



Universidad de  
Oviedo



## **TRABAJO FIN DE GRADO**

GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS MINEROS Y ENERGÉTICOS

Mención en Recursos Energéticos, Combustibles y Explosivos

# **Estudio del flujo térmico en tipologías de sistemas urbanos de drenaje sostenible: cunetas verdes**

**Autor:** Manuel Vega Rodríguez

**Tutor:** Felipe Pedro Álvarez Rabanal

**Cotutor:** Carlos Rey Mahía

**Junio, 2023**



Universidad de  
Oviedo





Universidad de  
Oviedo



## **Declaración de Originalidad del Trabajo Fin de Grado**

D. Manuel Vega Rodríguez, con DNI 71736303Q estudiante del Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros y Energéticos de la Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo, declaro bajo mi responsabilidad que:

El Trabajo de Fin de Grado aquí presentado con título “Estudio del flujo térmico en tipologías de sistemas urbanos de drenaje sostenible: cunetas verdes” ha sido realizado bajo mi autoría, es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Para que así conste, firmo la presente declaración.

En Mieres, a 11 de junio de 2023.

Manuel Vega Rodríguez  
71736303Q



Universidad de  
Oviedo





## Relación del TFG con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

### ODS con los que se relaciona el TFG:



### Breve justificación:

**ODS 6: Agua limpia y saneamiento.** Las cunetas verdes se sitúan como un sistema que permite realizar una gestión sostenible del agua.

**ODS 7: Energía asequible y no contaminante.** La geotermia es un tipo de energía renovable no contaminante.

**ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.** El presente TFG pretende promover estructuras resilientes, impulsar la industrialización sostenible y fomentar la innovación en el sector de la energía y la construcción.

**ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.** La combinación de geotermia superficial y SUDS permite la creación de superficies multidisciplinares en el entorno urbano.

**ODS 12: Producción y consumo responsables.** Algunos de los objetivos que persiguen estas dos disciplinas pretenden hacer un uso eficiente de los recursos y proporcionar infraestructuras sostenibles.

**ODS 13: Acción por el clima.** La geotermia es una fuente de energía renovable baja en emisiones de carbono, combatiendo así el cambio climático y sus efectos.

**ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres.** Las cunetas verdes contribuyen a la conservación y restauración de los ecosistemas terrestres.



Universidad de  
Oviedo



## RESUMEN

La creciente urbanización de las ciudades y la progresiva pérdida de espacios naturales hacen que estos entornos, y todo lo que engloban, se vean abocados a sufrir numerosas situaciones desfavorables. La poca eficacia y el mal funcionamiento de los sistemas de drenaje convencionales, así como la progresiva impermeabilización de las superficies, están provocando que cada vez sea más frecuente la generación de inundaciones, con importantes efectos negativos tanto en el aspecto económico, como en el medio ambiental o social. Por otra parte, los combustibles fósiles y el efecto que tienen sobre el cambio climático, su reciente subida de precios o su próximo agotamiento, hace necesario buscar y desarrollar nuevas formas de energía respetuosas con el medio ambiente. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y la energía geotérmica se configuran como dos prometedoras disciplinas que, combinadas de forma adecuada, pueden servir para dar solución a estos problemas, tanto en la correcta gestión del agua como en la búsqueda de fuentes de energías renovables.

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como objetivo investigar los beneficios que pueden proveer estas estructuras resilientes en las ciudades mediante su combinación. Con el propósito de cumplir con dicho objetivo, se han ensayado y analizado tres tipos de cunetas verdes en diferentes condiciones de funcionamiento (seco y húmedo), en las que se han medido valores de temperatura y flujo térmico, a partir de los cuales se ha determinado el comportamiento térmico de los diferentes diseños.

La realización de los diferentes ensayos y sus análisis han proporcionado resultados favorables que avalan el posible aprovechamiento energético que se puede realizar a partir de una cuneta verde combinada con técnicas de geotermia superficial, obteniendo mejores propiedades térmicas que muchos suelos convencionales, al mismo tiempo que se proporciona una alta capacidad hidráulica. Esto ha sido posible gracias a la realización del diseño de estas estructuras con un doble enfoque, el aprovechamiento hidráulico y el comportamiento térmico de las mismas.



Universidad de  
Oviedo



## ABSTRACT

The growing urbanization of cities and the progressive loss of natural spaces mean that these environments, and all that they encompass, are destined to suffer numerous unfavorable situations. The inefficiency and malfunctioning of conventional drainage systems, as well as the progressive waterproofing of surfaces, are causing flooding to become more and more frequent, with significant negative effects both economically, environmentally and socially. On the other hand, fossil fuels and the effect they have on climate change, their recent price increases or their imminent depletion, make it necessary to seek and develop new forms of environmentally friendly energy. Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) and geothermal energy are two promising disciplines that, when properly combined, can provide solutions to these problems, both in the correct management of water and in the search for renewable energy sources.

This Final Degree Project (TFG) aims to investigate the benefits that these resilient structures can provide in cities through their combination. In order to meet this objective, three types of green gutters have been tested and analyzed under different operating conditions (dry and wet), in which temperature and heat flux values have been measured, from which the thermal behavior of the different designs has been determined.

The different tests and their analysis have provided favorable results that support the possible energy use that can be made from a green gutter combined with surface geothermal techniques, obtaining better thermal properties than many conventional soils, while allowing a high hydraulic capacity. This has been possible thanks to the design of these structures with a double focus, the hydraulic exploitation and the thermal behavior of the structures.



Universidad de  
Oviedo



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi padre, a mi madre y a Lucía, gracias por todo.





## Índice

1. Objetivos y alcance del proyecto .....	6
2. Introducción .....	7
2.1. Antecedentes .....	7
2.2. El drenaje sostenible: Los SUDS .....	12
2.2.1. Tipos de SUDS .....	13
2.2.2. Cunetas verdes ( <i>swales</i> ) .....	16
2.3. Geotermia .....	18
2.4. Nexo agua-energía .....	24
3. Estado del arte .....	26
4. Materiales y métodos .....	32
4.1. Materiales .....	32
4.1.1. Árido ligero .....	33
4.1.2. Árido calizo .....	35
4.1.3. Árido reciclado .....	36
4.1.4. Tierra vegetal .....	37
4.1.5. Caja <i>Atlantis</i> .....	38
4.1.6. Geotextil .....	41
4.2. Equipamiento .....	42
4.2.1. Equipamiento para la caracterización de las propiedades térmicas de los materiales. ....	42
4.2.2. Equipamiento para la determinación del comportamiento térmico de cunetas verdes ....	43
4.3. Metodología .....	46
4.3.1. Ensayo <i>TCi</i> .....	46
4.3.2. Ensayo de flujo térmico con Hot-Box .....	47
4.3.3. Cuneta 1 .....	52
4.3.4. Cuneta 2 .....	53
4.3.5. Cuneta 3 .....	54
4.3.6. Mecanismos de transferencia de calor .....	55
4.3.7. Cálculo del comportamiento térmico de las cunetas verdes .....	57
5. Resultados y discusión .....	61
5.1. Propiedades térmicas de los materiales .....	61
5.2. Capacidad hidráulica de las cunetas verdes .....	62
5.3. Comportamiento térmico de las cunetas verdes .....	63



5.3.1. Temperatura .....	64
5.3.2. Flujo térmico .....	71
5.3.3. Transmitancia térmica.....	77
5.3.4. Resistencia térmica .....	79
5.3.5. Conductividad térmica equivalente .....	80
6. Conclusiones .....	83
7. Planificación del estudio .....	86
7.1. Periodo de trabajo en laboratorio .....	86
7.2. Periodo de confección del trabajo.....	87
8. Bibliografía .....	92

ANEXO I: Valoración económica

ANEXO II: Documentación de materiales



# Índice de figuras

Figura 1. Secuencia de imágenes de la isla sin nombre localizada en la costa de la Antártida. .... 8

Figura 2. Dependencia de las importaciones de energía de España de 2006 a 2020. .... 8

Figura 3. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. .... 11

Figura 4. Sistemas de infiltración y control en origen. .... 14

Figura 5. Sistemas de captación y transporte. .... 15

Figura 6. Sistemas de almacenamiento y saneamiento. .... 16

Figura 7. Sección transversal de una cuneta seca. .... 17

Figura 8. Esquema de la estructura de un sistema de geotermia superficial. .... 20

Figura 9. Funcionamiento de la bomba de calor con una válvula de 4 vías en ciclo calefacción (izquierda) y ciclo refrigeración (derecha). .... 21

Figura 10. Sistema de geotermia en circuito abierto. .... 22

Figura 11. Sistema de circuito cerrado con circulación directa (izquierda) e indirecta (derecha). .... 23

Figura 12. Intercambiador simple horizontal (izquierda) y doble horizontal (derecha). .... 23

Figura 13. Diferentes configuraciones en intercambiadores geotérmicos cerrados con disposición vertical. Intercambiador en simple-U (izquierda), doble-U (centro) y coaxial (derecha). .... 24

Figura 14. Foto de uno de los ensayos (izquierda) y la sección transversal de toda la estructura (derecha). .... 26

Figura 15. Sección transversal del firme permeable y el sistema de geotermia superficial (izquierda) y su ubicación junto con la casa (derecha). .... 27

Figura 16. Configuración del experimento (izquierda) y sección transversal (derecha) del estudio realizado. .... 28

Figura 17. Representación de las tres secciones tipo ensayadas. .... 32

Figura 18. Estructura interior y exterior de la arcilla expandida. .... 33

Figura 19. Estudio granulométrico del árido ligero utilizado. .... 34

Figura 20. Curva granulométrica ZA 0/32. .... 36

Figura 21. Curva granulométrica del árido reciclado utilizado. .... 37

Figura 22. Estudio granulométrico de la tierra vegetal utilizada. .... 38

Figura 23. Módulo de la caja Atlantis Flo-Cell® 52 mm. .... 39

Figura 24. Sistema de drenaje con la utilización de la caja Atlantis Flo-Cell®. .... 39

Figura 25. C-Therm TCi. .... 42

Figura 26. Equipo TCi utilizado para los ensayos. .... 43

Figura 27. Sección de la Caja de Prueba con el aislamiento térmico utilizado. .... 44

Figura 28. Caja de Prueba con desagües en la parte inferior. .... 44

Figura 29. Esquema de conexión del equipo TRSYS01. .... 45

Figura 30. Sensor de flujo térmico por ambas caras: izquierda, en rojo, orientada a la fuente de calor y derecha, en azul, orientada en la cara opuesta a la fuente de calor. .... 45

Figura 31. Medición con el equipo TCi del árido ligero (izquierda), árido calizo (centro) y tierra vegetal (derecha). .... 46

Figura 32. Montaje completo de los equipos utilizados. .... 47

Figura 33. Estructura general de las cunetas verdes ensayadas y disposición de los diferentes termopares y sensores de flujo térmico. .... 48

Figura 34. Secuencia de imágenes del montaje de la primera capa en la Caja de Prueba. .... 49

Figura 35. Parte superior de la segunda capa con los termopares y sensores de flujo térmico utilizados. .... 49

Figura 36. Parte superior de la tercera capa con los termopares y sensores de flujo térmico utilizados. .... 50

Figura 37. Disposición de los diferentes termopares y sensores de flujo térmico en la parte superior de la capa de tierra vegetal presente en las 3 cunetas ensayadas. .... 50

Figura 38. Estructura de la Cuneta 1 con los diferentes termopares y sensores de flujo térmico distribuidos. .... 52

Figura 39. Estructura de la Cuneta 2 con los diferentes termopares y sensores de flujo térmico distribuidos. .... 53

Figura 40. Estructura de la Cuneta 3 con los diferentes termopares y sensores de flujo térmico distribuidos. .... 54

Figura 41. Representación gráfica de la conductividad térmica de los diferentes materiales analizados. .... 61

Figura 42. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 1 en condiciones secas. .... 64

Figura 43. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 2 en condiciones secas. .... 65

Figura 44. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 3 en condiciones secas. .... 65



Figura 45. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 1 en condiciones húmedas.....	68
Figura 46. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 2 en condiciones húmedas.....	68
Figura 47. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 3 en condiciones húmedas.....	69
Figura 48. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 1 en condiciones secas.....	72
Figura 49. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 2 en condiciones secas.....	72
Figura 50. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 3 en condiciones secas.....	73
Figura 51. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 1 en condiciones húmedas.....	75
Figura 52. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 2 en condiciones húmedas.....	75
Figura 53. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 3 en condiciones húmedas.....	76
Figura 54. Diagrama de Gantt de las tareas realizadas en laboratorio. ....	87
Figura 55. Diagrama de Gantt de las tareas realizadas para la confección del trabajo.....	91



## Índice de tablas

Tabla 1. Listado de las COP realizadas hasta la fecha.....	9
Tabla 2. Mantenimientos requeridos de una cuneta seca. ....	17
Tabla 3. Tipos de yacimientos rangos de temperaturas, tecnologías utilizadas y aplicaciones. ....	19
Tabla 4. Estudios previos sobre la combinación de SUDS con sistemas de geotermia superficial. ....	29
Tabla 5. Características técnicas Arlita® Leca® dur. ....	34
Tabla 6. Dimensiones y principales propiedades de las cajas Atlantis Flo-Cell® 52 mm. ....	40
Tabla 7. Características y prestaciones del geotextil DANOFELTY PY 150. ....	41
Tabla 8. Conductividad térmica a temperatura ambiente en condiciones secas. ....	61
Tabla 9. Capacidad hidráulica de cada cuneta. ....	62
Tabla 10. Temperatura media registrada en los diferentes niveles de las cunetas en condiciones secas. ....	66
Tabla 11. Diferencia media de temperatura total y de cada capa en las diferentes cunetas en condiciones secas. ....	67
Tabla 12. Temperatura media registrada en los diferentes niveles de las cunetas en condiciones húmedas. ....	70
Tabla 13. Diferencia media de temperatura total y de cada capa en las diferentes cunetas en condiciones húmedas. ....	71
Tabla 14. Flujo térmico medio registrado en los ensayos secos de las cunetas. ....	73
Tabla 15. Flujo térmico medio registrado en los ensayos húmedos de las cunetas. ....	76
Tabla 16. Transmitancia térmica media de las diferentes cunetas en condiciones secas. ....	77
Tabla 17. Transmitancia térmica del árido calizo en la cuneta 1 en condiciones secas. ....	78
Tabla 18. Transmitancia térmica media de las diferentes cunetas en condiciones húmedas. ....	78
Tabla 19. Resistencia térmica media de las diferentes cunetas en condiciones secas. ....	79
Tabla 20. Resistencia térmica media de las diferentes cunetas en condiciones húmedas. ....	80
Tabla 21. Conductividad térmica equivalente media de las diferentes cunetas en condiciones secas. ....	80
Tabla 22. Comparación de resultados de conductividad térmica. ....	81
Tabla 23. Conductividad térmica equivalente media de las diferentes cunetas en condiciones húmedas. ....	82
Tabla 24. Propiedades térmicas de las cunetas verdes. ....	82
Tabla 25. Distribución de tareas realizadas en laboratorio. ....	86
Tabla 26. Distribución de tareas para la confección del trabajo. ....	89

## 1. Objetivos y alcance del proyecto

Con el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se pretende investigar, explorar y proporcionar más información en cuanto a la integración de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) junto con sistemas de geotermia superficial. La integración de estos dos sistemas favorece la gestión sostenible del agua a la vez que permite la generación de energía a partir de una fuente renovable.

El objetivo principal de este proyecto de investigación es profundizar en el estudio del desempeño térmico de este tipo de infraestructuras. Así, se podrán diseñar nuevas configuraciones que proporcionen mejor aislamiento térmico al sistema de drenaje, al tiempo que se realiza una gestión sostenible de las aguas pluviales. Se han estudiado, tanto en condiciones húmedas como secas, tres configuraciones distintas de cunetas verdes, empleando diferentes materiales en cada una de estas secciones tipo con el fin de evaluar que diseño presenta un mejor desempeño térmico. De esta forma, el diseño de la cuneta verde, teniendo en cuenta aspectos térmicos, proporcionará un mayor aislamiento entre el intercambiador geotérmico y el entorno, mejorando así el rendimiento de la bomba de calor.

Estudios previos [1] han puesto de manifiesto la función multidisciplinar de estas estructuras, mostrando la viabilidad de emplazar un sistema de geotermia superficial en el interior de SUDS. De esta forma, no solo se obtiene un aprovechamiento energético mediante una fuente de energía renovable, sino que se realiza una gestión sostenible del agua de lluvia.

Por lo tanto, en el marco de esta investigación, y para dar cumplimiento al objetivo general de la misma, se plantea alcanzar una serie de objetivos específicos:

- Realizar un estudio bibliográfico sobre investigaciones previas en este campo.
- Analizar el comportamiento térmico de las cunetas verdes bajo diferentes condiciones de funcionamiento, es decir, en condiciones secas y húmedas.
- Analizar la capacidad hidráulica que las diferentes estructuras diseñadas presentan, determinando el volumen máximo que son capaces de almacenar y retener cuando se encuentran saturadas y en condiciones húmedas.
- Evaluar la viabilidad técnica para la combinación de estas dos tecnologías.
- Establecer, a partir de los resultados obtenidos, nuevos pasos en la investigación del estudio de la combinación de sistemas de geotermia superficial con SUDS.

## 2. Introducción

### 2.1. Antecedentes

Actualmente, el uso cotidiano de combustibles fósiles como fuente de energía los convierten en un bien que no es viable en diversos aspectos. El carbón, petróleo y gas natural son combustibles que están fuera de lugar con respecto a la idea de un futuro energético sostenible. Esto genera una necesidad urgente en cuanto a la búsqueda de nuevas vías de suministro [2].

Uno de los principales inconvenientes de los combustibles fósiles es el hecho de que son fuentes de energía no renovables, por lo que su continua explotación hará que se llegue a un momento en el que se produzca un agotamiento de los yacimientos proveedores de estos bienes. En el caso del petróleo, el continuo uso que se está haciendo de este combustible hace que se estime su agotamiento en torno a la mitad del siglo XXI, siempre y cuando se mantenga el ritmo de consumo actual [3]. Según investigaciones realizadas [4], sería necesaria una reducción considerable del consumo de combustibles fósiles, con un horizonte objetivo para el año 2050, en el que se pretende que aproximadamente el 60 % del petróleo y el gas natural, y el 90% de carbón existentes permanezcan sin extraer, a fin de lograr diferentes objetivos en busca de la sostenibilidad del planeta. Esta disminución también repercutiría en la economía global, ya que en los últimos años se ha producido un incremento en el precio efectivo de estos bienes.

Otro aspecto a tener en cuenta es la contaminación que se genera con la utilización de combustibles fósiles, dando lugar a la producción de gases de efecto invernadero (GEI), entre los que se encuentran el óxido de azufre ( $\text{SO}_x$ ), óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), teniendo este último una gran influencia en el tan temido y preocupante cambio climático que acecha al planeta. La emisión de  $\text{CO}_2$  ha provocado un incremento en la temperatura promedio de la Tierra de entre  $1,0$ - $1,1^\circ\text{C}$  con respecto a la era preindustrial (1850-1900). Este aumento de temperatura ha sido uno de los puntos tratados en el *Acuerdo de París* de 2015, donde se solicitaba mantener este incremento por debajo de los  $2^\circ\text{C}$  y, en la medida de lo posible, inferior a  $1,5^\circ\text{C}$  [5]. Otros efectos de este gas son, por ejemplo, la acidificación de los mares [6] o la expansión térmica de los océanos, dando lugar a que, desde el año 1993, se haya dado una elevación del nivel del mar a razón de 3 mm/año [7]. Con respecto a su influencia sobre la salud en la población, también se ha registrado su posible efecto sobre la disminución de las capacidades cognitivas de las personas en función de las concentraciones de  $\text{CO}_2$  a las que han estado expuestas [6]. También son notables las consecuencias del cambio climático en el deshielo generado en los polos (ver Figura 1), produciéndose desde el año 1950 un aumento de las temperaturas en la Antártida de  $0,17^\circ\text{C}$ , casi el doble del promedio que se ha dado en el resto del planeta ( $0,1^\circ\text{C}$ ). Esto ha dado lugar, por ejemplo, a una reducción de la capa de hielo en la Antártida a un ritmo de  $100 \text{ Km}^3/\text{año}$  desde el año 2002 [8].

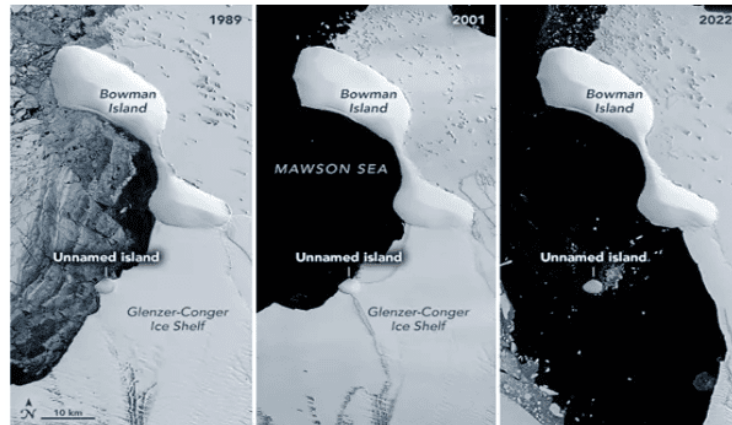


Figura 1. Secuencia de imágenes de la isla sin nombre localizada en la costa de la Antártida.

Fuente: Europa Press [9].

Como se comentaba anteriormente, un aspecto trascendental respecto al uso de combustibles fósiles es el relacionado con las importaciones/exportaciones de estos y su impacto económico. Según los datos disponibles [10], el grado de dependencia energética exterior de España en el año 2020 fue, aproximadamente, del 68% (ver Figura 2), dando lugar únicamente a un autoabastecimiento de energía primaria de en torno al 32%. A todo esto se le suma que, de toda la energía primaria consumida en España, el 66% proviene del petróleo y del gas natural, haciendo visible el gran peso que los hidrocarburos tienen en el sector energético español.

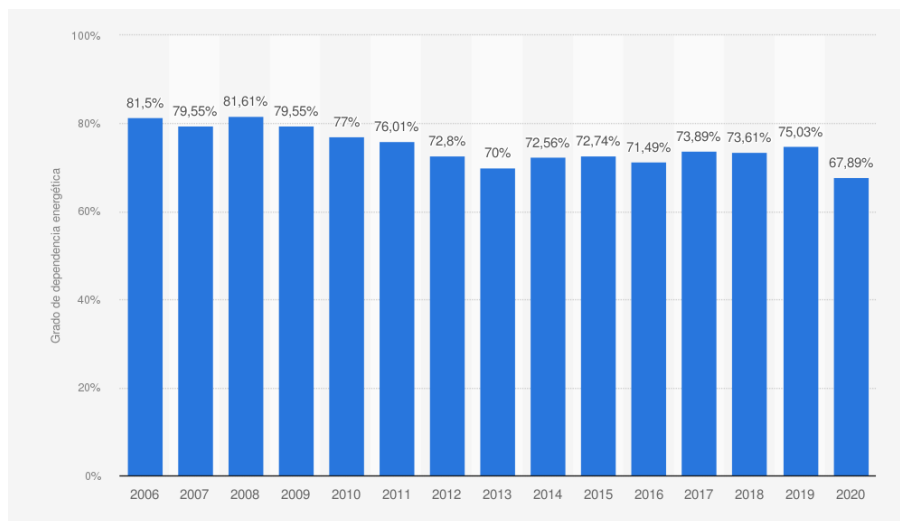


Figura 2. Dependencia de las importaciones de energía de España de 2006 a 2020.

Fuente: Eurostat [10].

Existen tres factores fundamentales, como son la gran dependencia energética que tiene España de combustibles fósiles, el uso aún limitado de las energías renovables y el encarecimiento de los precios de la energía, los que han provocado que el gasto en importación de energía en Julio de 2021 ascendiese a 2100 millones de euros [11]. Cabe remarcar que, sumado a lo anterior, en el pasado año 2022 se produjo la invasión rusa de Ucrania, generando el encarecimiento de todo tipo de productos, pero sobre todo el relacionado con los combustibles. Al ser Rusia uno de los principales productores de petróleo, gas natural y carbón en el mundo, la economía global se ha visto muy afectada, desatando una gran crisis energética, particularmente en Europa. En esta situación, los países han tratado de hacer cambios en la importación de energía. En el caso de



España, por ejemplo, se ha reducido el suministro de crudo procedente de Rusia en un 73%, aunque la demanda de gas a este país haya aumentado debido al cierre del gasoducto Magreb-Europa, a causa de los conflictos diplomáticos que existen entre Marruecos y Argelia [12].

Para lograr un futuro más sostenible, durante los últimos años se han celebrado numerosas cumbres de las Naciones Unidas, donde tiene gran importancia la creación de las *Conferencias de las Partes* (COP) de la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMNUCC). Estas conferencias nacieron durante la *Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro* (1992) [13], y sus principales objetivos son la reducción de la emisión de GEI y el trabajo conjunto de todos los Estados miembro para luchar contra el cambio climático [14].

Tabla 1. Listado de las COP realizadas hasta la fecha.

Fuente: Elaboración propia a partir de UNFCCC [15].

Sesión	Sede	Fecha
<b>COP 1</b>	Berlín, Alemania	28 marzo-07 abril 1995
<b>COP 2</b>	Ginebra, Suiza	09-19 julio 1996
<b>COP 3</b>	Kioto, Japón	01-10 diciembre 1997
<b>COP 4</b>	Buenos Aires, Argentina	02-13 noviembre 1998
<b>COP 5</b>	Bonn, Alemania	25 octubre-5 noviembre 1999
<b>COP 6 (1ª reunión)</b>	La Haya, Holanda	13-25 noviembre 2000
<b>COP 6 (2ª reunión)</b>	Bonn, Alemania	16-27 julio 2001
<b>COP 7</b>	Marrakech, Marruecos	29 octubre-10 noviembre 2001
<b>COP 8</b>	Nueva Delhi, India	23 octubre-01 noviembre 2002
<b>COP 9</b>	Milán, Italia	01-12 diciembre 2003
<b>COP 10</b>	Buenos Aires, Argentina	6-17 diciembre 2004
<b>COP 11</b>	Montreal, Canadá	28 noviembre-09 diciembre 2005
<b>COP 12</b>	Nairobi, Kenia	06-17 noviembre 2006
<b>COP 13</b>	Bali, Indonesia	03-14 diciembre 2007
<b>COP 14</b>	Poznan, Polonia	01-12 diciembre 2008
<b>COP 15</b>	Copenhague, Dinamarca	07-18 diciembre 2009
<b>COP 16</b>	Cancún, México	29 noviembre-10 diciembre 2010
<b>COP 17</b>	Durban, Sudáfrica	28 noviembre-09 diciembre 2011
<b>COP18</b>	Doha, Catar	26 noviembre-07 diciembre 2012
<b>COP19</b>	Varsovia, Polonia	11-22 noviembre 2013
<b>COP20</b>	Lima, Perú	01-12 diciembre 2014
<b>COP21</b>	París, Francia	30 noviembre-11 diciembre 2015
<b>COP 22</b>	Marrakech, Marruecos	07-18 noviembre 2016

<b>COP 23</b>	Bonn, Alemania	06-17 noviembre 2017
<b>COP 24</b>	Katowice, Polonia	02-14 diciembre 2018
<b>COP25</b>	Madrid, España	02-13 diciembre 2019
<b>COP26</b>	Glasgow, Escocia	31 octubre-12 noviembre 2021
<b>COP 27</b>	Sharm El-Sheikh	06-18 noviembre 2022

En todas las conferencias que se pueden ver reflejadas en la Tabla 1 se han establecido diferentes planes, metas o límites, como los expuestos en el *Protocolo de Kioto*, tema que se trataría también en posteriores cumbres. Uno de los principales objetivos que se pretendía conseguir con el *Protocolo de Kioto* era el establecimiento de unos límites en cuanto a las emisiones de GEI, fijando que estos deberían permanecer por debajo del 5% entre 2008 y 2012 con respecto a 1990 (COP3), objetivo que no se logró. Este tema se trató de nuevo en 2007 en la COP de Bali (COP13), donde se analizó qué hacer hasta y después del año 2012. En la COP de Copenhague en 2009 (COP15) el *Protocolo de Kioto* todavía estaba presente, fijándose en esta cumbre la misión de limitar el incremento de la temperatura promedio en el planeta hasta los 2°C con respecto a la era preindustrial. Otro hecho destacado fue la creación del *Fondo Verde del Clima*, en la COP de Cancún en 2010 (COP16), en la que los estados más desarrollados aprobarían una financiación de 100.000 millones de dólares para promover proyectos de lucha contra el cambio climático en países en vías de desarrollo [14,16].

Con respecto a las COP, también destaca el *Acuerdo de París* en 2015 (COP21), en el que se establecieron las directrices a seguir a partir del año 2020, siendo denominado como la segunda etapa del *Protocolo de Kioto*, pues aunque la primera etapa se fijase hasta el año 2012, mediante la Enmienda de Doha de ese mismo año (COP18) se prolongó hasta el año 2020. En esta vigesimoprimera COP se estudiaron de nuevo los objetivos tratados anteriormente en Copenhague, es decir, el establecer un límite máximo en cuanto al incremento de las temperaturas con respecto a la era preindustrial de 2°C y, en la medida de los posible, limitarlo a 1,5°C.

Recientemente, se ha celebrado en 2021 la vigesimosexta COP en Glasgow (COP26), conocida como *Cumbre del Clima* de la ONU, donde se abogó por la reducción de las emisiones de metano en un 30% para 2030 o, nuevamente, establecer un límite en el incremento máximo de temperatura en la Tierra de 1,5°C para finales del siglo XXI [14]. La última cumbre se llevó a cabo en Egipto en el año 2022 (COP27), donde se trató principalmente la necesidad de continuar con los objetivos planteados en las anteriores COP [17].

En esta situación, se encuentran diferentes planes, estrategias y objetivos, tanto a nivel mundial, como nacional y autonómico. En el ámbito mundial destaca la *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS) aprobada por la ONU en Septiembre de 2015 en la *Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible*, en la cuál se establecieron los 17 ODS (ver Figura 3), tratándose desde objetivos sociales hasta climáticos [18].



Figura 3. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Fuente: Naciones Unidas [18].

En España, destaca actualmente el *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030* (PNIEC), que plantea diferentes objetivos para el año 2030, entre los que destacan [19]:

- Reducir la emisión de GEI en un 23% con respecto al 42% que se planteó para la UE.
- Conseguir que las energías renovables supongan el 42% sobre el consumo total de energía con respecto al 32% planteado para la UE.
- Mejorar la eficiencia energética en un 39,5% frente al 32,5% que se busca para la UE.
- Lograr que el 74% de la generación de energía eléctrica provenga de fuentes de energía renovables.

Por último, en Asturias existe la *Estrategia de Especialización Inteligente* (S3), estableciéndose diferentes estrategias para el periodo 2021-2027 de cara a optar al *Fondo Europeo de Desarrollo Regional* (FEDER). La estrategia S3 plantea cinco objetivos para que se dé la transformación económica asturiana: Asturias verde, Asturias igual, Asturias industrial, Asturias cohesionada y Asturias digital. Para ello se establecen cinco ámbitos de especialización que contribuirán al logro de estos objetivos [20,21]:

- Agroalimentación
- Energía y circularidad
- Industria inteligente y resiliente
- Envejecimiento activo y saludable
- Patrimonio y biodiversidad

Todos estos planes buscan un objetivo común: la sostenibilidad energética. Este objetivo se logrará mediante el progreso hacia formas de energías renovables, tales como la eólica, hidráulica, solar... o la geotérmica, siendo esta última la que se ha estudiado para la realización del actual proyecto. La energía basada en sistemas geotérmicos es una forma de energía que puede ser implementada en la instalación de SUDS, como, por ejemplo, en pavimentos permeables o cunetas verdes, lo que permitiría introducir el aprovechamiento energético en infraestructuras de obra civil combinado con el uso sostenible del agua.

## 2.2. El drenaje sostenible: Los SUDS

La creciente urbanización de los espacios ha provocado la reducción de zonas verdes y una modificación en los usos del suelo, dando lugar con esta acción a un aumento de los espacios impermeables, donde una de las principales consecuencias son las inundaciones en entornos urbanos [22].

Este desarrollo, y la impermeabilización de los suelos, han provocado un cambio en el ciclo natural del agua. En un entorno natural se sucederían las fases de evaporación, condensación, precipitación y captación, siendo esta última etapa donde se generan los principales cambios. La creación de superficies impermeables ha hecho que la infiltración del agua en el terreno se dificulte, aumentando el volumen de escorrentía superficial y, por tanto, la probabilidad de inundaciones y la contaminación difusa del agua, generando consecuencias negativas en los aspectos económico, medio ambiental y social [23,24].

En esta situación, se ha de buscar una solución para realizar una gestión sostenible del agua, algo que no se puede conseguir con los sistemas convencionales de saneamiento. Se ha de optar, por lo tanto, por *Soluciones basadas en la Naturaleza* (SbN), siendo aquellas acciones que se apoyan en los ecosistemas y en los servicios que ofrecen [25]. La *Infraestructura Verde* (IV) es una de estas soluciones, con ella se busca dotar a los asentamientos urbanos y rurales de servicios ecosistémicos y de una protección de la biodiversidad, logrado mediante una red estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales. Básicamente, lo que se pretende lograr es mejorar la capacidad de la naturaleza para facilitar bienes y servicios ecosistémicos, como podrían ser el agua y el aire limpios. En esta búsqueda de objetivos se proporciona a su vez [26]:

- Una mejora en la calidad de vida.
- Una mejora de la biodiversidad.
- Protección frente a catástrofes medioambientales y al cambio climático.
- Un enfoque más integrado e inteligente del desarrollo que se pretende llevar a cabo.

Surgen así los SUDS como un tipo de IV, con el objetivo principal de recrear el ciclo natural del agua tal y como era antes de haber sido alterado por la acción humana [27]. Los SUDS son técnicas o metodologías complementarias a los sistemas convencionales, utilizadas para la gestión sostenible del agua de lluvia en las ciudades mediante la captación, laminación y tratamiento de las aguas pluviales. Estos sistemas aumentan la calidad de la escorrentía mientras se reduce su cantidad, proporcionando mejores entornos paisajísticos y estableciendo un espacio más atractivo, con mayor valor social y ambiental [22,28].

En resumen, mediante la implantación de SUDS se consiguen diferentes objetivos [29]:

- Reducir los problemas de permeabilidad existentes en las superficies de las ciudades y dotarlas de un entorno más naturalizado.
- Gestionar las aguas pluviales lo antes posible, una vez toman contacto con el espacio urbano.
- Infiltrar el agua en el terreno, reduciendo la cantidad de escorrentía superficial, pudiendo reutilizarse para otros usos. Estas acciones mejoran a su vez el rendimiento de las depuradoras al disminuir su dimensionamiento y consumo energético, ayudando a la descarbonización en el ciclo de vida del agua en entornos urbanos.
- Reducir la carga de contaminantes transportada por el agua en su recorrido sobre la superficie.
- Establecer una economía circular del agua, aprovechando el máximo posible de este recurso.

### 2.2.1. Tipos de SUDS

Se puede realizar una clasificación de las diferentes tipologías de SUDS según la función principal que desempeñen [30]:

#### Sistemas de infiltración y control en origen

- Superficies o firmes permeables (*pervious pavements*)

Estos sistemas permiten la infiltración del agua en el terreno o su almacenamiento en su sub-base para un posterior uso, al permitir el flujo del agua a través de las distintas capas que los componen. Puede ser pavimentos porosos ( con materiales como hormigón, asfalto o gravas reforzadas) o pavimentos impermeables con disposición permeable (con adoquines con huecos rellenos de césped, grava o sin relleno) [28].

- Pozos y zanjas de infiltración (*soakaways and filtration trenches*)

Estos sistemas se muestran como excavaciones de poca profundidad y extensión variable, rellenas de materiales drenantes de altas porosidades y construidas con el objetivo de almacenar grandes volúmenes de agua para su posterior infiltración en el terreno. La zanjas son diseñadas con mayor anchura y menor profundidad que los pozos, lo que las hace más eficientes durante la fase de construcción [30].

- Depósitos de infiltración (*infiltration basins*)

Son áreas deprimidas del terreno con vegetación que permiten almacenar el agua antes de su infiltración, con el objetivo de que se haga de una forma gradual. Estos depósitos cumplen con el mismo propósito que los pozos y zanjas de infiltración, pero tienen la capacidad de gestionar mayores cuencas [30].

- Cubiertas verdes (*green roofs*)

También llamados techos verdes, son sistemas dispuestos en tejados y terrazas compuestos de varias capas que permiten la instalación de un sistema vegetado en estos espacios, lo que permite la captación de las aguas pluviales en origen para su posterior filtrado y almacenamiento. Se puede diferenciar entre cubiertas extensivas o intensivas en función del tamaño de la vegetación. Destaca la función que estos sistemas desempeñan como aislante térmico de edificios, ayudando a mitigar el efecto *isla de calor* en el espacio urbano [22].

- Parterres inundables

Son áreas deprimidas con vegetación dispuestas en el entorno urbano con el objetivo de recibir y tratar la escorrentía de superficies impermeables adyacentes. Estos sistemas permiten la laminación y tratamiento del agua antes de que se dé su infiltración en el terreno o su evacuación mediante un drenaje subsuperficial. Se pueden diferenciar dentro de estos sistemas los jardines de lluvia y las áreas de bio-retención, siendo estas últimas utilizadas cuando se pretende tratar una escorrentía con mayor carga de contaminantes [28].



Figura 4. Sistemas de infiltración y control en origen.

Fuente: Elaboración propia a partir de diferentes recursos [31–35].

### Sistemas de captación y transporte

- Drenes filtrantes o franceses (*filter drains*)

Son estructuras consistentes en huecos o zanjas revestidas con un geotextil y rellenas con material drenante. Con este tipo de sistemas se pretende captar y transportar la escorrentía, realizándose en algunos casos mediante una tubería dispuesta en la parte inferior para facilitar la conducción del agua [28].

- Franjas filtrantes (*filter strips*)

Son áreas de tierra con vegetación diseñadas con una ligera pendiente para que el agua fluya, transportando la escorrentía desde superficies impermeables hacia un sistema receptor. Durante este proceso también se puede producir la infiltración del agua en el terreno y mejorar así su calidad gracias a la retención de contaminantes y partículas [30].

