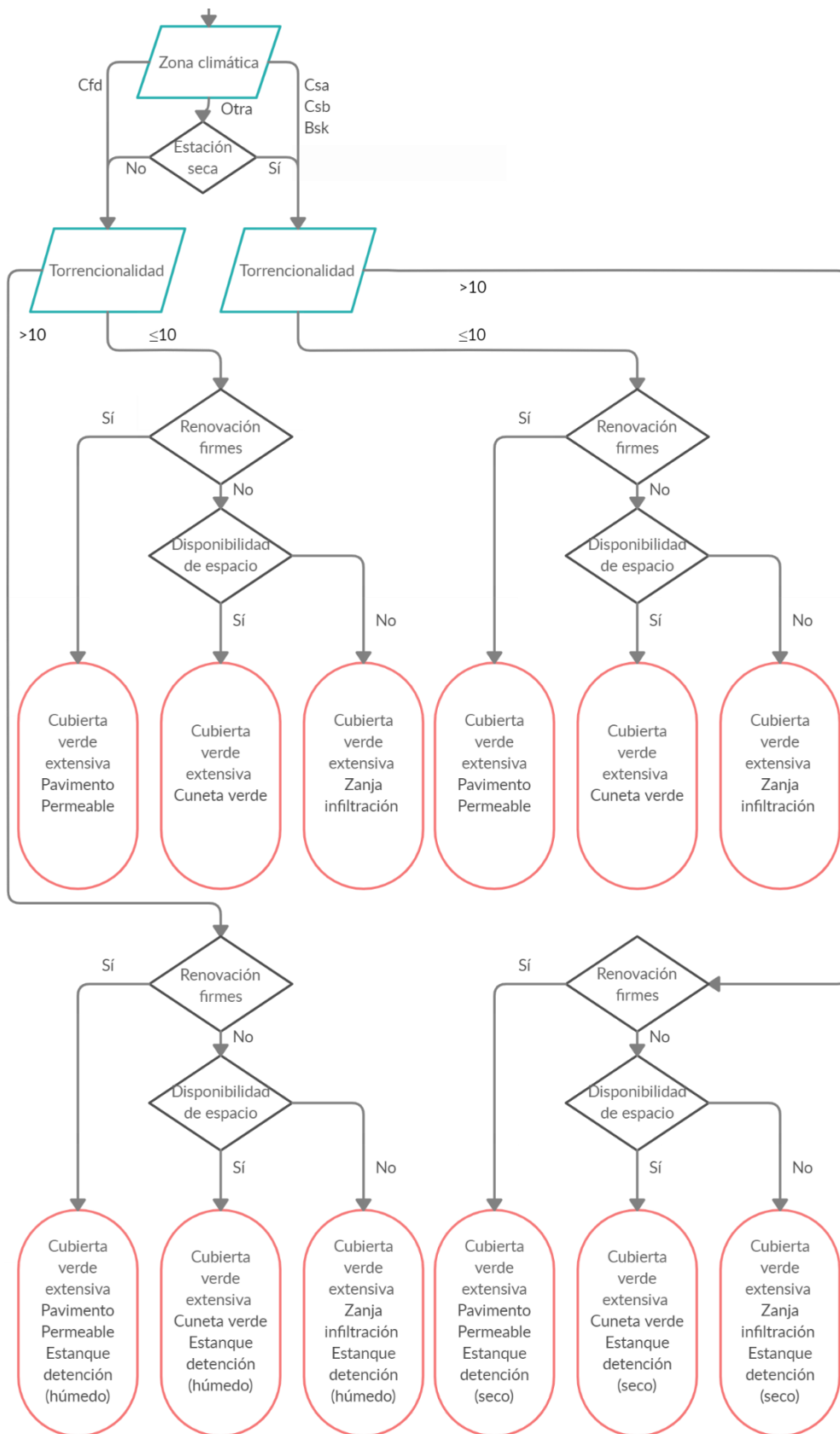


Figura 73. ES04 (Fuente: Elaboración propia).

4.3.6 Apeadero

Dado el gran tamaño de este apartado se decide dividir el mismo en las figuras que se indican a continuación:

Se deberá utilizar la figura AP01 en caso de obra nueva y las figuras AP02 AP03 y AP04 en caso de rehabilitaciones. Dentro de rehabilitaciones la figura AP02 comprenderá las actuaciones que tienen como objetivo la infiltración del agua, AP03 para la reutilización del agua y AP04 para el vertido a cauce natural.

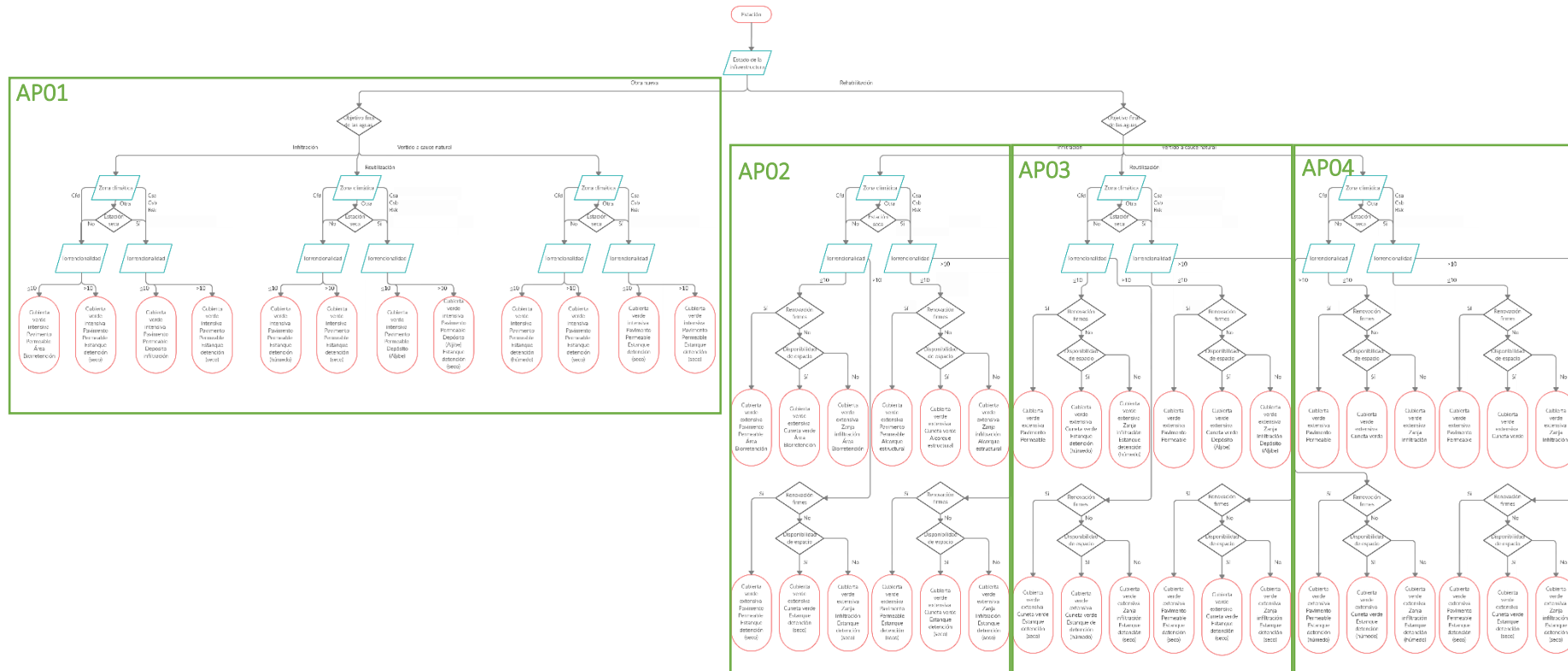


Figura 74. Árbol de decisión apeadero (Fuente: Elaboración propia).

AP01: Fragmento del árbol de decisión correspondiente a un apeadero en el caso de obra nueva.

