



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LAS CUBIERTAS VERDES CON EL OBJETIVO DE MEJORAR LA RESILIENCIA DE LAS CIUDADES.

Trabajo realizado por:
Diego Carrera Pérez

Dirigido:
Ignacio Lombillo Vozmediano
Jaime Carpio García

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, Octubre de 2020

TRABAJO FIN DE MASTER

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LAS CUBIERTAS VERDES CON EL OBJETIVO DE MEJORAR LA RESILIENCIA DE LAS CIUDADES

AUTOR: DIEGO CARRERA PÉREZ

DIRECTORES: IGNACIO LOMBILLO VOZMEDIANO Y JAIME CARPIO GARCÍA

CONVOCATORIA: SEPTIEMBRE DE 2020

PALABRAS CLAVE: CUBIERTAS VERDES, SOSTENIBILIDAD, ANÁLISIS MULTICRITERIO, ELECTRE, SUSTRATO, GEOTEXTIL

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo fundamental llevar a cabo un análisis multicriterio a través de diferentes indicadores seleccionados bajo criterios de sostenibilidad, empleando el método ELECTRE, sobre una serie de sustratos y capas separadoras propuestas con el fin de realizar una recomendación de utilización de aquellos materiales que mejor respondan a los indicadores propuestos de tipo medioambiental, social y económico. Para realizar este análisis, la importancia otorgada a cada indicador será evaluada a través de la bibliografía consultada, de la consulta a expertos del sector y, finalmente, a partir del juicio de los directores y el autor del proyecto.

Los materiales estudiados responden a tres categorías diferentes: material habitual de recurrente utilización en aplicaciones de cubiertas vegetadas; material reciclado o reutilizado y material novedoso, de propuesta propia, del que no existan evidencias de un uso recurrente en este campo. Son los que siguen:

- Sustratos: mezcla de tierra vegetal, gravilla calcárea y arena silíceas; mezcla de tierra vegetal, ladrillo reciclado triturado y arena silícea; mezcla de tierra vegetal, ladrillo reciclado triturado, arena silícea y geoespuma fenólica.
- Capa separadora: geocompuesto no tejido negro-verde, geotextil blanco agujeteado y geoespuma fenólica.

Un 'indicador' es definido como el valor o la información que sirve para conocer o valorar las características y la intensidad de un hecho o para determinar su evolución futura. Para el presente proyecto se ha elaborado una lista de indicadores vinculados directamente con los distintos criterios de sostenibilidad, que son el medioambiental, el económico y el social. A partir de una propuesta inicial, depurada por la consulta con expertos en la materia que aportaron su visión sobre la importancia, o no, de estos indicadores y tras ser puesta en contraste con los medios técnicos existentes y disponibles en los laboratorios de la Escuela, se alcanzó una propuesta en forma de lista con la que se ha evaluado el rendimiento de los materiales seleccionados en los términos marcados.

La evaluación de los indicadores se ha realizado empleando el método de análisis multicriterio conocido como ELECTRE, según el cual se asignan pesos a los diferentes indicadores en función de su importancia y, tras calificar los rendimientos mostrados por los materiales ensayados, se calculan las dominancias reales existentes entre ellos de forma objetiva y comparativa.

La conclusión final y más palpable del proyecto se cimienta en el cambio de paradigma que suponen las cubiertas verdes en términos de sostenibilidad, permitiendo al sector de la construcción adaptarse a los nuevos estándares vinculados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible a través del respeto al medio ambiente, la reducción de emisiones y la optimización de consumos en la totalidad del ciclo de vida, no sólo de los materiales con los que se construyen las estructuras, sino también de los procesos a través de los cuales estas se

hacen realidad y de los usos o aplicaciones a los que estos espacios se destinan. A esto responden los materiales que de este Trabajo Fin de Máster se destilan como los más sostenibles y que mayores beneficios aportan en términos de medio ambiente, sociedad y economía.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE PROPERTIES OF THE GREEN ROOFS WITH THE AIM OF IMPROVING THE RESILIENCE OF CITIES

AUTHOR: DIEGO CARRERA PÉREZ

DIRECTED BY: IGNACIO LOMBILLO VOZMEDIANO Y JAIME CARPIO GARCÍA

CALL: SEPTIEMBRE DE 2020

KEYWORDS: GREEN ROOFS, SUSTAINABILITY, MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS, ELECTRE, SUBSTRATE, GEOTEXTILE

The main objective of this Project is to carry out a multi-criteria analysis through different indicators selected under sustainability criteria, using the ELECTRE method, on a series of substrates and separating layers proposed in order to make a recommendation for the use of those materials that best respond to the proposed environmental, social and economic indicators. To carry out this analysis, the importance given to each indicator will be evaluated through the literature consulted, the consultation of experts in the sector and, finally, the judgement of the directors and the author of this Project.