- Cunetas verdes (*green swales*)

Son sistemas cuya función es captar y transportar la escorrentía de las zonas impermeables mediante canales de cierta anchura y poca profundidad. A diferencia de los sistemas convencionales, estos son diseñados con vegetación en su superficie, permitiendo así la eliminación de contaminantes y la infiltración del agua en el terreno [28,30]. Esta tipología será tratada posteriormente con mayor detalle, al ser el sistema que se utilizará en la investigación de este proyecto.



Figura 5. Sistemas de captación y transporte.

Fuente: Elaboración propia a partir de diferentes recursos [35–37].

### Sistemas de tratamiento y almacenamiento

- Estanques de retención (*retention ponds*)

Son embalses superficiales que presentan una lámina permanente de agua con profundidades entre los 1,2-2 m. Son capaces de almacenar grandes volúmenes de agua durante un periodo de tiempo de aproximadamente 2-3 semanas. Además, gracias a la combinación de estos sistemas con vegetación, se permite proporcionar al agua un mayor grado de depuración [30,38].

- Humedales artificiales (*wetlands*)

Aunque son sistemas muy similares a los anteriores, los humedales artificiales presentan algunas diferencias. Este tipo de SUDS son menos profundos y cuentan con una mayor cantidad de vegetación, lo que permite lograr una mejor calidad del agua [28].

- Depósitos de detención (*detention basins*)

Estos sistemas se presentan como excavaciones realizadas en el terreno para la laminación y almacenamiento de la escorrentía durante un periodo de tiempo determinado. Posteriormente, gracias a un desagüe ubicado en el fondo, se libera toda el agua almacenada, permitiendo así aprovechar el máximo de la capacidad que provee este sistema para hacer frente a episodios de fuertes tormentas. Estos depósitos pueden ser subterráneos en el caso de que no se disponga del suficiente espacio o no sea conveniente la instalación en superficie [22,30].



Figura 6. Sistemas de almacenamiento y saneamiento.

Fuente: Elaboración propia a partir de diferentes recursos [22,39,40].

### 2.2.2. Cunetas verdes (*swales*)

Dentro de los SUDS, se realizará una explicación más detallada de las cunetas verdes, también llamadas cunetas vegetadas o ecológicas. Esta tipología de SUDS son, como se comentaba anteriormente, estructuras destinadas a captar y transportar la escorrentía de las zonas impermeables próximas. La disposición de vegetación en la superficie de la cuneta permite, además de la captación y el transporte, el tratamiento del agua mediante la sedimentación y filtración de contaminantes. Si las condiciones del terreno lo permiten, también se puede producir la infiltración del agua en el terreno, diferenciándose así de los sistemas convencionales [28,30].

Con respecto a su diseño, es común el uso de una sección trapezoidal, pues se hace el sistema más ideal en cuanto a construcción, funcionamiento y mantenimiento. Las características suelen ser [28]:

- Base con anchura entre 0,5-3 m, permitiendo variaciones.
- Pendiente longitudinal entre 0,5-5%. Cuando la pendiente este por encima del 3%, se aconseja la introducción de elementos de represas o diques, de cara a que no se produzcan velocidades muy elevadas. También, si se tienen pendientes menores del 1,5% y la infiltración del agua en el terreno es complicada, se debe dotar a la base de la cuneta de conductos drenantes.
- Las pendientes laterales de las cunetas tendrán cierta inclinación, con una pendiente máxima 1V:3H (siendo “V” la dimensión vertical y “H” la horizontal), o 1V:4H en el caso de que exista esa posibilidad, así se obtendrán mejores condiciones de mantenimiento y se reducirá la probabilidad de erosión de la base.
- La vegetación será autóctona, adaptada al clima de la zona, resistente a inundaciones, con capacidad filtrante y con suficiente densidad para llevar a cabo los procesos de tratamiento de forma correcta.

Se pueden diferenciar 3 tipos de cunetas vegetadas [1,41]:

- Tradicional o estándar: canales vegetados que captan y transportan la escorrentía de las zonas próximas impermeabilizadas posibilitando su tratamiento e infiltración.
- Húmeda: canales vegetados donde se pretende mantener el agua estancada de forma permanente.
- Seca: cunetas vegetadas dispuestas con un sistema de filtración compuesto por una mezcla de materiales muy permeables y, bajo este, una capa de grava en la que se dispone un sistema



de drenaje subterráneo, el cual tiene la función de transportar el agua y evitar el encharcamiento en los periodos de tormenta, por lo que permanecerá la mayor parte del tiempo seco.

En este caso, el sistema de cuneta verde que se plantea es el de cuneta verde seca (ver Figura 7), el cual permite laminar los caudales punta y, además, desarrollar funciones de abastecimiento para labores de limpieza, riego, etc. Estos sistemas requerirán de diferentes mantenimientos, como los mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Mantenimientos requeridos de una cuneta seca.

Fuente: Elaboración propia a partir de City of Virginia Beach [42].

Actuación	Frecuencia
Poda, retirada de maleza o riego de la capa superficial	Según se requiera
Retirada de especies invasores que puedan obstruir el sistema	Según se requiera
Revisión de la existencia de roedores o plagas que puedan dañar el sistema	Mensualmente
Retirada de sedimentos, basura y escombros, incluido hojas y hierba)	Mensualmente y después de una tormenta según sea necesario
Comprobar que la altura del césped este entre 2-3 pulgadas	Regularmente
Comprobación del funcionamiento correcto del área de pretratamiento	Regularmente y después de fuertes tormentas según sea necesario
Reparación áreas erosionadas	Según sea necesario

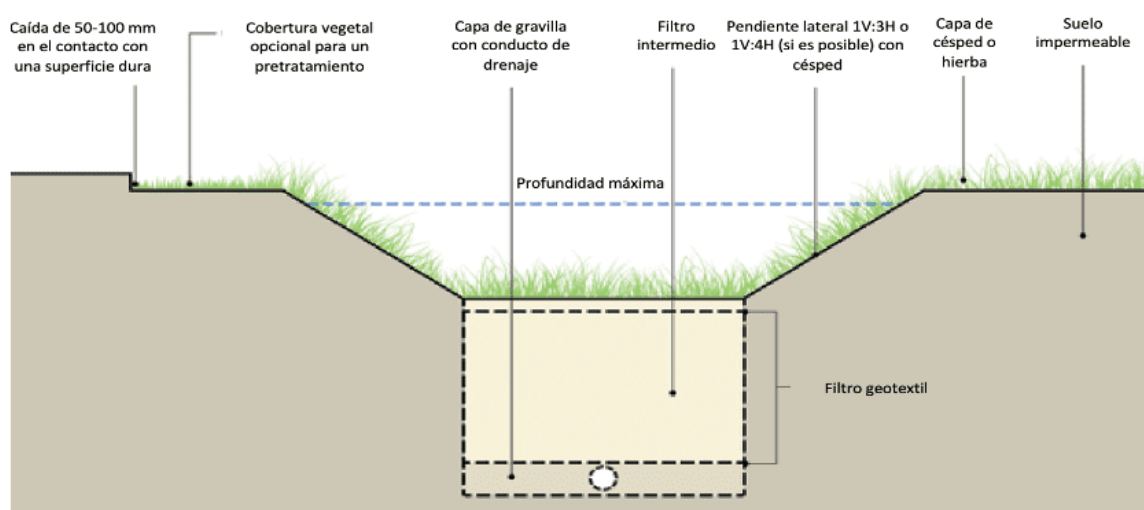


Figura 7. Sección transversal de una cuneta seca.

Fuente: Adaptación a partir de The SuDS Manual [41].

## 2.3. Geotermia

Como se indicó anteriormente, el uso masivo de combustibles fósiles como principal fuente de energía primaria para la producción de energía eléctrica, calor o locomoción, y la emisión de GEI derivados de su utilización está provocando que el calentamiento global se incremente año tras año y, por supuesto, se genere un cambio climático en nuestro planeta [43]. Para reducir estas emisiones es necesario incorporar nuevas fuentes de energía primarias no basadas en la utilización de combustibles fósiles, y cuya utilización suponga una disminución en las emisiones de GEI. Estas fuentes de energía, si a su vez cumplen la función de no agotarse y ser respetuosas con el medio ambiente, son denominadas fuentes de energía renovables [44]. La geotermia es una de estas fuentes de energía.

La geotermia permite el intercambio de energía desde el interior de la Tierra hasta la superficie, gracias a la energía interna de los diferentes materiales geológicos y su transferencia para la obtención de calor (uso directo) o para su transformación a otro tipo de energía (trabajo). Dentro de la geotermia se diferencian varias tipologías, y la elección de un tipo de geotermia u otra variará en función del uso que se le vaya a dar y del gradiente geotérmico de la región, es decir, del incremento de temperatura que se produzca al penetrar hacia el interior de la tierra, pudiendo ser mayor o menor según la zona en la que se esté [44].

Dentro de la geotermia se pueden diferenciar 4 tipos de yacimientos, diferenciados por los **niveles de temperatura o potencial entálpico** en que se encuentra cada uno, su profundidad y la aplicación que se vaya a dar, estableciendo la siguiente clasificación [44,45]:

- **Alta temperatura o entalpía:** asociado a la geotermia profunda (profundidad entre 4000-5000 m), donde el foco del calor hace que el fluido este en una situación de elevada presión y temperatura, a más de 150°C. Estos yacimientos suelen utilizarse con un interés económico para la generación de energía eléctrica mediante el uso de turbinas de vapor de agua. Estos yacimientos se encuentran en zonas específicas de la Tierra, donde el gradiente geotérmico es superior al normal.
- **Media temperatura o entalpía:** asociado a la geotermia media (profundidad entre 400-4000 m), donde el fluido está a temperaturas entre 100 y 150°C, permitiendo la producción de electricidad al igual que los yacimientos de alta entalpía, pero con la introducción de ciclos binarios, teniendo un rendimiento inferior. Al igual que la geotermia profunda, también está asociado a anomalías térmicas del terreno.
- **Baja entalpía:** asociado a la geotermia somera (profundidad menor a 400 m), con temperaturas entre los 25 y 100°C. Su uso principal está destinado a la transferencia de energía para utilizar ese propio calor, es decir, su utilización sin la transformación de energía interna en trabajo, lo que se llama *uso geotérmico directo*. Es utilizada en balnearios, calefacción residencial, procesos industriales, etc. Pueden precisar de bomba de calor cuando las temperaturas del yacimiento estén entre los 25-50°C.
- **Muy baja entalpía:** este grupo también está asociado a la geotermia somera, y se configura como una extensión de los yacimientos de baja entalpía debido a la alta estabilidad térmica que se da en el subsuelo poco profundo, con temperaturas entre los 5°C y 25°C. Se utilizan generalmente para su combinación con sistemas de calefacción y climatización, precisando el uso de bomba de calor.

Los rangos de temperatura son aproximados, pues en función de la fuente bibliográfica consultada se pueden establecer diferentes valores, pero todas oscilan en torno a los rangos indicados anteriormente [44–47]. En la Tabla 3 se puede ver un resumen de los tipos de yacimientos.

Tabla 3. Tipos de yacimientos rangos de temperaturas, tecnologías utilizadas y aplicaciones.

Fuente: Elaboración propia a partir de Manual de Geotermia [45].

Recursos geotérmicos	Temperaturas	Tecnología	Aplicación
<b>Muy baja entalpía</b>	5-25°C	Utiliza bomba de calor	Usos directos Climatización
<b>Baja entalpía</b>	25-50°C	Pueden precisar bomba de calor	Usos directos
	50-100°C		Usos directos
<b>Media entalpía</b>	100-150°C	Ciclos binarios	Electricidad Procesos
<b>Alta entalpía</b>	>150°C	Turbinas de vapor de agua	Electricidad

Este proyecto se centrará en el estudio de sistemas de geotermia somera y la utilización de bombas de calor geotérmicas (BCG) (*geothermal heat pumps* (GSHP) en su acepción en la literatura anglosajona). Este sistema permite tanto la climatización de espacios como la producción de energía para agua caliente sanitaria (ACS), siendo uno de los tipos de geotermia capaz de servir como sistema de refrigeración además de como calefacción en combinación con BCG. El aprovechamiento energético se produce gracias a que la temperatura que existe a pequeñas profundidades es próxima a la temperatura media atmosférica anual, manteniéndose constante prácticamente durante todo el año. Esto es debido a que la energía solar es capaz de penetrar a estas bajas profundidades, haciendo que la superficie del planeta se encuentre a unos 15°C de media, temperatura lo suficientemente alta en invierno para funcionar como medio calefactor y lo suficientemente fría en verano para funcionar como medio refrigerador mediante el uso de BCG con un pequeño aporte de energía (eléctrica normalmente) para su funcionamiento [45].

Dentro de la estructura de las BCG en un sistema de geotermia superficial se pueden diferenciar 3 circuitos [48]:

- Un circuito primario con un fluido caloportador, que permanece enterrado en el reservorio térmico, extrayendo calor o transmitiéndolo al terreno según el ciclo en el que se esté trabajando.
- Un segundo circuito secundario con otro fluido caloportador, que circulará por el interior de la vivienda o instalación para su climatización o producción de ACS.
- El circuito cerrado de la propia bomba de calor, donde se encuentran dos intercambiadores de calor (condensador y evaporador), un compresor y una válvula de expansión. Es el encargado de transferir el calor entre los circuitos primario y secundario.

En la Figura 8 se puede ver un esquema de la estructura de un sistema de geotermia superficial.

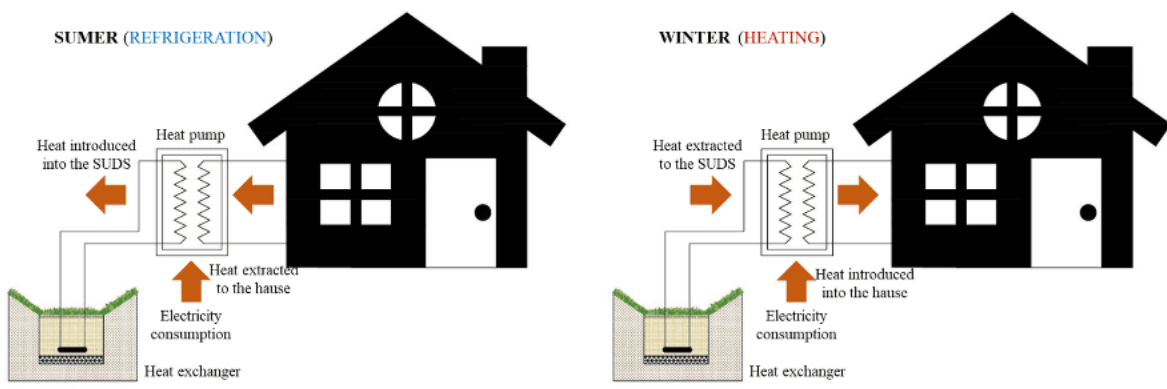


Figura 8. Esquema de la estructura de un sistema de geotermia superficial.

Fuente: *The Role of Geothermal Heat Pump Systems in the Water–Energy Nexus* [49].

En invierno la energía interna del terreno se utilizará como fuente calorífica, extrayéndose del subsuelo poco profundo, donde la temperatura es superior a la temperatura ambiental, y transportándose al interior de la vivienda o instalación. Primero, se realizará la absorción del calor presente en el terreno por parte del circuito primario enterrado, que posteriormente tomará contacto con el fluido del circuito de la propia bomba de calor a través del evaporador, cediendo el calor extraído del terreno a este circuito de la bomba de calor. Una vez en el interior de este circuito cerrado, se producirá la evaporación del fluido circulante, para pasar después por un compresor de vapor, donde aumenta su presión y por consiguiente su temperatura. Una vez se haya producido este aumento, el fluido cederá ese calor al circuito secundario que circula por el interior de la vivienda a través del otro intercambiador (condensador) y, finalmente, el fluido del circuito de la bomba, en estado líquido, pasará por una válvula de expansión, reduciendo su presión, y por consiguiente la temperatura, volviendo al intercambiador inicial a baja temperatura, transcurriendo este ciclo una y otra vez [47].

En verano el funcionamiento es inverso, lo cual se logra con una válvula de inversión de ciclo o de 4 vías (ver Figura 9 para ver el funcionamiento en ambos ciclos), por la cual el condensador pasa a trabajar como un evaporador y viceversa. En esta situación, el fluido del circuito primario enterrado se encuentra a una temperatura menor a la que se da en el ambiente, mientras que la vivienda por la que circula el circuito secundario presenta un exceso de calor. Primero, en el evaporador, se producirá la toma de contacto, no física, del fluido del circuito secundario con el de la bomba de calor, absorbiendo este último fluido el exceso de calor presente en la vivienda, para que su posterior paso por el compresor haga que se aumente su presión y temperatura. En esta situación, el fluido del circuito primario tomará contacto a través del condensador con el fluido del circuito enterrado, es decir, el primario, que estará inicialmente a menor temperatura, produciéndose la transferencia de calor del fluido del circuito de la bomba de calor al circuito primario. Posteriormente, en el circuito de la bomba de calor, el fluido pasa a través de la válvula de expansión, donde disminuye su presión y temperatura, para posteriormente llegar al evaporador y volver a realizar este ciclo. De esta forma se extrae el calor de la instalación para transferirlo al subsuelo [47].

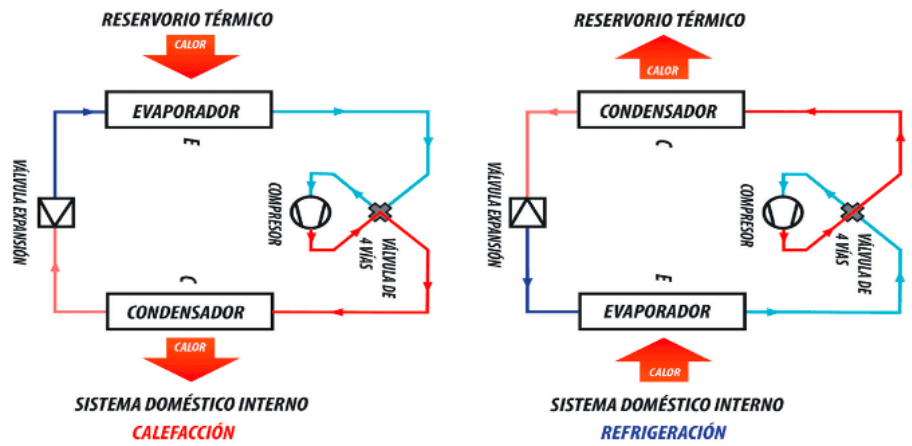


Figura 9. Funcionamiento de la bomba de calor con una válvula de 4 vías en ciclo calefacción (izquierda) y ciclo refrigeración (derecha).

Fuente: Geotermia somera: Fundamentos teóricos y aplicación [44].

La ventaja añadida de la geotermia somera es su capacidad para ser utilizada en cualquier lugar, pues no es dependiente de la geología de la zona ni de su gradiente geotérmico, como sí lo son la geotermia media y profunda, instalándose en puntos muy específicos que presentan anomalías y solo sirviendo para su uso en el sector industrial, como es el caso de la generación de electricidad [44,47].

Un aspecto importante con respecto al uso de BCG es el relacionado con su rendimiento, expresado mediante el coeficiente de rendimiento (*Coefficient of Performance* (CoP) en su acepción en la literatura anglosajona), siendo este la relación de energía útil o térmica suministrado por la bomba de calor con respecto a la energía real o trabajo mecánico realizado para el funcionamiento del compresor [45]. Cabe diferenciar este CoP en el caso de que la bomba funcione en ciclo calefacción o ciclo refrigeración.

En el caso de que la bomba funcione en ciclo calefacción, el rendimiento será expresado mediante el  $CoP_{t\acute{e}rmico}$  o coeficiente de rendimiento estacional (*Seasonal Coefficient of Performance* (SCoP) en su acepción en la literatura anglosajona), siendo el calor o energía térmica introducida desde el reservorio térmico al doméstico ( $Q_{calefacci\acute{o}n}$ ) con respecto a la energía real o trabajo mecánico consumido por el compresor ( $W$ ) [44,46]:

$$CoP_{t\acute{e}rmico} = SCoP = \frac{|Q_{calefacci\acute{o}n}| [J]}{W [J]} \tag{1}$$

En cambio, si la bomba está funcionando en ciclo refrigeración, el rendimiento será expresado mediante el  $CoP_{frigorifico}$  o ratio de eficiencia energética (*Energy Efficiency Ratio* (EER) en su acepción en la literatura anglosajona), siendo el calor o energía térmica evacuada del reservorio doméstico hacia el reservorio térmico ( $Q_{frigorifico}$ ) con respecto a la energía real o trabajo mecánico consumido por el compresor ( $W$ ) [46,50]:

$$CoP_{frigorifico} = EER = \frac{|Q_{frigorifico}| [J]}{W [J]} \tag{2}$$

Para determinar los valores sobre los que oscilan estos rendimientos se debe realizar una diferenciación también en cuanto al ciclo en el que estén trabajando. Estos rendimientos se obtienen atendiendo a la mayoría

de las prestaciones observadas en estos sistemas. En el ciclo calefacción el valor suele oscilar entre 3 y 4, pudiendo llegar a 5, mientras que en el ciclo refrigeración suele tomar valores de entre 2,5 y 3,5. Estos valores dependerán de multitud de factores, como el tipo de fluido utilizado, la profundidad de la instalación, la temperatura a la que se encuentre el recurso geotérmico y su estabilidad térmica, o el tipo de intercambio que se haga con el terreno entre otras características [47].

Con respecto al **tipo de intercambio que se haga con el terreno**, se pueden diferenciar 2 grupos [44,47]:

- **Intercambiadores en circuito abierto:** en este sistema se utiliza como fluido caloportador los recursos hídricos presentes en el propio terreno, normalmente aguas subterráneas. Este sistema consiste en la extracción del agua desde un primer sondeo donde se encuentra una bomba, mediante la cual se impulsa el agua hacia la bomba de calor. Ya en la bomba de calor se sucede el proceso explicado anteriormente. Posteriormente es inyectada de nuevo al acuífero mediante un segundo sondeo (ver Figura 10).

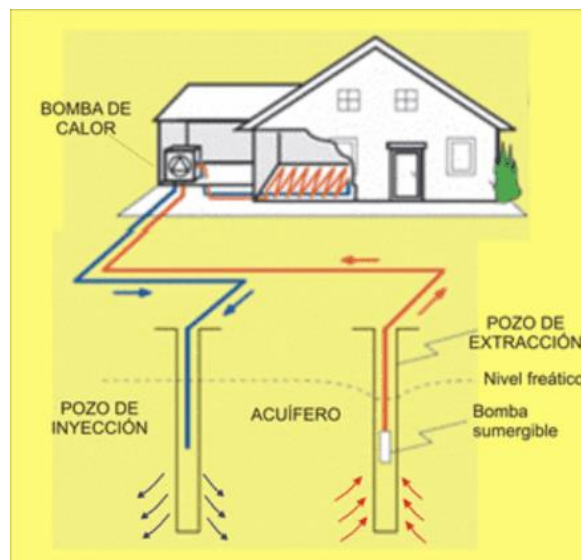


Figura 10. Sistema de geotermia en circuito abierto.

Fuente: Guía de la Energía Geotérmica [47].

- **Intercambiadores en circuito cerrado:** la diferencia con el anterior es que en este sistema el fluido caloportador circula por un circuito cerrado, no entrando en contacto con el medio. Estos sistemas pueden ser de circulación directa o indirecta (ver Figura 11). En el primero, el fluido que circula por las tuberías enterradas es el que circula por la bomba de calor, siendo el circuito primario definido anteriormente. Por lo tanto, el intercambio de calor se hace directamente entre el circuito primario, enterrado en el reservorio geotérmico, y el secundario, que circula por el interior de la vivienda. La circulación indirecta, predominante en la actualidad, cuenta con los tres circuitos definidos anteriormente, es decir, el primario, el secundario y el de la propia bomba de calor. Una de las ventajas que presentan estos sistemas es su ubicuidad, sin importar la geología del terreno ni sus características, siendo el sistema más utilizado para climatización de espacios y producción de ACS.

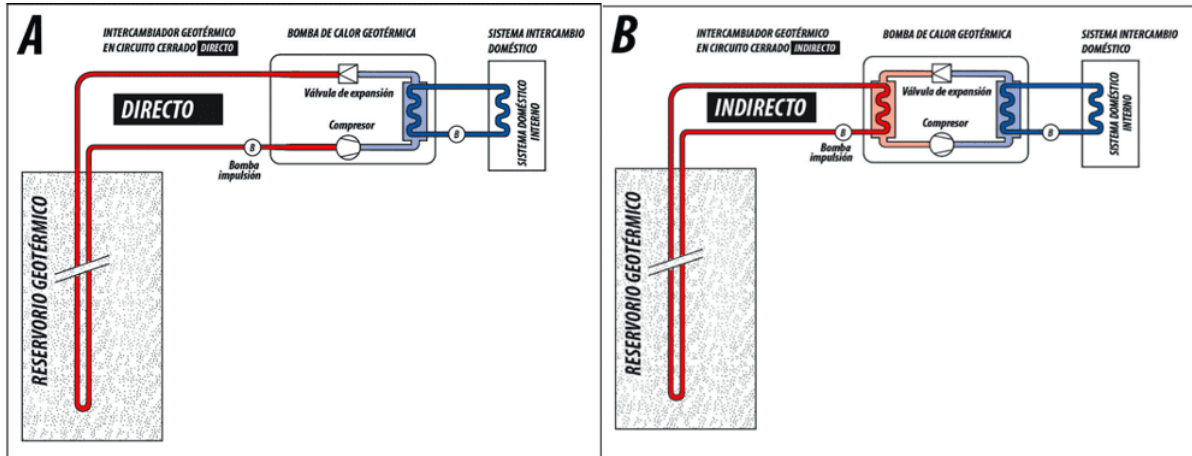


Figura 11. Sistema de circuito cerrado con circulación directa (izquierda) e indirecta (derecha).

Fuente: Geotermia somera y profunda: Fundamentos teóricos y aplicación [44].

Los sistemas de geotermia somera con intercambiadores en circuito cerrado se pueden clasificar en dos grupos según la disposición del intercambiador, siendo estos:

- **Intercambiadores horizontales:** Estos sistemas solo pueden ser instalados cuando se cuenta con superficie suficiente, como ocurre normalmente en el caso de las viviendas, necesitando aproximadamente un espacio un 50% superior a la superficie habitable si se cuenta con una construcción reciente, o un 300% con respecto a la vivienda en el caso de contar con cierta antigüedad y con malas condiciones de aislamiento térmico [47]. En función de lo anteriormente explicado, el intercambiador tendrá una longitud de entre 30 a 120 metros, dispuesto sobre zanjas a pocos metros de profundidad, en disposición simple, doble... o *slinky*. Esta última es una variante muy utilizada, en el que se van formando espirales de cara a tener la máxima longitud de intercambiador con la mínima superficie ocupada [46]. Se cuenta con la desventaja de la excesiva necesidad de espacio, explicada anteriormente, y también de la posible influencia del clima exterior debido a la cercanía de los intercambiadores con el ambiente, siendo en cambio un sistema de fácil instalación [47].

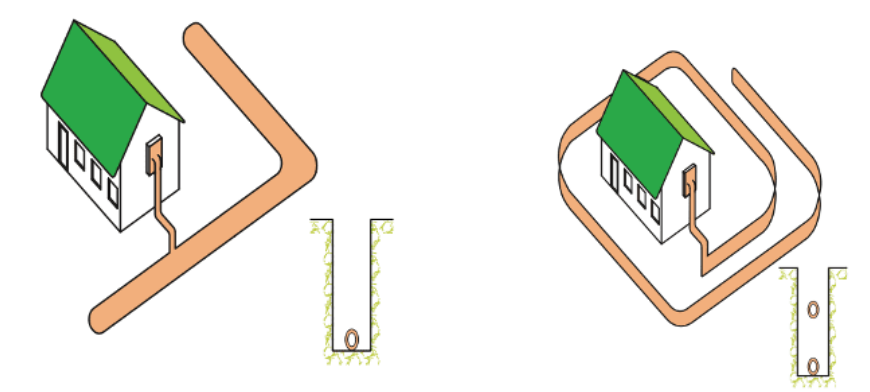


Figura 12. Intercambiador simple horizontal (izquierda) y doble horizontal (derecha).

Fuente: Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado [46].

- **Intercambiador vertical:** A diferencia del anterior sistema, este se instala cuando generalmente no hay suficiente espacio, pero también en el caso de que hubiese una gran cantidad de tuberías en esa zona, el espesor del suelo fuese insuficiente o en caso de necesitar una

excesiva cantidad de energía. Para la instalación de este tipo de intercambiadores es necesaria la ejecución de uno o varios sondeos, con profundidades que van desde los 20 hasta los 100 m e incluso más, con diámetros entre los 10 y 15 cm según la superficie a abastecer y los materiales existente [45,47]. Según la forma en que se dispongan las tuberías en el interior del sondeo se tendrá una configuración en U (simple o doble) o coaxial [46].

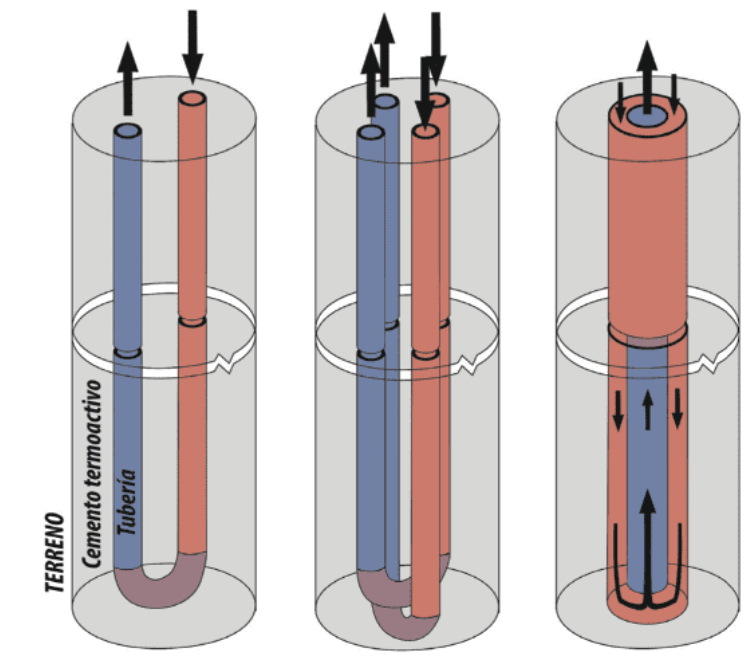


Figura 13. Diferentes configuraciones en intercambiadores geotérmicos cerrados con disposición vertical. Intercambiador en simple-U (izquierda), doble-U (centro) y coaxial (derecha).

Fuente: Geotermia somera y profunda: Fundamentos teóricos y aplicación [44].

Este proyecto se centrará en el estudio de un sistema de geotermia superficial con disposición horizontal con el objetivo de situarlo bajo la estructura de una cuneta verde.

## 2.4. Nexo agua-energía

El constante crecimiento que se ha estado dando en las ciudades desde los últimos años en la búsqueda de promover de mejores servicios, espacios o infraestructuras para la población ha provocado también inconvenientes. Esta rápida urbanización ha estado limitando y eliminando los espacios naturales y sus ecosistemas, dando lugar a un cambio en los usos del suelo y proporcionando una impermeabilización de los espacios. Por consiguiente, esto ha llevado a un problema en la gestión de las aguas pluviales, problema que no se es capaz de solucionar con los sistemas de drenaje convencionales, provocando inundaciones, contaminación difusa y una falta de servicio a la comunidad [30]. A parte, esta creciente urbanización también supone graves problemas en cuanto al aspecto energético, como por ejemplo, el debido a la contaminación difusa que sufre el agua de lluvia en el espacio urbano, derivando en un aumento del consumo de energía de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) para su tratamiento y la emisión de GEI en la consecución de dicha tarea [49]. Ante esta situación y con las previsiones de aumento de población que se dará en los próximos años, aproximadamente un incremento de 2,5 billones para el año 2050 [51], se ha de dotar a las ciudades de espacios multifuncionales, logrando una correcta gestión del agua a la vez que se buscan nuevas fuentes de energías, optimizando así el espacio urbano [52].



Los SUDS son una herramienta ideal para poder cumplir con esos objetivos: un espacio permeable que pueda ser integrado con sistemas de energía. Estos sistemas son, por ejemplo, la geotermia superficial combinada con el uso de BCG, permitiendo la gestión sostenible de pluviales a la vez que se consigue un aprovechamiento térmico y energético en viviendas, siendo este un aspecto importante, pues la climatización de edificios constituye aproximadamente un tercio de la energía total demandada en la UE [49]. Todo esto da lugar a la importancia del nexo agua-energía, concepto muy interesante y prometedor para hacer frente a los desafíos a los que está sometida la sociedad con el actual escenario de cambio climático [52]. Los SUDS también constituyen por sí solos una medida eficiente desde el punto de vista energético, como por ejemplo disminuyendo el *efecto isla de calor* (*Urban Heat Island* (UHI) en su acepción en la literatura anglosajona). Este efecto se basa en un aumento de la temperatura en las zonas urbanas debido, entre otras aspectos, a la masiva existencia de materiales impermeables en las ciudades con sus respectivas propiedades térmicas, que absorben la radiación solar durante el día, acumulándola y emitiéndola lentamente por las noches [53], lo que da lugar a un aumento en el consumo de energía por la necesidad de refrigerar los edificios y espacios residenciales de las ciudades en verano [54]. Para paliar este problema, una de las soluciones es dotar al espacio urbano de zonas verdes y permeables, permitiendo el enfriamiento de estos espacios por el efecto de evapotranspiración de las plantas, reduciendo así la temperatura ambiente y dando lugar al efecto *isla de frío urbano* [55].

Este problema también ha sido identificado por la Unión Europea, promoviendo, como se comentaba anteriormente, la implementación de SbN en entornos urbanos, como puede ser mediante el uso de SUDS [25].

Por lo tanto, el agua y la energía constituyen dos recursos sobre los que se deben realizar cambios en busca de un futuro más sostenible. Existe entre ellos un nexo más que notable que se ha empezado a tratar en los últimos años en diferentes investigaciones, tanto desde el punto de vista ambiental, energético, ingenieril y social [49]. En el presente proyecto se pretende estudiar la combinación de estos dos sistemas, pues aunque el empleo de cunetas verdes ya puede constituir por sí mismo una buena herramienta para la gestión sostenible del agua, su utilización combinada con fuentes de energía renovables, como puede ser la geotermia superficial, favorece la creación de estructuras multifuncionales, permitiendo el aprovechamiento de los recursos térmicos que proporciona la Tierra y reduciendo las emisiones de GEI a la atmósfera.

### 3. Estado del arte

En este apartado se mostrarán experiencias previas sobre la combinación de diferentes tipos de SUDS con elementos de geotermia superficial, realizando una búsqueda bibliográfica en la que se expondrán los objetivos, metodología utilizada y conclusiones observadas de cada estudio.

Esta línea de investigación, centrada en la combinación de SUDS con sistemas de energía geotérmica superficial, ha ido enfocada desde los inicios hacia su estudio en pavimentos permeables. Una de las primeras experiencias de laboratorio que pretendía estudiar esta temática fue la realizada en 2013 por el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria, donde se analizaron diferentes secciones con diferentes materiales, de cara observar el efecto de la estructura completa sobre un sistema de geotermia superficial horizontal y ver el comportamiento de esta en cuanto a las pérdidas que se pudiesen dar [56]. Todas las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones de temperatura, humedad, etc. Se utilizaron 3 tipos de pavimentos diferentes (bloques de hormigón entrelazados, hormigón y asfalto porosos) con dos sub-bases diferentes (cajas plásticas Atlantis y agregados de piedra caliza) además del resto de la estructura, que permanecía igual, dando lugar a 6 combinaciones diferentes, realizándose 3 pruebas para cada una de ellas con una duración de 72 h cada una.

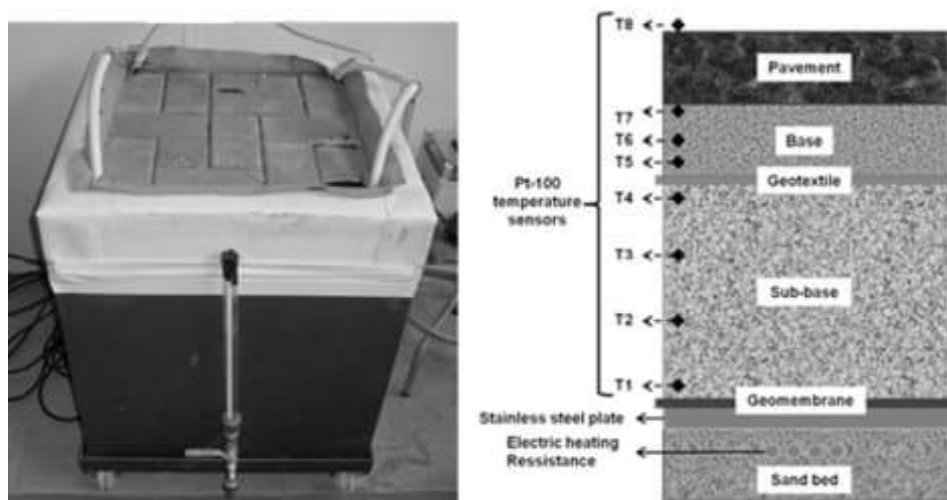


Figura 14. Foto de uno de los ensayos (izquierda) y la sección transversal de toda la estructura (derecha).

Fuente: *Influence of Pervious Pavement Systems on heat dissipation from a horizontal geothermal system* [56].

Los datos revelaron que se alcanzaban condiciones prácticamente estacionarias a partir de las primeras 24 h, en las que la utilización de módulos plásticos permite una mayor acumulación de calor que los áridos. También se determinó que en las últimas 48 h influía mucho más la elección del tipo pavimento que el tipo de sub-base con respecto a la disipación de energía. Finalmente, se llegó a la conclusión de que las propiedades térmicas de un pavimento u otro y la evaporación del agua en la sub-base son los principales parámetros que rigen el comportamiento de este sistema, además de considerar que la utilización de cajas Atlantis es más adecuada en la sub-base que el material árido, gracias a su mayor disipación y almacenamiento de calor.

Una aplicación práctica de la integración de sistemas de geotermia superficial bajo pavimentos permeables fue la realizada en *The Hanson Ecohouse* [50], una vivienda unifamiliar construida en Watford, en el *Building Research Establishment* (BRE). Esta fue la primera construcción donde se combinó un firme permeable con un sistema de geotermia superficial, de cara a gestionar el agua de lluvia a la vez que se trataba de realizar un aprovechamiento geotérmico. La casa cuenta con una superficie total de 143 m<sup>2</sup>, dividida en dos plantas y tres dormitorios, con un muy buen aislamiento térmico, siendo lo que se conoce como una *Passive House*.