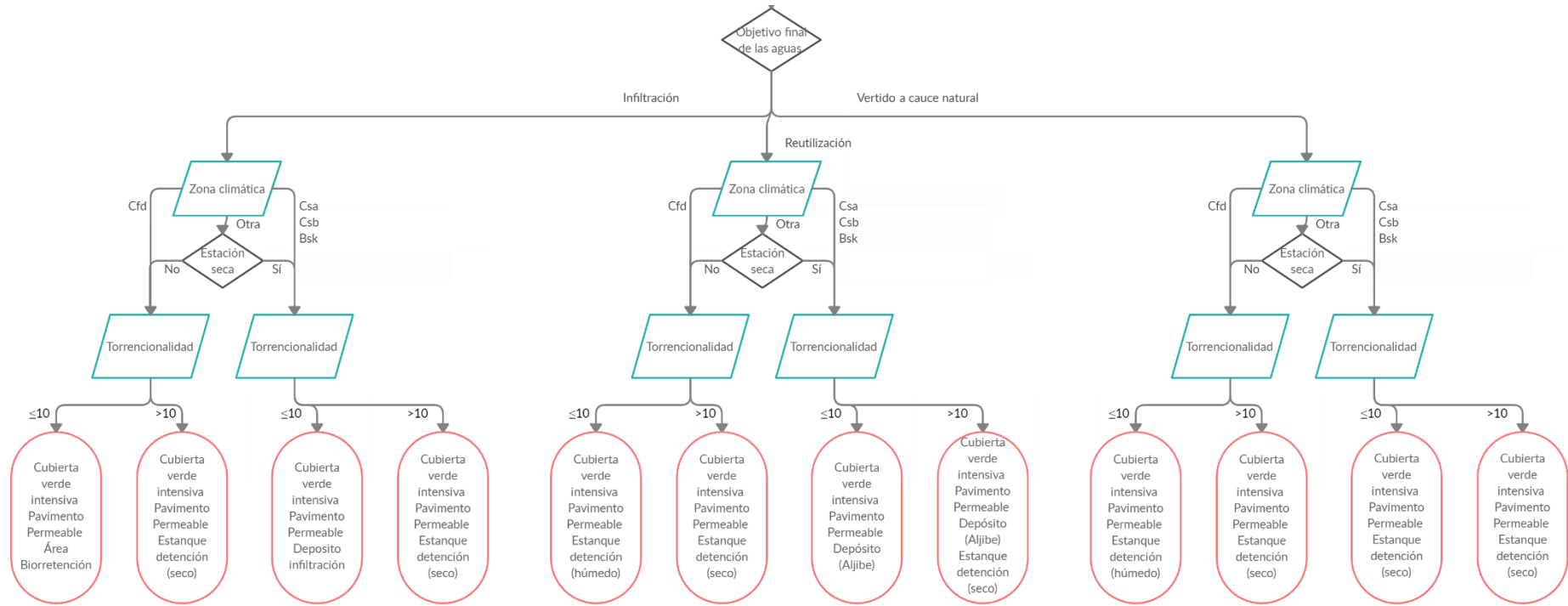


Figura 75. AP01 (Fuente: Elaboración propia).

AP02: Fragmento del árbol de decisión correspondiente al apeadero en caso de rehabilitación con el objetivo de la infiltración de las aguas.

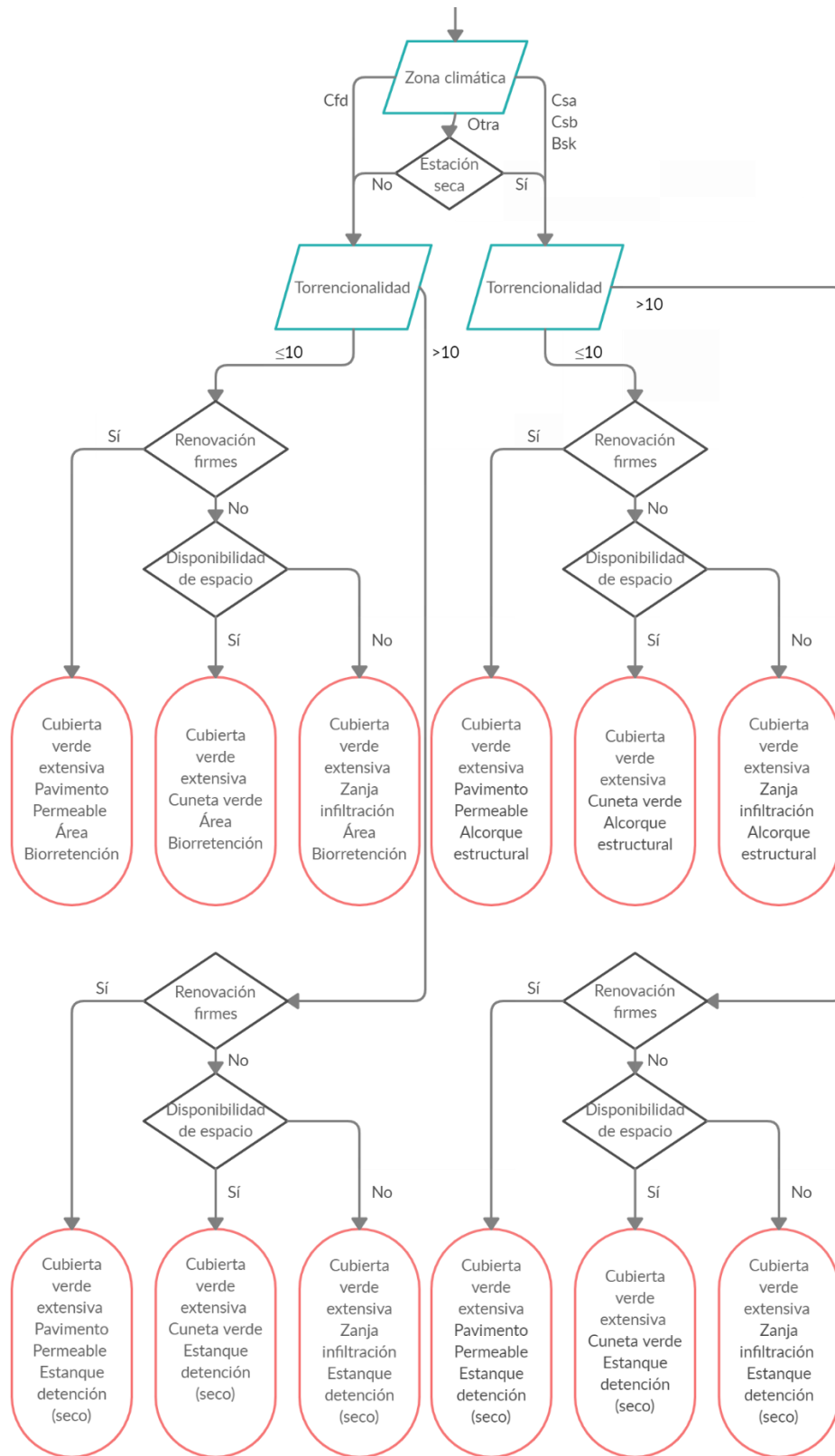


Figura 76. AP02 (Fuente: Elaboración propia).

AP03: Fragmento del árbol de decisión correspondiente al apeadero en caso de rehabilitación con el objetivo de la reutilización de las aguas.

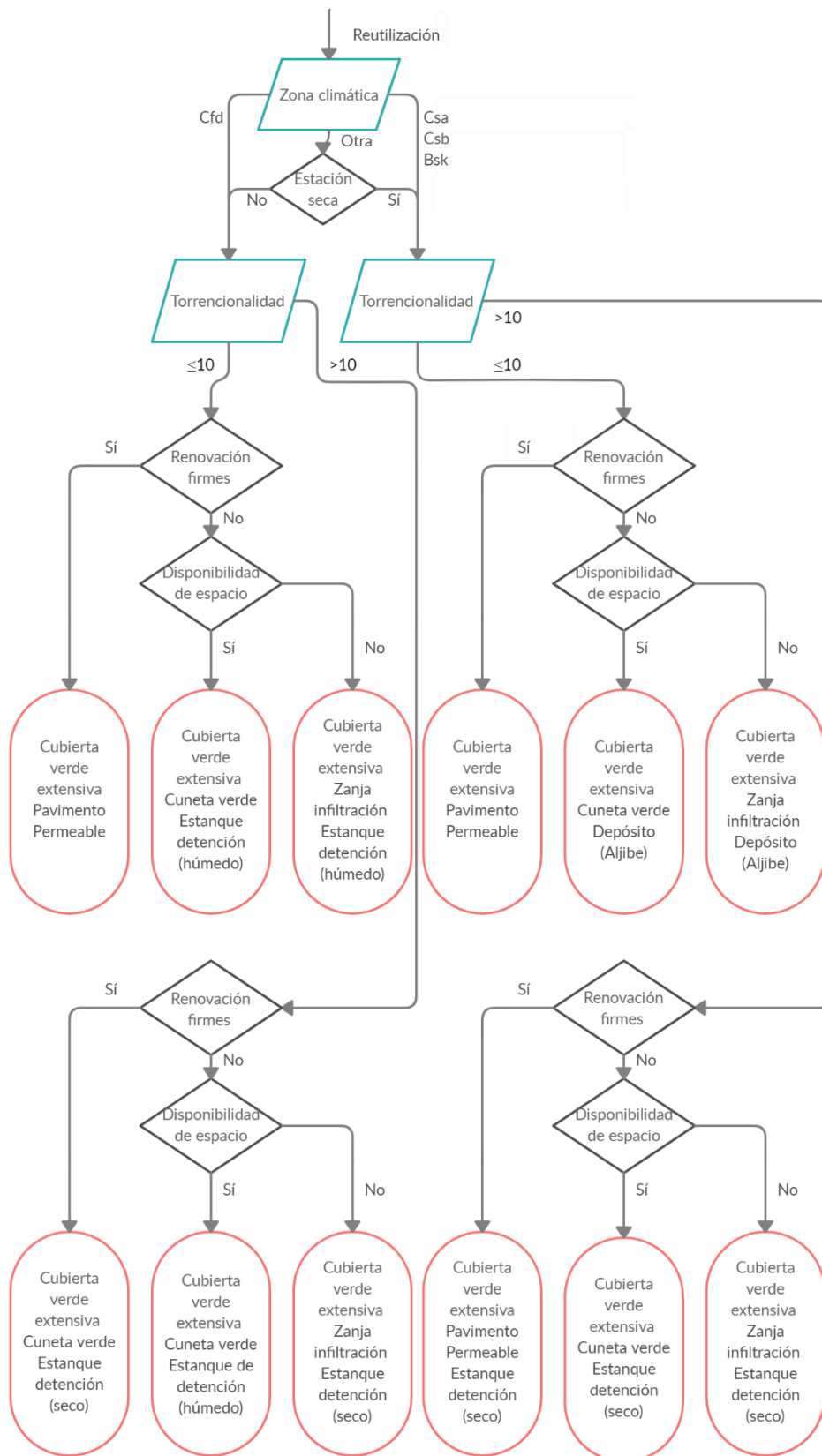


Figura 77. AP03 (Fuente: Elaboración propia).