The materials studied fall into three different categories: habitual material of recurrent use in applications on green roofs; recycled or reused material and new material, of our own proposal, of which there is no evidence of recurrent use in this field. These are the following:

- Substrates: mixture of topsoil, limestone gravel and silica sand; mixture of topsoil, crushed recycled brick and silica sand; mixture of topsoil, crushed recycled brick, silica sand and phenolic geofabric.
- Separating layer: black-green non-woven geocomposite, white needle-punched geotextile and phenolic foam.

An 'indicator' is defined as the value or information that serves to know or value the characteristics and intensity of an event or to determine its future evolution. For the present Project, a list of indicators has been drawn up which are directly linked to the different criteria of sustainability, which are environmental, economic and social. From an initial proposal, refined by consultation with experts in the field who provided their vision on the importance, or not, of these indicators and after being contrasted with the existing technical means available in the laboratories of the School, a proposal was reached in the form of a list with which the performance of the selected materials has been evaluated in the marked terms.

The evaluation of the indicators has been carried out using the multi-criteria analysis method known as ELECTRE, according to which weights are assigned to the different indicators according to their importance and, after qualifying the performances shown by the tested materials, the real dominances existing among them are calculated in an objective and comparative way.

The final and most palpable conclusion of the project is based on the change of paradigm that green roofs represent in terms of sustainability, allowing the construction sector to adapt to the new standards linked to the Objectives of Sustainable Development through respect for the environment, the reduction of emissions and the optimization of consumption throughout the entire life cycle, not only of the materials with which the structures are built, but also of the processes through which these become a reality and the uses or applications to which these spaces are destined. This is the reason why the materials that are distilled from

this Master's Degree are the most sustainable and the most beneficial in terms of the environment, society and economy.

Índice

1	Introducción	11
1.1	Motivación.....	13
1.2	Definición de objetivos	14
1.2.1	Objetivo general.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
1.3	Metodología	15
1.4	Estructura de la memoria	17
2	Estado del arte	18
2.1	Cubiertas convencionales.....	19
2.2	Cubiertas verdes.....	21
2.3	Estructura de una cubierta verde	25
2.4	Sustrato y capa separadora	31
2.4.1	Sustrato	31
2.4.2	Capa separadora	36
3	Metodología.....	38
3.1	Análisis multicriterio.....	39
3.1.1	Método Electre	40
3.1.2	Criterios sobre indicadores - Justificación.....	41
3.1.3	Indicadores seleccionados - Definición	46
3.1.4	Depuración de indicadores (panel de expertos)	49
3.1.5	Criterios para Método ELECTRE	52
3.2	Definición de campaña experimental.....	53
3.2.1	Elección de los sustratos y geotextiles (capa separadora-filtrante).....	54
3.2.2	Consideraciones previas a los ensayos.....	60
3.2.3	Descripción de los ensayos	60
4	Análisis de resultados	77
4.1	Resultados de los experimentos.....	78
4.1.1	Coste de ciclo de vida	78
4.1.2	Huella de carbono	81
4.1.3	Composición en materia orgánica del sustrato.....	87
4.1.4	Aislamiento térmico	88
4.1.5	Densidad aparente	89
4.1.6	Permeabilidad	91
4.1.7	Contenido en materia orgánica del agua efluente.....	94
4.1.8	Punzonamiento estático	95