Esta edificación contaba a su lado con una superficie de 65 m<sup>2</sup> donde se ejecutó la instalación del firme permeable, en cuya sub-base se introdujeron los intercambiadores de calor con disposición *slinky* a tan solo 350 mm de la superficie. Este circuito intercambiador, con una longitud total de 150 m y 50 mm de diámetro, se conectó a una bomba de calor de 8 kW de potencia. Cabe remarcar que esta casa también contaba con una superficie en el norte y oeste donde también se dispuso un sistema de firme permeable, pero sin ningún sistema de aprovechamiento energético.

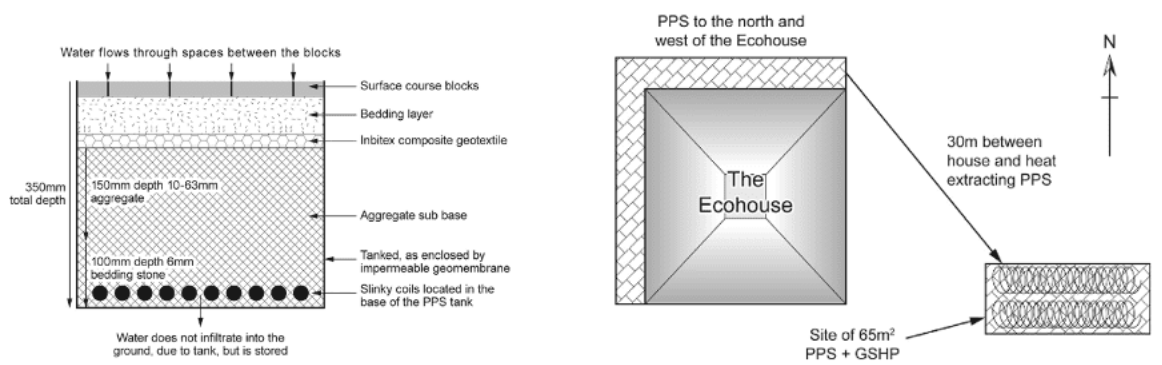


Figura 15. Sección transversal del firme permeable y el sistema de geotermia superficial (izquierda) y su ubicación junto con la casa (derecha).

Fuente: *Renewable energy combined with sustainable drainage: Ground source heat and pervious paving* [50].

La vivienda fue monitoreada durante 3 años, tomando datos de la temperatura en todos los espacios habitables, tanto en paredes exteriores e interiores, ambiente y subsuelo. Estas mediciones proporcionaron diferentes conclusiones, como la necesidad de una mayor profundidad de instalación del intercambiador geotérmico, ya que la temperatura ambiente influía de forma importante sobre el sistema. También se observó una posible mejora en el rendimiento del sistema si este se hubiese ubicado más cercano a la vivienda, o también la necesidad de no sobredimensionar excesivamente la bomba, lo que provocó diferentes cortes de energía.

Como conclusión, no puede faltar el hecho de que se esperaba que surgiesen inconvenientes, pues fue el primer proyecto de este tipo llevado a cabo. Esta experiencia previa sentó las bases de otros proyectos como el caso de *The Hanson Stewarby Office*, en Bedford, donde se pretendía rehabilitar una fábrica de ladrillos climatizando este espacio mediante la combinación de SUDS y sistemas de geotermia superficial. El objetivo era climatizar el complejo de tres plantas de 7.000 m<sup>2</sup> de superficie gracias a la instalación de un sistema de geotermia superficial, el cual contaba con cinco bombas de calor de 130 kW bajo el aparcamiento de 6.500 m<sup>2</sup>, siendo este un firme permeable. Se estimó que el proyecto estaría amortizado en unos 5-6 años, con un ahorro anual del 42% en consumo de energía y una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> del 26% [50,57,58].

Estos estudios, y la obtención de resultados favorables sobre la combinación de sistemas de geotermia superficial con firmes permeables, han hecho que diferentes investigadores abriesen nuevas líneas de investigación de cara a estudiar nuevas combinaciones con otras técnicas SUDS, como las cunetas verdes.

Uno de los primeros estudios que se centra en verificar la viabilidad de combinar sistemas de geotermia superficial con cunetas verdes, en este caso cunetas verdes húmedas, fue el realizado por diferentes autores en 2019 [1]. Se pretendía evaluar la viabilidad técnica de la combinación de BCG bajo este tipo de SUDS, analizando el comportamiento en relación a la diferencia de temperatura vertical y horizontal (la entrada y salida del agua), con la estructura y materiales propuestos. Para ello se construyó una cuneta verde a escala 1:2 en la que se instaló un sistema de geotermia superficial donde se recirculó el agua a temperaturas entre 20 y 50°C. Los ensayos tuvieron una duración de 24 h cada uno, divididas en una etapa de calentamiento de 8 h, basada en calentar el agua a la temperatura deseada (20,30,40 o 50°C), y otra de enfriamiento de 16 h.

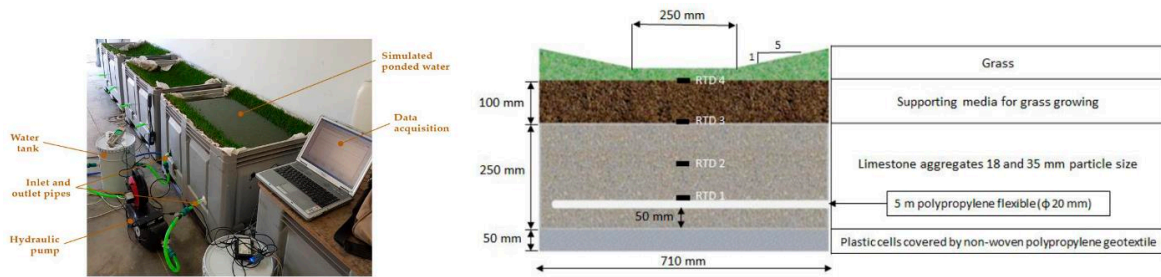


Figura 16. Configuración del experimento (izquierda) y sección transversal (derecha) del estudio realizado.

Fuente: *Evaluating the Thermal Performance of Wet Swales Housing Ground Source Heat Pump Elements through Laboratory Modelling* [1].

El experimento concluyó que el establecimiento de este rango de temperaturas había afectado al rendimiento térmico de la estructura, además de mostrar una buena resistencia térmica, haciendo que esta combinación resultase ventajosa tanto en la gestión de pluviales como en el posible ahorro energético.

Para continuar con la investigación en cunetas verdes, en 2020 se realizó el estudio de una cuneta vegetada en Ryton, Coventry, Reino Unido [59], llevando estos estudios a un entorno real con la finalidad de observar a largo plazo el comportamiento hidrológico de esta estructura mediante su monitoreo, ya que no existían muchas investigaciones que trataran este aspecto. Para ello, bajo condiciones climáticas reales y teniendo en cuenta el efecto de la estacionalidad y la variación de temperatura del agua de la cuneta, se monitoreó esta estructura durante 3 años con el objetivo de observar el comportamiento hidrológico. Así, se pudieron determinar ciertas etapas en las que la cuneta pasa de condición seca a húmeda, con los diferentes mantenimientos que pueden requerir, además de identificar diversos problemas asociados a periodos de fuertes tormentas. También se pudo observar la variación de temperatura superficial de la cuneta en ese rango de tiempo para comprobar su posible integración con BCG, similar al realizado en el primer estudio mencionado [1], siendo viable también en esta situación, incluso en las situaciones más desfavorables. Por último, también se tuvo en cuenta la evolución de la cuneta en cuanto a la vegetación y las actividades de mantenimiento necesarias. Durante los 3 años de monitoreo, hubo un periodo donde, debido a la pandemia de COVID-19, no se realizaron actividades de mantenimiento, analizándose el comportamiento de estas infraestructuras ante estos condicionantes de operación.

Este estudio permitió verificar la investigación realizada en 2019 anteriormente expuesta [1], desarrollando aún más esta nueva línea de investigación que pretende incorporar un sistema de geotermia superficial bajo la estructura de una cuneta verde.

En la Tabla 4 se puede ver un resumen de alguno de los estudios e investigaciones más importantes que se han realizado hasta la fecha sobre la integración de sistemas de geotermia superficial en SUDS, además de sus principales contribuciones y los tipos de SUDS estudiados.

Tabla 4. Estudios previos sobre la combinación de SUDS con sistemas de geotermia superficial.

Fuente: Adaptación a partir de *The Role of Geothermal Heat Pump Systems in the Water–Energy Nexus* [49].

Año	Autores	Tipo de SUDS estudiado	Tipo de estudio	Principales contribuciones
2008	Scholz y Grabowiecki [60]	Firme permeable	Laboratorio	Uno de los primeros experimentos sobre el uso geotérmico de pavimentos permeables, proporcionando resultados prometedoros.
2009	Coupe et al. [61]	Firme permeable	Laboratorio	Se determinó que la calidad del agua en un pavimento permeable no se ve afectada por la presencia de sistemas de geotermia superficial.
2010	Tota-Maharaj et al. [62]	Firme permeable	Laboratorio	Estudio de la proliferación de bacterias y microorganismos, descartando cualquier influencia significativa en cuanto al intercambiador de calor geotérmico.
2011	Tota-Maharaj et al. [63]	Firme permeable	Estudio teórico	Desarrollo de un método numérico para modelizar los flujos de calor y el balance energético a partir de datos de temperatura medidos y otros factores ambientales.
2012	Scholz et al. [64]	Firme permeable	Estudio teórico	Análisis de la aplicación de KSOM para predecir concentraciones de contaminantes microbianos y estudio del sistema en combinación con elementos geotérmicos.
2013	del-Castillo-García et al. [56]	Firme permeable	Laboratorio	Estudio de la influencia de diferentes superficies de pavimentación y diferentes secciones transversales en el rendimiento térmico.
2013	Novo et al. [65]	Firme permeable	Experimento de campo	Estudio de las diferencias de temperatura de los pavimentos permeables en comparación con la temperatura del aire, así

				como el análisis del deterioro de la calidad del agua debido a las diferencias de temperatura.
<b>2015</b>	Tota-Maharaj et al. [66]	Firme permeable	Laboratorio y campo	Determinación de la escasa influencia del intercambiador de calor geotérmico en la calidad del agua del sistema.
<b>2018</b>	Andrés-Valeri et al. [67]	Cuneta verde	Laboratorio	Estudio preliminar sobre la explotación geotérmica de la cuneta verde.
<b>2019</b>	Rey-Mahía et al. [1]	Cuneta verde	Laboratorio	Prueba de concepto en laboratorio sobre el aprovechamiento geotérmico de cunetas verdes húmedas.
<b>2020</b>	Sañudo-Fontaneda et al. [59]	Cuneta verde	Campo	Uno de los primeros estudios y de mayor duración en el que se monitorea una cuneta verde real en Coventry.
<b>2021</b>	Yildiz et al. [68]	General	Laboratorio	Determinación de que las condiciones termo-hidrológicas dentro de los SUDS son propicias para un intercambio eficaz del calor del suelo.
<b>2022</b>	Erbs-Poulsen et al. [69]	Firme permeable	Campo	Estudio de campo del aprovechamiento geotérmico de un pavimento permeable.
<b>2022</b>	Raaschou-Andersen et al. [70]	Firme permeable	Campo	Estudio de campo del aprovechamiento geotérmico de un pavimento permeable.
<b>2022</b>	Janssen et al. [71]	Estanque de retención	Campo	Estudio de campo para el aprovechamiento geotérmico como sistema de refrigeración de las salidas de un estanque

Como se puede observar en la Tabla 4 y en los diferentes estudios expuestos en este apartado de Estado del arte, la mayoría de las investigaciones se centran en el aprovechamiento geotérmico mediante firmes permeables, pues su uso es muy popular en Reino Unido. Estos sistemas han sido implementados experimentalmente en campo, como en el caso de *The Hanson Ecohouse*, permitiendo estudiar el rendimiento del sistema, e implementándose más tarde en *The Hanson Stewarby Office*, donde se pudo observar la alta eficiencia energética que suponía la integración de sistemas de geotermia bajo firmes permeables.

En la Tabla 4 también se puede ver que este aprovechamiento energético tiene cabida en otras tipologías de SUDS, como las cunetas verdes. Su posible combinación con sistemas de geotermia superficial ya ha sido estudiada por diferentes autores en los últimos años, y también en el presente proyecto, de cara a confirmar su eficiencia y proporcionar nuevas vías de desarrollo.

En este TFG se pretende seguir con esta línea de investigación, a fin de comprobar el comportamiento térmico de cunetas verdes bajo distintas condiciones de funcionamiento, tanto en condiciones secas como húmedas.

## 4. Materiales y métodos

En este apartado se explicarán los diferentes materiales, equipamiento y metodología utilizada para la realización de los ensayos en el presente TFG.

En este proyecto se diseñaron tres configuraciones diferentes de cunetas verdes para determinar su comportamiento térmico en condiciones secas y húmedas.

### 4.1. Materiales

Las cunetas verdes de la tipología seca están constituidas por tres capas [41]:

- Una primera capa o capa superficial. En este estudio se empleó tierra vegetal, siendo lo más habitual en estas tipologías de cunetas.
- Una segunda capa intermedia conformada generalmente por árido.
- Una tercera capa o capa drenante. En esta investigación se emplearon cajas Atlantis para esta capa.

En los tres modelos evaluados se mantuvieron inalterados los materiales y los espesores de la capa superficial y la drenante. En cuanto a la capa intermedia, es aquí donde se pretende investigar diferentes alternativas, con la intención de evaluar la implementación de nuevos materiales en la sección tipo de una cuneta. Para ello, se ensayará un modelo con una tipología tradicional como punto de partida (capa intermedia con árido calizo), para posteriormente ensayar las otras dos cunetas con nuevos materiales. En estas dos cunetas, la capa intermedia estará compuesta por capas de árido normal y árido ligero en la 2ª configuración (CUNETA 2), y por árido reciclado y árido ligero en la 3ª configuración (CUNETA 3). A continuación, en la Figura 17 se pueden ver las 3 secciones tipo ensayadas.

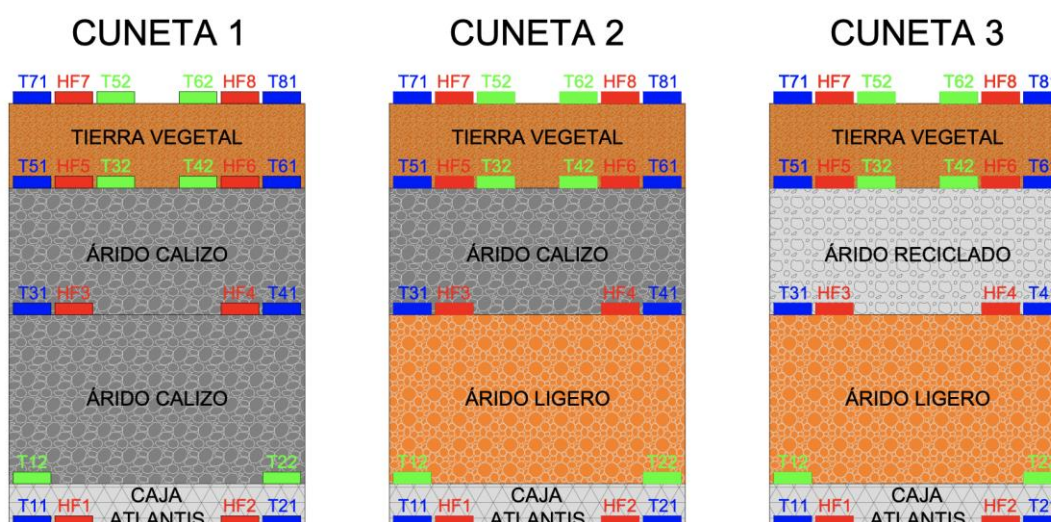


Figura 17. Representación de las tres secciones tipo ensayadas.

Fuente: Elaboración propia.



#### 4.1.1. Árido ligero

También conocida como arcilla expandida, es un árido de gran ligereza, calidad, duradero y muy estable, utilizado para múltiples aplicaciones en el que su ideal característica de ser respetuoso con el medio ambiente lo hace un material de construcción que mejora el rendimiento sostenible de cualquier edificio o infraestructura. Para la producción de arcilla expandida, es necesario abundante arcilla natural como materia prima, extraída por lo general de pozos ubicados cerca de las fábricas. Una vez en la planta, esta arcilla natural es procesada en hornos rotatorios, donde es sometida a temperaturas de hasta 1.500°C, pudiendo obtener hasta 5 m<sup>3</sup> de arcilla expandida a partir de 1 m<sup>3</sup> de arcilla natural [72]. Los gases generados en esta etapa de calentamiento permiten la expansión de la arcilla natural, creando un interior con alta porosidad y reduciendo su densidad. Además, el movimiento rotatorio del horno proporciona al material una forma esférica con una cubierta exterior cerámica de gran dureza, dando lugar a un material de alta resistencia mecánica, ligero y térmicamente aislante [73].



Figura 18. Estructura interior y exterior de la arcilla expandida.

Fuente: Laterlite [73].

Aparte de sus principales características como árido ligero, su baja densidad y alta resistencia mecánica, también destacan otras características importantes de este material [72,74]:

- Larga vida útil, manteniéndose estable en el tiempo sin necesidad de requerir mantenimiento. Es un material inerte que no contiene materia orgánica, siendo resistente ante situaciones climáticas extremas, ataques químicos o parásitos
- Resistente al fuego, siendo un material incombustible que no emite gases ni humos en su contacto con el fuego, mientras que mantiene sus demás características térmicas, físicas y mecánicas.
- Buen aislante térmico y acústico gracias a su estructura interior porosa.
- Material 100% reciclable o reutilizable, con arcilla natural como materia prima, biomasa o productos reciclados.
- Material altamente resistente, ideal en la producción de morteros y hormigones, mientras que se reduce su peso hasta en un 50% gracias a la baja densidad que tiene.
- Material con alta capacidad drenante, permitiendo gestionar grandes escorrentías y evitar inundaciones gracias a su alta porosidad.

Todas estas características hacen que la arcilla expandida sea utilizada para una gran variedad de finalidades: cubiertas ajardinadas, jardinería, hormigones ligeros estructurales y no estructurales, aplicaciones geotécnicas, cimentaciones, sistemas de protección pasiva, etc. [73].

En el presente proyecto se ha utilizado este material, en concreto la *Arlita® Leca® dur* de *Saint-Gobain Weber*, cuyas características son las mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Características técnicas *Arlita® Leca® dur*.

Fuente: *Saint-Gobain Weber* [75].

Características técnicas	Prestaciones
Forma de las partículas	Aproximadamente esféricas
Granulometría	2-10 mm [15-90]% pasan
Densidad aparente	350 kg/m <sup>3</sup> (±15%)
Conductividad térmica (EN12664)	0,1 W/mK
Resistencia a la fragmentación/machaqueo	≥ 1,3 N/mm <sup>2</sup>
Partículas machacadas	≤ 25% masa
Absorción de agua	≤ 34% masa seca

En el Anexo II se adjunta tanto la ficha técnica como la declaración de prestaciones que el fabricante proporciona de la *Arlita® Leca® dur*, donde se exponen las diferentes características del material entre otra información.

A continuación, se puede ver la curva granulométrica del árido ligero utilizado en algunas de las cunetas verdes ensayadas en este estudio. Esta curva granulométrica ha sido realizada mediante el método de tamizado por vía seca, de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1:2012 [76], lo que permitió obtener la Figura 19.

TAMIZ UNE (mm)	RETENIDO parcial (Kg)	PORCENTAJE (%)		
		RET. PARCIAL	RET. ACUM.	ACUM. PASA
40	0	0	0	100
31,5	0	0	0	100
20	0	0	0	100
16	0	0	0	100
10	0,052	5	5	95
8	0,406	36	41	59
4	0,636	57,1	98,1	1,9
2	0,008	0,7	99	1
1	0	0,0	99	1
0,500	0	0,0	99	1
0,250	0	0,0	99	1
0,125	0	0,0	99	1
0,063	0	0,0	99	1
Fondo	0	0,0	99	1
Módulo granulométrico (M.G.)				0,94
Material acumulado en el fondo (Kg)				0,049

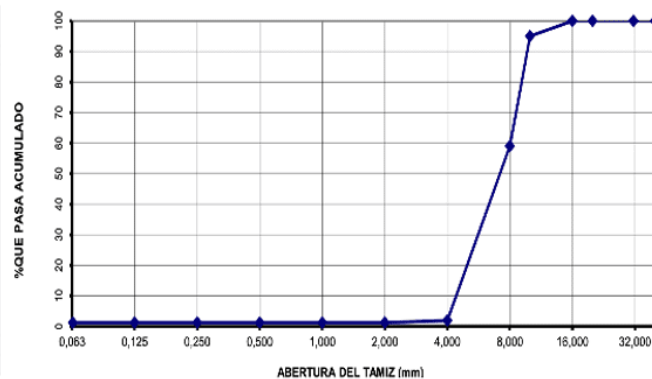


Figura 19. Estudio granulométrico del árido ligero utilizado.

Fuente: *Elaboración propia*.

#### 4.1.2. Árido calizo

También identificado como piedra caliza o árido normal en el presente proyecto, es una roca sedimentaria cuyo principal componente es el carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), en forma de calcita o aragonito generalmente, pudiendo contener también carbonato de magnesio debido a la dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), arcilla, carbonato de hierro, pirita, etc. Es un material cuyo principal origen es la acumulación y sedimentación de organismos marinos que han utilizado el carbonato cálcico presente en el agua para construir sus esqueletos y conchas, sedimentándose en los fondos marinos, pudiendo también formarse a partir de la precipitación del agua de mar en presencia de  $\text{CaCO}_3$  [77].

Este material, muy abundante en la Tierra, es utilizado en prácticamente todos los continentes del mundo, cada uno orientado a un determinado mercado. Los usos de este material son muy variados, los más comunes son los relacionados con la construcción y la obra pública, siendo utilizado como materia prima para la fabricación de morteros y cementos, agregado de la base, sub-base y asfalto de carreteras, uso directo como elemento de construcción o en la estabilización de suelos. También es usado en agricultura para la producción de *cal agrícola* cuando la piedra tiene un alto contenido en  $\text{CaCO}_3$ , de cara a neutralizar aquellos suelos ácidos en los que esa acidez pueda dificultar el crecimiento de plantas y cultivos. En industria, es empleado durante el proceso de producción del acero, eliminando impurezas durante la fase de reducción del mineral y la posterior producción de acero. También es utilizado en productos cosméticos y medicamentos, fabricación de vidrio, relleno de pinturas, plásticos, etc. [78].

Con respecto al uso de áridos en SUDS, estos son un elemento básico, pues son utilizados en multitud de estructuras, ya sea como material de capas drenantes, capas de almacenamiento o bajo la estructura [41].

Como se puede ver, los áridos calizos se utilizan en gran variedad de sectores gracias a su versatilidad, siendo además un material ideal desde el punto de vista sostenible. A continuación se muestran diferentes características y propiedades [79]:

- Muy resistente y duradero, permitiendo su uso en el tiempo sin prácticamente deteriorarse, lo que permite la eliminación de cualquier tipo de mantenimiento, estableciéndose como un material muy valioso.
- Reutilizable, siendo la principal característica que lo confiere como un material sostenible, pues puede utilizarse para múltiples fines tras un primer uso.
- Buen aislante acústico, gracias a su elevada densidad.
- Su versatilidad de uso, permitiendo su utilización para múltiples fines.
- Material permeable, permitiendo el paso del agua y configurándose como un buen material drenante
- Ignífugo, reteniendo el fuego y el calor

En la presente investigación se ha utilizado árido calizo para su disposición en dos de las tres cunetas verdes ensayadas, pues es uno de los principales materiales utilizados en este tipo de infraestructuras.

El árido calizo utilizado en el presente proyecto cumple con las especificaciones de la zavorra ZA 0/32, establecida en el PG-3 [80], cuya granulometría se muestra en la Figura 20.

TAMIZ UNE (mm)	% pasa
40	100
32	94
20	77,5
12,5	64
8	51,5
4	35,5
2	23,5
0,5	14
0,25	10
0,063	4,5

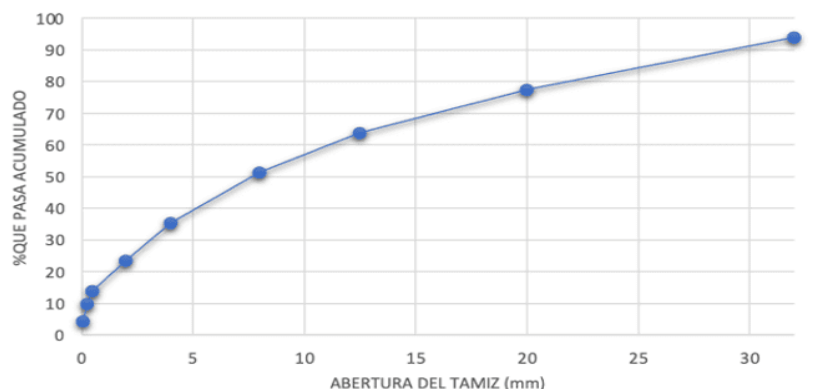


Figura 20. Curva granulométrica ZA 0/32.

Fuente: Elaboración propia a partir del PG-3 [80].

#### 4.1.3. Árido reciclado

Los áridos reciclados son una perfecta alternativa para su uso dentro de la estructura de SUDS. Son áridos obtenidos a partir de materiales generados en demoliciones, como ladrillos y hormigón; los procedentes de mantenimiento de obras civiles, como el pavimento asfáltico de carreteras; o los generados en otro tipo de actividades [41].

Uno de los materiales más utilizados dentro de los áridos reciclados es el hormigón triturado, pudiendo ser utilizado siempre y cuando se cumplan unos estándares de calidad mínima, dados por la calidad de la fuente de la que provenga el árido previo a su procesado y del proceso llevado a cabo para la obtención de un material adecuado. El uso de este tipo de material reciclado en SUDS debe venir precedido de ciertos requisitos de calidad, siendo estos similares a los establecidos en materiales naturales. Alguno de los requisitos exigidos para el uso de materiales reciclado en SUDS son [41]:

- Calidad constante, mediante la no degradación del material durante su vida útil.
- No contener partículas finas que pueda transportar el agua fuera de la estructura de drenaje, de cara a no producir contaminación o la obstrucción de los posibles conductos drenantes instalados.
- Se ha de asegurar que el material no contenga sustancias que pudiesen contaminar la escorrentía, como materia orgánica o chatarra de acero. Estos materiales también pueden contener altos valores de acidez, induciendo a un aumento de la erosión del suelo por el posible impedimento en el crecimiento de vegetación.
- Clasificación adecuada.

En cuanto a la clasificación de estos materiales, se puede hacer atendiendo a su granulometría, forma, calidad, composición, uso o limpieza que posean [81].

En el presente proyecto se ha utilizado árido reciclado en una de las tres secciones ensayadas, tratando de determinar la posible eficiencia de este material en cunetas verdes combinadas con el uso de BCG. El árido reciclado ha sido suministrado por *COGERSA* y ha sido declarado de origen mixto 0/32. El ensayo granulométrico está realizado de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1:2012 [76], mostrando los resultados obtenidos en la Figura 21.

TAMIZ UNE (mm)	% pasa
40	100
31,5	95
22,4	62
16	60
11,2	50
8	40
5,6	36
4	30
2	20
1	16
0,5	15
0,25	10
0,063	5

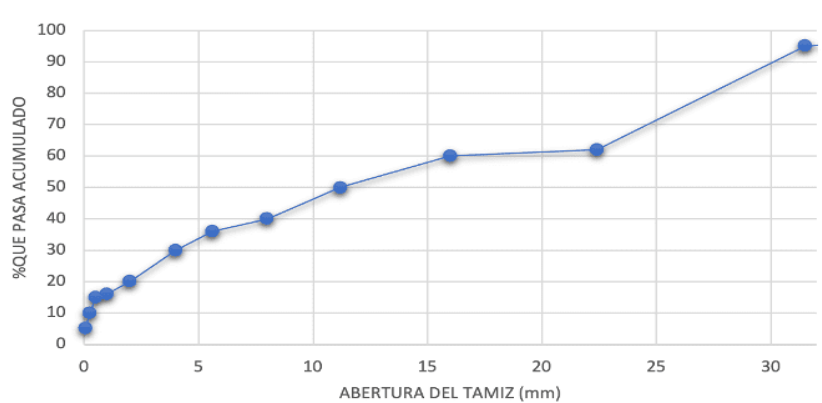


Figura 21. Curva granulométrica del árido reciclado utilizado.

Fuente: Elaboración propia a partir de COGERSA [82].

En el Anexo II se adjunta la declaración de prestaciones que COGERSA proporciona de este material.

#### 4.1.4. Tierra vegetal

La tierra vegetal, sustrato vegetal o *topsoil* en la literatura anglosajona, es una mezcla sustancias minerales y orgánicas como tierra natural, compost, arena, arcilla o descomposición de rocas, también llamado *detritus*. Esta capa de suelo superior dispone de los nutrientes y fertilizantes necesarios para proporcionar las condiciones adecuadas para la generación de actividad biológica, dando lugar al crecimiento de vegetación natural y sirviendo como espacio nutritivo para ciertos organismos, estando presente en una amplia zona de la superficie de la Tierra [83].

El tiempo necesario para la formación de este tipo de suelos es muy grande, aproximadamente 100 años por centímetro de suelo. Dentro de la tierra vegetal se encuentran diversos nutrientes, generalmente gracias a la presencia de compost, pues es el compuesto que mayores propiedades nutritivas confieren a los suelos y, por consiguiente, fertilidad, representada por los valores NPK, que indican la cantidad de fósforo, nitrógeno y potasio que hay presente en el suelo y, en función de su calidad nutritiva, se necesitará la utilización de fertilizantes o no. El fósforo es el nutriente que confiere a la planta su ADN, siendo necesario para un correcto crecimiento de las raíces; el potasio ayuda a las plantas en el proceso de la fotosíntesis y en el desarrollo de flores y frutos; y, por último, el nitrógeno es utilizado para obtener un crecimiento con hojas y tallos saludables. La tierra vegetal es rica en estos nutrientes, donde también destaca el magnesio, realizando prácticamente la misma función que el potasio y permitiendo que la tierra vegetal sea utilizada en distintas zonas, de cara a aumentar la fertilidad del suelo y enriquecerlo, mejorando a su vez también su estructura [41,84].

Se puede realizar una clasificación de este suelo vegetal en función de si se pretende que sea utilizado para fines multipropósito o específicos. Aquellos suelos multipropósito tendrán la capacidad de albergar árboles, plantas, arbustos, etc.; mientras que aquellos suelos vegetales destinados a usos específicos son utilizados cuando se tiene baja fertilidad, alta acidez o materiales calcáreos. Estos suelos no son aconsejables para usos paisajísticos, sino que son más utilizados para usos ecológicos donde sea necesario obtener el máximo beneficio para la biodiversidad, como se busca en los SUDS [41].

Las principales propiedades de la tierra vegetal son las siguientes

- Suelo muy fértil y rico en nutrientes gracias a la presencia de materia orgánica, haciendo que las plantas puedan obtener un crecimiento y desarrollo adecuados.

- Permite un correcto drenaje del agua, siendo esencial por la función que va a tener en la cuneta verde de cara a infiltrar el agua a su través.
- Gran capacidad para la retención de humedad.
- Mejora el suelo original con el que se mezcla permitiendo instaurar mejores propiedades fértiles.

En el presente estudio se ha instalado este material en la capa superficial de las tres secciones ensayadas, siendo este un elemento clave en la estructura de las cunetas verdes. En la Figura 22, se pueden ver los datos obtenidos en el estudio granulométrico de la tierra vegetal utilizada. Este estudio ha sido realizado mediante el ensayo por tamizado en vía seca según la norma UNE-EN 933-1:2012 [76].

TAMIZ UNE (mm)	RETENIDO parcial (g)	RETENIDO acumulado (g)	PORCENTAJE (Acum.)	
			RETENIDO	PASA
40	0	0	0	100
31,5	0	0	0	100
20	0	0	0	100
16	0	0	0	100
10	0	0	0	100
8	123	123	11	89
4	202	325	29	71
2	161	486	44	56
1	126	612	56	44
0,5	109	721	65	35
0,25	155	876	79	21
0,125	133	1009	92	8
0,063	58	1067	97	3
<b>Módulo granulométrico (M.G.)</b>				<b>4,73</b>
<b>Material acumulado en el fondo (g):</b>				<b>32</b>

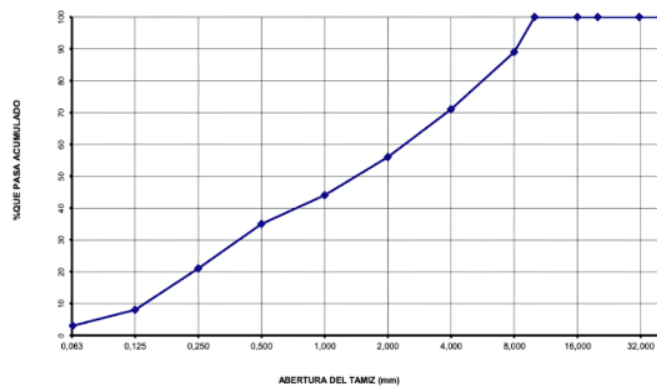


Figura 22. Estudio granulométrico de la tierra vegetal utilizada.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.5. Caja Atlantis

Las cajas o celdas de drenaje *Atlantis* son estructuras tridimensionales, con forma rectangular, huecas, perforadas tanto vertical como horizontalmente y fabricadas en polipropileno, diseñadas por la empresa *Atlantis – Green cities for life* bajo el nombre *Atlantis Flo-Cell®* (ver Figura 23). Esta empresa nace en 1986 con la intención de promover la existencia de ciudades verdes mediante la integración de espacios naturales en las ciudades, con la principal intención de crear un nuevo ciclo urbano del agua, lo que permitirá la regulación del efecto *isla de calor* en las ciudades, la mejora del bienestar general de la población, la mejora de la calidad del aire, el aumento de la capacidad de producción de oxígeno y, por último y no menos importante, la mejora de la calidad del agua y la reducción de la escorrentía superficial que pudiese estar contaminada en su paso por el espacio urbano [85,86].

Esta estructura es una herramienta con gran versatilidad, siendo una gran opción para su utilización en SUDS, ya que reduce el flujo superficial del agua al aumentar la permeabilidad del terreno y permite que el agua pueda almacenarse en depósitos subterráneos como acuíferos. También destaca la utilización de estos sistemas en drenajes de instalaciones deportivas, obras civiles, aplicaciones paisajísticas y muros de contención [87].



Figura 23. Módulo de la caja Atlantis Flo-Cell® 52 mm.

Fuente: Elaboración propia.

Las cajas o celdas Atlantis Flo-Cell® destacan por su gran ligereza, eficiente drenaje y gran capacidad portante, pues ofrecen gran resistencia sin comprometer a la estructura sobre la que se disponen, algo especialmente importante, por ejemplo, en las cubiertas verdes, pues la utilización de áridos pesados suponía serias limitaciones en el diseño estructural de los edificios. Son instaladas por debajo de una capa granular y envueltas en geotextil, de cara a proporcionar un espacio de almacenamiento de agua para el posterior uso que se le quiera dar, pero restringiendo la entrada de materiales o sustancias indeseables en la estructura gracias al geotextil. En la Figura 24 se puede ver la utilización de esta estructura en un sistema de drenaje [87].



Figura 24. Sistema de drenaje con la utilización de la caja Atlantis Flo-Cell®.

Fuente: Atlantis – Green cities for life [87].

A modo de resumen, las principales características y beneficios de las cajas *Atlantis Flo-Cell®* son las siguientes [87]:

- Drenaje rápido: eficiente drenaje del exceso de agua con un buen nivel de retención de la humedad.
- Ligero: no siendo necesario la utilización de equipos de elevación o grúas.
- Diseño estructural sólido: permiten su instalación tanto horizontal como vertical, lo que es combinado con una fácil configuración para cumplir con las especificaciones.
- Instalación rápida: rápida instalación en comparación a los tradicionales sistemas de drenaje basados en la utilización de áridos.
- Alta Infiltración: presentan un porcentaje de huecos del 90%.
- Resistencia biológica: la estructura permanece inocua a contaminantes biológicos externos.
- Resistencia química: el material permanece inalterable ante agresiones químicas presentes en la tierra como ácidos, alcoholes o hidrocarburos.

Las características nombradas y su gran potencial como uso en SUDS ha hecho que este sistema sea utilizado en todas las cunetas verdes ensayadas como capa sub-base. Particularmente para este estudio, se utilizaron los módulos de 52 mm de altura. A continuación, se puede ver tanto las dimensiones como las principales propiedades de las cajas *Atlantis Flo-Cell® 52 mm* en la Tabla 6.

*Tabla 6. Dimensiones y principales propiedades de las cajas Atlantis Flo-Cell® 52 mm.*

*Fuente: Atlantis – Green cities for life [87].*

Característica	Valor	
Dimensiones	Alto	52 mm
	Ancho	260 mm
	Largo	480 mm
Peso de cada módulo	450 gr/módulo	
Peso por metro cuadrado	3,60 kg/m <sup>2</sup>	
Resistencia a compresión	110-140 t/m <sup>2</sup>	
Capacidad de acumulación de agua	50L/m <sup>2</sup>	
Índice de huecos disponible	90%	
Porosidad superficie drenante	70%	
Material	100% Polipropileno Reciclado	
Temperatura de servicio	-10°C – 70°C	

En el Anexo II se adjunta la ficha técnica de la caja *Atlantis Flo-Cell® 52 mm*.



#### 4.1.6. Geotextil

Entre cada capa de los diferentes materiales explicados anteriormente se instaló una malla de geotextil, siguiendo así las recomendaciones de diferentes guías de SUDS [28,36,41].

Los geotextiles son materiales sintéticos entre cuyas características destacan su estructura laminar, flexible y porosa. Este material, fabricado con fibras de propileno, presenta unas altas propiedades mecánicas, oponiendo gran resistencia al desgarrar, punzonamiento, perforación o reventón. Además de esta función, también presenta una elevada vida útil, manteniéndose prácticamente inalterable ante agentes químicos, biológicos o físicos. Asimismo, su elevada fuerza a la rotura, su gran resistencia a la deformación, o su elevada permeabilidad gracias a ser un material muy poroso, lo hacen un elemento con unas características que le permiten cumplir con más de una función en su utilización [88].