AP04: Fragmento del árbol de decisión correspondiente al apeadero en caso de rehabilitación cuyo objetivo es el vertido a cauce natural de las aguas.

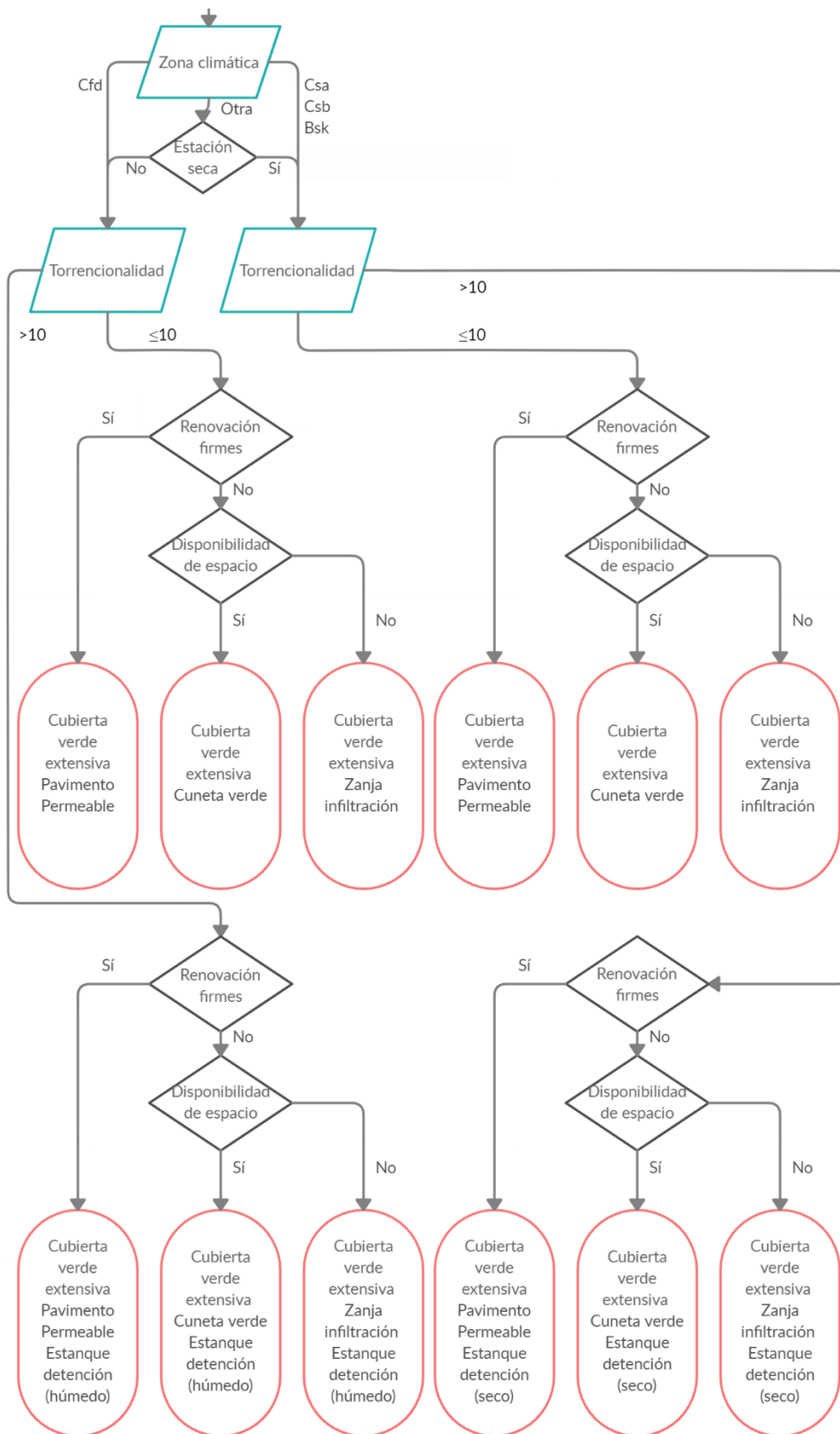


Figura 78. AP04 (Fuente: Elaboración propia).

4.3.7 Terminal de mercancías

Dado el gran tamaño de este apartado se decide dividir el mismo en las figuras que se indican a continuación:

Se deberá utilizar la figura TM01 en caso de obra nueva y las figuras TM02 TM03 y TM04 en caso de rehabilitaciones. Dentro de rehabilitaciones la figura TM02 comprenderá las actuaciones que tienen como objetivo la infiltración del agua, TM03 para la reutilización del agua y TM04 para el vertido a cauce natural.

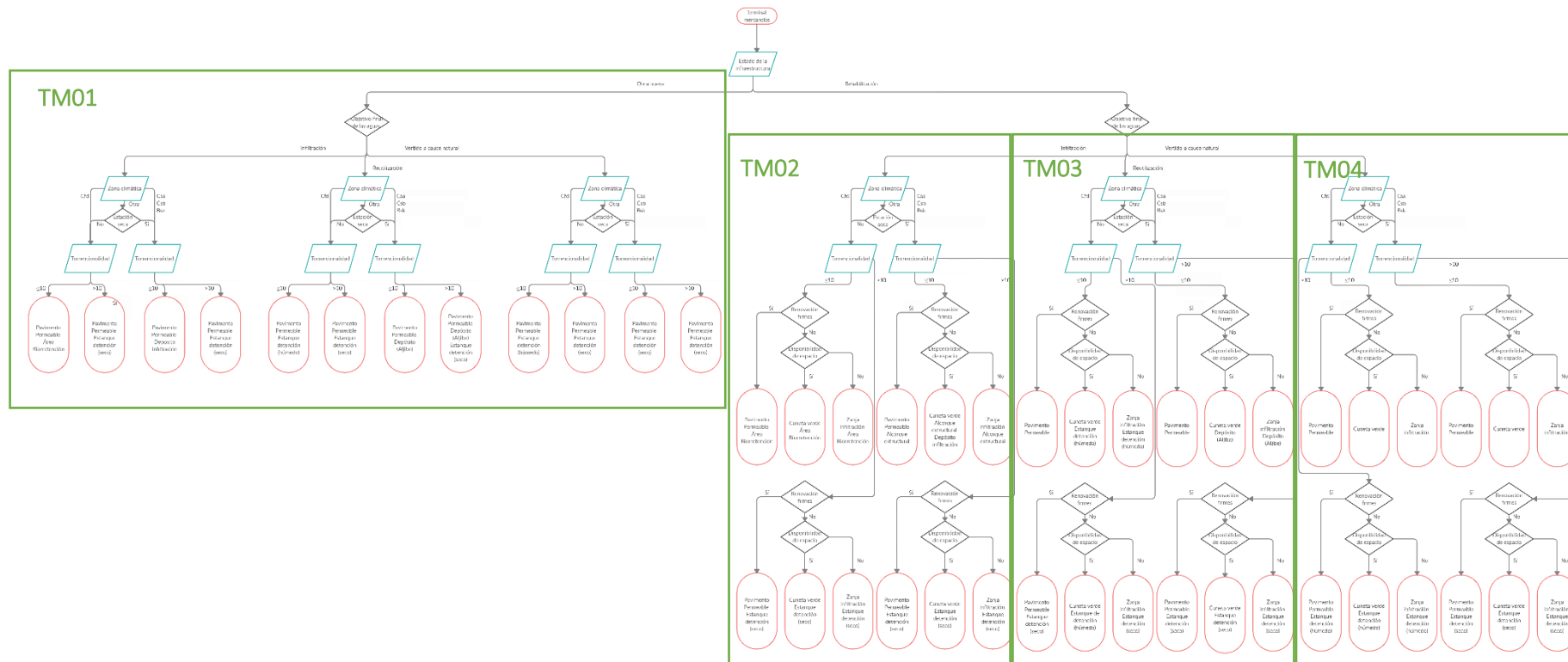


Figura 79. Árbol de decisión terminal de mercancías (Fuente: Elaboración propia).

TM01: Fragmento del árbol de decisión correspondiente a una terminal de mercancías en caso de obra nueva.