4.1.9	Perforación dinámica	97
4.1.10	Abertura característica.....	97
4.1.11	Masa por unidad de superficie.....	98
4.1.12	Resistencia a la hidrólisis.....	99
4.1.13	Resistencia a la oxidación.....	102
4.1.14	Compactación	106
4.2	Resultados método Electre	106
4.2.1	Sustrato	107
4.2.2	Geotextil.....	110
4.2.3	Sección compuesta (sustrato-geotextil).....	113
5	Valoración de resultados	119
6	Conclusiones	122
7	Bibliografía	125
8	ANEJOS.....	132
8.1	Encuesta a expertos.....	132
8.1.1	Experto 1	133
8.1.2	Experto 2	133
8.1.3	Experto 3	134
8.1.4	Experto 4.....	134
8.1.5	Experto 5	135
8.1.6	Experto 6	135
8.1.7	Experto 7	136
8.1.8	Experto 8	136
8.1.9	Experto 9	137
8.1.10	Experto 10.....	137
8.2	Informe de laboratorio – LAGUC	138

Índice de figuras

Figura 1. Efectos de la impermeabilización urbana (iagua.es, 2016)	12
Figura 2. Metodología del Trabajo (Fuente: elaboración propia)	15
Figura 3. Partes de la envolvente térmica de un edificio (CEX v2.3)	19
Figura 4. Cubierta plana (interempresas.net, 2012)	20
Figura 5. Cubierta inclinada (vilssa.com, 2013).....	20
Figura 6. Tumba de corredor en Newgrange, Irlanda, 3500 a.C (Fuente: 101viajes.com)	21
Figura 7. Recreación de la aldea vikinga de Stöng, Islandia (Museo Nacional de Islandia)	22
Figura 8. Terminal marítima de Yokohama, Japón. Construida entre los años 2000 y 2002 (Urbanarbolismo, s.f.)	22
Figura 9. Cub. extensiva (Urbanarbolismo, s.f.)	24
Figura 10. Cubierta intensiva (Fuente: isopan.es).....	24
Figura 11. Cubiertas verdes por uso en la ciudad de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, 2019)	24
Figura 12. Cubierta verde en el barrio financiero de Londres (Fuente: livingroofs.org/gallery-home/)	25
Figura 13. Ejemplo de cubierta visitable (Fuente: ZinCo).....	25
Figura 14. Sistema modular	26
Figura 15. Hidrosiembra (Fuente: Lipani Group).....	26
Figura 16. Diversidad de sustratos según las necesidades (Fuente: Portal Frutícola).....	26
Figura 17. Detalle constructivo del solape de la capa filtrante (Fuente: chova.com, 2020)	27
Figura 18. Ejemplo capa drenante "DELTA-FLORAXX" (Fuente: cosella-dorken.com)	28
Figura 19. Ejemplo de barrera anti-raíz (Fuente: Horticola de Pedralbes).....	29
Figura 20. Ejemplo poliestireno extruido XPS (Fuente: DANOSA).....	29
Figura 21. Proceso de impermeabilización de una cubierta (Fuente: Impermeabilizaciones Jigón).....	29
Figura 22. Ejecución de capa de formación de pendientes (Fuente: obrasonline.com, 2020)	30
Figura 23. Sección de sumidero en cubierta vegetada (Fuente: quelepasaamicasa.com, 2019)	30
Figura 24. Criterios de sostenibilidad (Fuente: elaboración propia)	41
Figura 25. Relación indicadores y sostenibilidad	48
Figura 26. Criterios de elección de materiales	54
Figura 27. Espuma fenólica en forma de 'foamy agrícola' (Hydro Environment, 2020)	55
Figura 28. Grava.....	56
Figura 29. Arena silíceo	56
Figura 30. Compost	56
Figura 31. Ladrillo triturado	56
Figura 32. Geoespuma	56
Figura 33. Aspecto sustrato S1.....	57
Figura 34. Aspecto sustrato S2.....	57
Figura 35. Aspecto sustrato S3.....	57
Figura 36. Agua almacenada en l/m ² en función del espesor de muestra (Tziampou, et al., 2019)	59
Figura 37. Recopilación de los datos para el análisis de la producción en el coste del ciclo de vida	61
Figura 38. Factores que inciden sobre la huella de carbono de un producto	62
Figura 39. Muestras de sustrato, previo a la calcinación (Fotografía tomada en laboratorio)	62
Figura 40. Probetas en acondicionamiento (Fotografía tomada en laboratorio).....	63
Figura 41. Ensayo de permeabilidad perpendicular al plano, máquina de ensayo y detalle de colocación de probeta (Fotografía tomada en laboratorio)	64
Figura 42. Ejemplo de ensayo de punzonado estático (Fotografía tomada en laboratorio).....	65
Figura 43. Ejemplo de curva típica Fuerza de punzonado - Hundimiento del punzonado.....	65
Figura 44. Ejemplo del sistema de fijación (Fuente: UNE-EN ISO 12236)	66
Figura 45. Dispositivo típico para el ensayo de caída de cono con pantalla de protección (Fuente: UNE-EN ISO 13433).	67
Figura 46. Ejemplo de cono y varilla guía (Fuente: UNE-EN ISO 13433)	67
Figura 47. Probeta ensayada a caída de cono (Fotografía tomada en laboratorio)	68
Figura 48. Ejemplo de aparato de tamizado (Fuente: UNE-EN ISO 13433).....	69
Figura 49. Zona requerida de la granulometría del material granular (Fuente: UNE-EN ISO 13433).....	70
Figura 50. Ensayo abertura característica (Fotografía tomada en laboratorio)	70