El presente estudio se ha valido de este material al destacar sus funciones de drenaje, separación, protección y refuerzo, permitiendo que en los ensayos realizados se evite la mezcla de materiales, pero sí el paso del agua a fin de, por ejemplo, no reducir la capacidad de almacenaje de la capa drenante ubicada en la sub-base de la estructura.

En particular, se ha utilizado el geotextil de poliéster no tejido de la empresa *DANOSA*, más concretamente el modelo *DANOFELT PY 150*. En este tipo de geotextiles, las fibras se disponen aleatoriamente, presentando aberturas pequeñas que dificultan la posibilidad de que se produzca el paso de cualquier tipo de material a su través, proporcionando una alta tasa de flujo perpendicular, siendo ideal en aplicaciones de filtración [41].

A continuación, se muestran en la Tabla 7 algunas de las características y prestaciones del geotextil utilizado en el presente estudio.

Tabla 7. Características y prestaciones del geotextil *DANOFELTY PY 150*.

Fuente: *DANOSA* [89].

Característica	Valor
Densidad nominal	79 kg/m <sup>2</sup>
Permeabilidad al agua	0,04468; -0,005 m/s
Masa media	150 (+10%; -15%) g/m <sup>2</sup>
Capacidad del flujo de agua en el plano	2,7exp(-7); -0,2exp(-7) m <sup>2</sup> /s
Medida de abertura	90; ±20 μm
Eficacia de la protección	9,0 · 10 <sup>3</sup> ; -0,3 · 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup>
Durabilidad	>25 años (suelo natural; 4<pH<9; T<25°C)

En el Anexo II se adjunta la declaración de prestaciones que la empresa *DANOSA* proporciona de este geotextil.

## 4.2. Equipamiento

En este apartado se describirán los diferentes elementos y equipos de medición utilizados para la realización de los ensayos junto con los materiales expuestos en el apartado 4.1, de cara a estudiar las propiedades térmicas que nos ofrece cada material y el conjunto de estos en cada tipo de cuneta verde. Esta sección se diferenciará en dos apartados, atendiendo al equipamiento utilizado para la caracterización de las propiedades térmicas de los materiales y el equipamiento utilizado para la determinación del comportamiento térmico de las cunetas verdes.

### 4.2.1. Equipamiento para la caracterización de las propiedades térmicas de los materiales.

#### Analizador de conductividad térmica *TCi*

Para la realización de estos ensayos se ha utilizado la herramienta *TCi*, comercializada por la empresa *C-Therm*. Este es un analizador no destructivo de conductividad y efusividad térmica de materiales que pueden presentarse en formato sólido, líquido, polvo o pasta sin requerir calibración o preparación de muestras, obteniendo caracterizaciones térmicas simples y muy precisas. El principio de operación del *TCi* está enmarcada en la técnica de la fuente plana transitoria modificada (MTPS), detallada en la norma ASTM D7984-16 [90], consistente en la aplicación de una fuente de calor en una muestra mediante un sensor reflector. Para garantizar la obtención de datos verídicos sobre la conductividad y efusividad térmica de los materiales ensayados puede colocarse un pequeño peso sobre la muestra y garantizar el contacto total de esta con el sensor [91].

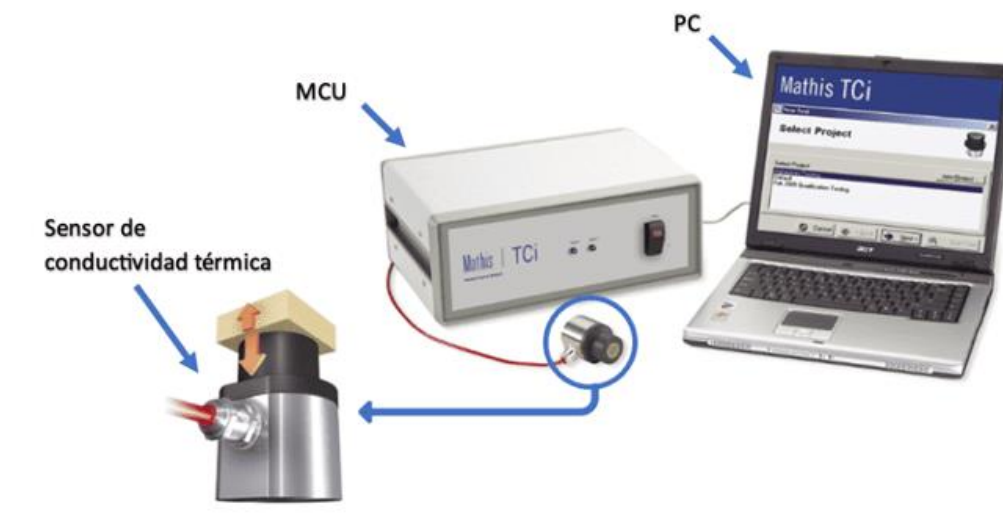


Figura 25. C-Therm TCi.

Fuente: C-Therm TCi Operator Manual [91].

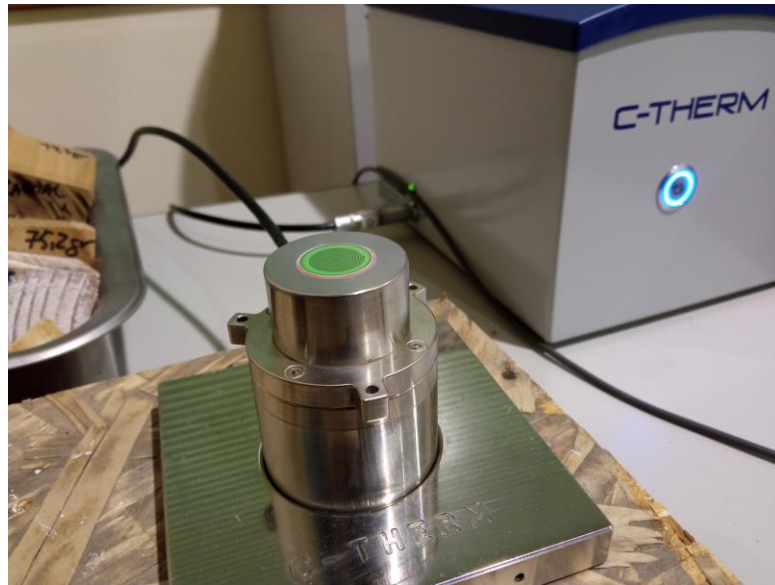


Figura 26. Equipo TCI utilizado para los ensayos.

Fuente: Elaboración propia.

Esta técnica de medición ha sido empleada y validada por otros autores en múltiples estudios realizados para determinar las propiedades térmicas de diferentes tipos de materiales [92–94].

#### 4.2.2. Equipamiento para la determinación del comportamiento térmico de cunetas verdes

Este equipamiento está formado por una cámara climática conectada a una caja caliente calibrada de 1m<sup>3</sup>, también conocida como Hot-Box, sobre la que descansa una caja de ensayos (Caja de Prueba) en la que se colocan los modelos estudiados. La superficie externa e interna de la Caja de Prueba se aísla térmicamente para evitar tanto la fuga de calor como la influencia de la temperatura ambiente exterior. A continuación, se detallan los diferentes equipos utilizados.

##### Cámara climática

Este equipo, capaz de generar unas determinadas condiciones de temperatura y humedad en un entorno cerrado controlado, permite proveer temperaturas desde los -20°C hasta los 60°C con una potencia de 6.000W.

##### Caja caliente calibrada o Hot-Box

Este equipo permanece conectado a la cámara climática. En este espacio, completamente aislado, se genera un flujo de calor controlado, manteniendo una temperatura y humedad prefijadas, colocándose de tal manera con respecto a la superficie de la Caja de Prueba que se permita que el flujo térmico incida perpendicularmente, es decir, desde el fondo de la cuneta hacia la parte superior de la misma, atravesando sus diferentes capas. Este equipo opera de acuerdo con lo indicado en las normas UNE-EN ISO 8990:1997 [95] y ASTM C1363-05 [96].

##### Caja de Prueba

En la Caja de Prueba se colocaron los modelos de las cunetas estudiadas. La caja estaba recubierta lateralmente con aislante térmico para evitar cualquier fuga de calor lateral o influencia del exterior, recubriéndose

por la zona exterior con 2 capas de poliestireno extruido de 5 cm de espesor y por la parte interior con una primera capa de espuma expansiva de poliuretano (5 cm de espesor) y otra de poliestireno extruido de 5 cm de espesor (ver Figura 27).

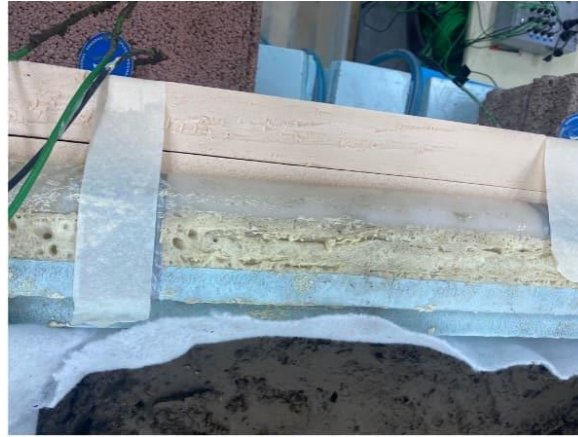


Figura 27. Sección de la Caja de Prueba con el aislamiento térmico utilizado.

Fuente: Elaboración propia

Esta caja tiene en la parte inferior dos desagües para evacuar el agua cuando se realicen los ensayos en condiciones húmedas de saturación ( ver Figura 28).

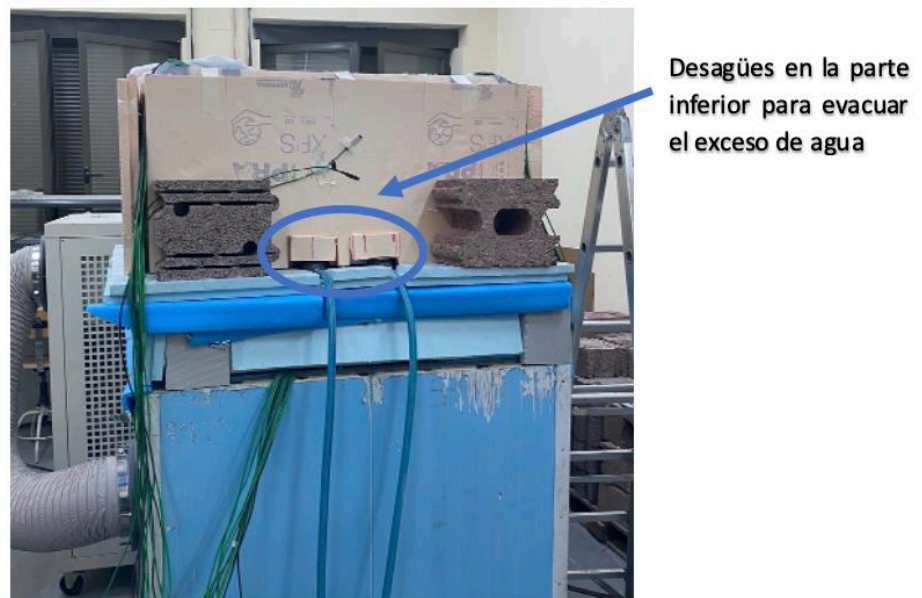


Figura 28. Caja de Prueba con desagües en la parte inferior.

Fuente: Elaboración propia.

### Equipos de medida *Hukseflux*

Los equipos de medida de flujo térmico y temperatura están formados por:

- Equipo *TRYSO1*: Este equipo permite la obtención de datos para el análisis de la resistencia y transmitancia térmica de elementos de construcción y de suelos. En esta investigación se ha utilizado la extensión *TRYSO4* del *TRYSO1 manual / version 0810*, la cual consta de ocho sensores de flujo térmico y dieciséis termopares, con cables de extensión de 10 y 20 m, que van desde la Unidad de Medida y Control (*Measurement and Control Unit (MCU)* en su acepción en la literatura anglosajona) hasta la zona de medida, todo ello conectado a un PC [97,98]. Este equipo opera de acuerdo con lo indicado en las normas ISO 9869-1:2014 [99], ASTM C1155-95 [100] y ASTM C1046-95 [101].

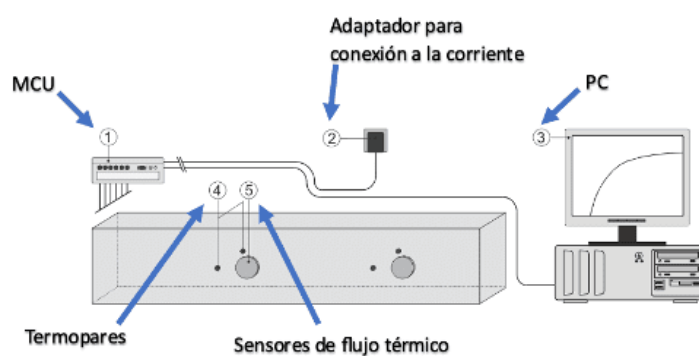


Figura 29. Esquema de conexión del equipo *TRYSO1*.

Fuente: *TRYSO1 manual / version 0810* [97].

- Sensores de flujo térmico *HFP01*: Estos sensores son colocados en diferentes niveles de la cuneta a ensayar, registrando el flujo térmico que atraviesa cada capa de material para el posterior cálculo de su resistencia y transmitancia térmica de acuerdo con las normas ISO 9869-1:2014 [99], ASTM C1155-95 [100] y ASTM C1046-95 [101].



Figura 30. Sensor de flujo térmico por ambas caras: izquierda, en rojo, orientada a la fuente de calor y derecha, en azul, orientada en la cara opuesta a la fuente de calor.

Fuente: *HFP01 HFP03 manual v2124* [102].

- Termopares: Estos sensores son también colocados en las interfases de las diferentes capas, para medir la temperatura en cada punto y la diferencia entre las temperaturas de cada capa del material.

### 4.3. Metodología

En este apartado se pretende mostrar por una parte el procedimiento llevado a cabo para determinar las propiedades térmicas de los diferentes materiales utilizados, realizado mediante el analizador de conductividad térmica *TCi* y, por otra parte, explicar la metodología que se ha utilizado para definir el comportamiento térmico de los 3 tipos de cunetas ensayadas, tanto en condiciones secas como en húmedas. Estos ensayos fueron llevados a cabo en los laboratorios del Área de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Oviedo.

#### 4.3.1. Ensayo *TCi*

Para el ensayo *TCi* se cogieron tres muestras diferentes de los materiales que fueron utilizados en las estructuras de las cunetas verdes estudiadas (árido calizo, árido ligero y tierra vegetal). En la Figura 31 se pueden ver algunos ensayos realizados con los diferentes materiales.



Figura 31. Medición con el equipo *TCi* del árido ligero (izquierda), árido calizo (centro) y tierra vegetal (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

Como se expuso anteriormente, este equipo permite la determinación de la conductividad y efusividad térmica de los materiales tanto en formato sólido, como líquido, polvo o pasta. Tanto la tierra vegetal como el árido ligero se ensayaron en formato polvo, para el cual este último material necesito un previo proceso de trituración. Por el contrario, el árido calizo se ensayaría en formato sólido tal y como se puede observar en la Figura 31.

Los ensayos para los diferentes materiales fueron realizados en condiciones ambientales con los mismos valores de temperatura y humedad relativa (18°C y 81%HR). Para la ejecución de las mediciones se dispusieron los diferentes materiales sobre el sensor con un peso encima para asegurar un contacto completo entre el dispositivo y la muestra a ensayar.

Para cada muestra de cada material se realizaron 10 mediciones de su conductividad térmica, dando lugar a un total de 30 mediciones por cada material ensayado en condiciones ambiente. El resultado final de la conductividad térmica de cada material se obtuvo realizando un promedio de las mediciones realizadas.

### 4.3.2. Ensayo de flujo térmico con Hot-Box

Al principio de este apartado de Materiales y métodos, se definieron brevemente las diferentes cunetas propuestas a fin de mostrar sus características térmicas. Todas estas cunetas se han ensayado mediante el mismo procedimiento, diferenciándose dos tipos de ensayos, un ensayo en condiciones secas y posteriormente un ensayo en condiciones húmedas con los materiales de la cuneta saturados.

Para la realización del ensayo, se ubicó la Hot-Box en sentido vertical, con la base de la Caja de Prueba con aislamiento térmico lateral colocada sobre ella. Mediante el uso de la Hot-Box, se generó en todos los ensayos una temperatura estable de 55°C en la parte inferior de las cunetas. De esta forma, se creó un flujo de calor vertical homogéneo que atravesó las diferentes capas que componían las cunetas verdes. En la Figura 32 se puede visualizar el montaje completo y los equipos utilizados.



Figura 32. Montaje completo de los equipos utilizados.

Fuente: Elaboración propia.

Colocados y configurados los diferentes equipos para su correcto funcionamiento, se procedió al montaje de los modelos de cuneta a ensayar. Este montaje se realizó mediante el vertido de los diferentes materiales en el orden correspondiente, separándolos mediante un geotextil, y con los diferentes termopares y sensores de flujo térmico convenientemente repartidos en sus interfases. A continuación, en la Figura 33 se muestra un esquema de la estructura general que presentaban todos los tipos de cunetas ensayadas.

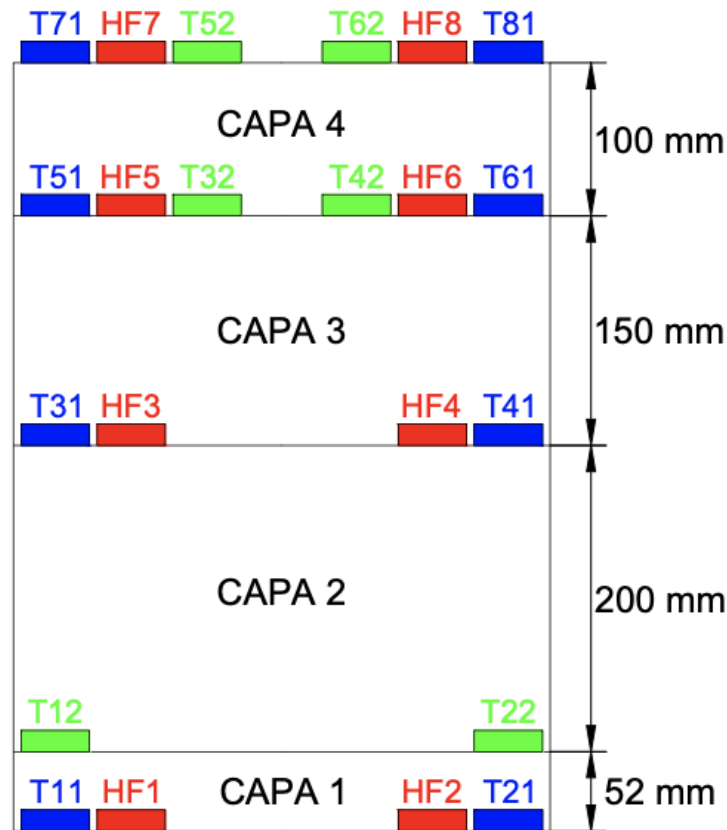


Figura 33. Estructura general de las cunetas verdes ensayadas y disposición de los diferentes termopares y sensores de flujo térmico.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, y con la ayuda de la Figura 33, se explicará el procedimiento general de montaje llevado a cabo.

- Todas las cunetas presentaban una primera capa sub-base ocupada por la caja Atlantis de 52 mm (CAPA 1). Bajo esta caja, se colocaron de forma simétrica dos dispositivos termopares (T11 y T21) y dos sensores de flujo térmico (HF1 y HF2). Los sensores utilizados debían colocarse de forma que la parte roja quedase orientada hacia abajo (ver Figura 30), es decir, hacia la zona de donde procede el flujo de calor. Sobre esta capa se colocó una malla de geotextil, a fin de separar esta capa de la siguiente e impedir la entrada de ningún tipo de material en la caja de drenaje, colocándose también dos termopares (T12 y T22) sobre ella. Los termopares representados en azul (T11 y T21) medían directamente la temperatura en ese nivel, mientras que los termopares representados en verde (T12 y T22) permanecían emparejados a estos, permitiendo medir la diferencia de temperatura que presenta la capa sobre la que se disponen. En la Figura 34 se puede ver un reportaje fotográfico del procedimiento de montaje de esta primera capa.





Figura 34. Secuencia de imágenes del montaje de la primera capa en la Caja de Prueba.

Fuente: Elaboración propia

- La segunda capa (CAPA 2), presentaba un espesor de 200 mm. Sobre esta capa, una vez rellena con el material correspondiente, se extendía de nuevo una malla de geotextil y se colocaban dos dispositivos termopares (T31 y T41) y dos sensores de flujo térmico (HF3 y HF4) (ver Figura 35).



Figura 35. Parte superior de la segunda capa con los termopares y sensores de flujo térmico utilizados.

Fuente: Elaboración propia.

- La tercera capa (CAPA 3), con un espesor de 150 mm, presentaba en la parte superior un total de 4 termopares (T51, T61, T32 y T42) y dos sensores de flujo térmico (HF5 y HF6) (ver Figura 36). Los termopares T32 y T42 permanecen emparejados respectivamente con T31 y T41 para medir la diferencia de temperatura que presenta la tercera capa entre su parte superior e inferior. Por su parte, los termopares T51 y T61 medían directamente la temperatura sobre esta capa. La colocación del geotextil entre la segunda y tercera capa se llevaría a cabo en todas las configuraciones excepto en la primera (CUNETA 1), pues en esa cuneta ambas capas eran del mismo material (árido normal).



Figura 36. Parte superior de la tercera capa con los termopares y sensores de flujo térmico utilizados.

Fuente: Elaboración propia.

- La cuarta y última capa (CAPA 4), idéntica en los tres tipos de cunetas, contaba con 100 mm de tierra vegetal. En la parte superior de esta capa se colocaron un total de cuatro termopares (T71, T81, T52 y T62) y dos sensores de flujo térmico (HF7 y HF8) (ver Figura 37). Los termopares T71 y T81 permitieron medir la temperatura de la cuneta en su parte superior, mientras que T52 y T62 permanecían emparejados respectivamente con T51 y T61 para medir la diferencia de temperatura de la última capa entre su parte superior e inferior.



Figura 37. Disposición de los diferentes termopares y sensores de flujo térmico en la parte superior de la capa de tierra vegetal presente en las 3 cunetas ensayadas.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se procede a describir la metodología seguida en los dos tipos de ensayos llevados a cabo.

#### **Ensayo en condiciones secas**

Una vez colocados todos los materiales y dispositivos de medida, se procedió a la programación de la cámara climática, configurada de tal manera que se alcanzase una temperatura de 55°C en la Hot-Box a las 12 h del inicio del ensayo. Posteriormente a la programación y puesta en marcha, se procedía a la toma de datos mediante el equipo *TRYSO1*, obteniendo datos de flujo térmico y temperatura en intervalos de 10 minutos durante casi seis días. Para determinar el comportamiento térmico de las cunetas ensayadas, solamente se tuvieron en cuenta los datos medios registrados en las 24 h del cuarto día de ensayo, periodo de tiempo en el que se consideró que tanto el flujo térmico como la temperatura medidas eran prácticamente estables.

#### **Ensayo en condiciones húmedas**

Finalizada la toma de datos del ensayo en condiciones secas, se procedió a realizar el ensayo en condiciones húmedas, manteniendo la misma estructura y disposición de equipos de medida establecidos inicialmente.

Para la realización de este ensayo se llevó a cabo una saturación de la estructura mediante el llenado de agua de la Caja de Prueba y, tras 24 horas, se procedió al vaciado del volumen sobrante no absorbido por parte de los diferentes materiales que componían las cunetas. El vaciado se realizó a través los desagües situados en la parte inferior de la Caja de Prueba (ver Figura 28). Como en el caso del ensayo en condiciones secas, se recogieron los datos registrados durante las 24 horas del cuarto día de ensayo y se promediaron los resultados.

Esta metodología fue llevada cabo en cada una de las tres cunetas ensayadas, cuyas estructuras se explican a continuación.

### 4.3.3. Cuneta 1

La primera cuneta, la más tradicional y simple de todas, se componía de un total de cuatro capas con tres materiales diferentes, distribuyéndose de la siguiente manera:

- Una primera ocupada por la caja Atlantis de 52 mm de espesor.
- Una segunda capa compuesta por árido normal de 200 mm de espesor.
- Una tercera capa rellena también de árido normal de 150 mm de espesor.
- La cuarta y última capa de tierra vegetal de 100 mm de espesor.

En la Figura 38 se puede ver la estructura de la primera cuneta ensayada y el posicionamiento de los sensores y termopares en las distintas interfaces entre capas.

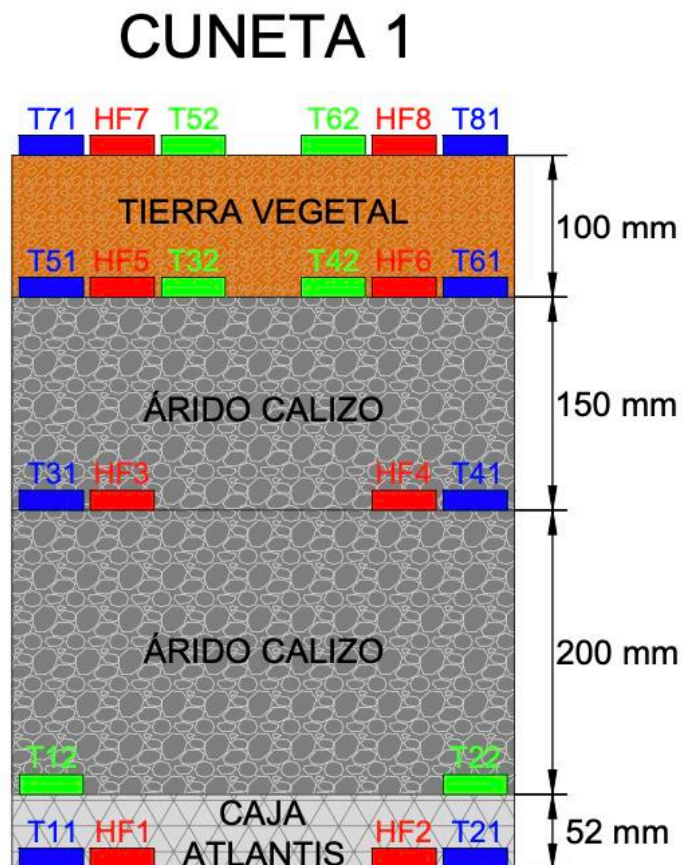


Figura 38. Estructura de la Cuneta 1 con los diferentes termopares y sensores de flujo térmico distribuidos.

Fuente: Elaboración propia.

Esta sería la primera cuneta que se ensayaría, siendo similar a la sección tipo que fue objeto de estudio por diferentes autores en 2019 [1]. Este tipo de cuneta es el diseño más estándar, formada por tres tipos diferentes de materiales con el árido normal diferenciado en dos capas, siendo la cuneta de la que se va a partir en la toma de datos para su comparación con el resto de las cunetas propuestas.

#### 4.3.4. Cuneta 2

En esta segunda configuración se pretende diseñar una cuneta más compleja y diferente a las habituales, con el objetivo de comparar el comportamiento térmico de este diseño más innovador con respecto al estándar y poder confirmar su viabilidad para la combinación de cunetas verdes con BCG. Su estructura se compone de los siguientes materiales:

- La primera capa seguiría ocupada por la caja Atlantis de 52 mm de espesor.
- La segunda capa se compone de árido ligero con un espesor total de 200 mm.
- La tercera capa se rellena de árido normal con un espesor de 150 mm.
- La cuarta y última capa también será, como en el resto de configuraciones, de tierra vegetal de 100 mm de espesor.

En la Figura 39 se puede ver un esquema de la estructura descrita y de los sensores utilizados.

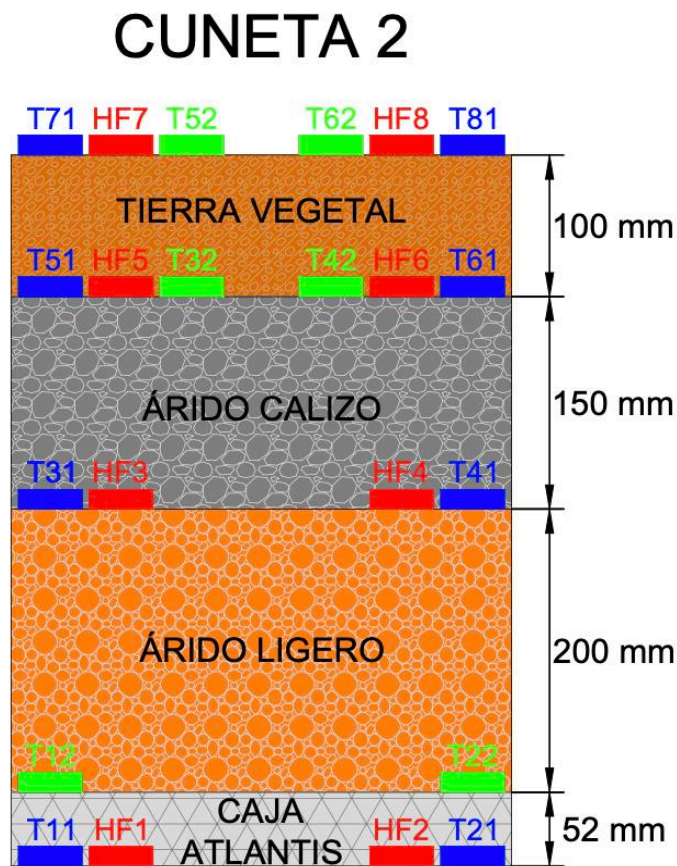


Figura 39. Estructura de la Cuneta 2 con los diferentes termopares y sensores de flujo térmico distribuidos.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.5. Cuneta 3

Por último, esta tercera configuración cuenta con la adición de otro material, siendo este el árido reciclado facilitado por *COGERSA*. Este material se ubica en la tercera capa y elimina definitivamente el árido normal de la estructura. Su estructura se compone, por lo tanto, de los siguientes materiales:

- Una primera capa, ocupada por la caja Atlantis de 52 mm de espesor.
- La segunda capa, compuesta de árido ligero con un espesor total de 200 mm.
- La tercera capa, rellena de árido reciclado con un espesor de 150 mm.
- La cuarta y última capa, formada por tierra vegetal de 100 mm de espesor.

En la Figura 40 se puede ver el esquema de esta tercera configuración.

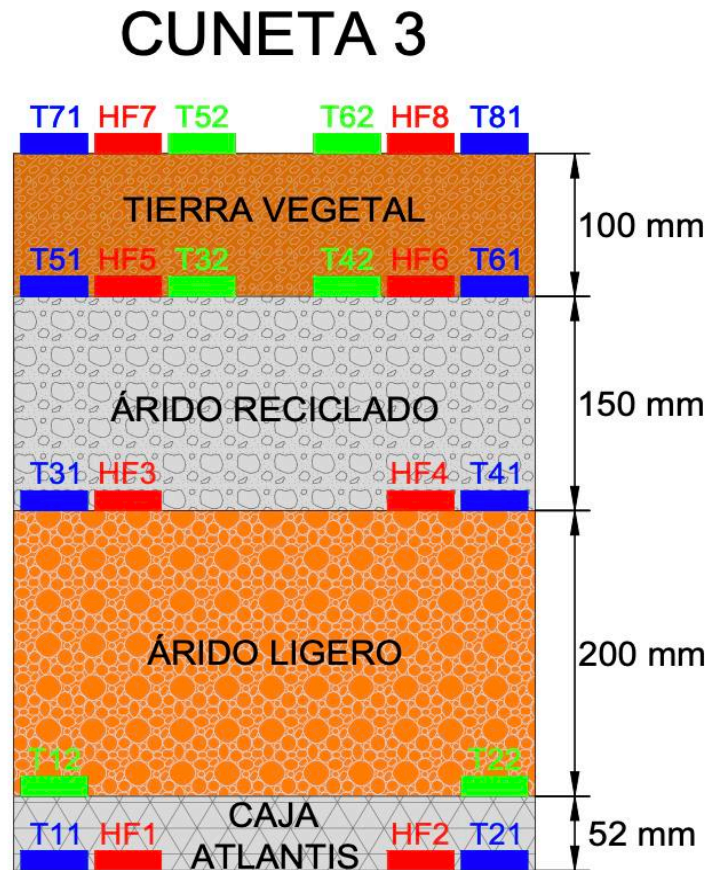


Figura 40. Estructura de la Cuneta 3 con los diferentes termopares y sensores de flujo térmico distribuidos.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.6. Mecanismos de transferencia de calor

Durante los ensayos térmicos realizados sobre las tres cunetas se producen tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. La suma de estos tres mecanismos hace difícil poder determinar el comportamiento térmico de este tipo de estructuras conociendo solamente la conductividad térmica de los materiales que las conforman, ya que entonces se tendría en cuenta únicamente el fenómeno de la conducción. Por ello, para poder determinar el comportamiento térmico real de las cunetas será necesario realizar los ensayos diseñados en este TFG.

Antes de proceder con la explicación de los diferentes mecanismos de calor existentes, cabe remarcar que la transferencia de calor se origina siempre y cuando exista una diferencia de temperaturas entre un cuerpo y otro, produciéndose el flujo de calor desde el sistema de mayor temperatura al de menor. Este flujo de calor es la cantidad de calor transferido por unidad de área a través de una superficie, la cual permanece perpendicular a la dirección de transferencia, y en un periodo de tiempo concreto. Puede ser expresado mediante la siguiente expresión [103]:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3)$$

donde:

- $\dot{q}$  ( $W/m^2$ ), es el flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área.
- $\dot{Q}$  ( $\frac{J}{s} = W$ ), es la velocidad de transferencia de calor.
- $A$  ( $m^2$ ), es el área de la superficie de transferencia de calor, siendo perpendicular a la dirección del flujo.

#### Conducción

Este mecanismo se basa en la transferencia de energía cinética entre cuerpos sólidos por las colisiones moleculares adyacentes que se originan en un material, produciéndose un intercambio de energía térmica entre distintos cuerpos debido a la diferencia de energía y temperatura que existen entre ellos, transmitiéndose desde el sistema de mayor energía o temperatura al de menor [103,104]. En las cunetas ensayadas se producirán fenómenos de conducción en los elementos sólidos que las conforman.

La ley de conducción de Fourier permite determinar la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo mediante la siguiente expresión:

$$\vec{q} = -k\nabla T = -k \left( i \frac{dT}{dx} + j \frac{dT}{dy} + k \frac{dT}{dz} \right) \quad (4)$$

Así, se permite el cálculo del flujo térmico por unidad de área a través de un medio de forma generalizada, siendo proporcional al gradiente normal de temperaturas. Si se considera que el flujo de calor se da en una sola dirección, se obtiene la siguiente expresión [105]:

$$\dot{q} = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

donde:

- $\dot{q}$  ( $W/m^2$ ), es el flujo térmico por unidad de área a través de un medio.
- $k$  ( $W/mK$ ), es la conductividad térmica del material atravesado.
- $\frac{dT}{dx}$  es el gradiente de temperaturas en la dirección del flujo de calor.

### Convección

Este mecanismo de transferencia de calor se produce cuando dos cuerpos, uno en estado sólido y otro en estado líquido o gaseoso, están en movimiento, produciéndose la transferencia de calor por el movimiento masivo del fluido, en cuya ausencia solo habrá transferencia de energía térmica por conducción [103].

Este mecanismo de transferencia se da por la combinación de la difusión o movimiento molecular aleatorio entre las partículas del fluido, donde se da el mecanismo de conducción, y el movimiento masivo o macroscópico del fluido, en el que se produce la transferencia por convección, y es por eso por lo que, en ausencia de movimiento masivo del fluido, el único mecanismo implicado en la transferencia de calor será la conducción [103].

En función de la naturaleza del fluido, se pueden diferenciar dos tipos de convección: la convección forzada, en la que el fluido debe su movimiento a un mecanismo externo, o la convección natural, donde el movimiento del fluido es debido a las diferencias de densidad que se dan por las diferencias de temperatura existentes en el fluido, dando lugar a diferentes fuerzas de empuje [104].

En las cunetas ensayadas se producirán fenómenos de convección en la capa de aire de la caja Atlantis, en el aire de los huecos que hay entre las distintas partículas de árido, y en la parte superior de la cuneta, es decir, en la zona de contacto entre la zona superior de la tierra vegetal y el aire del ambiente.

Este mecanismo puede ser expresado según la *ley de enfriamiento de Newton*, que permite relaciona la velocidad con que se transfiere el calor por convección con la diferencia de temperaturas que se dan entre el cuerpo sólido y el fluido. El efecto de la convección puede ser expresado por la siguiente fórmula [105]:

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_S - T_\infty) \quad (6)$$

donde:

- $\dot{Q}$  ( $W$ ), es la velocidad de transferencia de calor por convección.
- $h$  ( $W/m^2$ ), es el coeficiente de transferencia de calor por convección.
- $A$  ( $m^2$ ), es el área a través de la cual se produce la transferencia de calor.
- $T_S$  ( $K$ ), es la temperatura del cuerpo sólido.
- $T_\infty$  ( $K$ ), es la temperatura del fluido.



### Radiación térmica

Este fenómeno, al contrario de los mecanismos de conducción y convección, no necesita de un medio material para que se produzca la transferencia de calor, permitiéndose en el vacío. La radiación térmica es la transferencia de energía interna de la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) debido a variaciones en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas, permitiendo que un cuerpo negro, o radiador ideal, irradie energía a una velocidad proporcional a la cuarta potencia de la temperatura de un cuerpo [105].

En las cunetas ensayadas se producirán fenómenos de transferencia de calor por radiación entre la parte inferior y superior de la caja Atlantis, y entre las superficies de los áridos que limitan los huecos que hay entre las distintas partículas.

Este concepto está relacionado con la *ley de Stefan-Boltzmann*, la cual permite determinar la máxima radiación que puede emitir un cuerpo negro a una determinada temperatura, y es expresado según la siguiente fórmula [103]:

$$E_b(T) = \sigma T_S^4 \quad (7)$$

donde:

- $E_b (W)$ , es la potencia emisiva total de una superficie negra.
- $\sigma (W/m^2 K^4)$ , es la *constante de Stefan-Boltzmann*.
- $T_S (K)$ , es la temperatura a la que se halla el cuerpo.

Sin embargo, esta situación donde existan cuerpos negros o radiadores ideales se daría, cabe la redundancia, únicamente en condiciones ideales. En la realidad, la potencia emitida por un cuerpo real es menor que la que puede emitir un cuerpo negro a la misma temperatura. Estos cuerpos reales son también llamados cuerpos grises, y la expresión que permite calcular la radiación que emiten es la siguiente [104]:

$$E(T) = \varepsilon \sigma T_S^4 \quad (8)$$

donde  $\varepsilon$  es la propiedad radiativa del cuerpo gris o emisividad, con valores entre 0 y 1 dependiendo del material, siendo más idóneo cuanto más se aproxime a 1.