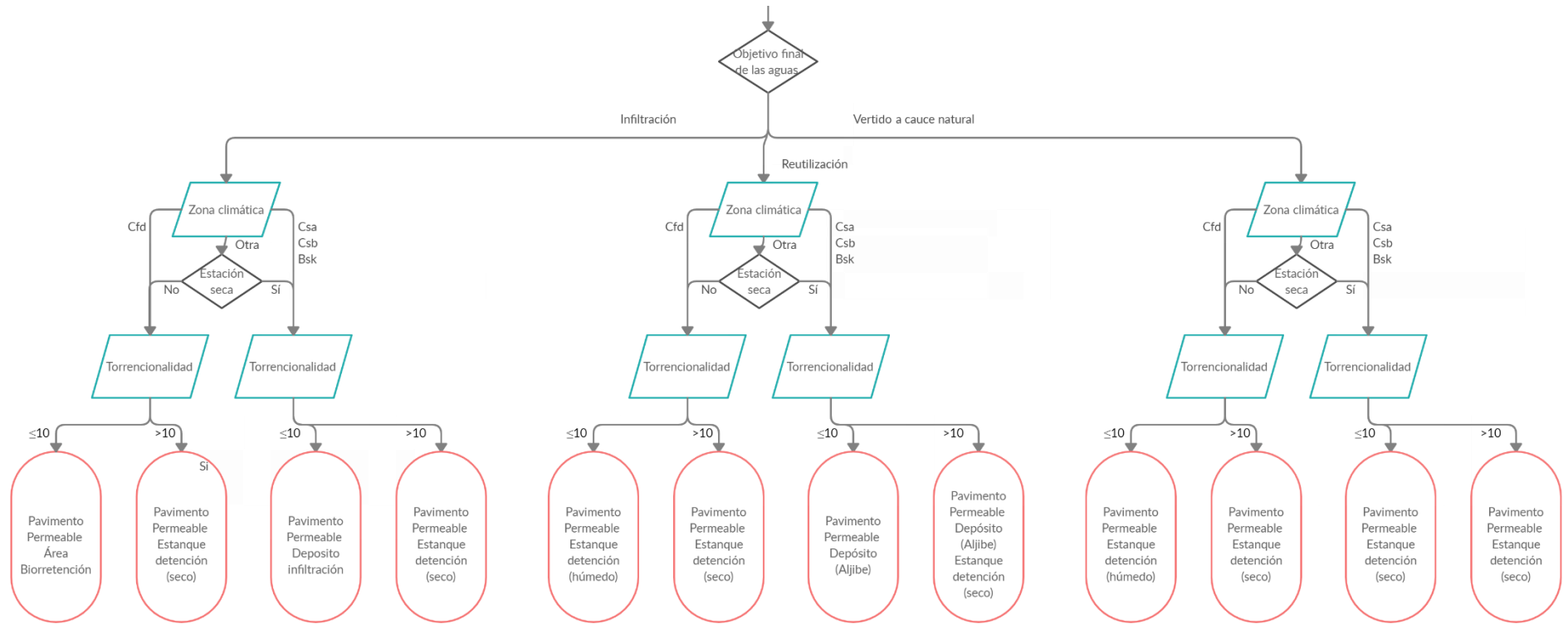


Figura 80. TM01 (Fuente: Elaboración propia).

TM02: Fragmento del árbol de decisión correspondiente a una terminal de mercancías en caso de rehabilitación con el objetivo de la infiltración de las aguas.

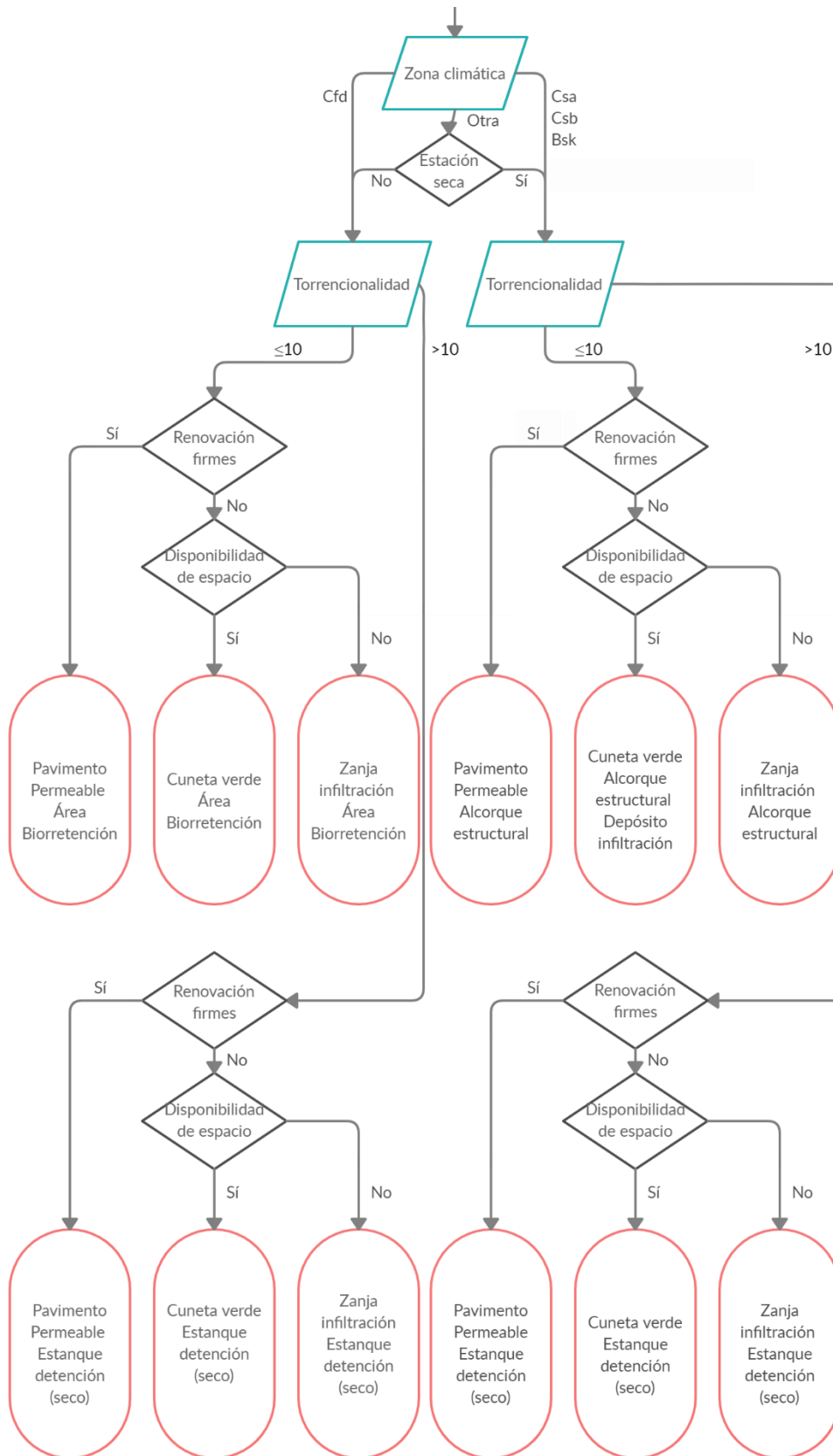


Figura 81. TM02 (Fuente: Elaboración propia).

TM03: Fragmento del árbol de decisión correspondiente a una terminal de mercancías en caso de rehabilitación cuyo objetivo es la reutilización de las aguas.

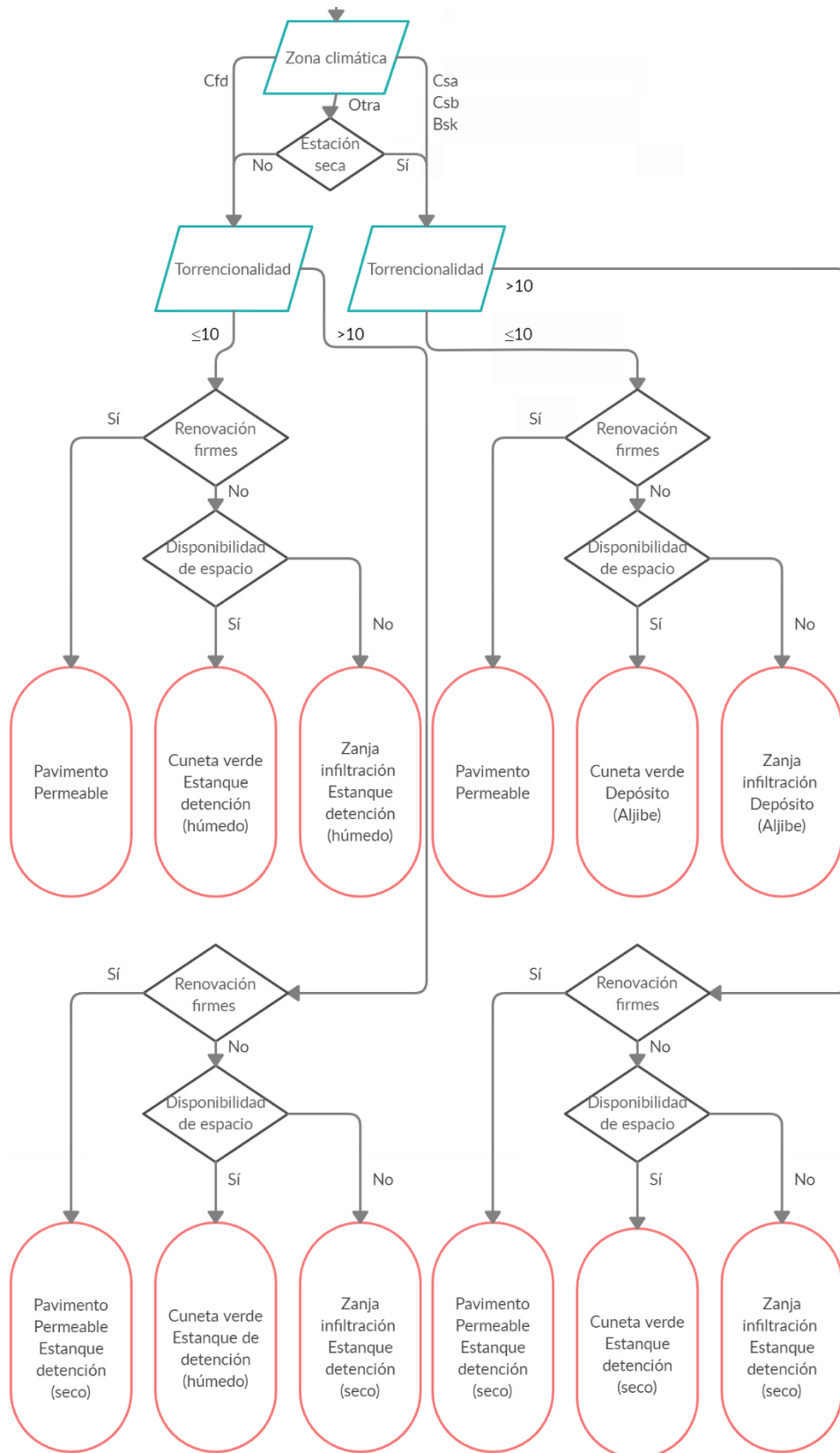


Figura 82. TM03 (Fuente: Elaboración propia).