Figura 51. Filtrado ensayo abertura característica (Fotografía tomada en laboratorio).....	70
Figura 52. Disposición general y detallada de las probetas sumergidas para hidrólisis (Fotografía tomada en laboratorio)	71
Figura 53. Disposición en el horno de las probetas sometidas a oxidación (Fotografía tomada en laboratorio)	72
Figura 54. Ejemplo de pesado de probeta (Fotografía tomada en laboratorio)	73
Figura 55. Sistema de permeabilidad sobre sección compuesta (Fotografías tomadas en laboratorio)	74
Figura 56. Permeabilidad - Medida del caudal (Fotografías tomadas en laboratorio).....	75
Figura 57. Calcinación a 550 °C en horno de mufla (Fotografía tomada en laboratorio)	76
Figura 58. Plan mantenimiento - Coste de ciclo de vida (elaboración propia).....	80
Figura 59. Resultados permeabilidad - Curva promedio (elaboración propia)	92
Figura 60. Resultados permeabilidad - Sección compuesta (Elaboración propia)	94
Figura 61. Contenido en MO del efluente.....	95
Figura 62. Resultados punzonamiento estático G1 y G2– Gráficas (extraído de testXpert V11.0)	96
Figura 63. Aspecto tras desgarro de las muestras de G1 y G2 ensayadas a CBR	96
Figura 64. Aspecto tras desgarro de las muestras de G1 y G2 ensayadas a CBR	97
Figura 65. Ensayo abertura característica - Geoespuma (Fotografías tomadas en laboratorio).....	98
Figura 66. Agua que pasa a través de la geoespuma, sin presencia apreciable de sólidos	98
Figura 67. Colorimetría – Hidrólisis (Fotografías tomadas en laboratorio).....	100
Figura 68. Diferencia de aspecto entre muestra en recepción (izda) y tras hidrólisis (dcha)	101
Figura 69. Resultados oxidación - Alteración geoespuma (Fotografías tomadas en laboratorio).....	102
Figura 70. Muestras extraídas del horno - Oxidación (Fotografía tomada en laboratorio)	104
Figura 71. Muestras en estado de recepción	104
Figura 72. Resultados oxidación - Gráfica permeabilidad (elaboración propia)	104
Figura 73. Colorimetría – Oxidación, registros del colorímetro	105
Figura 74. Orden de prevalencia sobre secciones compuestas (elaboración propia)	118
Figura 75. Pestaña de 'Instrucciones' del fichero Excel.....	132
Figura 76. Pestaña de 'Indicadores' del fichero Excel	132
Figura 77. Pestaña de 'Valoración' del fichero Excel.....	132