#### 4.3.7. Cálculo del comportamiento térmico de las cunetas verdes

Este procedimiento de ensayo está basado en la ecuación de Fourier que, si se desarrolla para una sola dirección, como es en esta ocasión, permite relacionar los siguientes términos:

- El flujo de calor, que fue medido en los ensayos de flujo térmico en laboratorio.
- La conductividad térmica equivalente, siendo la incógnita que se pretende obtener.
- El gradiente de temperaturas, siendo el cociente entre la diferencia de temperaturas medidas en el laboratorio y los espesores.

Por lo tanto, utilizando la ley de Fourier en una sola de dirección y en condiciones estacionarias, se pueden determinar las siguientes expresiones:

$$U = \frac{\dot{q}}{\Delta T} \quad (9)$$

$$R = \frac{1}{U} \quad (10)$$

$$\lambda_{eq} = \frac{e}{R} \quad (11)$$

donde:

- $U$  ( $W/m^2K$ ), es la transmitancia térmica.
- $R$  ( $m^2K/W$ ), es la resistencia térmica
- $\lambda_{eq}$  ( $W/mK$ ), es la conductividad térmica equivalente de una capa de material o de un sistema completo en unas condiciones determinadas.
- $\dot{q}$  ( $W/m^2$ ), es el flujo de calor promedio medido.
- $\Delta T$  ( $K$ ), es el diferencial de temperatura en la sección estudiada.
- $e$  ( $m$ ), es el espesor de la sección estudiada.

Estas fórmulas y el procedimiento de cálculo expuesto está estandarizado [95,96,99–101]. Como se explicó anteriormente, estos cálculos pueden realizarse gracias a que previamente se han obtenido los valores de temperatura y flujo térmico en cada uno de los niveles en los que se hallaban estos dispositivos de medida. Posteriormente, en el siguiente apartado, se verán reflejadas en las distintas gráficas de temperatura los siguientes datos:

- T11\_T21: es el promedio calculado de los termopares T11 y T21 para cada registro de temperatura. Estos termopares se hallan en la parte inferior de la cuneta, bajo la caja Atlantis.
- T31\_T41: es el promedio realizado de los termopares T31 y T41 para cada registro de temperatura. Estos termopares se hallan en la parte inferior de la capa 3, o lo que es lo mismo, en la parte superior de la capa 2.
- T51\_T61: es el promedio realizado de los termopares T51 y T61 para cada registro de temperatura. Estos termopares se hallan en la parte inferior de la capa de tierra vegetal, o lo que es lo mismo, en la parte superior de la capa 3.
- T71\_T81: es el promedio realizado de los termopares T71 y T81 para cada registro de temperatura. Estos termopares se hallan en la parte superior de la cuneta, sobre la capa de tierra vegetal.

- $\Delta T (T11\_T21 - T71\_T81)$ : se corresponde con el cálculo de diferencia de temperatura que existe entre las capas inferior y superior.

Por otra parte, aunque no se vaya a representar la temperatura de la caja Atlantis en su parte superior, se puede determinar su valor. Además, este será necesario posteriormente para calcular las propiedades térmicas de algunos materiales y del conjunto de la estructura. Para conocer su valor se hace uso de los termopares presentes en su parte inferior (T11 y T21) y los termopares que miden la diferencia de temperatura de la caja Atlantis (T12 y T22), así, mediante su diferencia (T11\_T21 – T12\_T22) se puede conocer el valor de la temperatura en este nivel.

En lo referente al flujo térmico, se podrán visualizar los siguientes términos:

- HF1\_HF22: es el promedio calculado de los sensores HF1 y HF2 para cada registro de flujo térmico. Estos sensores se hallan en la parte inferior de la cuneta, bajo la caja Atlantis.
- HF3\_HF4: es el promedio realizado de los sensores HF3 y HF4 para cada registro de flujo térmico. Estos sensores se hallan en la parte inferior de la capa 3, o lo que es lo mismo, en la parte superior de la capa 2.
- HF5\_HF6: es el promedio realizado de los sensores HF5 y HF6 para cada registro de flujo térmico. Estos sensores se hallan en la parte inferior de la capa de tierra vegetal, o lo que es lo mismo, en la parte superior de la capa 3.
- HF7\_HF8: es el promedio realizado de los sensores HF7 y HF8 para cada registro de flujo térmico. Estos sensores se hallan en la parte superior de la cuneta, sobre la capa de tierra vegetal.

Posteriormente, se calculará la transmitancia térmica, la resistencia térmica y la conductividad térmica equivalente de las diferentes capas y del total de la estructura sin tener en cuenta el espacio ocupado por la caja Atlantis, ya que los tubos de geotermia superficial se dispondrían en la parte superior de dicha caja.

Para ello, en el cálculo de la transmitancia térmica de cada capa, se efectuará las siguientes operaciones basadas en la anteriormente expuesta en la ecuación (9). Se tomarán el flujo térmico que atraviesa cada una de las capas y la diferencia de temperatura que existe entre sus caras.

$$U_{CAPA 2} = \frac{HF3\_HF4}{(T11\_T21 - T12\_T22) - T31\_T41} \quad (12)$$

$$U_{CAPA 3} = \frac{HF5\_HF6}{T31\_T41 - T51\_T61} \quad (13)$$

$$U_{CAPA 4} = \frac{HF7\_HF8}{T51\_T61 - T71\_T81} \quad (14)$$

Por otra parte, en el cálculo de la transmitancia total de la estructura sin tener en cuenta la caja Atlantis, se realizará la siguiente operación:

$$U_{TOTAL} = \frac{HF7\_HF8}{(T11\_T21 - T12\_T22) - T71\_T81} \quad (15)$$

Posteriormente se utilizarán las ecuaciones de resistencia térmica (10), y conductividad térmica equivalente (11), para calcular el resto de las propiedades térmicas de los materiales y estructuras. Se puede hacer uso de la Figura 33 para un mejor entendimiento de las fórmulas.

Para finalizar, hay que mencionar que antes de realizar cualquier modelado y análisis, se ha procedido a una depuración de los datos que han sido proporcionados por el equipo TRSYS, ya que, al ser ensayos de tan larga duración, se han producido diferentes mediciones erróneas por fallos puntuales en algunos de los sensores y termopares utilizados.

## 5. Resultados y discusión

En el presente apartado se pretende, a partir de los datos y resultados obtenidos, realizar un análisis del comportamiento térmico e hidráulico de las cunetas estudiadas y determinar posteriormente diferentes conclusiones acerca de la posible viabilidad del diseño combinado de SUDS con sistemas de geotermia superficial.

Esta sección cuenta con representaciones gráficas y tabulares donde se recopilan todos los datos obtenidos en los diferentes ensayos realizados, tanto en el aspecto hidráulico como en el térmico, pues en última instancia, los ensayos realizados pretenden dar cuenta del uso multidisciplinar que pueden ofrecer estas estructuras en el ámbito urbano, tanto en la gestión sostenible del agua, como en el aprovechamiento energético.

### 5.1. Propiedades térmicas de los materiales

A continuación, mediante el empleo del equipo analizador de conductividad térmica *TCi*, se han obtenido diferentes resultados de conductividad térmica que permitirán caracterizar correctamente los tres principales materiales que se utilizaron en el presente estudio.

Tabla 8. Conductividad térmica a temperatura ambiente en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

Material	Conductividad térmica $\lambda$ (W/mK)
Árido calizo ZAD 0/32	1,6735
Arlita® Leca® dur	0,0982
Tierra vegetal	0,1422

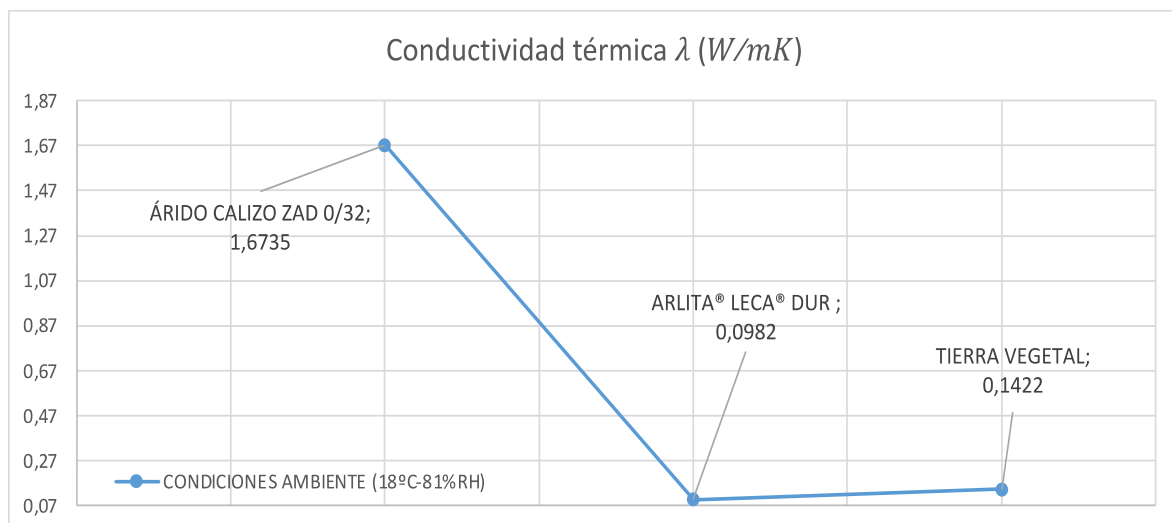


Figura 41. Representación gráfica de la conductividad térmica de los diferentes materiales analizados.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos expuestos en la Tabla 8 se corresponde con el promedio de las treinta mediciones que han sido realizadas para cada material. Como se puede ver, el árido ligero es el material que menor conductividad térmica presenta, como era de esperar debido al proceso de calentamiento que sufre en su proceso de fabricación, confiriéndolo como material óptimo para su empleo como elemento de relleno en la estructura de una cuneta verde bajo la que se quiere disponer un sistema de geotermia superficial.

Otro de los motivos de realizar este tipo de ensayo fue el de obtener una mejor caracterización de los materiales, ya que, si se acude a la Tabla 5, donde se muestra las prestaciones que el fabricante proporciona de la *Arlita® Leca® dur*, y se observa el valor que toma la conductividad térmica (0,1 W/mK), se puede ver que este valor coincide prácticamente con el que arrojó el *TCi* (0,0982 W/mK).

En la Figura 41 se puede ver una comparativa de las conductividades térmicas de los diferentes materiales analizados.

## 5.2. Capacidad hidráulica de las cunetas verdes

Los ensayos realizados en condiciones húmedas han permitido determinar la capacidad hidráulica de las tres cunetas estudiadas.

Tabla 9. Capacidad hidráulica de cada cuneta.

Fuente: Elaboración propia.

Diseño	Volumen vertido sobre la cuneta	Volumen sobrante	Volumen absorbido	Porcentaje de volumen absorbido con respecto al total vertido
Cuneta 1	122,67	99,3	23,37	19,05%
Cuneta 2	152,6	113,6	39	25,56%
Cuneta 3	146,1	108,5	37,6	25,74%

Tras seguir el procedimiento de llenado y vaciado expuesto anteriormente, se presentan en la Tabla 9 los resultados obtenidos.

A primera vista, y como es de esperar por la diferencia de materiales, la primera configuración presenta una menor capacidad de almacenamiento y absorción en comparación con las otras dos cunetas. En el primer diseño las capas intermedias estaban rellenas solamente de ZA 0/32, mientras que una de las capas intermedias de las otras dos cunetas, en concreto la segunda, está rellena de árido ligero, residiendo aquí los principales motivos de que las últimas configuraciones sean capaces de almacenar y también absorber mayor cantidad de agua. Esta primera configuración ha sido capaz de absorber un 19,05% de los 122,67 L de agua vertidos sobre la cuneta.

Con respecto a las otras dos configuraciones, se puede observar que los porcentajes de volumen absorbido con respecto al total vertido son mayores (25,56% y 25,74% en la Cuneta 2 y 3 respectivamente). Esto es debido a la utilización del árido ligero en la segunda capa de estas configuraciones, pues su estructura interna, altamente porosa, hace que el material tenga una excepcional capacidad de absorción y retención de agua en su interior, mayor que la que puede presentar el árido calizo.

Dentro de las últimas dos configuraciones, la Cuneta 3 presenta un porcentaje de absorción algo mayor, lo que es debido a los materiales utilizados en la tercera capa en ambas configuraciones. En esta última configuración, la tercera capa se encuentra rellena de árido reciclado de origen mixto, compuesto por una mezcla de materiales de construcción entre los que se encuentran diferentes materiales cerámicos, haciendo que la capacidad de absorción sea ligeramente mayor que la proporcionada por el árido calizo normal presente en la Cuneta 2.

Otro aspecto relevante por comentar es el volumen de almacenamiento que presentan las tres estructuras cuando permanecen inundadas, existiendo algunas variaciones entre las diferentes cunetas, algo de esperar pues todas cuentan con el mismo espesor, pero diferentes materiales. Mientras que las dos capas intermedias de la primera configuración están rellenas de árido calizo con un volumen de huecos mayor y una baja porosidad, la segunda y tercera configuración presentan una diferencia sustancial al contar con árido ligero en su segunda capa. Esto se debe fundamentalmente a que el árido ligero es un material con una alta porosidad, además de contar con un menor volumen de huecos debido a su menor tamaño de grano (ver ensayo de granulometría en la Figura 19).

Tomando en consideración los aspectos mencionados anteriormente, y a modo de resumen, es correcta la afirmación realizada relativa a la excelente capacidad de absorción que presenta el árido ligero por sí solo en comparación con el árido calizo, dando lugar también a una capacidad de almacenamiento mayor en las cunetas 2 y 3, lo que permitiría una mayor laminación de los caudales de escorrentía.

### 5.3. Comportamiento térmico de las cunetas verdes

Atendiendo a los procedimientos aplicados en la configuración de las distintas capas de las cunetas verdes y la metodología de ensayo desarrollada, tal como se describen en el apartado 4.3, se han obtenido una serie de resultados que permitirán analizar el comportamiento e influencia que tiene cada uno de los materiales en el comportamiento térmico de las distintas cunetas.

Anteriormente (ver apartado 4.3.2), se mencionó la colocación de una serie de sensores de flujo térmico y temperatura entre cada una de las capas. De igual forma, se colocaron sensores en la parte superior e inferior de las cunetas y en los laterales para comprobar que no se producían excesivas pérdidas de calor hacia el exterior. Una vez comprobado, se procedió a retirarlos.

Considerando las mediciones proporcionadas por el equipo *TRSYS*, se ha permitido analizar gráfica y numéricamente, en condiciones secas y húmedas, los siguientes aspectos:

- Temperatura inferior, superior y entre capas de cada una de las cunetas ensayadas, así como las diferencias de temperatura.
- Flujos térmicos que atraviesan cada una de las capas.
- Transmitancia térmica total y de las distintas capas.
- Resistencia térmica total y de las distintas capas.
- Conductividad térmica equivalente total y de las distintas capas.

### 5.3.1. Temperatura

Dentro de este apartado se tratará de analizar el comportamiento térmico que han tenido las diferentes tipologías de cunetas ensayadas y los materiales que las conforman, tanto en condiciones de funcionamiento en seco como en húmedo.

#### Condiciones secas

A continuación, en la Figura 42, Figura 43 y Figura 44, se puede ver la evolución que toma la temperatura para los diferentes niveles en que se han colocado los termopares. A partir de esto, se pretende realizar un análisis general de las temperaturas que toman los diferentes niveles de cada cuneta en condiciones secas, así como de la diferencia de temperatura que presenta cada capa y la estructura total, permitiendo realizar una comparativa del comportamiento de las tres diferentes configuraciones.

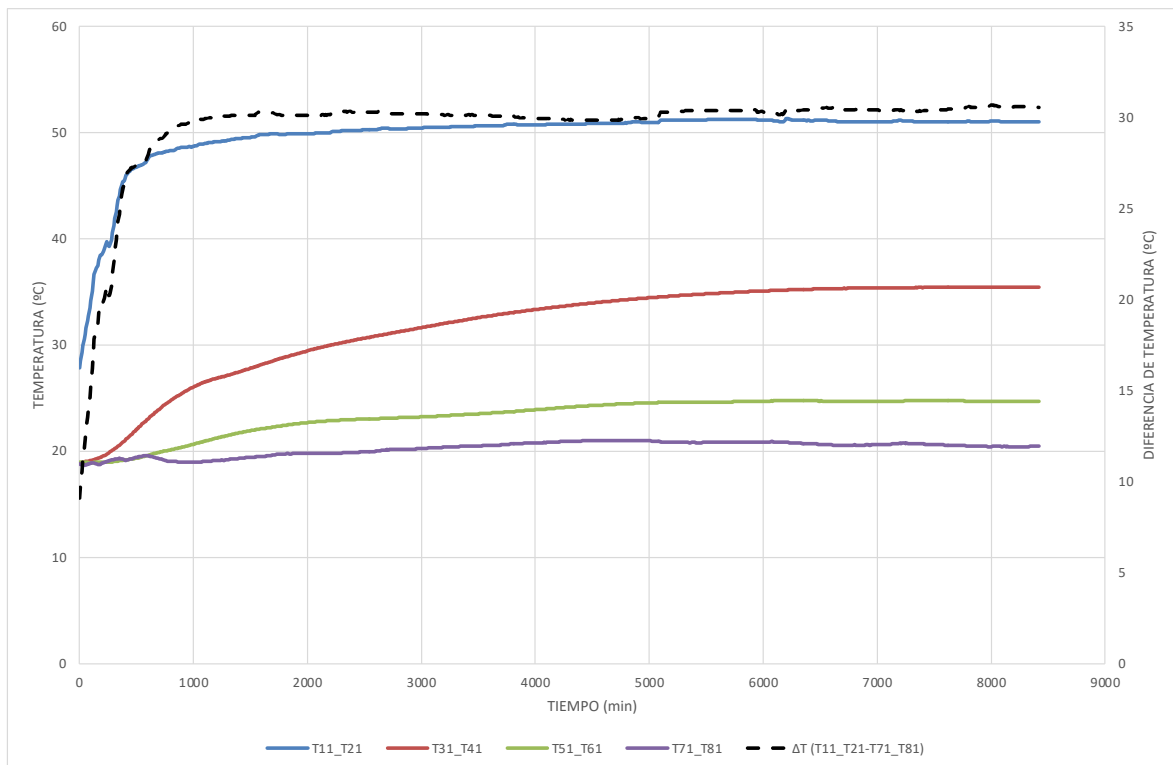


Figura 42. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 1 en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.



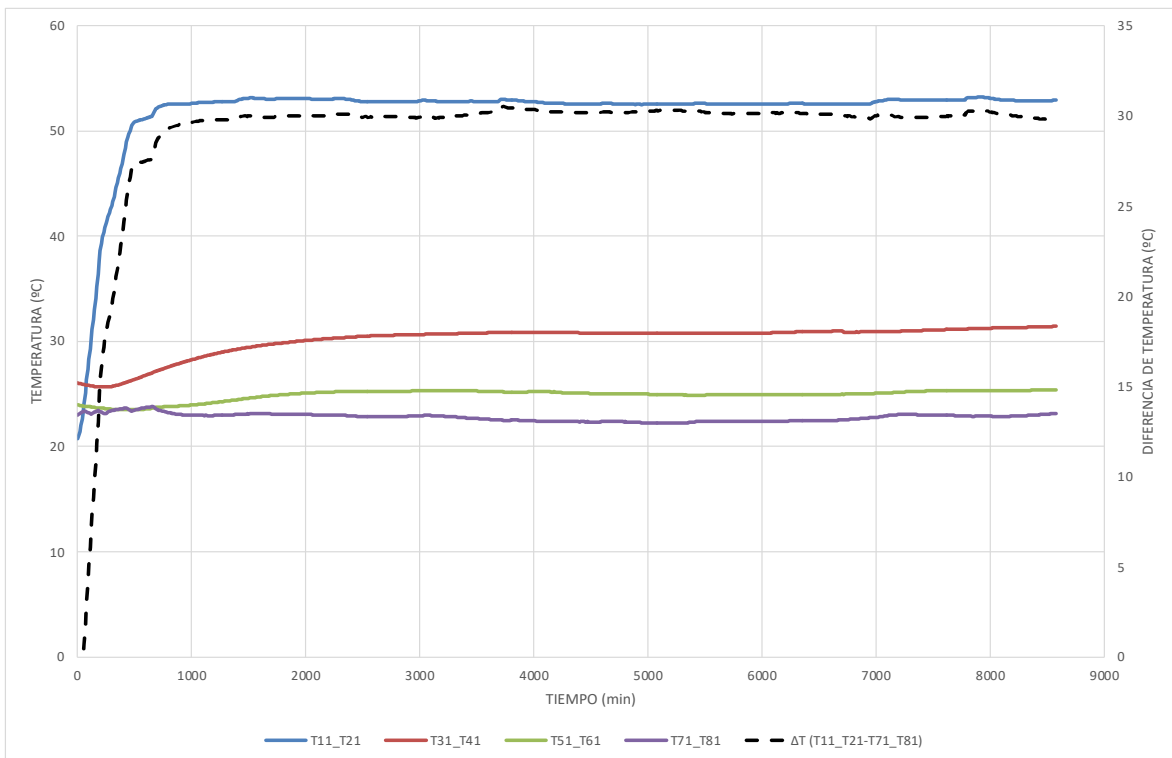


Figura 43. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 2 en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

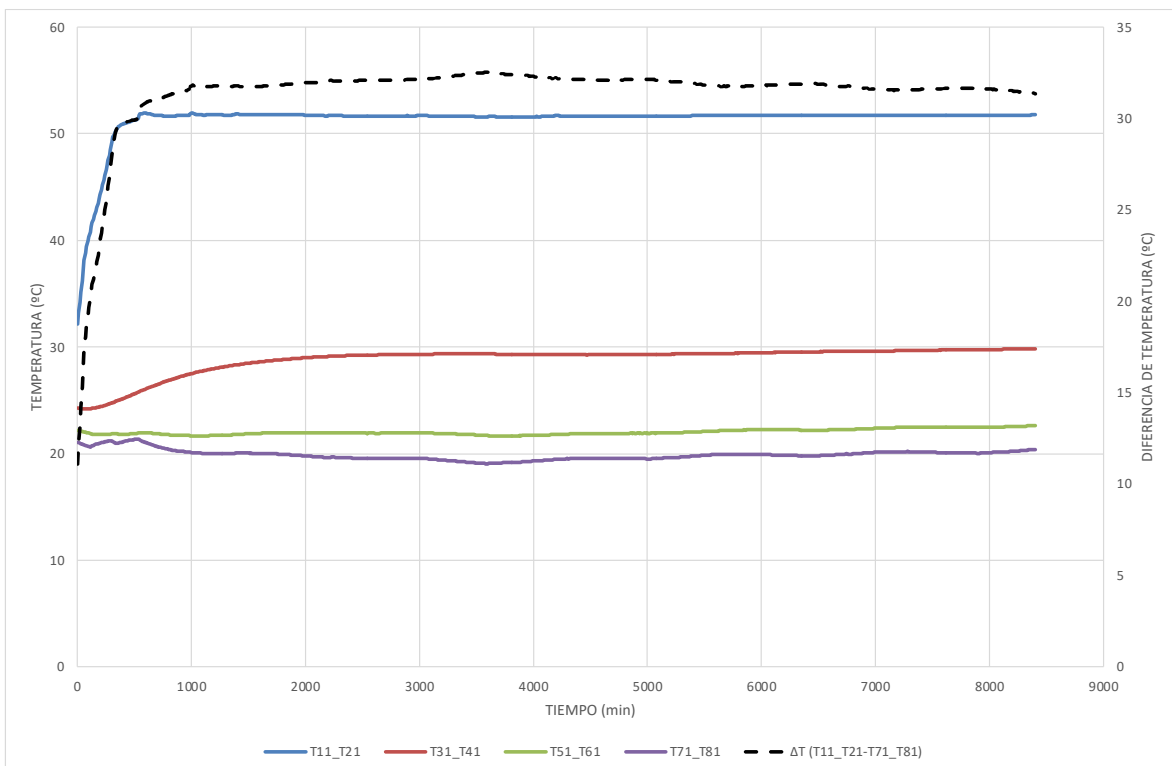


Figura 44. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 3 en condiciones secas.

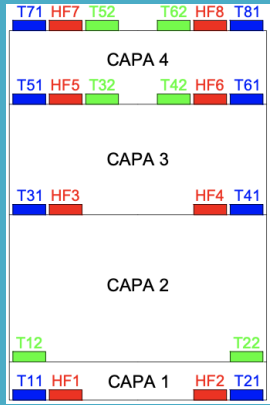
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la temperatura inferior de cada una de las cunetas (T11\_T21), no presenta valores estables en su inicio, algo que no tiene trascendencia en el presente estudio, ya que lo que se pretende es que el sistema se estabilice durante un periodo de tiempo para poder comparar el desempeño térmico de las diferentes configuraciones en el cuarto día de ensayo. En lo que respecta a esto, si se observa ahora las últimas horas de los diferentes ensayos atendiendo a la temperatura en la parte inferior (T11\_T21), se puede ver que las tres cunetas alcanzan un valor de temperatura en torno a 51-52°C, ahí la razón de que del total de días de ensayo, casi seis días, solo se hayan tenido en cuenta los valores registrados en el periodo de 24 h que se da entre el cuarto y quinto día de ensayo, pues en este periodo se considera que el flujo térmico y la temperatura alcanzan un estado estacionario. En la Tabla 10 se muestra la temperatura promedio que se registra en cada nivel de cada cuneta durante el cuarto día de ensayo.

Tabla 10. Temperatura media registrada en los diferentes niveles de las cunetas en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETA 1	CUNETA 2	CUNETA 3
<b>PARTE INFERIOR CAPA 1</b>	51,11°C	52,62°C	51,71°C
<b>PARTE SUPERIOR CAPA 1</b>	46,15°C	50,36°C	46,75°C
<b>PARTE SUPERIOR CAPA 2</b>	35,24°C	30,88°C	29,54°C
<b>PARTE SUPERIOR CAPA 3</b>	24,71°C	24,98°C	22,27°C
<b>PARTE SUPERIOR CAPA 4</b>	20,72°C	22,55°C	19,95°C



El diagrama adjunto muestra la configuración de las cunetas con los sensores T (Temperatura) y HF (Flujo de calor) en las diferentes capas. Las cunetas están numeradas del 1 al 3. Los sensores T11-T21 están en la parte inferior de cada cuneta, y los sensores T71-T81 están en la parte superior. Los sensores HF1-HF8 están distribuidos en las capas superiores de cada cuneta. El diagrama también muestra la ubicación de los sensores T12, T22, T31, T41, T51, T61, T71, T81, HF1, HF2, HF3, HF4, HF5, HF6, HF7, HF8 en las diferentes capas (CAPA 1 a CAPA 4).

Como se explicaba anteriormente, el equipo generador de calor fue configurado para emitir una temperatura de 55°C a las 12 h de ensayo, a sabiendas de que en la parte inferior de las distintas configuraciones (T11\_T21) se registrarían temperaturas algo menores debido a las pérdidas térmicas que se producen entre la Hot-Box y la Caja de Prueba.

Respecto a la temperatura que presenta la parte superior de cada cuneta (T71\_T81), se puede ver en la Tabla 10 que los valores oscilan entre los 19-23°C, aunque si se atiende a las diferentes gráficas expuestas, se observa que estos valores se mantienen prácticamente constantes durante los casi seis días de ensayo, al margen de la temperatura aplicada en la parte inferior de la cuneta. Esto se debe en parte a que, al ubicar estos termopares en la parte superior de la cuneta, y por tanto estar en contacto con el aire ambiente, las temperaturas registradas están influenciadas por la temperatura del espacio exterior del laboratorio y por fenómenos de convección con el aire exterior.

Como se puede ver, al presentar todas las configuraciones unas temperaturas similares, tanto en la parte inferior como en la superior, el diferencial de temperaturas entre estos dos niveles ( $\Delta T$  (T11\_T21-T71\_81)) es bastante similar en las tres gráficas, pudiendo visualizarse que en la mayor parte del ensayo se mantiene una diferencia de temperatura algo superior a los 30°C (se ha de utilizar el eje presente a la derecha del gráfico).

En la Tabla 11 se muestran las diferencias de temperatura que presenta cada capa entre su cara superior e inferior, así como la de la estructura total en condiciones secas, la cual debe ser superior a 15°C para que los cálculos posteriores de transmitancia térmica sean representativos y fiables, según lo indicado por la norma ASTM C1363-05 [96].

Tabla 11. Diferencia media de temperatura total y de cada capa en las diferentes cunetas en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETA 1	CUNETA 2	CUNETA 3
<b>CAPA 1 (CAJA ATLANTIS)</b>	4,96°C	2,26°C	4,96°C
<b>CAPA 2</b>	10,91°C	19,48°C	17,21°C
<b>CAPA 3</b>	10,53°C	5,90°C	7,28°C
<b>CAPA 4 (TIERRA VEGETAL)</b>	3,99°C	2,42°C	2,32°C
<b>ESTRUCTURA TOTAL</b>	30,39°C	30,07°C	31,76°C

Atendiendo a esta Tabla 11, se puede ver que la disposición de árido ligero en la capa 2 de la segunda y tercera cuneta ha permitido retener una mayor cantidad de calor al existir una mayor diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de esta capa. Mientras que la Cuneta 1 registra una diferencia de temperatura de 10,91°C, en las Cunetas 2 y 3 la diferencia es de 19,48 y 17,21°C respectivamente, dejando ver la excelente capacidad que tiene el árido ligero como aislante térmico.

Con respecto al registro de temperaturas llevado a cabo por los termopares presentes en la parte inferior de la capa constituida por tierra vegetal (T51\_T61), se puede ver que ocurre algo similar con respecto a los termopares presentes en la parte superior de la cuneta, es decir, las temperaturas registradas están muy influenciadas por la temperatura ambiente debido a la fina capa de tierra vegetal que separa a estos termopares del exterior.

**Condiciones húmedas**

A continuación, se representa de forma gráfica la temperatura inferior, superior y entre capas de cada una de las cunetas ensayadas en condiciones húmedas, a fin de realizar una comparativa de los resultados obtenidos y explicar la influencia que pueda tener la saturación de los diferentes materiales en el comportamiento térmico de la cuneta.

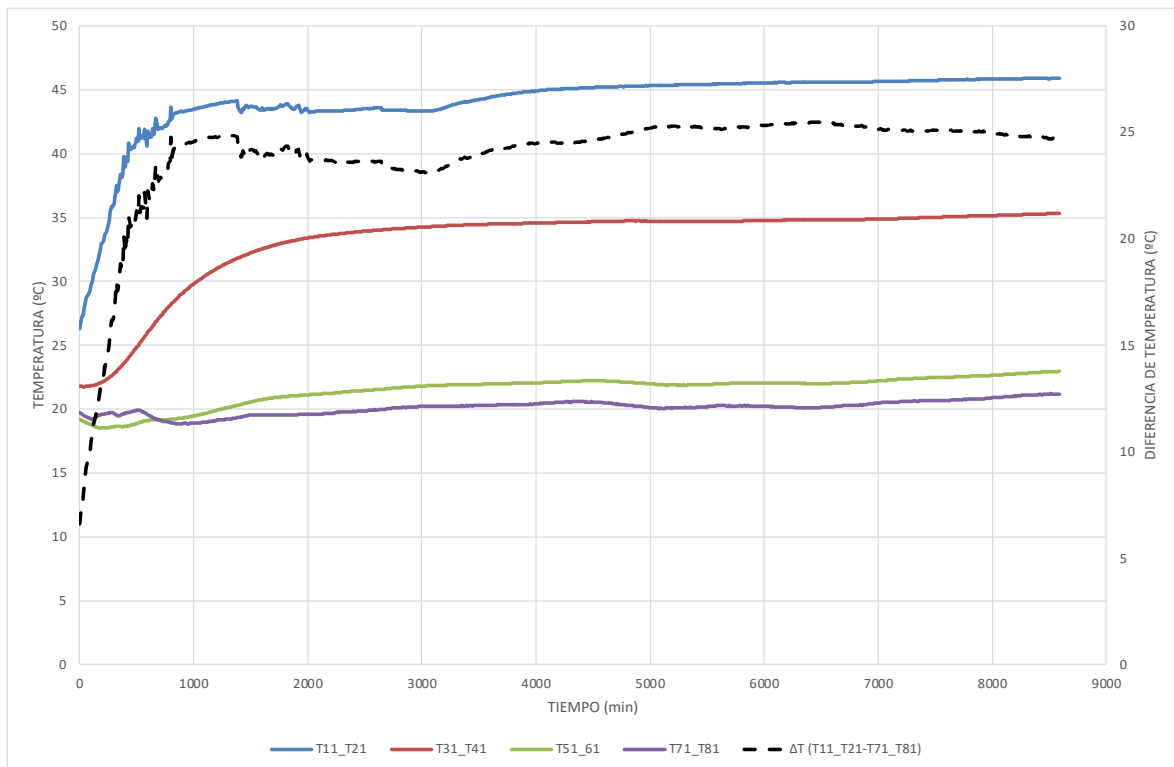


Figura 45. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 1 en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

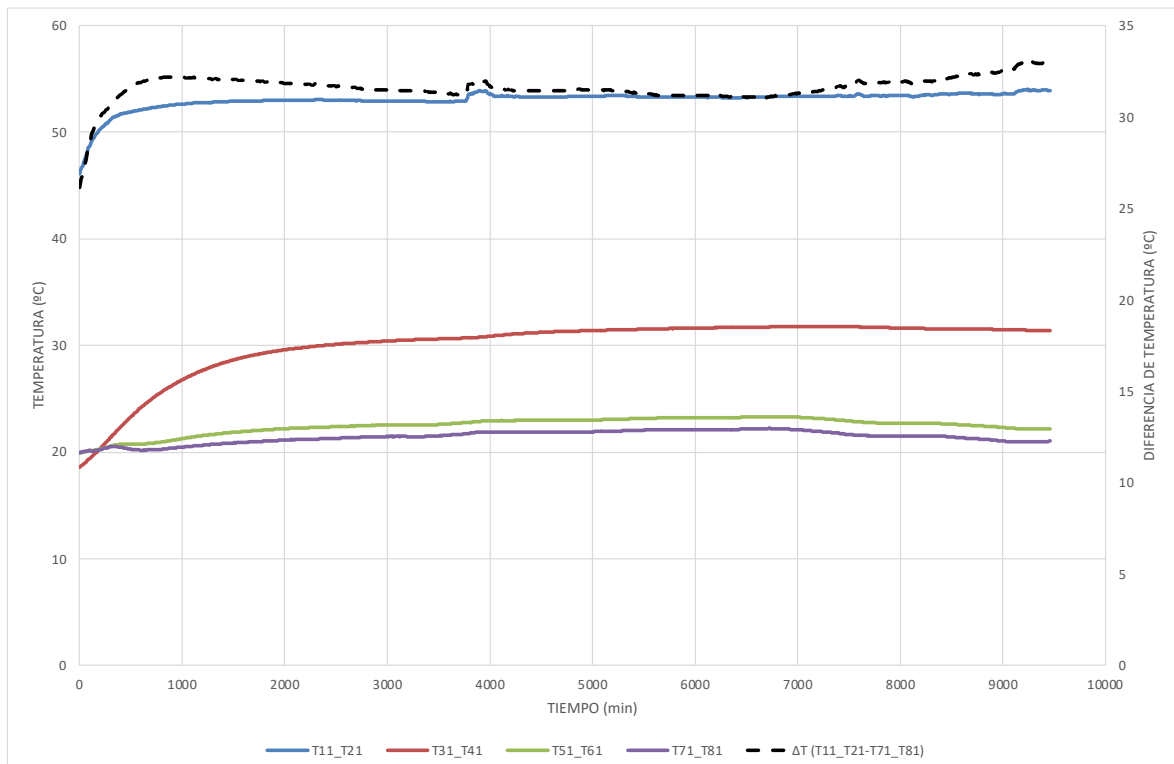


Figura 46. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 2 en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

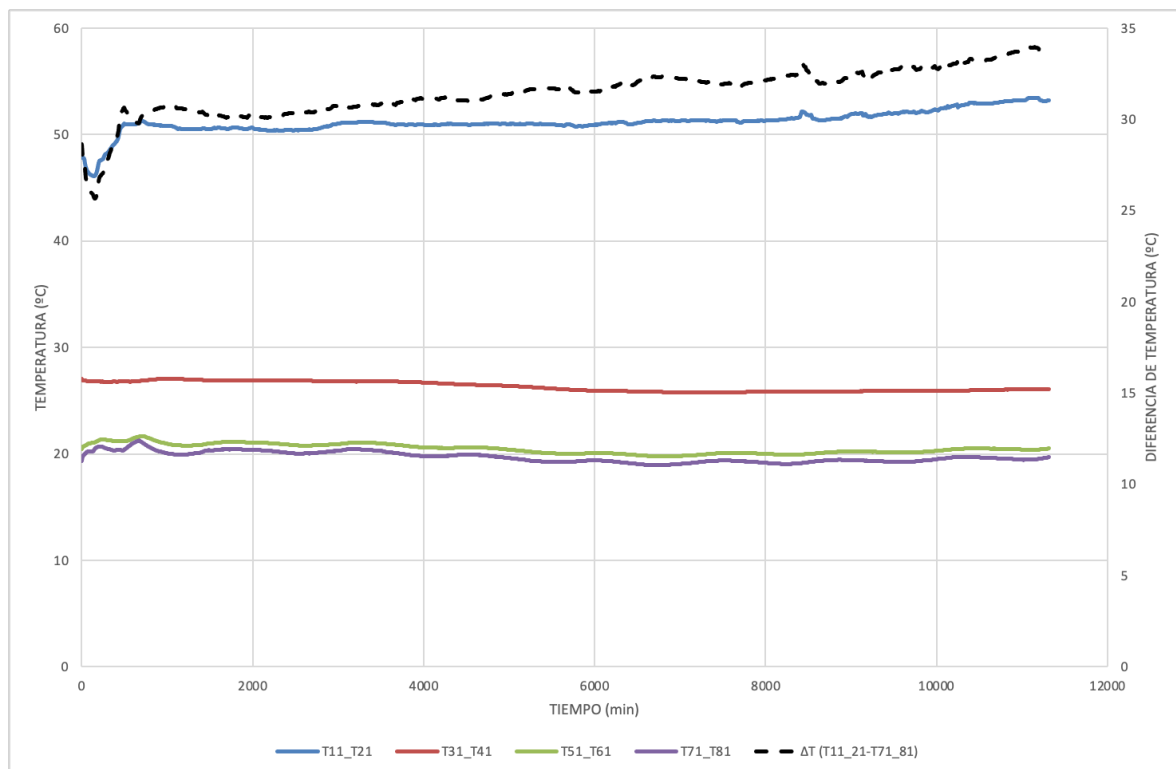


Figura 47. Temperatura inferior, superior y entre capas de la Cuneta 3 en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

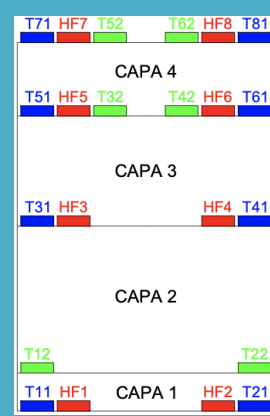
Con respecto a los resultados de los ensayos en condiciones húmedas (ver Figura 45, Figura 46 y Figura 47), se ha de comentar que, excepto en el caso de la Cuneta 1, el resto de las configuraciones se ensayaron durante un mayor periodo de tiempo, pues, al concluir el periodo de ensayo inicialmente establecido, se observó que el flujo térmico y las temperaturas aún no eran lo suficientemente estables. Ante esta situación, se decidió reiniciar la cámara climática y prolongar el ensayo durante otros seis días, con la intención de permitir la estabilización total del flujo térmico y de las temperaturas para la obtención de datos fiables y comparables con los obtenidos en los ensayos en condiciones secas. Por lo tanto, las gráficas que se muestran en la Figura 46 y en la Figura 47 se corresponden con el segundo periodo de ensayo de las Cunetas 2 y 3 respectivamente. Para la toma de datos en la segunda parte de ensayo de la Cuneta 2 se siguieron tomando aquellos comprendidos entre los minutos 5760 y 7200. En cambio, en el caso de la cuneta 3, se decidió estudiar el tramo comprendido entre los minutos 4000 y 5440 por razones que se podrán apreciar más claramente en el posterior análisis gráfico del flujo térmico que se hará de esta cuneta.