TM04: Fragmento del árbol de decisión correspondiente a una terminal de mercancías en caso de rehabilitación con el objetivo de vertido a cauce natural de las aguas.

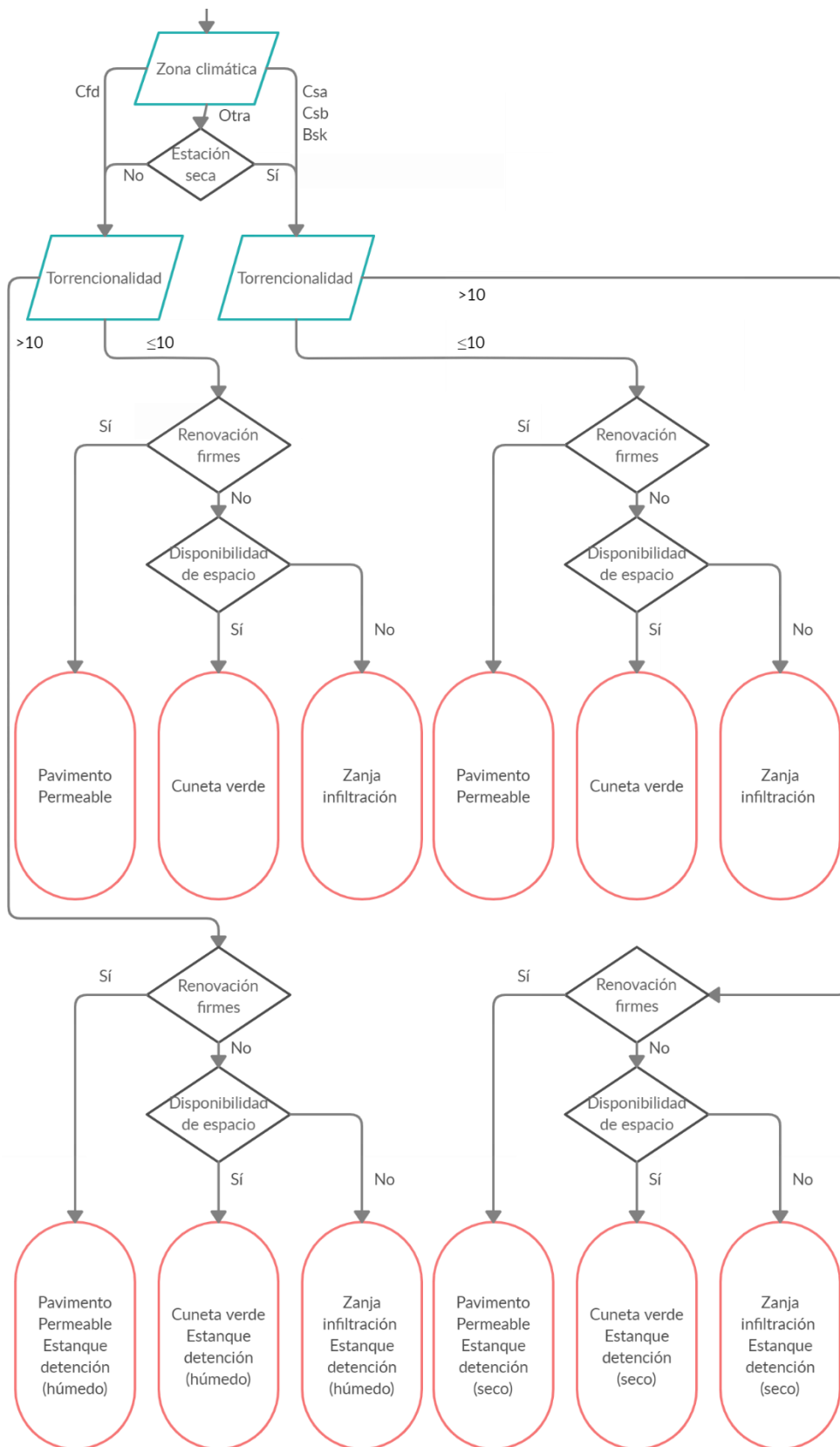


Figura 83. TM04 (Fuente: Elaboración propia).

5 Elaboración de aplicación web

De cara a facilitar la utilización de los árboles de decisión por parte de los técnicos competentes, se desarrolla una aplicación basada en HTML y JavaScript que actúa como asistente destinado a indicar las salidas de los árboles en base a las entradas indicadas en la interfaz gráfica.

El código empleado para la realización de la aplicación quedará recogido dentro del siguiente enlace de GitHub (<https://github.com/alvaro492/APPTFM>) de cara a que cualquier persona interesada pueda hacer uso de él. La aplicación estará alojada en el siguiente dominio (<http://sudsferrocarriles.alvaro.one/>) accesible mediante el siguiente código QR:



Figura 84. Código QR (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, se hará un repaso a la interfaz de la aplicación:

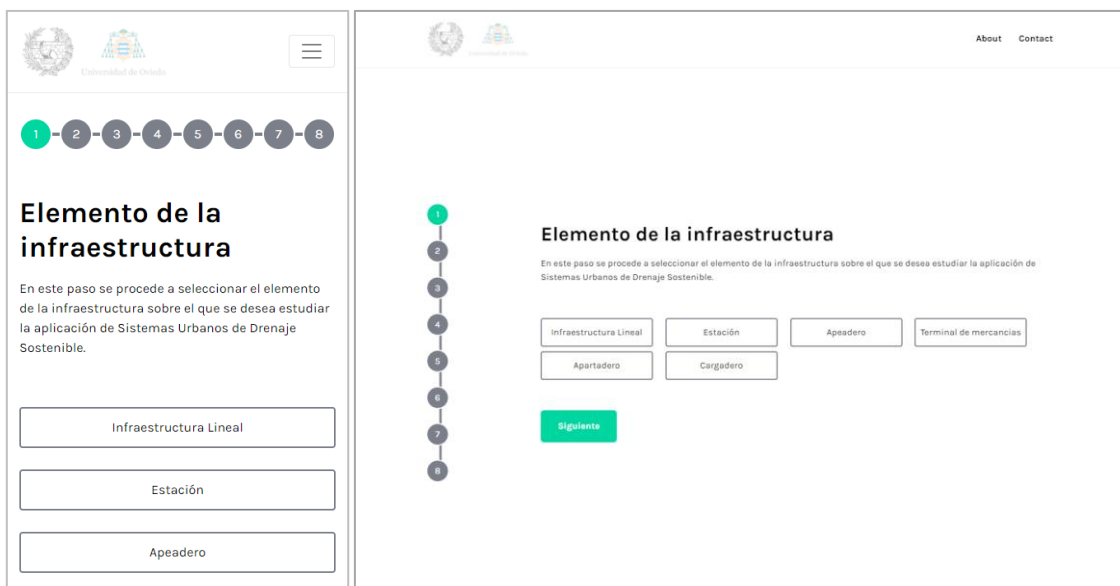


Figura 85. Portada de la aplicación (izquierda versión móvil, derecha versión escritorio) (Fuente: Elaboración propia).

Dentro de la aplicación tanto en la versión móvil como en la versión escritorio se puede acceder a un resumen de la misma, este resumen está recogido dentro de la pestaña "About" como se muestra en la Figura 86.

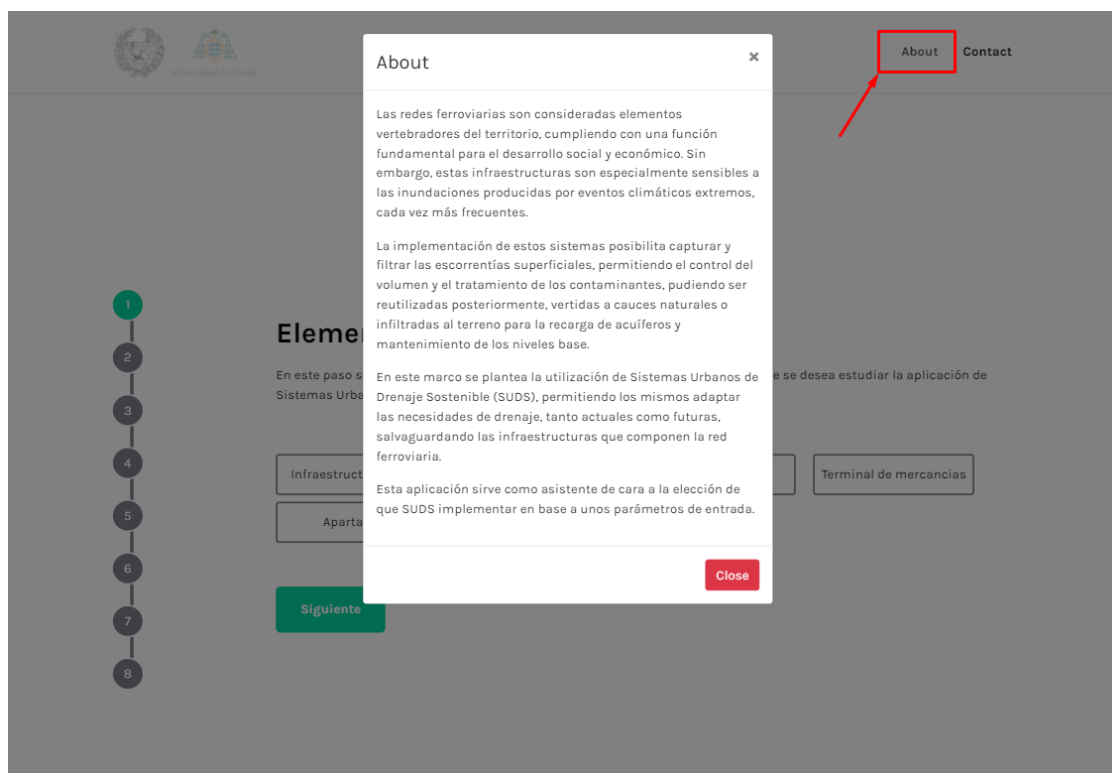


Figura 86. Resumen de la aplicación I (Fuente: Elaboración propia).