Índice de tablas

Tabla 1. Características de cubiertas extensivas e intensivas	23
Tabla 2. Valores recomendados para los sustratos de uso en cubiertas extensivas.....	32
Tabla 3. Valores recomendados para los sustratos de uso en cubiertas intensivas	34
Tabla 4. Pesos aproximados de materiales de la capa de sustrato para cubiertas intensivas	36
Tabla 5. Propuesta inicial de indicadores.....	44
Tabla 6. Normalización de las encuestas recibidas	50
Tabla 7. Resumen de la importancia de los indicadores	50
Tabla 8. Lista definitiva de indicadores	51
Tabla 9. Pesos asignados a los indicadores adoptados para valorar los sustratos.....	52
Tabla 10. Pesos asignados a los indicadores adoptados para valorar los geotextiles.....	52
Tabla 11. Pesos asignados a los indicadores adoptados para valorar la sección compuesta	53
Tabla 12. Tipos de espuma fenólica en función de la estructura celular (Ashida & Iwasaki, 1995)	59
Tabla 13. Temperaturas y duraciones de la etapa de envejecimiento (Fuente: UNE-EN ISO 13438)	72
Tabla 14. Precio unitario de los materiales.....	78
Tabla 15. Precios y rendimientos de materiales y de la mano de obra por m ² de cubierta verde.....	79
Tabla 16. Coste de la unidad de obra “Metro cuadrado de sección (geotextil y sustrato) acabada”	79
Tabla 17. Coste de ciclo de vida	80
Tabla 18. Composición de los geotextiles	81
Tabla 19. Método de caracterización CML, estimado para 1 kg de material – Geotextiles (Base de datos GaBi 9.1)	81
Tabla 20. Impacto por unidad de superficie - Geotextiles	82
Tabla 21. Composición de sustratos	83
Tabla 22. Método de caracterización CML, estimado para 1 kg de material – sustratos (Base de datos GaBi 9.1).....	84
Tabla 23. Impacto por unidad de superficie - Sustratos	86
Tabla 24. Huella de carbono (Elaboración propia).....	87
Tabla 25. Resultados composición MO sustratos	87
Tabla 26. Transmitancias térmicas estimadas (elaboración propia).....	89
Tabla 27. Densidad de recepción sustratos	89
Tabla 28. Densidad saturada sustratos	90
Tabla 29. Densidad aparente combinación sustrato-geotextil	90
Tabla 30. Densidad saturada combinación sustrato-geotextil	90
Tabla 31. Variaciones porcentuales de densidad aparente a saturada para las distintas combinaciones S-G	90
Tabla 32. Resultados permeabilidad	91
Tabla 33. Resultados permeabilidad - Sección compuesta	92
Tabla 34. Variación media permeabilidades	93
Tabla 35. Resultados MO efluente.....	94
Tabla 36. Resultados punzonado estático	95
Tabla 37. Resultados perforación dinámica.....	97
Tabla 38. Resultados abertura característica	97
Tabla 39. Resultados masa por unidad de superficie.....	99
Tabla 40. Resultados colorimetría - Hidrólisis.....	100
Tabla 41. Resultados hidrólisis - Permeabilidad.....	101
Tabla 42. Resultados oxidación - Abertura característica	102
Tabla 43. Resultados oxidación - Permeabilidad	103
Tabla 44. Resultados colorimetría - Oxidación.....	105
Tabla 45. Resultados compactación.....	106
Tabla 46. Pesos indicadores de sustratos	107
Tabla 47. Calificación alternativas de sustrato.....	107
Tabla 48. Matriz de concordancia sustrato	108
Tabla 49. Matriz de discordancia sustrato	109
Tabla 50. Dominancias sustratos	109
Tabla 51. Pesos indicadores de geotextiles	110

Tabla 52. Calificación alternativas de geotextiles	110
Tabla 53. Matriz de concordancia geotextiles	112
Tabla 54. Matriz de discordancia geotextiles.....	112
Tabla 55. Dominancias geotextiles	112
Tabla 56. Pesos indicadores sección compuesta	113
Tabla 57. Calificación alternativas de sección compuesta	113
Tabla 58. Matriz de concordancia sección compuesta	114
Tabla 59. Matriz de discordancia sección compuesta.....	115
Tabla 60. Dominancias sección compuesta	115
Tabla 61. Valoraciones del Experto 1.....	133
Tabla 62. Valoraciones del Experto 2.....	133
Tabla 63. Valoraciones del Experto 3.....	134
Tabla 64. Valoraciones del Experto 4.....	134
Tabla 65. Valoraciones del Experto 5.....	135
Tabla 66. Valoraciones del Experto 6.....	135
Tabla 67. Valoraciones del Experto 7.....	136
Tabla 68. Valoraciones del Experto 8.....	136
Tabla 69. Valoraciones del Experto 9.....	137
Tabla 70. Valoraciones del Experto 10.....	137



1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad se estima que el 55 % de la población mundial reside en ciudades (Naciones Unidas, 2018) y se prevé que dicha proporción aumente un 13 % hasta 2050, siendo los países en vías de desarrollo los que abanderarán este proceso. Los motivos de este aumento son el éxodo rural y el crecimiento demográfico, esperándose para este horizonte temporal un aumento total de 2 500 millones de personas. Las ciudades son el ámbito fundamental en el que los seres humanos desarrollamos nuestras actividades vitales, trabajo, residencia, ocio y más; necesitando de ellas unos servicios y comodidades mínimos. Sin embargo, el patrón de consumo actual y el aumento demográfico genera alteraciones en el medio ambiente en todas las escalas espaciales y temporales.