A continuación, para una mejor comprensión de los ensayos realizados, se procede a analizar los datos obtenidos mediante el uso de la Tabla 12.

Tabla 12. Temperatura media registrada en los diferentes niveles de las cunetas en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETA 1	CUNETA 2	CUNETA 3
PARTE INFERIOR CAPA 1	45,57°C	53,31°C	50,98°C
PARTE SUPERIOR CAPA 1	45,10°C	49,16°C	39,84°C
PARTE SUPERIOR CAPA 2	34,81°C	31,70°C	26,46°C
PARTE SUPERIOR CAPA 3	22,08°C	23,26°C	20,46°C
PARTE SUPERIOR CAPA 4	20,26°C	22,12°C	19,69°C



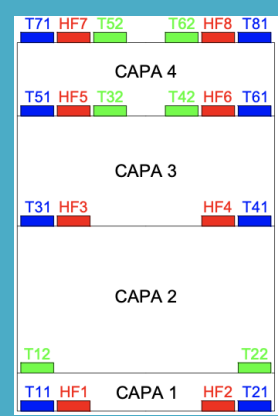
Como se puede observar, las temperaturas registradas por los termopares ubicados en la parte inferior de las cunetas (T11\_T21) al inicio del ensayo son diferentes. Aunque la cámara climática estuviese programada para el ensayo de la Cuneta 1 en condiciones húmedas con el objetivo de alcanzar los 50°C, solo se alcanzaron temperaturas en torno a los 45°C. Este hecho se debe al fenómeno de la inercia térmica que se produce debido a la saturación de los materiales de la cuneta al introducirlos en agua, siendo necesaria una mayor cantidad de calor para elevar la temperatura. Respecto a las Cunetas 2 y 3, se alcanzaron temperaturas por encima de 50°C en la parte inferior de la cuneta.

En lo referente a las temperaturas registradas en la parte superior de la cuneta (T71\_T81), y en la parte inferior de la capa base (T51\_T61), se ve que se produce el mismo suceso que se daba en condiciones secas, produciéndose temperaturas prácticamente constantes durante todo el ensayo con valores en torno a los 20-23°C, próximos a la temperatura ambiente. Por lo tanto, en cada uno de los anteriores gráficos se observa que la diferencia de temperatura entre la capa inferior y superior (( $\Delta T$  (T11\_T21-T71\_T81)) se asemeja a la forma que toma la línea correspondiente a la temperatura en la parte superior de la estructura. A continuación, en la Tabla 13 se muestran las diferencias de temperatura que presenta cada capa entre su cara superior e inferior, así como la de la estructura total en condiciones húmedas.

Tabla 13. Diferencia media de temperatura total y de cada capa en las diferentes cunetas en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETA 1	CUNETA 2	CUNETA 3
<b>CAPA 1 (CAJA ATLANTIS)</b>	0,48°C	4,15°C	11,14°C
<b>CAPA 2</b>	10,29°C	17,46°C	13,38°C
<b>CAPA 3</b>	12,73°C	8,45°C	6°C
<b>CAPA 4 (TIERRA VEGETAL)</b>	1,82°C	1,14°C	0,77°C
<b>ESTRUCTURA TOTAL</b>	25,31°C	31,18°C	31,29°C



En la Tabla 13, se puede ver de nuevo el efecto que tiene el árido ligero saturado en la segunda capa en comparación con el árido calizo saturado. Mientras que las dos últimas configuraciones registran en esta capa diferencias de temperatura de 17,46 y 13,38°C, la primera cuneta presenta una diferencia menor, concretamente de 10,29°C, por lo que se puede comprobar que en condiciones húmedas el árido ligero también proporciona un mayor aislamiento respecto al árido normal, aunque menor que el que proporciona en condiciones secas, existiendo en condiciones húmedas una diferencia de temperatura menor debido a la mayor conductividad térmica que presenta este material al estar saturado.

Un aspecto a considerar es el relativo a que estas temperaturas serán utilizadas para obtener resultados fiables de transmitancia térmica, resistencia térmica y conductividad térmica equivalente, para lo que, según la norma ASTM C1363-05 [96], se establece que es necesario que la diferencia de temperatura entre la capa superior e inferior del material que se está analizando tenga un valor mayor a 15°C y sea estable. Se puede ver que no en todas las capas se da esta diferencia, pero sí entre la parte inferior y superior de todas las cunetas.

### 5.3.2. Flujo térmico

Del mismo modo que se ha hecho con la temperatura, se expondrán los diferentes gráficos y tablas donde se muestran los datos de flujo térmico registrados por los diferentes sensores repartidos en las cunetas en condiciones secas y húmedas.

#### Condiciones secas

En la Figura 48, Figura 49 y Figura 50 se visualizan gráficamente los flujos térmicos promedio que atraviesan las diferentes capas de las tres cunetas ensayadas en condiciones secas.

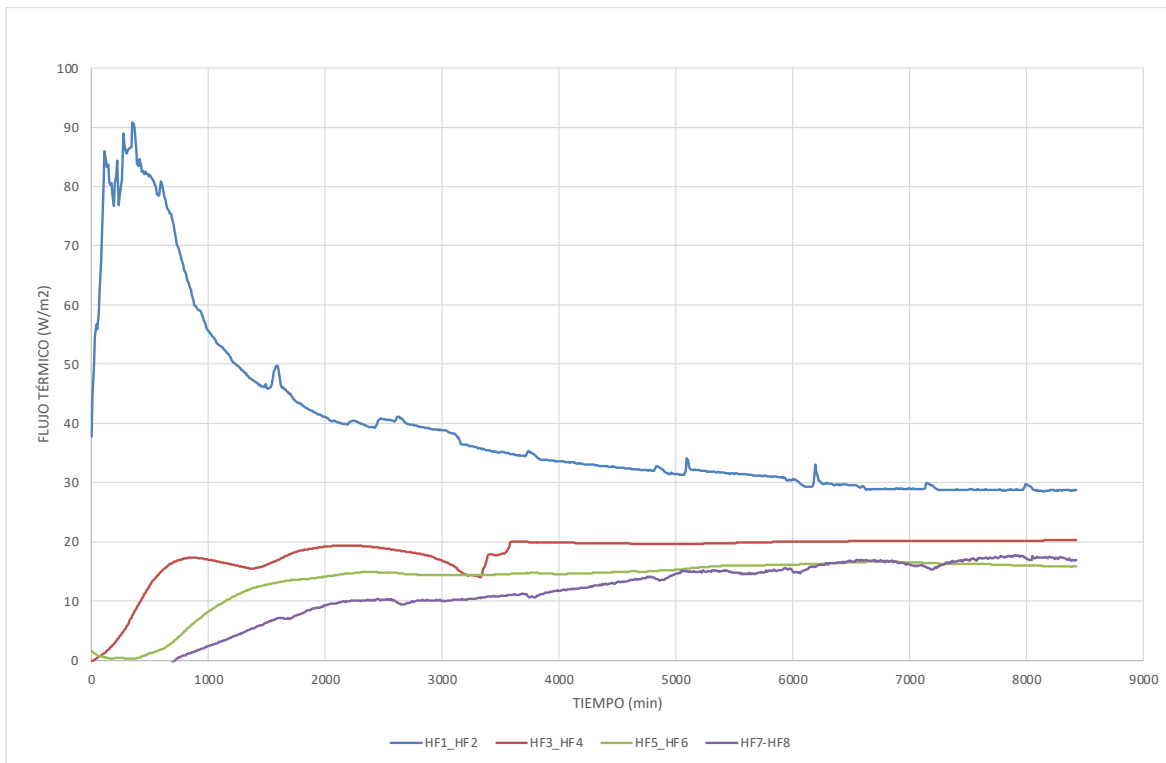


Figura 48. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 1 en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

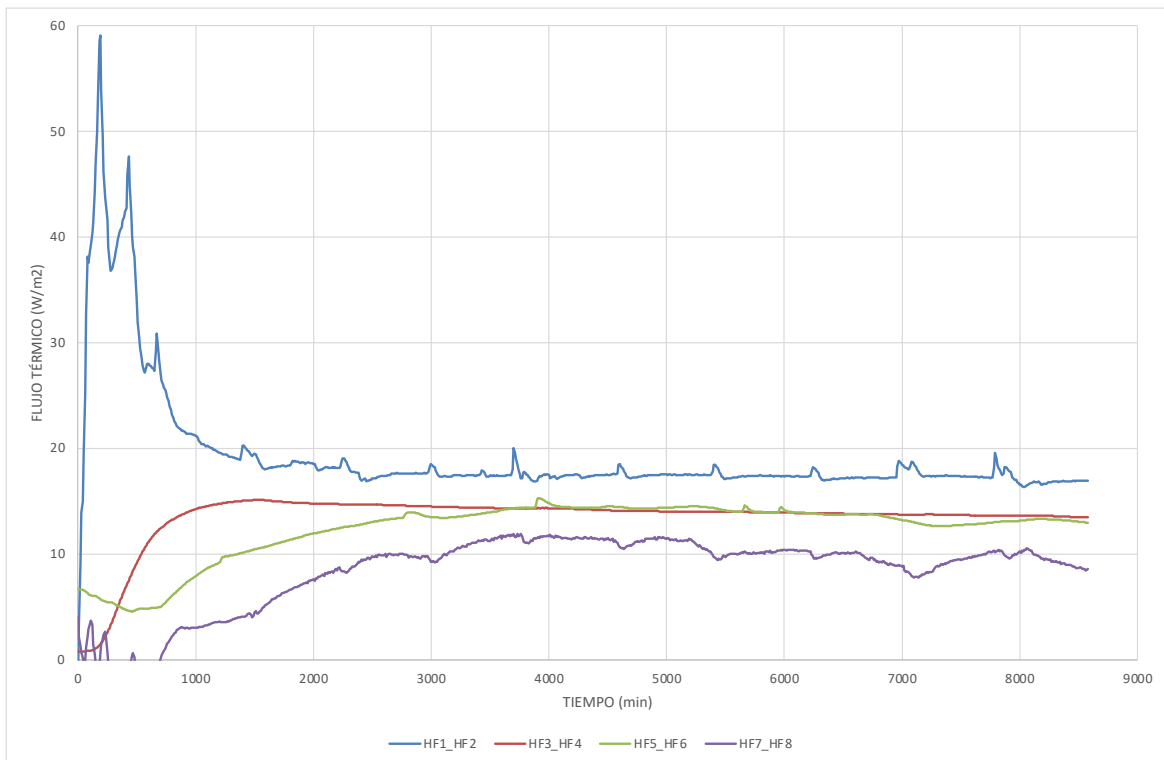


Figura 49. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 2 en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.



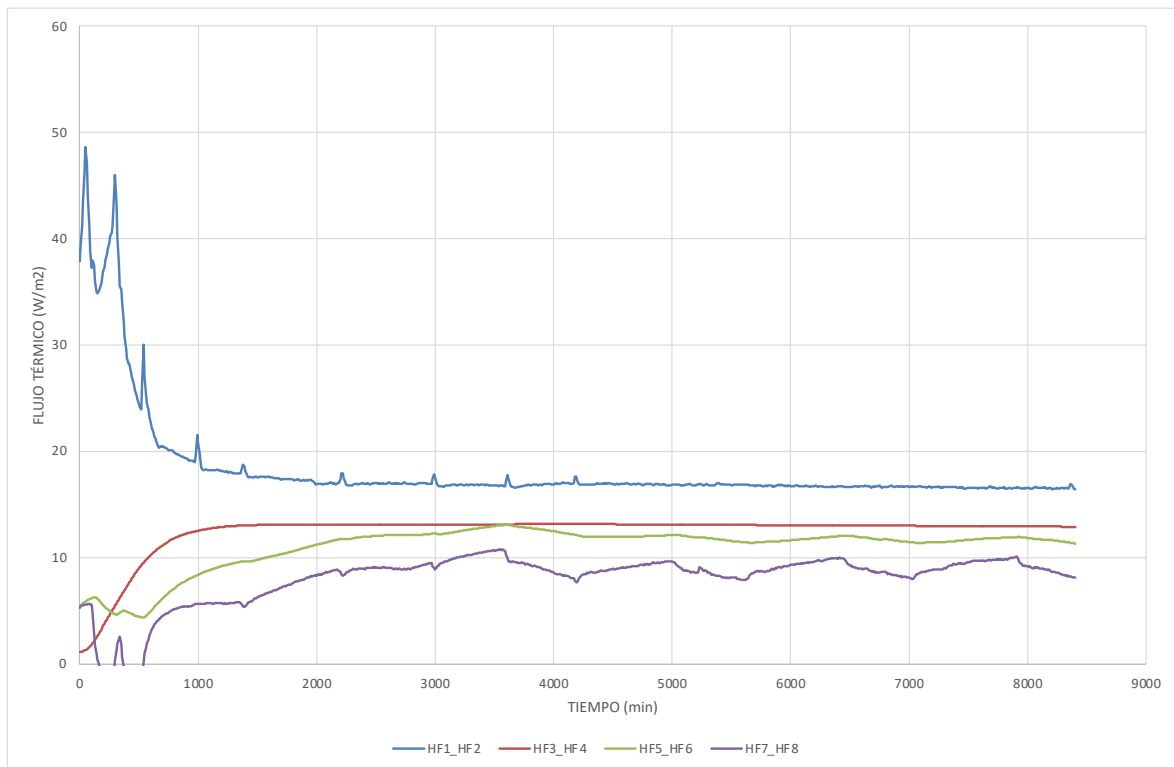


Figura 50. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 3 en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 14 se muestran los valores medios de flujo térmico que se han tomado para el análisis de las tres cunetas en los ensayos en condiciones secas.

Tabla 14. Flujo térmico medio registrado en los ensayos secos de las cunetas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETA 1	CUNETA 2	CUNETA 3	
PARTE INFERIOR CAPA 1	29,66 W/m <sup>2</sup>	17,44 W/m <sup>2</sup>	16,70 W/m <sup>2</sup>	
PARTE SUPERIOR CAPA 2	20,10 W/m <sup>2</sup>	13,83 W/m <sup>2</sup>	13,02 W/m <sup>2</sup>	
PARTE SUPERIOR CAPA 3	16,40 W/m <sup>2</sup>	13,68 W/m <sup>2</sup>	11,71 W/m <sup>2</sup>	
PARTE SUPERIOR CAPA 4	16,07 W/m <sup>2</sup>	9,64 W/m <sup>2</sup>	9,03 W/m <sup>2</sup>	

Aunque en un inicio se pueda observar que los sensores de flujo térmico situados en la parte inferior de la caja Atlantis (HF1\_HF2) proporcionan valores muy altos, al cabo de ciertos días se consigue estabilizar el flujo.

Con respecto a los sensores de flujo térmico situados en la parte superior de la capa 2 (HF3\_HF4), y en la parte superior de la capa 3 (HF5\_HF6), se puede observar que en los 3 ensayos en condiciones secas se alcanzan valores muy constantes para las últimas horas de ensayo, dando valores medios como los que se presentan en la Tabla 14. Por otro lado, los datos registrados en la parte superior de la capa 2 (HF3\_HF4), permite ver que en la Cuneta 1, en comparación con las otras dos configuraciones, se dan valores muy altos de flujo térmico, pues esta primera configuración presenta en su segunda capa, y también en la tercera, árido calizo normal, material con más conductividad térmica que el árido ligero presente en la segunda capa de las cunetas 2 y 3, de ahí que se genere un mayor flujo térmico en la primera configuración. La Cuneta 1 presenta un flujo térmico en su segunda capa de  $20,10 \text{ W/m}^2$ , mientras que en la Cuneta 2 y 3 se da un valor de  $13,83$  y  $13,02 \text{ W/m}^2$  respectivamente.

Por último, es necesario mencionar que el último nivel de sensores (HF7\_HF8), situados en la parte superior de la cuneta, presentan bastantes variaciones, incluso durante las últimas horas de ensayo, lo que puede ser debido a que están en contacto directamente con el entorno exterior, el cual es variable, y en el que se producen fenómenos de convección con el aire exterior.

Otra comparativa que se puede realizar es mediante la visualización del flujo térmico que registran los sensores situados en la parte superior de la capa 3 (HF5\_HF6) en las dos últimas cunetas. Mientras que la Cuneta 2 tiene en la tercera capa árido normal, la última de las configuraciones tiene árido reciclado y, como se puede observar, el flujo térmico de esta tercera cuneta es algo menor en comparación con el de la segunda. Este suceso es debido a que el árido reciclado de origen mixto presenta materiales cerámicos y de otro tipo, contribuyendo ligeramente a un mejor aislamiento de la estructura y una menor transferencia de calor.

### Condiciones húmedas

A continuación, se muestra en la Figura 51, Figura 52 y Figura 53 las gráficas correspondientes a los flujos térmicos que atraviesan las diferentes capas de cada cuneta en condiciones de saturación de los materiales que las componen.

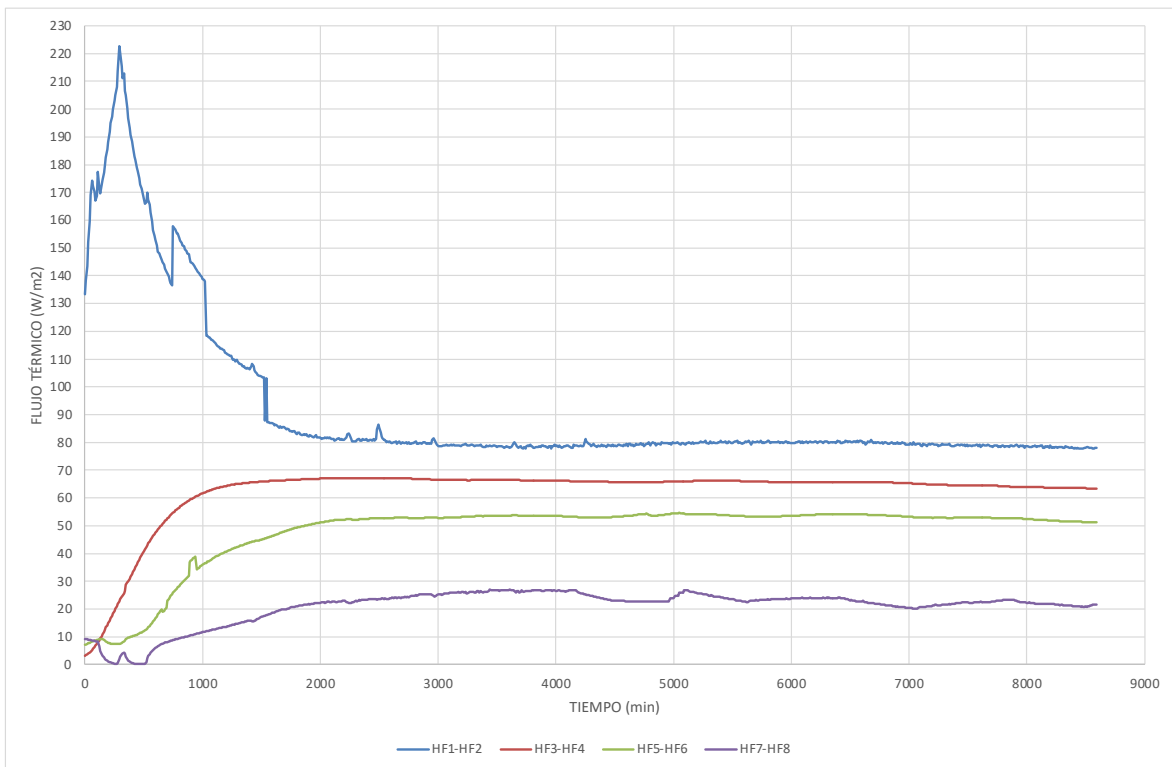


Figura 51. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 1 en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

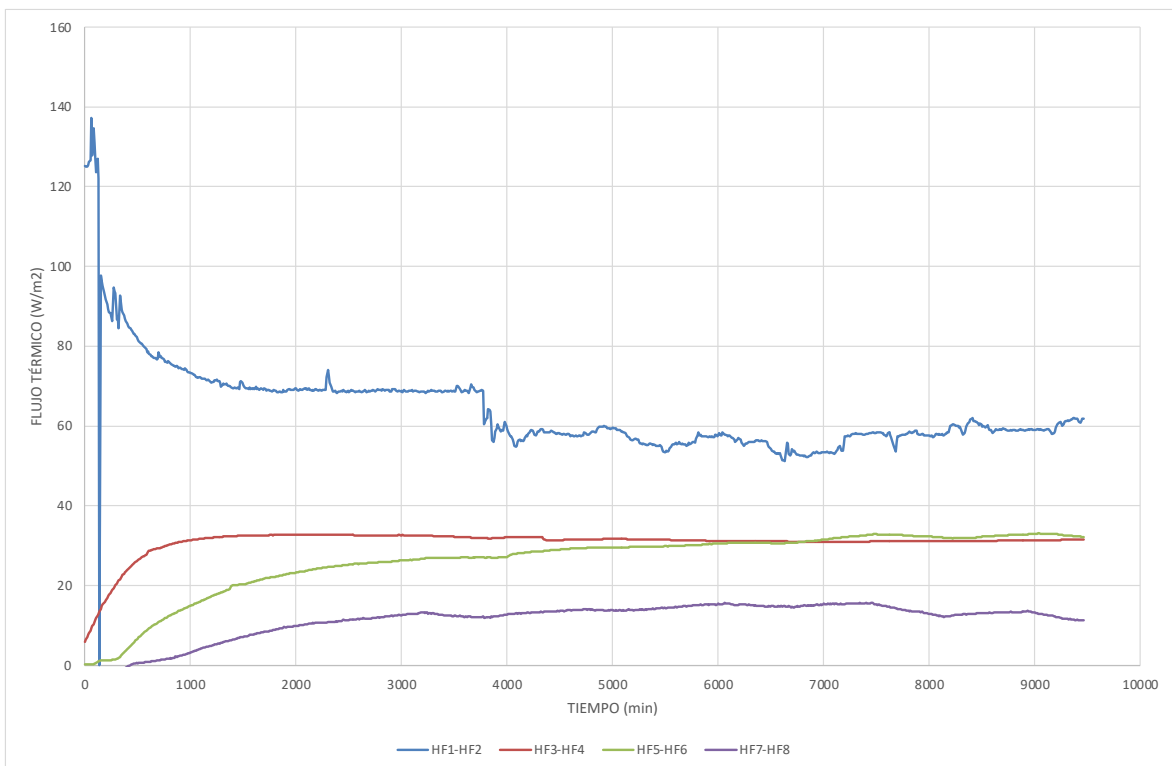


Figura 52. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 2 en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

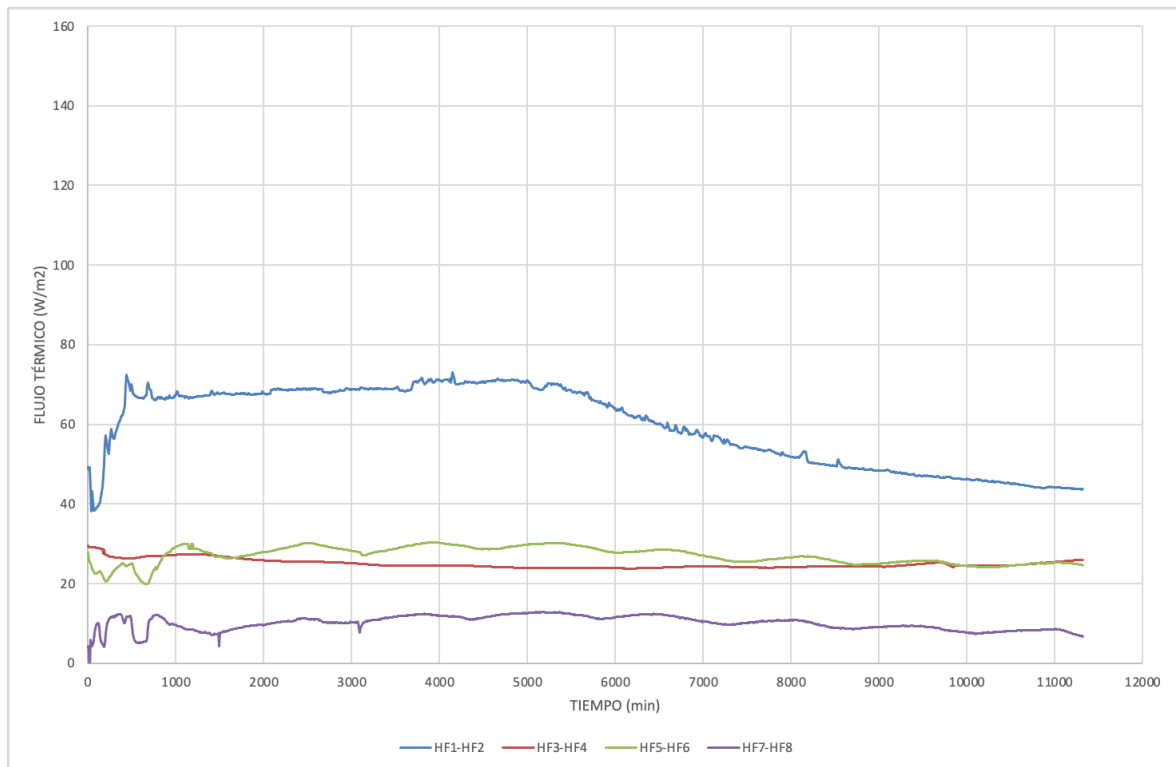


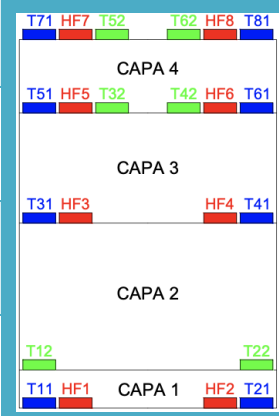
Figura 53. Flujo térmico inferior, superior y entre capas de la Cuneta 3 en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 15, se muestran los valores medios de flujo térmico que se han tomado para el análisis de las tres cunetas en los ensayos en condiciones húmedas.

Tabla 15. Flujo térmico medio registrado en los ensayos húmedos de las cunetas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETA 1	CUNETA 2	CUNETA 3	
<b>PARTE INFERIOR CAPA 1</b>	78,89 W/m <sup>2</sup>	55,05 W/m <sup>2</sup>	70,41 W/m <sup>2</sup>	
<b>PARTE SUPERIOR CAPA 2</b>	65,51 W/m <sup>2</sup>	31,09 W/m <sup>2</sup>	24,18 W/m <sup>2</sup>	
<b>PARTE SUPERIOR CAPA 3</b>	53,66 W/m <sup>2</sup>	30,87 W/m <sup>2</sup>	29,51 W/m <sup>2</sup>	
<b>PARTE SUPERIOR CAPA 4</b>	22,64 W/m <sup>2</sup>	15,09 W/m <sup>2</sup>	12,12 W/m <sup>2</sup>	

Se había comentado en el apartado de temperaturas que en la Cuneta 2 y 3 se había realizado un segundo ensayo debido a la falta de estabilidad en los resultados, teniendo que prolongarlo durante más días para obtener datos confiables. El motivo por el que en esta segunda parte de ensayo de la Cuneta 3 se han utilizado los datos registrados entre los minutos 4000 y 5540, reside en que este es el único periodo de tiempo en el que la parte inferior de la cuneta (HF1\_HF2) parece registrar y mantener un flujo estable como se muestra en la Figura 53. Atendiendo al resto de sensores de flujo térmico (HF3\_HF4, HF5\_HF6 y HF7\_HF8), y las gráficas que registran, se puede ver que en este periodo de tiempo también toman valores con cierta estabilidad.

Si se realiza una comparación de los flujos térmicos en los ensayos en condiciones secas y húmedas, se puede ver que, debido a los mayores valores de conductividad térmica en los materiales saturados, los flujos térmicos son más altos cuando la cuneta está en condiciones húmedas.

### 5.3.3. Transmitancia térmica

Analizados y registrados los valores de temperatura y flujo térmico, se procede a continuación al cálculo de la transmitancia térmica, siendo el resultado del flujo térmico que atraviesa cada zona de estudio entre el diferencial de temperatura que presenta dicha zona (ecuación (9)). De este modo, se es capaz de determinar los valores de la transmitancia térmica, tanto de los diferentes materiales que conforman la cuneta como del conjunto de cada estructura en condiciones secas y húmedas.

Es necesario recordar que, para efectuar este cálculo, y que tenga validez de acuerdo con la norma ASTM C1363-05 [96], es necesario que el material que se está analizando (árido normal, árido ligero, árido reciclado o tierra vegetal) o el conjunto de toda la cuneta, presente entre su parte inferior y superior una diferencia de al menos 15°C, además de la necesidad de que el tramo que se estudie presente valores estables para poder establecer un valor promedio.

Por último, remarcar que el cálculo de las propiedades térmicas se llevará a cabo para todas las capas que forman cada cuneta excepto para la capa sub-base, es decir, el espacio ocupado por la caja Atlantis.

#### Condiciones secas

En la Tabla 16 se muestran los valores de temperatura y transmitancia térmica medias de los distintos materiales de cada cuneta en condiciones secas, así como del conjunto de las 3 estructuras.

Tabla 16. Transmitancia térmica media de las diferentes cunetas en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETAS 1		CUNETAS 2		CUNETAS 3	
	$\Delta T$ (°C)	U (W/m <sup>2</sup> K)	$\Delta T$ (°C)	U (W/m <sup>2</sup> K)	$\Delta T$ (°C)	U (W/m <sup>2</sup> K)
<b>CAPA 2</b>	10,91	1,843	19,48	0,710	17,21	0,756
<b>CAPA 3</b>	10,53	1,557	5,90	2,317	7,28	1,610
<b>CAPA 4</b>	3,99	4,024	2,42	3,975	2,32	3,892
<b>TOTAL (SIN INCLUIR CAJA ATLANTIS)</b>	25,43	0,632	27,81	0,347	26,81	0,337

Atendiendo a la diferencia de temperatura que muestra cada una de las capas en las distintas cunetas, se puede ver que el único material que presenta suficiente diferencia de temperatura (más de 15°C) entre sus caras es el árido ligero presente en la segunda capa de las Cunetas 2 y 3, pudiendo determinar que este material presenta una transmitancia térmica en condiciones secas de 0,710-0,756 W/m<sup>2</sup>K.

Para mostrar una idea de cuan fiables pueden ser estos datos, se ha calculado el valor que toma el árido calizo en la cuneta 1 según se cumpla o no este criterio de diferencia de temperatura. Aprovechando que la capa 2 y 3 de esta configuración presenta el mismo material, se ha decidido calcular la transmitancia térmica de este material cuando su espesor es de 20 y 35 cm. En la Tabla 17 se muestra la comparativa numérica de la transmitancia térmica de este material para esos dos espesores con sus respectivas diferencias de temperatura, donde el que toma el valor de 0,765 W/m<sup>2</sup>K sería el fiable.

Tabla 17. Transmitancia térmica del árido calizo en la cuneta 1 en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

	$\Delta T$ (°C)	U (W/m <sup>2</sup> K)
<b>ÁRIDO CALIZO e=20 cm</b>	10,91	1,843
<b>ÁRIDO CALIZO e=35 cm</b>	21,44	0,765

Como se puede ver, existe una gran diferencia en función de si este criterio se cumple o no, por lo que solo se analizarán y se tendrán en cuenta aquellos materiales que presenten una diferencia de temperatura de al menos 15°C, diferencia que se da siempre entre la parte inferior y superior de cada cuneta, permitiendo analizar entre sí las diferentes configuraciones.

Atendiendo a lo anteriormente expuesto, se puede ver en la Tabla 16 que las Cunetas 2 y 3 presentan una marcada diferencia en cuanto a la transmitancia térmica total que presenta la estructura con respecto a la Cuneta 1, debido en gran medida al árido ligero. Las transmitancias térmicas son 0,632 W/m<sup>2</sup>K, 0,347 W/m<sup>2</sup>K y 0,337 W/m<sup>2</sup>K para las cunetas 1, 2 y 3 respectivamente.

### Condiciones húmedas

A continuación, se muestran en la Tabla 18 los valores medios de transmitancia térmica que tomaron las diferentes capas y el conjunto total de las cunetas en condiciones húmedas.

Tabla 18. Transmitancia térmica media de las diferentes cunetas en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETAS 1		CUNETAS 2		CUNETAS 3	
	$\Delta T$ (°C)	U (W/m <sup>2</sup> K)	$\Delta T$ (°C)	U (W/m <sup>2</sup> K)	$\Delta T$ (°C)	U (W/m <sup>2</sup> K)
<b>CAPA 2</b>	10,29	6,367	17,46	1,781	13,38	1,807
<b>CAPA 3</b>	12,73	4,215	8,45	3,655	6	4,003
<b>CAPA 4</b>	1,82	12,474	1,14	13,296	0,77	15,814
<b>TOTAL (SIN INCLUIR CAJA ATLANTIS)</b>	24,84	0,912	27,04	0,558	20,15	0,602

Como se puede observar de nuevo, la segunda y tercera configuración presentan una transmitancia térmica bastante menor de la que se da en la primera cuneta. También, otro resultado a comentar es el mayor valor que toman las transmitancias térmicas de las diferentes cunetas en comparación con las proporcionadas en condiciones secas, algo que era de esperar debido a la mayor conductividad que presentan los distintos materiales al estar saturados, disminuyendo así las propiedades aislantes de la estructura.

### 5.3.4. Resistencia térmica

A continuación, se procederá a analizar la resistencia térmica en las diferentes cunetas. Como se exponía anteriormente en el apartado 4.3.7, la resistencia térmica es el resultado del inverso de la transmitancia térmica (ecuación (10)), por lo que, si antes un mejor aislamiento térmico significaba un menor valor de transmitancia, aquí será al contrario.

#### Condiciones secas

A continuación, en la Tabla 19 se muestran los valores de resistencias térmicas de la Cuneta 1, 2 y 3, así como el valor que toman los diferentes materiales que las componen en los ensayos realizados en condiciones secas.

Tabla 19. Resistencia térmica media de las diferentes cunetas en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETAS 1		CUNETAS 2		CUNETAS 3	
	$\Delta T$ (°C)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\Delta T$ (°C)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\Delta T$ (°C)	R (m <sup>2</sup> K/W)
<b>CAPA 2</b>	10,91	0,543	19,48	1,409	17,21	1,322
<b>CAPA 3</b>	10,53	0,642	5,90	0,432	7,28	0,621
<b>CAPA 4</b>	3,99	0,249	2,42	0,252	2,32	0,257
<b>TOTAL (SIN INCLUIR CAJA ATLANTIS)</b>	25,43	1,583	27,81	2,886	26,81	2,968

Como se puede observar en la Tabla 19, con el objetivo de comparar las distintas estructuras, la Cuneta 1 presenta una resistencia térmica total de 1,583 m<sup>2</sup>K/W, mientras que la disposición del árido ligero en la segunda capa de la Cuneta 2 permite obtener un valor significativamente mayor de 2,886 m<sup>2</sup>K/W. Posteriormente, la introducción del árido reciclado permite elevar levemente esta última resistencia térmica, llegando hasta los 2,968 m<sup>2</sup>K/W.

#### Condiciones húmedas

A continuación, se procederá de la misma manera que en el apartado anterior a analizar las resistencias térmicas de las diferentes cunetas y materiales, esta vez en condiciones húmedas. En la Tabla 20 se muestra un resumen de los diferentes valores obtenidos.

Tabla 20. Resistencia térmica media de las diferentes cunetas en condiciones húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETAS 1		CUNETAS 2		CUNETAS 3	
	$\Delta T$ (°C)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\Delta T$ (°C)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\Delta T$ (°C)	R (m <sup>2</sup> K/W)
<b>CAPA 2</b>	10,29	0,157	17,46	0,561	13,38	0,533
<b>CAPA 3</b>	12,73	0,237	8,45	0,274	6	0,250
<b>CAPA 4</b>	1,82	0,080	1,14	0,075	0,77	0,063
<b>TOTAL (SIN INCLUIR CAJA ATLANTIS)</b>	24,84	1,097	27,04	1,791	20,15	1,622

A la vista de los datos de la Tabla 20, y en comparación con los de la Tabla 19, se puede ver que las resistencias térmicas en condiciones húmedas son menores que en seco, por lo que la estructura presenta una menor resistencia térmica cuando se halla saturada.

Dentro de estas menores prestaciones, las Cunetas 2 y 3 siguen destacando en comparación con la primera.