De igual manera, la pestaña “Contact” incluye la información de contacto en caso de tener interés en algún aspecto relacionado con la aplicación el trabajo realizado.

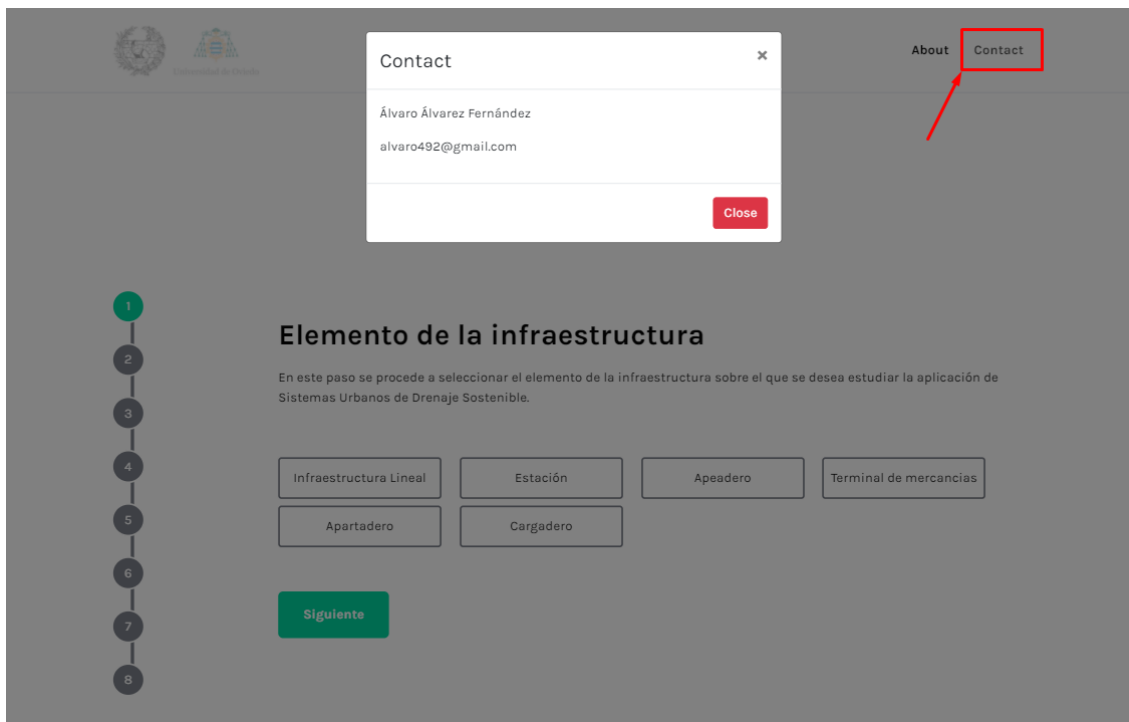


Figura 87. Resumen de la aplicación III (Fuente: Elaboración propia).

Para la utilización de la aplicación será necesario ir seleccionando opciones entre las disponibles a lo largo del número de pasos indicado en la interfaz. El número de pasos se irá actualizando en función de las opciones seleccionadas hasta el momento, puesto que las mismas tienen un carácter dinámico y el número de pasos depende de las decisiones tomadas hasta el momento.

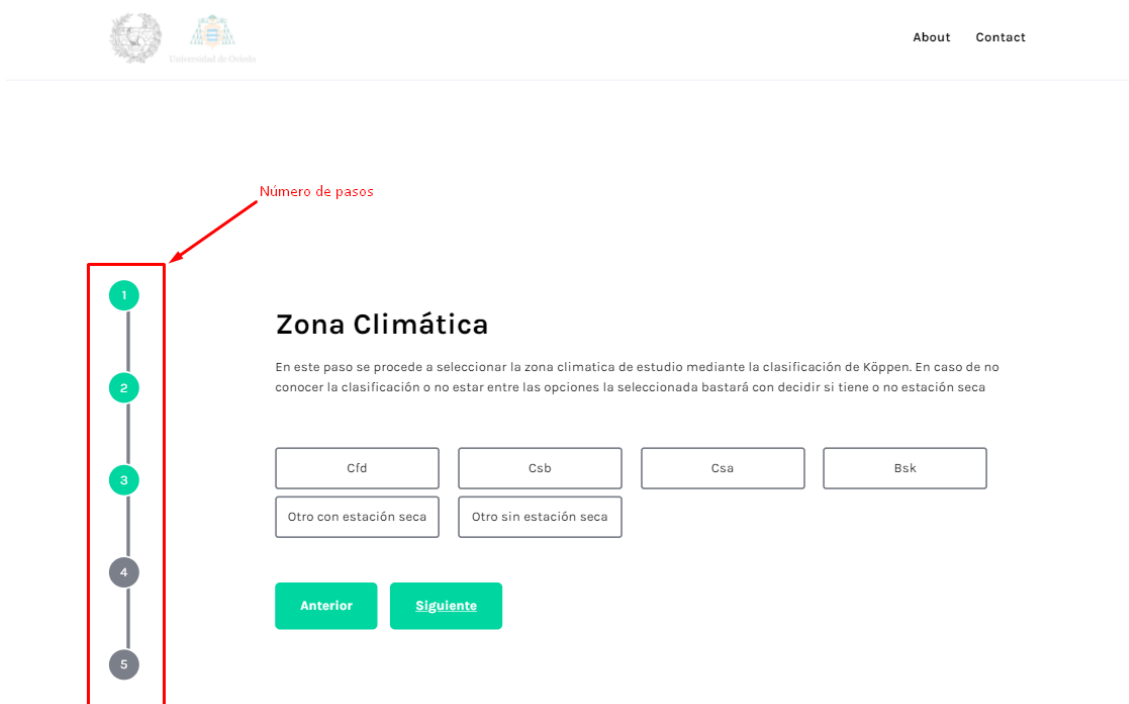


Figura 88. Resumen de la aplicación IV (Fuente: Elaboración propia).



Una vez determinada una opción será necesario pulsar el botón “Siguiete” para pasar al siguiente paso, se incluye también la opción de retroceder mediante el botón “Anterior”.



Objetivo Final de las aguas

En este paso se procede a seleccionar el objetivo a alcanzar con las aguas, bien sea la reutilización, la infiltración o el vertido a un cauce natural.

Infiltración	Reutilización	Vertido Cauce Natural
--------------	---------------	-----------------------

Anterior	Siguiete
----------	----------

Botones retroceso y avance

Figura 89. Resumen aplicación V (Fuente: Elaboración propia).

Al finalizar la toma de decisiones será necesario dar al botón “Calcular” para evaluar las respuestas seleccionadas en busca de la recomendación de SUDS a emplear.



Resultado

Sin Evaluar, Pulse el botón "Calcular"

Anterior	Calcular
----------	----------

Figura 90. Resumen aplicación VI (Fuente: Elaboración propia).

Una vez evaluadas las respuestas seleccionadas el programa mostrara en una lista de texto las recomendaciones se SUDS a emplear (basándose en los árboles de decisión desarrollados en este documento). Adicionalmente se incluirán imágenes de los tipos de SUDS propuestos.