Tradicionalmente, las superficies horizontales de las ciudades han estado compuestas por dos tipologías básicas: cubiertas y pavimentos, estando las primeras asociadas, de forma general, a las edificaciones y las segundas a los viales. Estas superficies suponen una impermeabilización severa del terreno, reduciendo la infiltración, eliminando la vegetación natural y, con ello, reduciendo la interceptación y evapotranspiración del agua de lluvia, así como las heterogeneidades naturales del suelo. De esta forma, se interrumpe directamente el equilibrio hídrico natural (escorrentía superficial y recarga de acuíferos) aumentando los caudales punta, incrementando el riesgo y magnitud de las inundaciones, elevando los volúmenes de escorrentía y reduciendo notablemente el caudal base, tal y como se puede apreciar en la **Figura 1**:

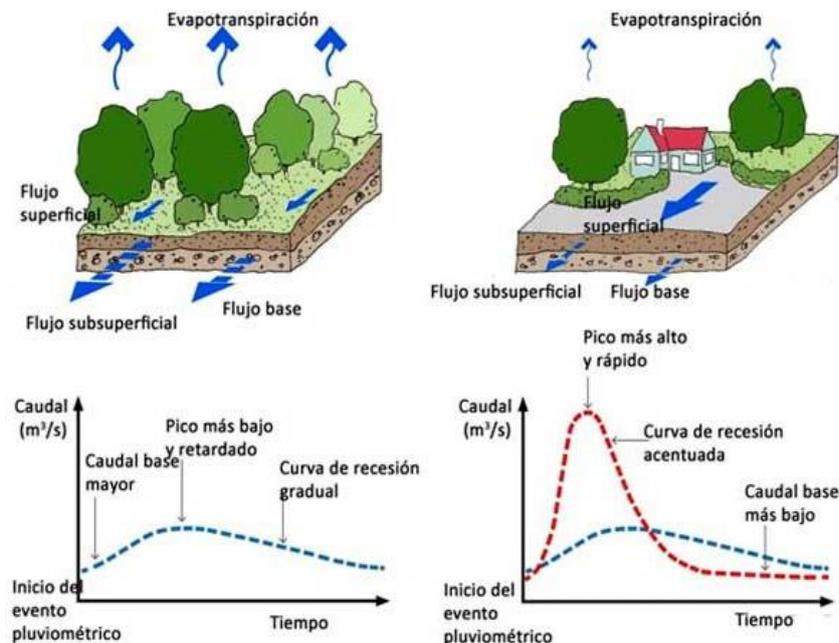


Figura 1. Efectos de la impermeabilización urbana (iagua.es, 2016)

En consecuencia, es necesario que los sistemas de drenaje de las ciudades estén dimensionados para eventos mucho más problemáticos de lo que correspondería de manera natural, tanto en dimensión como en duración.

Además de los efectos sobre el ciclo del agua, las ciudades tienen un albedo muy bajo, es decir, reflejan una proporción muy reducida de la radiación que incide sobre su superficie por lo que se absorbe radiación solar y se produce lo que se conoce como efecto 'isla de calor'. Esto provoca un aumento en el consumo energético medio y, por consiguiente, un aumento en la contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero, convirtiendo a la ciudad en un núcleo de empeoramiento de la calidad ambiental.