### 5.3.5. Conductividad térmica equivalente

Por último, en este apartado se procede a exponer y discutir los resultados que se obtuvieron de la última de las propiedades térmicas estudiadas. La conductividad térmica equivalente se corresponde con el resultado del espesor de la capa o estructura estudiada entre la resistencia térmica que presenta (ecuación (11)). Cabe remarca que la conductividad térmica que se ha medido con el equipo *TCi*, y la que se presenta en las fichas técnicas de los materiales, se corresponde con la propiedad del material en sí. En el ensayo Hot-Box, lo que se está determinando es la conductividad térmica equivalente de una capa de material, la cual está dentro de una estructura con otros materiales y entre la que hay huecos en los que se producen fenómenos de conducción, convección y radiación.

En la Tabla 21 se exponen las conductividades térmicas equivalentes de cada capa y cuneta en condiciones secas, así como sus espesores y diferencias de temperatura.

Tabla 21. Conductividad térmica equivalente media de las diferentes cunetas en condiciones secas.

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETAS 1			CUNETAS 2		CUNETAS 3	
	Espesor (m)	$\Delta T$ (°C)	$\lambda_{ea}$ (W/mK)	$\Delta T$ (°C)	$\lambda_{ea}$ (W/mK)	$\Delta T$ (°C)	$\lambda_{ea}$ (W/mK)
<b>CAPA 2</b>	0,2	10,91	0,369	19,48	0,142	17,21	0,151
<b>CAPA 3</b>	0,15	10,53	0,234	5,90	0,348	7,28	0,241
<b>CAPA 4</b>	0,1	3,99	0,402	2,42	0,398	2,32	0,398
<b>TOTAL (SIN INCLUIR CAJA ATLANTIS)</b>	0,450	25,43	0,284	27,81	0,156	26,81	0,152



Atendiendo a lo anteriormente descrito, se ha realizado una comparativa entre los valores de conductividad térmica obtenidos con el equipo *TCi* y con el ensayo Hot-Box en condiciones secas. Para ello, se ha de observar la Tabla 22.

Tabla 22. Comparación de resultados de conductividad térmica.

Fuente: Elaboración propia.

	$\Delta T$ (°C)	<i>TCi</i>	Ficha técnica	Hot-Box (seco)
		$\lambda$ (W/mK)	$\lambda$ (W/mK)	$\lambda_{eq}$ (W/mK)
<b>ÁRIDO LIGERO CUNETAS 2</b>	19,48	0,0982	0,1	0,142
<b>ÁRIDO LIGERO CUNETAS 3</b>	17,48			0,151
<b>ÁRIDO CALIZO e=35 cm</b>	21,44	1,6735	ND	0,268

Observando aquellos materiales en los ensayos Hot-Box donde se cumple el criterio mínimo de diferencia de temperatura, es decir, el árido ligero en las Cunetas 2 y 3, y el árido normal en la Cuneta 1 considerando el espesor total de 35 cm, se puede ver que se dan valores de conductividad térmica diferentes según el estado en que se encuentren los materiales. Por un lado, el árido ligero en el ensayo Hot-Box toma un valor de 0,142 y 0,151 W/mK, mientras que en el ensayo con el equipo *TCi* se obtiene un valor de 0,0982 W/mK, próximo al valor que proporciona el fabricante en su ficha técnica de 0,1 W/mK. Esta discrepancia de valores se debe al estado en el que se encuentra este material en ambos ensayos, ya que, mientras que en el primer ensayo se ha triturado y prensado para eliminar cualquier hueco y poder analizar así la propiedad física del propio material, en el ensayo Hot-Box se encuentran dispuesto de forma aleatoria en su capa, con pequeños huecos de aire que afectarán al valor de conductividad térmica, además de estar en contacto con otros tipos de materiales y de disponer de poros internos, los cuales se generan en el proceso de expansión de la arcilla en el horno, influyendo todo esto en su comportamiento térmico.

Por otro lado, el árido calizo toma un valor de 0,268 W/mK en el ensayo Hot-Box, mientras que en el ensayo *TCi* proporciona un valor de 1,6735 W/mK, dejando ver una clara diferencia. Mientras que en el ensayo *TCi* se ha cortado el árido normal para dejar sus caras uniformes y se ha puesto un peso encima para asegurar el contacto total del material con el sensor y así poder analizar la propiedad física del propio material, en el ensayo Hot-Box se encuentran dispuestos de forma aleatoria en sus respectivas capas, con pequeños huecos de aire y en contacto con otros materiales, lo que influirá en su comportamiento térmico.

Atendiendo a la Tabla 21, se puede observar que las últimas dos cunetas presentan una menor conductividad térmica equivalente en comparación con la primera, sobre todo en el caso de la Cuneta 3. Los datos tomados en el periodo de estudio son 0,284 W/mK para la Cuneta 1 frente a los 0,156 y 0,152 W/mK de la Cuneta 2 y 3 respectivamente.

#### Condiciones húmedas

Atendiendo a los ensayos realizados en condiciones húmedas, se exponen a continuación en la Tabla 23 las conductividades térmicas de cada capa y cuneta.

Tabla 23. Conductividad térmica equivalente media de las diferentes cunetas en condiciones húmedas

Fuente: Elaboración propia.

	CUNETAS 1			CUNETAS 2		CUNETAS 3	
	Espesor (m)	$\Delta T$ (°C)	$\lambda_{eq}$ (W/mK)	$\Delta T$ (°C)	$\lambda_{eq}$ (W/mK)	$\Delta T$ (°C)	$\lambda_{eq}$ (W/mK)
<b>CAPA 2</b>	0,2	10,29	1,273	17,46	0,356	13,38	0,361
<b>CAPA 3</b>	0,15	12,73	0,632	8,45	0,548	6	0,601
<b>CAPA 4</b>	0,1	1,82	1,247	1,14	1,330	0,77	1,581
<b>TOTAL (SIN INCLUIR CAJA ATLANTIS)</b>	0,450	24,84	0,410	27,04	0,251	20,15	0,271

De nuevo, se puede ver el excelente comportamiento térmico que presenta la Cuneta 2 y 3 gracias a la utilización del árido ligero y árido reciclado, si bien estas estructuras tienen una mayor conductividad térmica equivalente debido a la presencia de agua, y por tanto un menor rendimiento en comparación con los ensayos en seco.

A modo de resumen, se muestra en la Tabla 24 las propiedades térmicas de las cunetas verdes ensayadas tanto en condiciones secas como húmedas.

Tabla 24. Propiedades térmicas de las cunetas verdes.

Fuente: Elaboración propia

	Condiciones secas			Condiciones húmedas		
	U (W/m <sup>2</sup> K)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\lambda_{eq}$ (W/mK)	U (W/m <sup>2</sup> K)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\lambda_{eq}$ (W/mK)
<b>CUNETAS 1</b>	0,632	1,583	0,284	0,912	1,097	0,410
<b>CUNETAS 2</b>	0,347	2,886	0,156	0,558	1,791	0,251
<b>CUNETAS 3</b>	0,337	2,968	0,152	0,602	1,622	0,271

Como se puede ver, las últimas dos cunetas presentan mejores propiedades de aislamiento térmico respecto al aire ambiente exterior en comparación con la Cuneta 1, tanto en condiciones secas como en húmedas. Otro resultado a mencionar es el relativo a las mejores propiedades térmicas que presenta la Cuneta 3 en condiciones secas en comparación con la Cuneta 2, pero peores cuando se dan condiciones húmedas. La diferencia entre estas dos cunetas reside en la tercera capa, donde la segunda configuración presenta árido calizo normal y la tercera árido reciclado de origen mixto.

## 6. Conclusiones

Tras el análisis llevado a cabo con los resultados extraídos de los ensayos de laboratorio, y que han sido presentados en el apartado anterior, se procede a mostrar a continuación diversas conclusiones extraídas del presente estudio.

En primer lugar, desde el punto de vista térmico, la ejecución del ensayo con el equipo *TCi* en la determinación de las conductividades térmicas de la tierra vegetal, el árido calizo y el árido ligero, ha permitido observar la excelente capacidad aislante de este último material, con una conductividad térmica de 0,0982 W/mK, muy próxima al dato proporcionado por el fabricante. La tierra vegetal y el árido calizo presentan una conductividad térmica de 0,1422 y 1,6735 W/mK respectivamente.

Atendiendo al comportamiento hidráulico, la realización de ensayos en condiciones húmedas ha permitido comprobar que todas las estructuras presentan una capacidad de almacenamiento hidráulico considerable, siendo superior en las Cunetas 2 y 3. Mediante el análisis de los datos obtenidos, se observa que la Cuneta 2, compuesta en sus capas intermedias por árido ligero y árido calizo normal, es la que mayor capacidad de almacenamiento provee cuando la estructura permanece inundada, mientras que es la Cuneta 3, que se diferencia de la anterior en la sustitución del árido calizo por árido reciclado en la tercera capa, la que mayor porcentaje de agua absorbe con respecto al total vertido, siendo atribuible esta propiedad a la mayor porosidad que presenta el árido ligero y el árido reciclado en comparación con el árido calizo, permitiendo absorber más cantidad de agua. Por lo tanto, se puede corroborar la gran capacidad que tendrían estas cunetas para disminuir el riesgo de inundaciones o contaminación difusa del agua al reducir el volumen de escorrentía superficial en el entorno urbano.

Para continuar con el análisis térmico, en los ensayos Hot-Box se puede observar que ante las distintas condiciones de ensayo (secas y húmedas), las distintas estructuras muestran diferentes propiedades térmicas, también debido a la distinta configuración que presenta cada una de las cunetas al variar la composición de las capas intermedias, partiendo de una primera cuneta seca tradicional e investigando la posible evolución y mejor funcionamiento de las otras dos configuraciones más innovadoras.

A la vista de los resultados, se puede observar un mejor aislamiento térmico del terreno en las Cunetas 2 y 3. Atendiendo a los ensayos en seco, la Cuneta 3, con árido ligero y árido reciclado en sus capas intermedias, es la que mejor desempeño tiene, con una resistencia térmica del conjunto de la estructura de 2,968 m<sup>2</sup>K/W, siendo por tanto la configuración que mejor capacidad aislante ofrece. En cuanto a las otras dos configuraciones, la Cuneta 2 presenta una resistencia térmica similar de 2,886 m<sup>2</sup>K/W, y la Cuneta 1 arroja un valor total de 1,583 m<sup>2</sup>K/W, muy inferior al de las configuraciones de cuneta con capa de arcilla expandida. Por tanto, esta comparativa de resultados permite determinar que las soluciones más innovadoras permiten un mejor aislamiento térmico debido a la mayor resistencia térmica que presentan, por lo que el uso de materiales como el árido ligero o el árido reciclado de origen mixto en este tipo de estructuras, en combinación con un sistema de geotermia superficial, es más que viable, haciendo que la influencia de la temperatura ambiente exterior en el intercambiador geotérmico colocado en el fondo de la cuneta sea menor.

Respecto a las propiedades que muestran las cunetas en los ensayos húmedos, se ha podido ver que las tres tipologías de cunetas presentan un significativo impacto negativo cuando los materiales que las componen se encuentran saturados. Como se puede observar en el resumen de propiedades térmicas que se expone en la Tabla 24, la Cuneta 2 es la que mayor resistencia térmica proporciona en condiciones húmedas, con un valor de 1,791 m<sup>2</sup>K/W, seguido de la Cuneta 3 con una resistencia térmica de 1,622 m<sup>2</sup>K/W y de la Cuneta 1 con un valor de 1,097 m<sup>2</sup>K/W. Gracias a esta diversidad de condiciones se ha podido determinar que el árido ligero presente en las últimas configuraciones proporciona a las estructuras una alta capacidad de aislamiento, tanto en condiciones húmedas como en secas, mientras que el árido reciclado muestra un menor

rendimiento con respecto al árido normal cuando se halla saturado. Por otra parte, analizando el resto de las propiedades térmicas de la estructura, se puede ver que tanto la transmitancia térmica como la conductividad térmica equivalente ven aumentado su valor por la saturación de los materiales, haciendo que las propiedades aislantes de la estructura sean peores en comparación con los ensayos en seco. Por lo tanto, el rendimiento de este tipo de sistemas para su utilización en regiones con climas secos será superior en comparación con su utilización en climas húmedos.

Para finalizar este análisis térmico, mediante la comparativa realizada de los resultados proporcionados por el equipo *TCi* y el ensayo en *Hot-Box*, se han podido determinar las diferencias en la conductividad térmica que presentan los materiales y su valor equivalente en condiciones de operación debido a la presencia de huecos y los fenómenos de convección y radiación que se producen, viéndose bastante incrementado en este último caso.

Desde una perspectiva integral, se concluye que la opción 3 es la más adecuada para la instalación de un sistema de geotermia superficial bajo una cuneta verde. Esta estructura cuenta en sus capas intermedias con árido ligero y árido reciclado de origen mixto, conformando una estructura con una elevada capacidad de almacenamiento y absorción de agua y con unas propiedades aislantes muy eficientes, tanto en condiciones húmedas como secas. Además, el empleo del árido reciclado permite realizar una economía circular de los residuos, contribuyendo al cuidado del medio ambiente mediante el reciclaje y la reutilización de residuos de la construcción.

Atendiendo al análisis térmico e hidráulico realizado, se puede corroborar la excelente solución que ofrecería la integración de sistemas de geotermia superficial bajo la estructura de una cuneta verde. Diseñar este tipo de estructuras teniendo en consideración los aspectos térmicos que puede proveer, permitiría dotar al entorno urbano de una superficie multidisciplinar, permitiendo la generación de energía a partir de recursos naturales a la vez que se realiza una correcta gestión del agua. A su vez, este estudio avala los resultados favorables obtenidos en anteriores trabajos en los que se estudió la combinación de este tipo de SUDS con sistemas de geotermia superficial [1], también realizado en pavimentos permeables [50].

Recientemente, en 2023, se ha publicado un artículo [106] donde diferentes autores han estimado las conductividades térmicas de diferentes suelos convencionales mediante un dispositivo de medición, siendo esto útil para el correcto diseño de un sistema de geotermia superficial. Atendiendo a los resultados obtenidos en dichos ensayos, se puede observar que se obtuvieron valores de conductividad térmica superiores a los que se dan para las diferentes estructuras estudiadas en este TFG. Por lo tanto, los resultados muestran que este tipo de cunetas, que han sido diseñadas teniendo en cuenta aspectos térmicos, presentan un mejor aislamiento térmico en comparación con los suelos convencionales, dejando ver que el diseño combinado de SUDS + BCG proporcionaría un mejor rendimiento de la BCG frente a una instalación en suelos convencionales.

No obstante, a pesar de los resultados obtenidos y de las conclusiones extraídas en el presente estudio, donde se destacan significativamente los beneficios que proporcionan esta combinación de sistemas en términos medioambientales, hidráulicos y térmicos, se hace necesario emprender nuevas líneas de investigación que respalden los resultados obtenidos y profundicen en el desarrollo de esta infraestructura multidisciplinar. A continuación, se exponen unas posibles líneas de investigación:

- Investigar y desarrollar diseños más eficientes y personalizados que puedan adaptarse a todo tipo de condiciones y situaciones climáticas específicas.
- Llevar a cabo ensayos de larga duración para evaluar el rendimiento de estas estructuras a lo largo del tiempo y en diferentes situaciones estacionales y climáticas, como el realizado en 2020 por diferentes autores [59].

- Realizar ensayos en campo con condiciones ambientales reales para determinar cuál es la ubicación óptima del intercambiador dentro de la estructura de la cuneta verde y las mejoras cuantificables de los CoP y ERR de las bombas de calor respecto al uso de sistemas de geotermia superficial en suelos convencionales.
- Evaluar, al igual que se hizo en *The Hanson Stewarby Office* con los firmes permeables [50], los beneficios ambientales, económicos y la eficiencia energética que se puede llegar a obtener con esta combinación de sistemas en el entorno urbano.

## 7. Planificación del estudio

A continuación, se procede a detallar el proceso de conformación del presente TFG, explicando las diferentes tareas realizadas y el tiempo de ejecución que supuso cada una de ellas.

El total este TFG se ha desarrollado en dos periodos de tiempo, uno de ellos dedicado a la realización de las diferentes tareas en el laboratorio y el otro destinado a la confección del actual documento.

### 7.1. Periodo de trabajo en laboratorio

Este periodo de trabajo se ha desarrollado en un total de 2 meses, donde se han desarrollado:

- Ensayos granulométricos.
- Ensayos de medición de los diferentes materiales con el equipo TCi.
- Ensayos Hot-Box de las diferentes cunetas.

Aunque este trabajo ha tomado un total de 2 meses, es necesario remarcar que el trabajo realizado como tal se ha desarrollado durante 13 días, pues la mayoría del tiempo ha sido ocupado por los plazos de ensayo de las diferentes cunetas. De estos 13 días, 2 han sido dedicados a la realización de ensayos granulométricos, 1 a la realización de ensayos con el equipo TCi y 10 al montaje y desmontaje de las diferentes cunetas para su posterior ensayo. Cada una de estas jornadas diarias ha tomado una duración aproximada de 4 horas, por lo que el tiempo de trabajo en el laboratorio ha supuesto un total de 52 horas. A continuación, en la Tabla 25 se muestra una representación tabular de las diferentes tareas realizadas, la duración de cada una de ellas y las fechas de inicio y fin.

Tabla 25. Distribución de tareas realizadas en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Sección	Actividad	Descripción	Duración (días)	Inicio	Fin
<b>REALIZACIÓN DE ENSAYOS EN LABORATORIO</b>	Actividad 1	Estudios granulométricos	2	2/12/22	3/12/22
	Actividad 2	Ejecución ensayos con el equipo TCi	1	7/12/22	7/12/22
	Actividad 3	Montaje ensayo cuneta 1 seco	1	15/12/22	15/12/22
	Actividad 4	Montaje y saturación ensayo cuneta 1 húmedo	2	21/12/22	22/12/22
	Actividad 5	Montaje ensayo cuneta 2 seco	1	29/12/22	29/12/22
	Actividad 6	Montaje y saturación ensayo cuneta 2 húmedo (1ª parte)	1	4/1/23	5/1/23
	Actividad 7	Montaje ensayo cuneta 2 húmedo (2ª parte)	1	12/1/23	12/1/23

	Actividad 8	Montaje ensayo cuneta 3 seco	1	19/1/23	19/1/23
	Actividad 9	Montaje y saturación ensayo cuneta 3 húmedo (1ª parte)	2	25/1/23	26/1/23
	Actividad 10	Montaje ensayo cuneta 3 húmedo (2ª parte)	1	2/2/23	2/2/23

A continuación, en la Figura 54 se muestran las diferentes tareas realizadas representadas en un diagrama de Gantt a partir de lo expuesto en la Tabla 25.

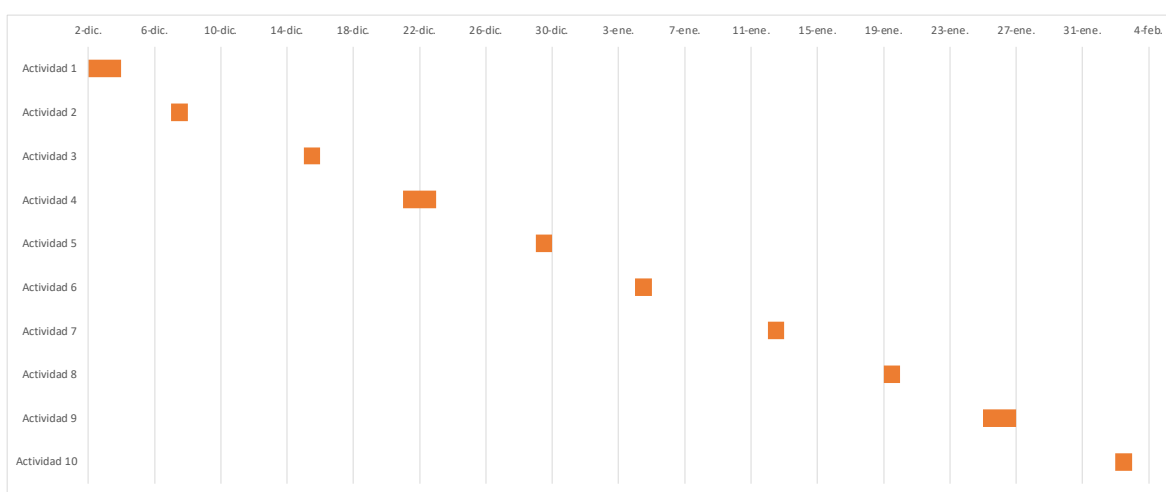


Figura 54. Diagrama de Gantt de las tareas realizadas en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

## 7.2. Periodo de confección del trabajo

Por otra parte, una vez se han realizado los diferentes ensayos en laboratorio, se ha procedido a confeccionar el presente documento.

El proceso de ejecución del trabajo ha tomado un total de casi 3 meses, desde el 01/03/2023 hasta el 08/06/2023, donde la planificación no ha sido uniforme en el tiempo y no se ha diferenciado entre días laborables y no laborables. El tiempo aproximado dedicado a la confección total de la memoria y anexos ha tomado un total de 348 horas, repartidas en un total de 87 días, siendo la duración de cada jornada de aproximadamente 4 horas de trabajo.

Así, el tiempo dedicado a cada sección del trabajo es la siguiente:

- Búsqueda de información (64 horas)
  - Introducción (28 horas)
  - Estado del arte (12 horas)
  - Materiales y métodos (24 horas)

- Contraste de la información (16 días)
  - Introducción (12 horas)
  - Materiales y métodos (4 horas)
- Entendimiento de la información recopilada (44 horas)
  - Introducción (20 horas)
  - Estado del arte (16 horas)
  - Materiales y métodos (8 horas)
- Cálculos, análisis y discusión resultados (68 horas)
  - Tratamiento de datos de temperatura y flujo térmico (28 horas)
  - Determinación propiedades térmicas (12 horas)
  - Elaboración de gráficos (8 horas)
  - Análisis y discusión de los resultados obtenidos (20 horas)
- Redacción y maquetación del documento (144 horas)
  - Introducción (36 horas)
  - Estado del arte (20 horas)
  - Materiales y métodos (36 horas)
  - Resultados y discusión (28 horas)
  - Objetivos y alcance del estudio (8 horas)
  - Conclusiones (4 horas)
  - Anexos (12 horas)
- Otros (12 horas)
  - Revisión de las modificaciones y corrección (8 horas)
  - Índices y bibliografía (4 horas)

A continuación, Tabla 26 se muestra una representación tabular detallando las diferentes tareas realizadas, la duración de cada una de ellas y las fechas de inicio y fin.



Tabla 26. Distribución de tareas para la confección del trabajo.

Fuente: Elaboración propia.

Sección	Actividad	Descripción	Duración (días)	Inicio	Fin
<b>OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO</b>	Actividad 11	Redacción y maquetación del apartado de objetivos	2	1/3/23	2/3/23
<b>INTRODUCCIÓN</b>	Actividad 12	Búsqueda y recopilación de información	7	3/3/23	9/3/23
	Actividad 13	Contraste de la información recopilada	3	7/3/23	9/3/23
	Actividad 14	Entendimiento de la información recopilada	5	10/3/23	14/3/23
	Actividad 15	Redacción y maquetación del apartado de antecedentes	2	15/3/23	16/3/23
	Actividad 16	Redacción y maquetación del apartado del drenaje sostenible	2	19/3/23	20/3/23
	Actividad 17	Redacción y maquetación del apartado de geotermia	3	24/3/23	26/3/23
	Actividad 18	Redacción y maquetación del apartado nexo agua-energía	2	26/3/23	27/3/23
	<b>ESTADO DEL ARTE</b>	Actividad 19	Búsqueda y recopilación de estudios	3	9/4/23
Actividad 20		Entendimiento de la información recopilada	4	12/4/23	15/4/23
Actividad 21		Redacción y maquetación del apartado de estado del arte	5	15/4/23	19/4/23
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	Actividad 22	Búsqueda y recopilación de la información	6	21/4/23	26/4/23
	Actividad 23	Contraste de la información recopilada	1	27/4/23	27/4/23
	Actividad 24	Entendimiento de la información recopilada	2	28/4/23	29/4/23

	Actividad 25	Redacción y maquetación del apartado de materiales	3	30/4/23	2/5/23
	Actividad 26	Redacción y maquetación del apartado de equipamiento	2	5/5/23	6/5/23
	Actividad 27	Redacción y maquetación del apartado de metodología	4	8/5/23	11/5/23
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	Actividad 28	Tratamiento de datos de temperatura y flujo térmico	7	12/5/23	18/5/23
	Actividad 29	Determinación propiedades térmicas	3	19/5/23	21/5/23
	Actividad 30	Elaboración de gráficos	2	21/5/23	22/5/23
	Actividad 31	Análisis y discusión de los resultados obtenidos	5	23/5/23	27/5/23
	Actividad 32	Redacción y maquetación del apartado de resultados y discusión	7	24/5/23	30/5/23
<b>CONCLUSIONES</b>	Actividad 33	Redacción y maquetación del apartado de conclusiones	1	31/5/23	31/5/23
<b>ANEXOS</b>	Actividad 34	Anexo I: Planificación y presupuesto	2	3/6/23	4/6/23
	Actividad 35	Anexo 2: Documentación	1	5/6/23	5/6/23
<b>OTROS</b>	Actividad 36	Revisión de las modificaciones y corrección	2	6/6/23	7/6/23
	Actividad 37	Índices y bibliografía	1	8/6/23	8/6/23

A continuación, en la Figura 55 se muestran las diferentes tareas realizadas representadas en un diagrama de Gantt a partir de lo expuesto en la Tabla 26.

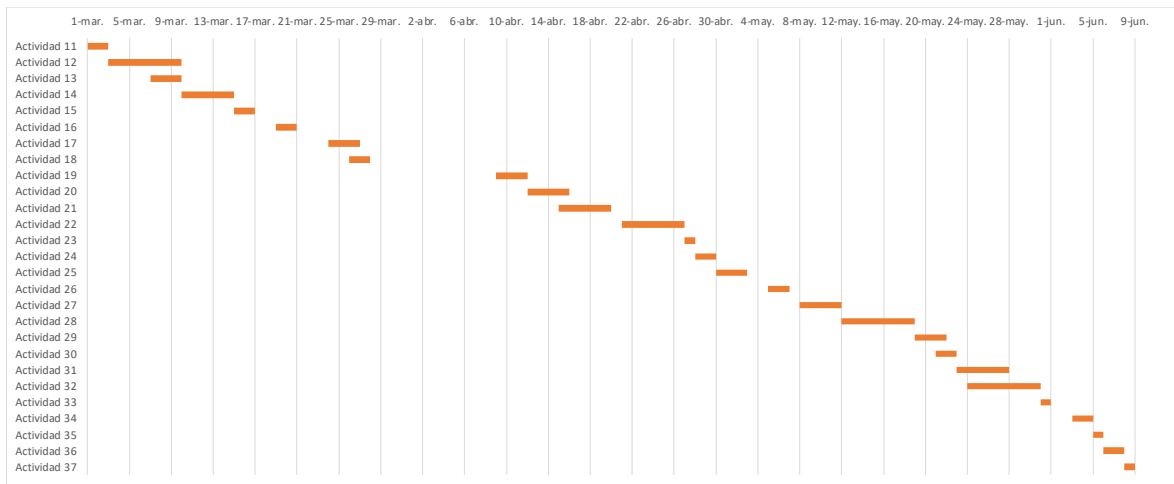


Figura 55. Diagrama de Gantt de las tareas realizadas para la confección del trabajo.

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

## 8. Bibliografía

1. Rey Mahía, C.; Sañudo Fontaneda, L.A.; Andrés Valeri, V.C.; Álvarez Rabanal, F.P.; Coupe, S.J.; Rocas García, J. Evaluating the Thermal Performance Of wet Swales Housing Ground Source Heat Pump Elements through Laboratory Modelling. *Sustainability* **2019**, *11*, 1–13, doi:10.3390/su11113118.
2. Salaet Fernández, S.; Roca Jusmet, J. Agotamiento de Los Combustibles Fósiles y Emisiones de CO<sub>2</sub>: Algunos Posibles Escenarios Futuros de Emisiones. *Rev. Galega Econ.* **2010**, *19*, 1–19.
3. de la Serna, C. ¿Cuánto Petróleo Queda En El Mundo (y Cómo Está Distribuido)? *Theobjective* 2021.
4. Welsby, D.; Price, J.; Pye, S.; Ekins, P. Unextractable Fossil Fuels in a 1.5 °C World. *Nature* **2021**, *597*, 230–234, doi:10.1038/s41586-021-03821-8.
5. Mondragón, F. Ciclos Del Dióxido de Carbono En La Formación y Utilización de Combustibles Fósiles y Su Efecto En El Cambio Climático. *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.* **2021**, *45*, 833–849, doi:10.18257/raccefyn.1364.
6. Karnauskas, K.B.; Shelly L., M.; Schapiro, A.C. Fossil Fuel Combustion Is Driving Indoor CO<sub>2</sub> Toward Levels Harmful to Human Cognition. *GeoHealth* **2020**, *4*, 1–8, doi:10.1029/2019GH000237.
7. Vermeersen, B.L.A.; Slangen, A.B.A.; Gerkema, T.; Baart, F.; Cohen, K.M.; Dangendorf, S.; Duran-Matute, M.; Frederikse, T.; Grinsted, A.; Hijma, M.P.; et al. Sea-Level Change in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands J. Geosci. / Geol. en Mijnb.* **2018**, *97*, 79–127, doi:10.1017/njg.2018.7.
8. Juste, I. Datos Sobre El Deshielo de Los Polos Available online: <https://www.ecologiaverde.com/datos-sobre-el-deshielo-de-los-polos-187.html> (accessed on 16 March 2023).
9. Europa Press El Deshielo Costero En La Antártida Deja Entrever Una Nueva Isla. *Eur. Press* 2022.
10. Orús, A. El Sector Energético En España - Datos Estadísticos Available online: <https://es.statista.com/temas/7651/el-sector-energetico-en-espana/#topicOverview> (accessed on 16 March 2023).
11. Jorrián, J.G. La Dependencia Energética Le Costó a España 2.100 Millones En Julio, El Peor Dato Desde 2018. *El Confid.* 2021.
12. La Información Luz, Carburantes, Alimentos... Un Año de Guerra de Ucrania Con Los Precios Al Alza. *La Inf.* 2023.
13. Rey Rodríguez, L.; Palomares, A. ¿Qué Son Las COP? Un Resumen de Las Más Icónicas Available online: <https://fundspeople.com/es/glosario/que-son-las-cop-resumen-de-las-mas-icnicas/> (accessed on 19 March 2023).
14. Linares Fleites, G.; Valera Pérez, M.A. El Origen Y Evolución De Las Conferencias De Las Partes (COP) Sobre El Cambio Climático. *RD-ICUAP* **2022**, *8*, 28–41.
15. UNFCCC Conference of the Parties (COP) Available online: <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop> (accessed on 14 March 2023).
16. Canales Canarias, L. Comentario de Las Cumbres de La Naciones Unidas Sobre Cambio Climático. *La Rev. Derecho* **2015**, *35*, 5–25, doi:10.5377/lrd.v35i0.1781.
17. Reyes Haczek, Á. COP 27: ¿han Servido Para Algo Estas Reuniones Contra El Cambio Climático? ¿Qué Se Espera Este Año? Available online: <https://cnnespanol.cnn.com/2022/11/04/cop27-cambio-climatico-explainer-orix/> (accessed on 19 March 2023).
18. Naciones Unidas *La Agenda 2030 y Los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una Oportunidad Para América Atina y El Caribe*; 2018; ISBN 978-92-1-058643-6.
19. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*; 2020;

20. Gobierno del Principado de Asturias *Estrategia de Especialización Inteligente (S3) Del Principado De Asturias 2021-2027*; 2022;
21. Europa Press Aprobada La Estrategia de Especialización Inteligente, Que Movilizará Más de 314 Millones En I+D+i Hasta 2027. *Eur. Press* 2022.
22. Perales Momparler, S.; Andrés Doménech, I. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a La Gestión Del Agua de Lluvia. *Retema. Rev. técnica medio Ambient.* **2008**, *21*, 92–104.
23. Calvo Sánchez, B. Qué Es El Ciclo Del Agua y Sus Etapas. *unCOMO - MD* 2022.
24. HiSoUR Arte Cultura Sistema de Drenaje Sostenible Available online: <https://www.hisour.com/es/sustainable-drainage-system-40544/> (accessed on 15 March 2023).
25. European Commission *CORDIS Results Pack on Nature-Based Solutions: A Thematic Collection of Innovative EU-Funded Research Results*; 2020; ISBN 978-92-78-42282-0.
26. European Commission *Construir Una Infraestructura Verde Para Europa*; 2014; ISBN 978-92-79-39996-1.
27. European Commission *The Multifunctionality of Green Infrastructure*; 2012;
28. de la Fuente García, L.; Perales Momparler, S.; Rico Cortés, M.; Andrés Doménech, I.; Marco Segura, J.B. *Guía Básica Para El Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible En La Ciudad de València*; 2021; ISBN 978-84-9089-386-9.
29. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) Available online: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/vertido-desbordamiento-sistema-saneamiento-dss/Vertidos-DSS-Sistemas-Urbanos-Drenaje-Sostenible-SUDS.aspx> (accessed on 23 March 2023).
30. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodríguez-Hernandez, J.; Castro-Fresno, D. *Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*; 2012;
31. Paviprint Sistema de Pavimento Hormigón Permeable Available online: <https://www.paviprint.com/conoces-el-sistema-de-pavimento-hormigon-permeable/> (accessed on 22 March 2023).
32. Abellán García, A.I. Pozos y Zanjas de Infiltración Available online: <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/pozos-y-zanjas-de-infiltracion/> (accessed on 22 March 2023).
33. Soto-Fernández, R.; Perales-Momparler, S. El Camino Del Agua En El Paisaje Urbano, Barrio de Bon Pastor, Barcelona. In Proceedings of the V Water Engineering Conference; A Coruña, 2017; pp. 1–9.
34. ZinCo Green Roof Centro Comercial Lagoh, Sevilla Available online: <https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/referencias/centro-comercial-lagoh-sevilla> (accessed on 26 March 2023).
35. Castro Fresno, D.; Rodríguez Bayón, J.; Rodríguez Hernández, J.; Ballester Muñoz, F. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Interciencia* **2005**, *30*, 255–260.
36. Ayuntamiento de Madrid; Perales Momparler, S.; Calcerrada Romero, E. *Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales En Zonas Verdes y Otros Espacios Libres*; 2018;
37. Natural Resources Conservation Service Filter Strips Available online: <http://nwrwm.eu/measure/filter-strips> (accessed on 22 March 2023).
38. Perales Momparler, S.; Andrés Domenech, I.; Fernández Escalante, A.E. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) En La Hidrogeología Urbana. In Proceedings of the IX Simposio de Hidrogeología AEH-IGME; Elche, 2008; pp. 1–12.
39. Greene, R.B. Maintaining Stormwater Systems Available online: <https://www.gleassociates.com/maintaining-stormwater-systems/> (accessed on 22 March 2023).
40. NC Wetlands Suggs Mill Pond Available online:

- <https://www.srs.fs.usda.gov/compass/2020/09/08/climate-change-and-the-future-of-southern-wetlands/> (accessed on 22 March 2023).
41. Woods Ballar, B.; Wilson, S.; Udale-Clarke, H.; Illman, S.; Scott, T.; Ashley, R.; Kellagher, R. *The SuDS Manual*; 2015; ISBN 978-0-86017-697-8.
  42. City of Virginia Beach Maintainig a Dry Swale Available online: <https://www.vbgov.com/government/departments/public-works/surface-water-regulation/Documents/SWMF-Fact-Sheets/DrySwale.pdf#:~:text=To Maintain Your Dry Swale Prune%2C weed%2C water%2C,to no shorter than 2-1%2F2 to 3 inches.> (accessed on 25 March 2023).
  43. Nunez, C. Explicación de Qué Son Los Combustibles Fósiles Available online: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-fosiles> (accessed on 4 June 2023).
  44. García Gil, A.; Garrido Schneider, E.A.; Mejías Moreno, M. *Geotermia Somera: Fundamentos Teóricos y Aplicación*; 2020; ISBN 978-84-9138-105-1.
  45. IDAE; IGME *Manual de Geotermia*; 2008; ISBN 978-84-96680-35-7.
  46. ATECYR; IDAE *Guía Técnica de Diseño de Sistemas de Intercambio Geotérmico de Circuito Cerrado*; 2012; ISBN 948-84-96680-60-9.
  47. Llopis Trillo, G.; Rodrigo Angulo, V. *Guía de La Energía Geotérmica*; 2008;
  48. Robles, G. ¿Cómo Funciona Una Bomba de Calor? Available online: <https://gerardorobles.es/bomba-de-calor/> (accessed on 4 June 2023).
  49. Rey Mahía, C.; Álvarez Rabanal, F.P.; Coupe, S.J.; Sañudo Fontaneda, L.Á. The Role of Geothermal Heat Pump Systems in the Water–Energy Nexus. In *Geothermal Heat Pump Systems. Green Energy and Technology*; Springer, Cham, 2023; pp. 185–215 ISBN 978-3-031-24524-4.
  50. Charlesworth, S.M.; Faraj-Lloyd, A.S.; Coupe, S.J. Renewable Energy Combined with Sustainable Drainage: Ground Source Heat and Pervious Paving. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *68*, 912–919, doi:10.1016/j.rser.2016.02.019.
  51. World Economic Forum *Inspiring Future Cities & Urban Services Shaping the Future of Urban Development & Services Initiative*; 2016;
  52. Rey Mahía, C.; Álvarez Rabanal, F.P.; Sañudo Fontaneda, L.A.; Hidalgo Tostado, M.; Suárez Inclán, A.M. An Experimental and Numerical Approach to Multifunctional Urban Surfaces through Blue Roofs. *Sustainability* **2022**, *14*, 1–15, doi:10.3390/su14031815.
  53. Abellán García, A.I. Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible versus Cambio Climático Available online: <https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/cambio-climatico-y-suds> (accessed on 1 April 2023).
  54. Correa, É.N.; Flores Larsen, S.; Lesino, G. Isla de Calor Urbana: Efecto de Los Pavimentos. Informe de Avance. *AVERMA. Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.* **2003**, *7*, 25–30.
  55. Arellano, B.; Roca, J. Áreas Verdes e Isla de Calor Urbana. In Proceedings of the CTV 2018: XII Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual: “Ciudades y Territorios Inteligentes”.; Mendoza, 2018; pp. 417–432.
  56. Del Castillo García, G.; Borinaga Treviño, R.; Sañudo Fontaneda, L.A.; Pascual Muñoz, P. Influence of Pervious Pavement Systems on Heat Dissipation from a Horizontal Geothermal System. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2013**, *17*, 956–967, doi:10.1080/19648189.2013.837842.
  57. Faraj-Lloyd, A.; Charlesworth, S.M.; Coupe, S.J. Sustainable Drainage Systems and Energy: Generation and Reduction. In *Sustainable Surface Water Management: A Handbook for SUDS*; John Wiley & Sons, 2016; pp. 177–192 ISBN 9781118897690.
  58. Coupe, S.J.; Faraj, A.S.; Nnadi, E.O.; Charlesworth, S.M. Integrated Sustainable Urban Drainage Systems. In *Water Efficiency in Buildings*; John Wiley & Sons, 2013; pp. 147–163 ISBN 978-1-118-45661-3.