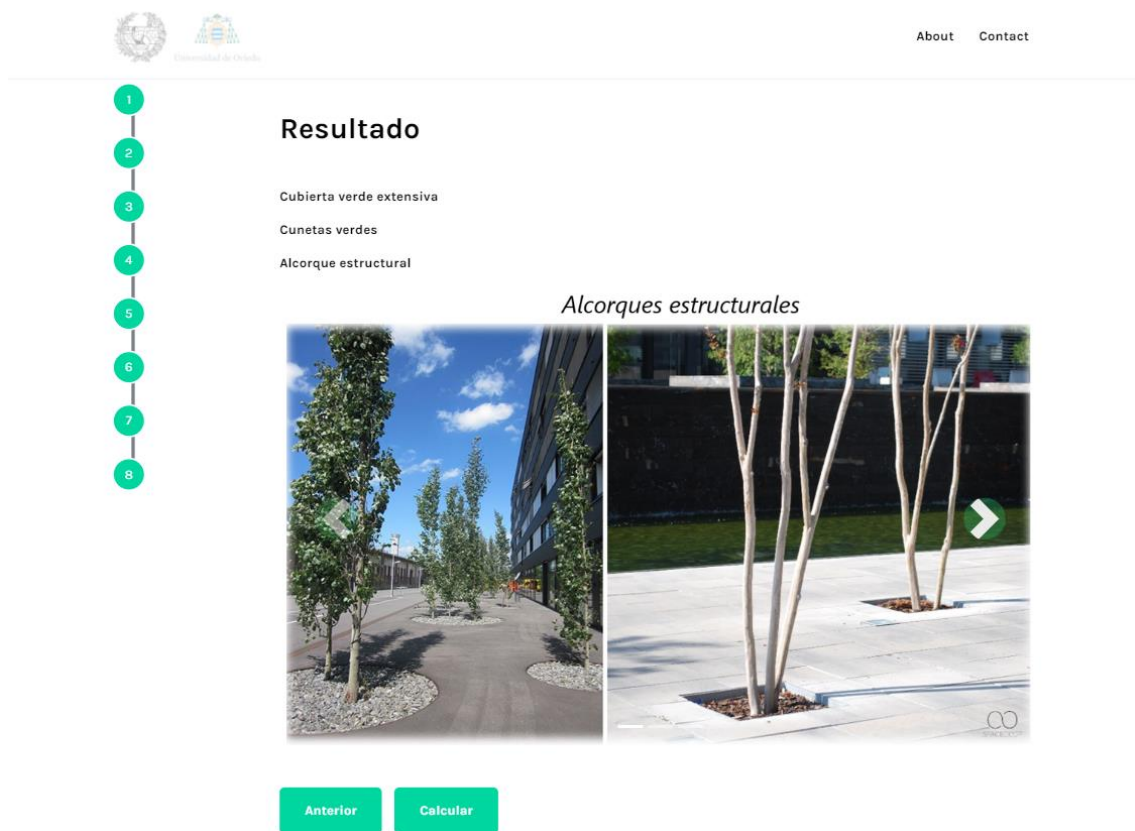


Figura 91. Resumen aplicación VII (Fuente: Elaboración propia).



6 Conclusiones

Este trabajo aplica por primera vez una metodología a seguir a la hora de seleccionar que tipos de SUDS son de aplicación dentro de las redes ferroviarias basándose en una serie de parámetros como la carga contaminante, el elemento de la infraestructura sobre el que se desea actuar etc...

Una vez estudiada y creada la metodología a seguir para la selección de SUDS se implementa con éxito en una aplicación web basada en JavaScript y HTML que permite a los profesionales del sector acceder de manera rápida sencilla y a una recomendación sobre los sistemas a emplear desde cualquier lugar y cualquier dispositivo siempre y cuando se disponga de conexión a internet.

El código de la aplicación creada esta publicado en GitHub de cara a poder ser consultado o continuado. Sirviendo de ejemplo para el desarrollo de herramientas que faciliten el trabajo de los profesionales de la Ingeniería de Caminos Canales y Puertos u otras ramas a la hora de disponer de tablas y manuales accesibles a través de una interfaz gráfica online.

En base al análisis realizado a lo largo de este documento, se puede concluir que los SUDS pueden suponer una importante evolución para el drenaje en redes ferroviarias, aportando múltiples ventajas a la hora de realizar una gestión eficiente de los recursos naturales y alineándose con las nuevas normativas y recomendaciones a nivel europeo, nacional o autonómico.

El empleo de estos sistemas, además de mejorar las capacidades hidráulicas de las redes ferroviarias, pueden contribuir a paliar efectos del cambio climático tales como el efecto isla de calor en las ciudades o la desertificación en entornos interurbanos.

Dentro de los ámbitos urbanos, el empleo de SUDS en las redes ferroviarias contribuirá a mejorar el aspecto de las ciudades, la calidad del aire y el confort de los usuarios, reduciendo las necesidades de tratamiento de aguas, los costes asociados a los mismos, así como los daños derivados de los fenómenos de alta torrencialidad, ayudando a garantizar el servicio y el correcto funcionamiento de las infraestructuras.

Por último, cabe destacar que, en el ámbito interurbano, la aplicación de estas técnicas mejorará significativamente el desempeño hidráulico de las infraestructuras ferroviarias, garantizando el funcionamiento de estas frente a inundaciones, realizando un tratamiento de los contaminantes existentes y protegiendo los cauces naturales de posibles vertidos de carácter accidental.



7 Valoración económica del trabajo realizado

El presente informe, elaborado como Trabajo Fin de Máster, ha tenido como finalidad la realización de una guía técnica para la implantación de SUDS en redes ferroviarias.

A continuación, se realiza una valoración económica del coste de desarrollar este documento si el mismo fuera realizado por una consultoría o por un profesional en ejercicio libre de la profesión.

Se consideran en la elaboración de este proyecto 3 partidas fundamentales. Por un lado, se valora el coste del material informático, tanto el Hardware como el Software empleado para la realización del trabajo.

La segunda parte del presupuesto, siendo esta la fundamental, se corresponde con el coste estimado de personal en función de las horas empleadas para la realización del presente documento.

Por último, se incluye una partida de gastos generales.

7.1 Informática

Como se mencionó anteriormente en este apartado, se valora por un lado el coste del hardware empleado para la realización del proyecto y por otro el coste del software empleado.

Para la valoración del coste, se utilizará la siguiente formulación:

$$\text{Coste (€)} = \frac{\text{Coste}_{\text{Adquisición}}(\text{€}) \cdot \text{Tiempo de uso (Años)}}{\text{Tiempo de amortización (Años)}}$$

Donde:

- Coste: Hace referencia al coste imputable al proyecto.
- $\text{Coste}_{\text{Adquisición}}$: Hace referencia al coste de adquisición de los equipos en el momento de su compra.
- Tiempo de uso: El tiempo que se ha requerido de los equipos para la realización del proyecto.
- Tiempo de amortización: El tiempo de vida estimado para los equipos antes de requerir la renovación de estos.

Por otro lado, las licencias empleadas, tanto de Microsoft 365 como de Photoshop, son mensuales, por lo que se repercutirán los costes del tiempo empleado de las mismas.



Tabla 25. Valoración económica Hardware empleado.

	Coste adquisición	Tiempo uso (meses)	Tiempo amortización (años)	Coste
Intel i7-6700K 4.0Ghz	276,86 €	4	6	15,38 €
Asus Maximus VIII Hero	170,25 €	4	6	9,46 €
Corsair Cooling Hydro Series H75	71,69 €	4	6	3,98 €
Samsung 750 Evo SSD Series 250GB SATA3	58,68 €	4	6	3,26 €
Corsair VS 650W 80 Plus	50,41 €	4	6	2,80 €
Asus ROG GeForce GTX 1060 Strix Gaming 6GB GDDR5	288,43 €	4	6	16,02 €
BenQ Zowie XL2411 24" LED 144Hz	238,84 €	4	6	13,27 €
BenQ Zowie XL2411 24" LED 144Hz	238,84 €	4	6	13,27 €
Corsair Vengeance LPX DDR4 2400 PC4-19200 16GB 2x8GB CL16	70,25 €	4	6	3,90 €
Corsair Vengeance LPX DDR4 2400 PC4-19200 16GB 2x8GB CL16	70,25 €	4	6	3,90 €
Corsair Carbide 400C	87,46 €	4	6	4,86 €
Corsair K70 LUX	107,43 €	4	6	5,97 €
Corsair Dark Core RGB SE	68,59 €	4	6	3,81 €
TOTAL				99,89 €

Tabla 26. Valoración económica Software empleado.

	Coste adquisición	Tiempo uso (meses)	Tiempo amortización (años)	Coste
Microsoft Windows 10 Home 64Bits OEM	78,47 €	4	7	3,74 €
Microsoft 365 Empresa Premium	202,8	4	1	67,60 €
Adobe Photoshop	145,08	1	1	12,09 €
TOTAL				83,43 €

7.2 Personal

El coste del trabajo personal viene determinado por las horas necesarias para la realización de este informe, valorando las mismas en 55 euros por cada hora de trabajo si se realizaran como labor de consultoría o como profesional en ejercicio libre de la profesión.

En total se emplean un total de 344 horas con la siguiente distribución:

Tabla 27. Valoración económica tiempo empleado.

Concepto	Coste unitario (€/h)	Tiempo invertido (h)	Total
Recopilación de información	55,00 €	40	2.200,00 €
Estudio de la problemática	55,00 €	40	2.200,00 €
Análisis y desarrollo de la herramienta multicriterio	55,00 €	140	7.700,00 €
Elaboración de Figuras	55,00 €	24	1.320,00 €
Redacción y maquetación	55,00 €	60	3.300,00 €
Correcciones y revisiones	55,00 €	40	2.200,00 €
TOTAL			18.920,00 €

7.3 Gastos generales

En esta partida se consideran los gastos ocasionados por la adquisición de bibliografía, telefonía, internet y la factura eléctrica.

A esta partida se le asigna un coste estimado de 150 euros.

7.4 Valoración económica del proyecto

Se estimará la valoración económica del presente documento en la suma de las partidas anteriores sumándole a las mismas un 6% en concepto de beneficio industrial y un 21% de IVA.

Tabla 28. Valoración económica del trabajo realizado.