59. Sañudo Fontaneda, L.A.; Roces García, J.; Coupe, S.J.; Barrios Crespo, E.; Rey Mahía, C.; Álvarez Rabanal, F.P. Vegetated Swale through Long-Term Hydrological. *Water* **2020**, *12*, 1–16, doi:10.3390/w12102781.
60. Scholz, M.; Grabowiecki, P. Combined Permeable Pavement and Ground Source Heat Pump Systems to Treat Urban Runoff. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **2008**, *84*, 405–413, doi:10.1002/jctb.2054.
61. Coupe, S.J.; Tota Maharaj, K.; Scholz, M.; Grabiowiecki, P. Water Stored Within Permeable Paving and the Effect of Ground Source Heat Pump Applications on Water Quality. **2009**, 1–10.
62. Tota Maharaj, K.; Scholz, M.; Ahmed, T.; French, C.; Pagaling, E. The Synergy of Permeable Pavements and Geothermal Heat Pumps for Stormwater Treatment and Reuse. *Environ. Technol.* **2010**, *31*, 1517–1531, doi:10.1080/09593331003782409.
63. Tota Maharaj, K.; Scholz, M.; Coupe, S.J. Modelling Temperature and Energy Balances within Geothermal Paving Systems. *Road Mater. Pavement Des.* **2011**, *12*, 315–344, doi:10.1080/14680629.2011.9695248.
64. Scholz, M.; Tota Maharaj, K.; Grabowiecki, P. Modelling of Retrofitted Combined Permeable Pavement and Ground Source Heat Pump Systems. **2012**, 1–10.
65. Novo, A. V.; Bayon, J.R.; Castro Fresno, D.; Rodriguez Hernandez, J. Temperature Performance of Different Pervious Pavements: Rainwater Harvesting for Energy Recovery Purposes. *Water Resour. Manag.* **2013**, *27*, 5003–5016, doi:10.1007/s11269-013-0270-y.
66. Tota Maharaj, K.; Paul, P. Sustainable Approaches for Stormwater Quality Improvements with Experimental Geothermal Paving Systems. *Sustainability* **2015**, *7*, 1388–1410, doi:10.3390/su7021388.
67. Andrés Valeri, V.C.; Sañudo Fontaneda, L.A.; Rey Mahía, C.; Coupe, S.J.; Alvarez Rabanal, F.P. Thermal Performance of Wet Swales Designed as Multifunctional Green Infrastructure Systems for Water Management and Energy Saving. In Proceedings of the 2nd International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment; MDPI, 2018; Vol. 2, pp. 1–4.
68. Yildiz, A.; Stirling, R.A. Thermo-Hydrological Behaviour of Green Infrastructure: A Comparative Field and Laboratory Study. *Geomech. Energy Environ.* **2021**, *25*, 100219, doi:10.1016/j.gete.2020.100219.
69. Poulsen, S.E.; Andersen, T.R.; Tordrup, K.W. Full-Scale Demonstration of Combined Ground Source Heating and Sustainable Urban Drainage in Roadbeds. *Energies* **2022**, *15*, 1–21, doi:10.3390/en15124505.
70. Andersen, T.R.; Poulsen, S.E.; Tordrup, K.W. The Climate Road-A Multifunctional Full-Scale Demonstration Road That Prevents Flooding and Produces Green Energy. *Water* **2022**, *14*, 1–16, doi:10.3390/w14040666.
71. Janssen, E.; Seters, T. Van Thermal Mitigation of Stormwater Management Pond Outflows Using Geothermal Cooling. *J. Water Manag. Model.* **2022**, 1–14, doi:10.14796/JWMM.C483.
72. Saint-Gobain Weber Leca Available online: <https://www.leca.com/> (accessed on 21 April 2023).
73. Laterlite Arcilla Expandida Laterlite: Árido Ligero, Aislante y Resistente. Available online: <https://www.laterlite.es/productos/aridos-ligeros/arcilla-expandida-laterlite/> (accessed on 21 April 2023).
74. Laterlite ¿Qué Es La Arcilla Expandida? Available online: <https://www.laterlite.es/el-grupo/que-es-la-arcilla-expandida/> (accessed on 21 April 2023).
75. Saint-Gobain Weber Ficha Técnica Arcilla Expandida de Altas Resistencias Available online: <https://www.es.weber/soluciones-ligeras-con-arlita/arlita/arlita-dur> (accessed on 22 April 2023).
76. AENOR UNE-EN 933-1:2012. *Ensayos Para Determinar Las Propiedades Geométricas de Los Áridos. Parte 1: Determinación de La Granulometría de Las Partículas.*; Spain, 2012;
77. The Editors of Encyclopaedia Britannica Limestone. *Britannica* 2023.

78. Science Learning Hub - Pokapū Akoranga Pūtaiao Limestone Uses Available online: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/472-limestone-uses> (accessed on 23 April 2023).
79. Arquitectura Sostenible 8 Ventajas de La Piedra Natural En Construcción Sostenible Available online: <https://arquitectura-sostenible.es/8-ventajas-la-piedra-natural-construccion-sostenible/> (accessed on 23 April 2023).
80. Ministerio de Fomento *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) - Parte 5ª. Firmes*; Spain, 2015;
81. Lobeto Álvarez, N. Evaluación Sobre El Uso De Áridos Reciclados De Hormigón Y Mixtos Como Capas De Árido En Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible, University of Oviedo, 2022.
82. COGERSA Declaración de Prestaciones de Árido Combinado de Origen Mixto 0/32 Available online: [https://www.cogersa.es/mtsp\\_cache/55881.pdf](https://www.cogersa.es/mtsp_cache/55881.pdf) (accessed on 24 April 2023).
83. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico Origen, Naturaleza y Estructura Del Suelo Vegetal Available online: [https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/fondo/pdf/41683\\_4.pdf](https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/fondo/pdf/41683_4.pdf) (accessed on 8 April 2023).
84. Online Soil What Is Topsoil? Available online: <https://www.onlinesoil.co.uk/knowledge-base/general-info/what-is-topsoil> (accessed on 24 April 2023).
85. Atlantis corporation Atlantis - Green Cities for Life Available online: <https://www.atlantiscorporation.com.au/> (accessed on 25 April 2023).
86. SUDS Sistemas Urbanos Drenaje Sostenible S.L. Ficha Técnica Atlantis Flo-Cell® Available online: <https://drenajesostenible.com/productos/> (accessed on 25 April 2023).
87. Atlantis corporation Atlantis Flo-Cell® Available online: <https://www.atlantiscorporation.com.au/flo-cell/> (accessed on 14 April 2023).
88. Geotexan S.A. Malla Geotextil, ¿qué Es y Cuáles Son Sus Usos? Available online: <https://geotexan.com/malla-geotextil-usos/#> (accessed on 26 April 2023).
89. DANOSA Declaración de Prestaciones DANOFELTY PY 150 Available online: [https://d7rh5s3nxmpy4.cloudfront.net/CMP1814/files/DOP\\_DANOFELT\\_PY\\_150\\_ES.pdf](https://d7rh5s3nxmpy4.cloudfront.net/CMP1814/files/DOP_DANOFELT_PY_150_ES.pdf) (accessed on 26 April 2023).
90. ASTM International *ASTM D7984-16. Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument*; USA, 2016;
91. C-Therm Technologies C-Therm TCI Operator Manual Available online: [https://ctherm.com/files/C-Therm\\_TCI\\_Thermal\\_Conductivity\\_-\\_2016.pdf](https://ctherm.com/files/C-Therm_TCI_Thermal_Conductivity_-_2016.pdf) (accessed on 5 May 2023).
92. Martínez Martínez, J.E.; Alvarez Rabanal, F.P.; Lázaro, M.; Alonso Matínez, M.; Alvear, D.; del Coz Díaz, J.J. Assessment of Lightweight Concrete Thermal Properties at Elevated Temperatures. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 0–18, doi:10.3390/app112110023.
93. Alonso Matínez, M.; Martínez Martínez, J.E.; del Coz Díaz, J.J.; Álvarez Rabanal, F.P. Caracterización Térmica de La Madera de Castaño Para Su Uso Como Elemento Constructivo. In Proceedings of the LIGNOMAD 19. Congreso sobre Construcción con Madera y otros Materiales Lignocelulósicos; Santiago de Compostela, 2019; pp. 222–226.
94. Alvarez Rabanal, F.P.; del Coz Díaz, J.J.; Alonso Matínez, M.; Martínez Martínez, J.E. Thermal and Structural Optimization of Lightweight Concrete Mixtures to Manufacture Composite Slabs. In Proceedings of the 5th International Conference on Mechanical Models in Structural Engineerings; Alicante, 2019; pp. 655–667.
95. AENOR *UNE-EN ISO 8990:1997. Determinación de Las Propiedades de Transmisión Térmica En Régimen Estacionario. Métodos de La Caja Caliente Guardada y Calibrada. (ISO 8990:1994)*; Spain, 1997;



96. ASTM International *ASTM C1363 – 05. Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus*; USA, 2005;
97. Hukseflux Thermal Sensors TRSYS01 Manual / Version 0810 2004.
98. D'Amelio, V.; Hukseflux Thermal Sensors TRSYS04 Manual Extension 8 Sensors V1101 2011.
99. ISO *ISO 9869-1:2014. Thermal Insulation — Building Elements — In-Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance — Part 1: Heat Flow Meter Method*; Switzerland;
100. ASTM International *ASTM C1155 - 95. Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data*; USA, 2017;
101. ASTM International *ASTM C1046 - 95. Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*; USA, 2021;
102. Hukseflux Thermal Sensors HFP01 HFP03 Manual V2124 Available online: [https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/HFP01\\_HFP03\\_manual\\_v2124\\_0.pdf](https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/HFP01_HFP03_manual_v2124_0.pdf) (accessed on 2 May 2023).
103. Çengel, Y.A. *Transferencia de Calor y Masa. Un Enfoque Práctico*; Tercera ed.; McGrawHill, 2007; ISBN 978-970-10-6173-2.
104. Incropera, F.P.; DeWitt, D.P. *Fundamentos de Transferencia de Calor*; Cuarta ed.; Prentice Hall, 1999; ISBN 970-17-0170-4.
105. Holman, J.P. *Transferencia de Calor*; Décima ed.; McGrawHill, 1999; ISBN 968-26-0649-7.
106. Sivaprasad, A.; Basu, P. Comparative Assessment of Transient- and Steady-State Soil Thermal Conductivity Using a Specially Designed Consolidometer. *Geothermics* **2023**, *107*, doi:10.1016/j.geothermics.2022.102583.





Universidad de  
Oviedo



GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS MINEROS Y

ENERGÉTICOS

Mención en Recursos Energéticos, Combustibles y Explosivos

# **ANEXO I: VALORACIÓN ECONÓMICA**

**Estudio del flujo térmico en tipologías de  
sistemas urbanos de drenaje sostenible:  
cunetas verdes**

**JUNIO, 2023**



## Índice

1. Presupuesto .....	3
1.1. Programas y equipamiento informático.....	3
1.2. Materiales y equipamiento de laboratorio .....	4
1.3. Material fungible .....	5
1.4. Personal .....	5
1.5. Gastos generales .....	6
1.6. Coste total del estudio.....	6



## Índice de tablas

Tabla 1. Coste económico del hardware.....	4
Tabla 2. Coste económico del software.....	4
Tabla 3. Coste de materiales.....	4
Tabla 4. Coste de equipos y herramientas.....	5
Tabla 5. Coste de personal.....	6
Tabla 6. Coste total del proyecto.....	7

## 1. Presupuesto

Como se expuso en la memoria de este documento, el presente proyecto se ha desarrollado durante varios meses donde ha sido necesaria la realización de varias tareas y la utilización de diferentes equipos, con su correspondiente gasto.

A continuación, se procede a detallar las diferentes partidas consideradas en este estudio además de su gasto, permitiendo definir el siguiente presupuesto:

- Programas y equipamiento informático: en este apartado se incluyen los equipos de software y hardware que han sido necesarios para la realización del estudio
- Materiales y equipamiento de laboratorio: en el periodo de trabajo en laboratorio se han utilizado diferentes materiales y ha sido necesario el empleo de diferentes equipos para el ensayo y monitorización de las diferentes tareas, así como diferentes herramientas.
- Material fungible: se incluyen en este apartado los diferentes materiales consumidos y que han supuesto un gasto económico
- Personal: como se expuso anteriormente, el presente trabajo ha necesitado del empleo de múltiples horas de trabajo, siendo valoradas en este apartado.
- Gastos generales: se incluyen aquí los gastos no incluidos en los anteriores apartados, como por ejemplo gastos de transporte, electricidad, telefonía, etc.

### 1.1. Programas y equipamiento informático

Se engloban en esta sección los gastos relacionados con los equipos informáticos y los diferentes programas utilizados para el desarrollo de este proyecto. Puesto que estos equipos y programas no están destinados únicamente a la realización del actual proyecto, se incluye la siguiente expresión para la estimación de su coste:

$$\text{Coste} = \text{Precio unitario} \cdot C_{\text{amortización}} ; C_{\text{amortización}} = \frac{T_{\text{uso}}}{T_{\text{amortización}}} \quad (1)$$

donde:

- $C_{\text{amortización}}$  (*adimensional*), es el coeficiente de amortización del equipo o programa.
- $T_{\text{proyecto}}$  (*años*), es el tiempo en que se ha utilizado el equipo o programa en el proyecto
- $T_{\text{amortización}}$  (*años*), es el tiempo estimado de amortización del equipo o programa

Por lo tanto, los costes de hardware y software se exponen en la Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.

Tabla 1. Coste económico del hardware.

Fuente: Elaboración propia.

Hardware	Cantidad	Precio unitario	Amortización	Coste
Portátil MacBook Pro A2141	1 ud.	2.499,00 €	0,15	374,85 €
<b>Coste del hardware</b>				<b>374,85 €</b>

Tabla 2. Coste económico del software.

Fuente: Elaboración propia.

Software	Cantidad	Precio unitario	Amortización	Coste
macOS Big Sur	1 ud.	0,00 €	0,15	0,00 €
Microsoft 365	1 ud.	134,00 €	0,19	25,46 €
Autodesk Auto-CAD 2018	1 ud.	2342,00 €	0,10	234,20
<b>Coste del software</b>				<b>258,66 €</b>

## 1.2. Materiales y equipamiento de laboratorio

Se incluyen en este apartado todos los costes de material utilizados en este proyecto para la realización de los ensayos. Cabe mencionar que muchos de estos materiales ya han sido adquiridos con anterioridad o cedidos, siendo aun así incluidos en la Tabla 3.

Por otra parte, se incluyen en la Tabla 4 los gastos asociados a los diferentes equipos, herramientas, accesorios, etc. Se utiliza para el cálculo del coste de este apartado la ecuación anteriormente descrita (1).

Tabla 3. Coste de materiales.

Fuente: Elaboración propia.

Material	Cantidad	Precio unitario (€/cant.)	Coste
Árido calizo ZA 0/32	1 t.	10,22	10,22 €
Arlita® leca® dur	2 sacos	6,45	12,90 €
Árido reciclado	1 t.	9,50	9,50 €
Tierra vegetal	1 t.	23,70	23,70 €
Caja Atlantis Flo-Cell®	0,5 m <sup>2</sup>	13,50	6,75 €
Geotextil	1 ud.	67,00	67,00 €

<b>DANOFELT PY 150</b>			
Placas aislantes <b>DANOPREN TR 50</b>	3 ud.	4,27	12,81 €
Placas aislantes <b>SOPRA XPS</b>	3 ud.	10,49	31,47 €
Espuma expansiva de poliuretano	2 ud.	5,94	11,88 €
Caja de plástico con desagüe	1 ud.	36,95	36,95 €
<b>Coste de materiales</b>			<b>223,18 €</b>

Tabla 4. Coste de equipos y herramientas.

Fuente: Elaboración propia.

Equipos y herramientas	Cantidad	Precio unitario	Camortización	C
Hot-box y equipo climático	1 ud.	44.000,00	0,23	10.120,00 €
Equipo TRSYS	1 ud.	18.000,00	0,23	4.140,00 €
Equipo TCi	1 ud.	35.000,00	0,15	5.250,00 €
Herramientas y accesorios	1 ud.	235,00	0,43	101,05 €
EPIs	1 ud.	300,00	0,54	162, 00 €
<b>Coste de equipos y herramientas</b>				<b>19.773,05 €</b>

### 1.3. Material fungible

Dentro de este apartado solo se asumirán algunos gastos dedicados al fotocopiado de diferentes documentos en diversas etapas del proyecto, con un coste total aproximado de 35,00 €.

### 1.4. Personal

La presenta partida de gastos tiene la intención de calcular la retribución que se ha de entregar al personal por las horas dedicadas al desarrollo de este estudio técnico.



Tabla 5. Coste de personal

Fuente: Elaboración propia.

Tarea	Tiempo invertido (horas)	Coste unitario (€/horas)	Coste
Realización de ensayos	52	40,00	2.080,00 €
Búsqueda de información	64	40,00	2.560,00 €
Contraste de la información	16	40,00	640,00 €
Entendimiento de la información recopilada	44	40,00	1.760,00 €
Cálculos, análisis y discusión resultados	68	40,00	2.720,00 €
Redacción y maquetación del documento	144	40,00	5.760,00 €
Otros	12	40,00	480,00 €
<b>Coste de personal</b>			<b>16.000,00 €</b>

### 1.5. Gastos generales

Se dedican a esta partida aquellos otros gastos derivados de la realización del estudio técnico que no han sido recogidos en los anteriores apartados. Los gastos principales de este apartado se corresponden con los derivados del desplazamiento para la realización de los diferentes ensayos o para acudir a tutorías. La estimación de estos gastos es de aproximadamente 180 €.

### 1.6. Coste total del estudio

En la Tabla 6 se muestra la suma de las anteriores partidas, que corresponderá con el coste total del proyecto y al que se le aplicará un 6% adicional de beneficio industrial y un 21% de IVA.

Tabla 6. Coste total del proyecto

Fuente: Elaboración propia.

Partida	Coste
Coste económico del hardware	374,85 €
Coste económico del software	258,66 €
Coste de materiales	223,18 €
Coste de equipos y herramientas	19.773,05 €
Coste del material fungible	35,00 €
Coste de personal	16.000,00 €
Gastos generales	180,00 €
<b>Coste bruto del estudio</b>	<b>36.844,74 €</b>
<b>Beneficio industrial (6%)</b>	<b>2.210,68 €</b>
<b>TOTAL</b>	<b>39.055,42 €</b>
<b>IVA (21%)</b>	<b>8.201,64 €</b>
<b>Coste neto del estudio</b>	<b>47.257,06 €</b>



Universidad de  
Oviedo



GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS MINEROS Y

ENERGÉTICOS

Mención en Recursos Energéticos, Combustibles y Explosivos

# **ANEXO II: DOCUMENTACIÓN DE MATERIALES**

**Estudio del flujo térmico en tipologías de  
sistemas urbanos de drenaje sostenible:  
cunetas verdes**

**JUNIO, 2023**



## Índice

1. Ficha técnica <i>Arlita® Leca® dur</i> .....	2
2. Declaración de prestaciones <i>Arlita® Leca® dur</i> .....	4
3. Declaración de prestaciones árido reciclado.....	5
4. Ficha técnica <i>Atlantis Flo-Cell® 52 mm</i> .....	7
5. Declaración de prestaciones geotextil <i>DANOFELTY PY 150</i> .....	8

## 1. Ficha técnica *Arlita® Leca® dur*



### **Arlita® Leca® dur**

#### arcilla expandida de altas resistencias

- Excelente relación ligereza/dureza
- Bombeable
- Estable en el tiempo
- Respetuosa con el medio ambiente
- Tamaño: 2-10 mm

#### APLICACIONES

- Recrecidos ligeros de altas prestaciones.
- Hormigones ligeros estructurales (>25 MPa).
- Drenajes.
- Jardinería.
- Nivelaciones.
- Cubiertas verdes.

#### SOPORTES

- Forjados.
- Cubiertas.
- Láminas de polipropileno y geotextiles.
- Poliestireno.
- P.V.C.
- Terreno compactado.

#### PREPARACIÓN DEL SOPORTE

- Asegurar que la superficie del forjado sea consistente y esté totalmente limpia.
- Proteger vigas y correas de madera (si las hay) colocando una lámina de polietileno antes de verter el hormigón.
- Prever juntas de dilatación.
- Humedecer el soporte.

#### PRESENTACIÓN

Sacos de plástico de 50 l.  
Palets de 3 m<sup>3</sup> (60 sacos) con palet intermedio.

#### RENDIMIENTO

Aproximadamente, 50 l (un saco)  
/5 m<sup>2</sup> y cm de espesor.

#### COLORES

Grisáceo.

#### CONSERVACIÓN

El material es imperecedero, sólo se degrada el envase.



#### COMPOSICIÓN

Arcilla expandida.

#### RECOMENDACIONES DE USO

Prever juntas de dilatación en los encuentros con los petos.



Línea consulta gratuita 900 35 25 35  
[www.weber.es](http://www.weber.es) - [info@weber.es](mailto:info@weber.es)

## MODO DE EMPLEO



Amasar arcilla expandida **Arlita® Leca® dur** con un 10-20% de agua y un 15-30% de cemento, y verter o bombear\* sobre el soporte.



Extender el mortero con un espesor mínimo de 3 cm, regleándolo sobre maestras recuperables.



Dejar fraguar un mínimo de 12 horas en condiciones normales, antes de ser revestido.

\* Según la aplicación, se puede verter o bombear en seco

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS



### Características de empleo generales

Conservación	producto imperecedero
<b>Prestaciones finales</b>	
Granulometría	2 - 10 mm
Densidad	350 kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica (EN12664)	0,1 W/(m·K)
Resistencia a la fragmentación y machaques	1 MPa
Temperatura máxima utilización	1150°C
Partículas machacadas	25% masa
Cloruros	< 0,1% Cl
Sulfatos solubles en ácido	< 0,4% SO <sub>3</sub>
Azufre total	< 0,2 % S
Absorción de agua	< 34% masa seca

Estos resultados se han obtenido en ensayos realizados en condiciones estándar, y pueden variar en función de las condiciones de puesta en obra.



1029

UNE-EN 13055-1

Agregado ligero artificial obtenido por proceso de materias naturales. Para la utilización en hormigón, prefabricados, morteros e inyectados en edificios y en obras de ingeniería civil.


La caracterización ecotoxicológica del producto revela que está clasificado como inerte (Anexo III del DL 152/2002).

No ha sido determinado el uso en ambientes sujetos a hielo y deshielo.


Sistema de gestión  
 certificado de acuerdo  
 a la norma ISO 9001



## 2. Declaración de prestaciones Arlita® Leca® Dur



### DECLARACIÓN DE PRESTACIONES



Nº. DoP - PT - 0017 - 01

1. Código de identificación única del producto tipo:  
**(0017) Arlita® Leca® Dur**

2. Tipo, lote o número de serie o cualquier otro elemento que permita la identificación del producto de construcción como se establece en el artículo 11, apartado 4:  
saco: (fecha, hora) marcados en la embalage  
big bag y granel: (fecha, hora) marcados en la embalage o en el alborán

3. Uso o usos previstos del producto de construcción, con arreglo a la especificación técnica armonizada aplicable, tal como lo establece el fabricante:  
Áridos ligeros obtenidos por tratamiento de materiales naturales  
Para su empleo en hormigón, prefabricados y morteros en edificios y en obras de ingeniería civil

4. Nombre, nombre o marca registrados y dirección de contacto del fabricante según lo dispuesto en el artículo 11, apartado 5:  
Saint-Gobain Weber Portugal, S.A.  
Zona Industrial da Taboeira, 3800-055 Aveiro, Portugal  
Tel: (+351) 234 10 10 10 / Fax: (+351) 234 30 11 48 / www.weber.com.pt

5. En su caso, nombre y dirección de contacto del representante autorizado cuyo mandato abarca las tareas especificadas en el artículo 12, apartado 2:  
**Spain:**  
Saint-Gobain Weber Cemarska  
Crta C - 17 Km.2  
08110 Montcada i Reixac, Barcelona  
www.weber.es

6. Sistema o sistemas de evaluación y verificación de la constancia de las prestaciones del producto de construcción tal como figura en el anexo V:  
Sistema 2+

7. En caso de declaración de prestaciones relativa a un producto de construcción cubierto por una norma armonizada:  
SGS-ICS - SERVIÇOS INTERNACIONAIS DE CERTIFICAÇÃO, organismo de certificación del control de producción notificado nº1029,  
tarea realizada, la vigilancia, evaluación y supervisión permanentes del control de producción en fábrica por el sistema 2+  
y emitido el certificado de conformidad del control de producción en fábrica: 1029 - CPD - PT04/01236

8. En caso de declaración de prestaciones relativa a un producto de construcción para el que se ha emitido una evaluación técnica europea:  
No aplicable

9. Prestaciones declaradas

Características esenciales / Prestaciones	Especificaciones técnicas armonizadas
• Forma de las partículas: Aproximadamente esféricas	EN 13055-1:2002/AC:2004
• Tamaño de las partículas: 2 – 10 mm [15-90]% pasan	
• Densidad aparente: 350 kg/m <sup>3</sup> (± 15%)	
• Porcentaje de partículas machacadas: ≤ 25% masa	
• Limpieza: NPD	
• Resistencia a la fragmentación/machaqueo: ≥ 1,3 N/mm <sup>2</sup>	
• Composición/contenido - Cloruros: < 0,1% Cl - Sulfatos solubles en ácido: < 0,4% SO <sub>3</sub> - Azufre total: < 0,2% S	
• Estabilidad en volumen: NPD	
• Absorción de agua: < 34% masa seca	
• Sustancias peligrosas - Emisión de radioactividad (para los áridos de yacimiento radioactivos destinados al empleo en hormigón de edificios): NPD - Liberación de metales pesados: NPD - Liberación de carbonos poliaromáticos: NPD - Liberación de otras sustancias peligrosas: NPD	
• Durabilidad frente ao hielo y deshielo: NPD	
• Durabilidad frente a la reactividad álcali-silíce: NPD	

NPD = Prestación No Determinada

Quando en virtud de los artículos 37 o 38 la documentación técnica específica ha sido utilizada, los requisitos que cumple el producto:  
No aplicable

10. Las prestaciones del producto identificado en los puntos 1 y 2 son conformes con las prestaciones declaradas en el punto 9.  
La presente declaración de prestaciones se emite bajo la sola responsabilidad del fabricante identificado en el punto 4.  
Firmado por y en nombre del fabricante por:


**Aveiro, 22 de Abril de 2013**

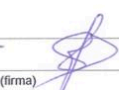
(lugar y fecha de emisión)

(1) Luis Carlos Matos Campos Folque, Administrador Delegado

(2) Paulo Jorge Correia Santos, Apoderado


(nombre, cargo)

(1) 

(2) 

(firma)

### 3. Declaración de prestaciones árido reciclado



**Declaración de Prestaciones  
Aridos para capas granulares  
Nº2 OMX-AC-T-0/32-R**

MARCAO CE  
Conforme al Reglamento Europeo de Productos de la Construcción nº 305/2011

**CE**

**20**

**COGERSA, SAU**  
C/Marqués de Santa Cruz, 12, 4º  
33007 Oviedo

**OMIX-AC-T-0/32-R**

EN 13242:2003  
ARIDOS PARA CAPAS  
GRANULARES Y CAPAS  
TRATADAS CON  
CONGLOMERADOS  
HIDRAULICOS PARA USO  
EN CAPAS  
ESTRUCTURALES DE  
FIRMES

**AENOR,**  
**ORGANISMO NOTIFICADO**  
**Nº0099**

ÁRIDOS OBTENIDOS POR TRATAMIENTO DE MATERIALES RECICLADOS





**Declaración de Prestaciones  
Áridos para capas granulares  
Nº2 OMX-AC-T-0/32-R**

DECLARACION DE PRESTACIONES	
Conforme al Reglamento Europeo de Productos de la Construcción nº 305/2011	
<b>1.- Nombre y código de identificación del producto</b>	Árido combinado de origen Mixto 0/32
<b>2.- Nombre y dirección del fabricante:</b>	COGERSA SAU. Centro de Tratamiento de Residuos de Asturias Carretera de COGERSA, 1125, 33697 Serín (Gijón), Asturias
<b>3.- Uso previsto:</b>	Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.
<b>4.- Sistema de evaluación y verificación de la constancia de las prestaciones:</b>	Sistema 2+
<b>5.- Norma armonizada y Organismo Notificado:</b>	EN 13242:2002+A1:2007 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes. AENOR, Organismo notificado nº 0099,

REQUISITO	CATEGORÍA	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO
Tamaño	0/32	
Forma del árido grueso	FI <sub>35</sub>	EN 933-3
Densidad de las partículas	2.5±0.2	EN 1097-6
Granulometría	VER GRANULOMETRIA CARACTERISTICA CATEGORIA TOLERANCIA GTA25	EN 933-1
Contenido en finos	f7	
Equiv Arena/Azul de Metileno	SE<50 / AM<5	Anexo A (en 13242)
Porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	C <sub>90/3</sub>	EN 933-5
Resistencia a la fragmentación del árido grueso	LA60	EN 1097-2
Componentes que afectan a la estabilidad de volumen de las escorias de horno alto y férricas para áridos no tratados	PND	EN 1744-1
Absorción de agua	<7%	EN 1097-6
Clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados	Rcug≥50	EN-933-11
Sulfatos solubles en ácido	AS1	EN 1744-1
Sulfatos solubles en agua	SS <sub>NR</sub>	EN 1744-1
Azufre total	S1	EN 1744-1
Componentes que alteran el tiempo de fraguado y de endurecimiento de las mezclas.	NO CONTIENE	EN 1744-1
Resistencia al desgaste del árido grueso	M DE 50	EN 1097-1
Resistencia al hielo y al deshielo	PND	EN 1367-1/2
Sonnenbrand	PND	EN 1367-3 EN 1097-2

**GRANULOMETRIA DECLARADA 0/32 MIXTO**

Tamiz	40	31.5	22,4	16	11.2	8	5.6	4	2	1	0,5	0,25	0,063
% pasa	100	95	62	60	50	40	36	30	20	16	15	10	5

Las prestaciones del producto identificado anteriormente son conformes por el conjunto de prestaciones declaradas. La presente declaración de prestaciones se emite de conformidad con el reglamento(UE) nº 305/2011, bajo la sola responsabilidad del fabricante arriba identificado

Firmado por y en nombre del fabricante por Irina Vigil Cereijo (Rble. Planta RCD's COGERSA, SAU)

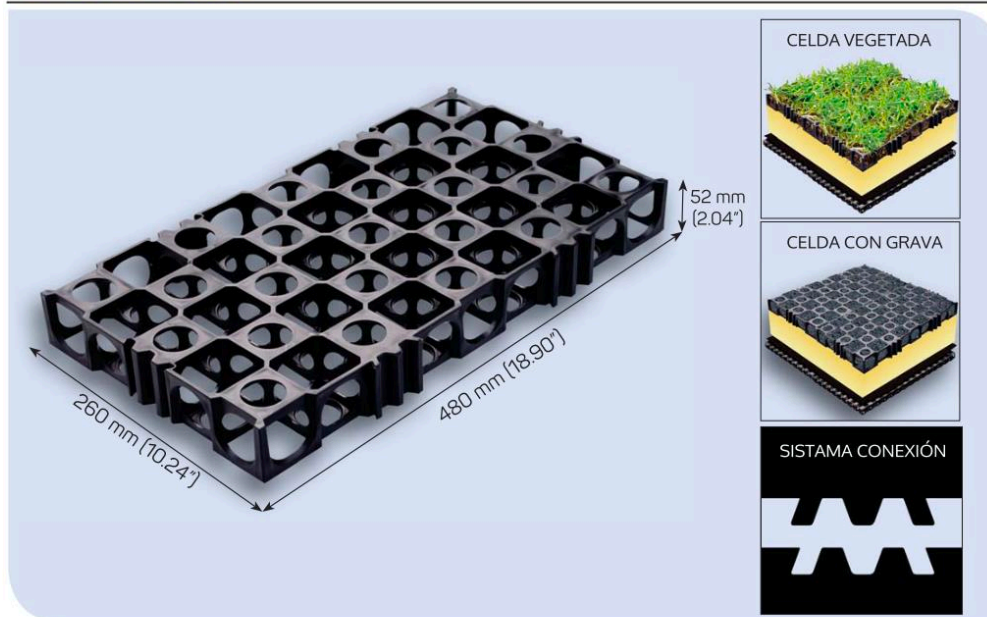


En Serín ( Gijón ) a 18 de diciembre de 2020 .

#### 4. Ficha técnica Atlantis Flo-Cell® 52 mm



### atlantis® Celda 52 mm



Tamaño celda	Alto		Ancho		Largo	
	52 mm	2.04 in	260 mm	10.24 in	480 mm	18.90 in
Flujo celda horizontal	150 L/min/m (1% pendiente)		Flujo celda vertical		1200 L/min/m	
Peso celda	450 gramos		1.65 lbs			
Peso por m2 (ft2)	3.60 kg		1.23 lbs/ft2			
Resistencia a la compresión	Entre 110 y 140 ton/m2		156.50 psi			
Capacidad acumulación	50 L/m2		Superficie celda		0.125 m2	
Celdas por m2	8		Color		Negro	
Ratio de huecos	Volumen hueco disponible: 90%			Porosidad superficie drenante: 70%		
Material	100% Polipropileno reciclado					
Resistencia Química y Biológica	Material altamente resistente a agresiones químicas y biológicas presentes en la tierra.					
Temperatura de servicio	-10°C a 70°C (14F° a 15 F°)					
Esperanza de vida material	Superior a 50 años (Nota: Instalado bajo superficie)					

SUDS S.L. C/ Portuete 23 Edif. CEMEI B, Ofic. 201 Donostia-San Sebastián Tel. 943 394399 e-mail: suds@drenajesostenible.es  
www.drenajesostenible.com

## 5. Declaración de prestaciones geotextil *DANOFELTY PY 150*

### DECLARACION DE PRESTACIONES (DoP)

Nº DoP: GEO-PY-0002

11/11/2020

VERSION 07

**1. Código de Identificación única del producto tipo:**

GEOTEXTIL DE POLIESTER

**2. Tipo, Lote, Nº de Serie o cualquier otro elemento que permita la identificación del producto de construcción, como se establece en el artículo 11(4) del RPC:**

DANOFELT PY 150

**3. Uso ó usos previstos del producto de construcción , con arreglo a la especificación técnica armonizada aplicable, tal como establece el fabricante:**

Geotextil de poliester para aplicación en: carreteras, vías de tráfico, vías férreas, movimientos de tierra, cimentaciones, estructuras de contención, sistemas de drenaje, control de la erosión, embalses, presas, canales, túneles, estructuras subterráneas, vertederos de residuos sólidos y proyectos de contenedores de residuos líquidos.

Usos previstos: "F", "F+S", "F+S+D" y "P"

**4. Nombre, razón social ó marca comercial y dirección de contacto del fabricante según lo dispuesto en el artículo 11(5) del RPC:**

DANOSA- POL. IND. SECTOR 9-19290 FONTANAR-GUADALAJARA-ESPAÑA

Tel.: +34 949 88 82 10 - info@danosa.com

**5. En su caso, nombre y dirección de contacto del representante autorizado cuyo mandato abarca las tareas especificadas en el artículo 12(2) del RPC:**

No aplica

**6. Sistema ó sistemas de evaluación y verificación de la constancia de las prestaciones del producto de construcción tal como figura en el anexo V:**

2+

**7. Para los productos cubiertos por una norma armonizada: Nombre y número del organismo notificado/ Tarea realizada/ Por el sistema (1+,1, 2+,3)/nº certificado y fecha de concesión:**

AENOR:0099

Evaluación del Control de Producción en Fábrica

Sistema 2+

Certificado del Control de Producción en Fábrica, nº y fecha: 0099/CPR/A42/0046/0047/0048/0049 - 05/03/2007

## 8. Prestaciones declaradas:

Características esenciales	Prestaciones	Especificación Técnica Armonizada
<b>Resistencia a la tracción:</b>		
Fuerza máxima tracción L*, (kN/m)	1,3 (-0,4)	EN-13249:2016
Fuerza máxima tracción T*, (kN/m)	1,3 (-0,4)	EN-13250:2016
Alargamiento L*, (%)	105 ± 40	EN-13251:2016
Alargamiento T*, (%)	105 ± 40	EN-13252:2016
<b>Resistencia al punzonado estático (CBR), (kN)</b>	0,4 (-0,2)	EN-13253:2016
<b>Resistencia a la perforación dinámica (cono), (mm)</b>	35 (+5)	EN-13254:2016
<b>Medida de abertura, (µm)</b>	90 ± 20	EN-13255:2016
<b>Permeabilidad al agua, (m/s)</b>	0,04468 (-0,005)	EN-13256:2016
<b>Flujo de agua en el plano, (m<sup>2</sup>/s)</b>	20 kPa: 2,7*10 <sup>-7</sup> (-0,2*10 <sup>-7</sup> )	EN-13257:2016
<b>Eficacia de la protección, (kN/m<sup>2</sup>)</b>	9,0*10 <sup>3</sup> (-0,3*10 <sup>3</sup> )	EN-13265:2016
<b>Durabilidad, (años)</b>	>25; suelo natural; 4<pH<9;T<25°C	

L\* significa dirección longitudinal, T\* significa dirección transversal

Las prestaciones del producto identificado en los puntos 1 y 2 son conformes con las prestaciones declaradas en el punto 8

La presente DoP se emite de conformidad con el Reglamento (UE) nº 305/2011, bajo la sola responsabilidad del fabricante arriba identificado. Firmado por y en nombre del fabricante por:

Nombre y Cargo	Lugar y Fecha de emisión	Firma
Carlos Castro Martín Responsable técnico	Fontanar 11/11/2020	