	Coste
Hardware	99,89 €
Software	83,43 €
Personal	18.920,00 €
G. Generales	150 €
Coste bruto del estudio	19.253,31 €
Beneficio industrial (6%)	1.155,20 €
Total	21.178,65 €
IVA (21%)	4.285,79 €
Coste total del proyecto	24.694,30 €

Firmado: Álvaro Álvarez Fernández



REFERENCIAS

BIBLIOGRAFIA

- Adif. (2015). *NAP 1-2-0.3 Climatología, Hidrología y Drenaje*. (Adif, ed.).
- Adif. (2020). *Declaración sobre la red 2020*.
- Ashley, R., Walker, L., D'Arcy, B., Wilson, S., Illman, S., Shaffer, P., Woods-Ballard, B., and Chatfield, P. (2015). "UK sustainable drainage systems: Past, present and future." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*, 168(3), 125–130.
- Boston Water and SewerCommission, and Geosyntec Consultants. (2013). *Stormwater Best Management Practices: Guidance Document*. Boston, MA, USA.
- Burkhardt, M., Rossi, L., and Boller, M. (2008). "Diffuse release of environmental hazards by railways." *Desalination*, 226(1–3), 106–113.
- Center for Watershed Protection. (2000). "Maryland Stormwater Design Manual. Volumes I & II." *Maryland Department of the Environment*.
- Charlesworth, S. M., Mbanaso, F. U., Coupe, S. J., and Nnadi, E. O. (2014). "Utilization of glyphosate-containing herbicides on pervious paving systems: Laboratory-based experiments to determine impacts on effluent water quality." *Clean - Soil, Air, Water*, 42(2), 133–138.
- City of Edmoton. (2011). *Low Impact Development Best Management Practices Design Guide. Low Impact Development - Best Management Design Guide*, Edmoton, AB, Canada.
- City of Los Angeles. (2011). "Development Best Management Practices Handbook." *City of Los Angeles*.
- City of Santa Rosa. (2011). "Storm Water. Low Impact Development Technical Design Manual." *City of Santa Rosa & The County of Sonoma*.
- Debo, T. N., and Reese, A. J. (2003). "Stormwater Management." *Lewis Publishers*.
- Department of Defense USA. (2010). *Unified Facilities Criteria (UFC): Low Impact Development Manual*. Washington, DC, USA.
- Department of Economic and Social Affairs. (2014). *World Urbanization Prospects, The 2014 (revisión)*. New York .
- elPeriódico. (2020). "El tren entre Blanes y Malgrat tardará 6 meses en circular." Barcelona.
- Faha, L., Faha, M., and Milligan, B. (2009). "Low Impact Development Approaches Handbook." *Clean Water Services*.
- Fletcher, T., Duncan, H., Poelsma, P., and Lloyd, S. (2004). *Stormwater Flow and Quality, and The Effectiveness of Non-Proprietary Stormwater Treatment Measures—A Review and Gap Analysis. Technical Report*. Melbourne, VIC, Australia.
- Gobierno de España. (2018). *Hacia una Estrategia Española de Desarrollo Sostenible*.
- Highways Agency. (2018). *Design Manual for Roads and Bridges, Part 4 HD 221/18. RESERVOIR PAVEMENTS FOR DRAINAGE ATTENUATION SUMMARY*.
- Instituto Geográfico Nacional, and Atlas Nacional de España. (2010). "Clasificación climática según Köppen." <http://atlasnacional.ign.es/images/c/cc/Espana_Clasificacion-climatica-segun-



Koppen_1981-2010_mapa_15815_spa.jpg> (Aug. 19, 2020).

- Jiménez Ariza, S. L., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A., and Díaz-Granados, M. (2019). "A Multicriteria Planning Framework to Locate and Select Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Consolidated Urban Areas." *Sustainability* .
- Liu, J., Sample, D. J., Bell, C., and Guan, Y. (2014). "Review and Research Needs of Bioretention Used for the Treatment of Urban Stormwater." *Water* .
- Liu, Y., Engel, B. A., Flanagan, D. C., Gitau, M. W., McMillan, S. K., and Chaubey, I. (2017). "A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities." *Science of The Total Environment*, 601–602, 580–593.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. (1990). *Instrucción 5.2-IC Drenaje superficial*. Madrid.
- Pittner, C., and Allerton, G. (2001). *SUDS For Roads. Engineering*.
- Revitt, M., Ellis, B., and Scholes, L. (2003). "Report 5.1 Review of the use of stormwater BMPs in Europe." *Review of the Use of Stormwater BMPs in Europe*.
- Riverside County Flood Control and Water Conservation District. (2011). "Design Handbook for Low Impact Development Best Management Practices." *Riverside County Flood Control and Water Conservation District*.
- Sañudo-Fontaneda, L. A. (2014). "Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines y aglomerados porosos para el control en origen de inundaciones." Universidad de Cantabria.
- Stage, J. H., Davis, A. P., Jamil, E., and Kim, H. (2012). "Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff." *Water Research*, 46(20), 6731–6742.
- Strecker, E., Sheffield, A., Cristina, C., and Leisenring, M. (2010). "Stormwater BMP Guidance Tool." *A Stormwater Best Management Practices Guide for Orleans and Jefferson Parishes*.
- Toronto and Region Conservation Authority, and Credit Valley Conservation Authority. (2010). "Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide." *Toronto and Region Conservation Authority*.
- Urban Drainage and Flood Control District. (2010). *Urban Storm Drainage. Criteria Manual. Urban Storm Drainage. Criteria Manua*, (Water Resources Publications, ed.).
- Venner, M., Strecker, E., Leisenring, M., Pankani, D., and Taylor, S. (2013). *Current Practice of Post-Construction Structural Stormwater Control Implementation for Highways*. Lakewood, CO, USA.
- Virginia Department of Transportation. (2013). "BMP Design Manual of Practice." *Virginia Department of Transportation: Richmond*.
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., and Shaffer, P. (2007). "The SUDS manual." *The SUDS Manual*.
- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. (2015). "The SuDS Manual." London.
- ZinCo. (n.d.). "Descripción de sistema 'Cubierta inclinada hasta 35°' con Georaster®." <https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/downloads/download_files/Des_Georaster_es.pdf> (Sep. 2, 2020).

FIGURAS

Tabla 29. Fuentes de las figuras y fecha de acceso a las mismas.

Figura	Enlace	Fecha de acceso
Figura 1. Superestructura Ferroviaria (Fuente: Cadena SER 2020)	Cadena ser 2020	07/08/2020
Figura 2. Estación ferroviaria de Canfranc (Fuente: Distrito Castellana Norte Madrid)	Castellana Norte Madrid	07/08/2020
Figura 3. Apeadero Ferroviario del EL ROMANI (Fuente: Flickr)	Flickr	07/08/2020
Figura 4. Terminal de mercancías de Barcelona-Can Tunis (Fuente: Trenesmania)	Trenesmania	07/08/2020
Figura 5. Descarrilamiento tren Málaga - Sevilla (Fuente: El Periódico de Extremadura, 2019)	El periodo de Extremadura 2020	07/08/2020
Figura 6. Agua inutiliza la red Feve (Fuente: El Comercio, 2019)	El Comercio 2019	07/08/2020
Figura 7. Inundaciones en Asturias (Fuente: La Nueva España, 2020)	La Nueva España 2020	07/08/2020
Figura 8. Efecto isla de calor (Fuente: ISGlobal)	ISGlobal	07/08/2020
Figura 9. Corte en la línea ferroviaria Castellón-Tarragona a su paso por Vinaròs debida a la gota fría (Fuente: El Periódico Mediterráneo, 2018)	El Periódico Mediterráneo 2018	12/08/2020
Figura 10. Túnel del AVE anegado (Comunidad Valenciana 2019) (Fuente: Las provincias 2019)	Las provincias 2019	20/08/2020
Figura 11. WSUD (Fuente: Toowoomba Region)	Toowoomba Region	08/08/2020
Figura 14. Ejemplo de aplicación Alcorque estructural (Fuente: Pinterest)	Pinterest Pinterest	13/08/2020
Figura 18. Ejemplo de aplicación Cubiertas verdes (Fuente: Isopan)	Isopan	10/08/2020
Figura 22. Ejemplo de aplicación Cunetas vegetadas (Fuente: Pinterest)	Pinterest Pinterest	10/08/08
Figura 26. Ejemplo de aplicación Depósito (Fuente: El Mundo 2012)	El Mundo 2012	16/08/2020
Figura 30. Ejemplo de aplicación Depósito de infiltración (Fuente: Pinterest)	Pinterest	10/08/2020
Figura 34. Ejemplo de aplicación Estanque de detención (húmedos) (Fuente: SuD Sostenible)	SuD Sostenible	16/08/2020
Figura 38. Ejemplo de aplicación Estanque de detención (Seco) (Fuente: SuD Sostenible)	SuD Sostenible	16/08/2020
Figura 42. Ejemplo de aplicación Área de biorretención (Fuente: Pinterest)	Pinterest	16/08/2020
Figura 49. Ejemplo de aplicación Humedal artificial (Fuente: Pinterest)	Pinterest	10/08/2020
Figura 53. Ejemplo de aplicación Pavimentos permeables (Fuente: Pinterest)	Pinterest	10/08/2020
Figura 60. Ejemplo aplicación Zanjias filtrantes (Fuente: Pinterest)	Pinterest	16/08/2020
Figura 64. Clasificación climática según Köppen (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)	Instituto Geográfico Nacional	15/08/2020
Figura 65. Índices de torrencialidad en España (Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo 1990)	Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo	15/08/2020