Desde un punto de vista de responsabilidad profesional, es necesario resaltar que el sector de la construcción supone un 14 % del PIB nacional en agosto de 2019, aportando más de 80 000 millones de euros de forma directa y más de 100 000 de forma indirecta (American Express, 2019) y empleando a aproximadamente al 14 % de la población (porcentajes extrapolables a la Unión Europea). Por otra parte, aproximadamente el 40 % de la energía consumida a nivel mundial es empleada en la construcción, explotación y mantenimiento de los edificios, siendo estos responsables de un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero (Berardi, et al., 2013). Dichas cifras justifican que todo avance en el sector en cualquiera de las fases de un proyecto será relevante en términos económicos y de sostenibilidad. Es por ello por lo que una visión más amplia de los métodos constructivos y los materiales empleados en el sector puede ayudar a identificar apli-



caciones o propiedades que se orienten a aumentar la vida útil, disminuir el mantenimiento u optimizar procesos, reduciendo así los impactos del sector de la construcción y más concretamente de la edificación sobre el medio ambiente.

El tema abordado en el presente Trabajo Fin de Máster, las cubiertas verdes, se justifica puesto que las cubiertas suponen una gran proporción de la superficie urbana y, por tanto, son un campo abierto a la implementación y desarrollo de soluciones constructivas más respetuosas con el medio ambiente y de un menor consumo energético. Las cubiertas verdes se presentan como una solución sostenible debido a sus diversos beneficios:

- Crean un hábitat natural para la flora y la fauna.
- Ayudan a mantener la biodiversidad, fomentando una mayor propagación de las especies locales.
- Suponen un impacto visual positivo, integrando los edificios en el entorno.
- Colaboran en la reducción del riesgo de inundación, reteniendo gran proporción del agua de lluvia y reduciendo la escorrentía superficial, haciendo la superficie urbana más permeable.
- Mejoran la calidad del aire, reduciendo los contaminantes y el polvo en suspensión.
- Mitigan el efecto ‘isla de calor’, mediante la absorción de la radiación y la evapotranspiración natural de la vegetación y el sustrato empleados.
- Reducen la huella de carbono de los edificios, disminuyendo los consumos energéticos de éstos.
- Aumentan el valor de la propiedad, maximizando los usos de los edificios como ocio o cultivo, incrementando la superficie útil de la ciudad.
- Reducen el ruido gracias a sus condiciones acústicas.

1.1 Motivación

Con el presente Trabajo Fin de Máster, y la investigación asociada a él, se busca dar continuidad a otros estudios realizados desde las áreas de Edificación (Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica) y Construcción (Dpto. Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos) de la E.T.S. de Caminos Canales y Puertos de Santander, aportando conocimiento al estado del arte y colaborando con el desarrollo de la tecnología de las cubiertas verdes. En dichos estudios previos se evaluó la resiliencia y sostenibilidad de las cubiertas verdes. Por su parte, la presente investigación está focalizada en el análisis, comprensión y parametrización de los siguientes componentes (en orden descendente) de una sección tipo: el sustrato y el geotextil (capa separadora); estudiando los parámetros más relevantes de los mismos y extrayendo las conclusiones necesarias. Este trabajo se engloba dentro del marco del proyecto “Caracterización mecánica de secciones filtrantes y estrategias de localización inteligente para un drenaje urbano sostenible a escala ciudad” (RTI2018-094217-B-C32, MCIU/AEI/FEDER, UE) de la Convocatoria 2018 de proyectos I+D+i «Retos investigación» del “Programa Estatal de I+D+i Orientada a los retos de la Sociedad”.



1.2 Definición de objetivos

Partiendo de la base de que las cubiertas verdes son un campo de acción para mejorar la resiliencia de las ciudades y mitigar los efectos del cambio climático que las amenazan, se especifican a continuación los objetivos generales y específicos del trabajo.

1.2.1 Objetivo general

El objetivo fundamental es la identificación de los parámetros más representativos del funcionamiento de las capas de una cubierta verde correspondientes al sustrato y al geotextil (capa separadora), comparando diferentes tipologías de éstas, en base a un análisis multicriterio que ayude a seleccionar la metodología a seguir en la campaña experimental. Se tratará de definir la idoneidad de las distintas tipologías con respecto de los indicadores seleccionados, encaminados a cumplir criterios de sostenibilidad, de tal forma que sea posible establecer una caracterización específica para cada una en función a los resultados de los ensayos y a la experiencia hallada en la bibliografía. Del mismo modo, se tratará de correlacionar los resultados obtenidos con rendimientos esperados llegando a justificar, o al menos servir como paradigma, el empleo de las cubiertas vegetadas tanto en nuevas construcciones como en posibles reconversiones de las ya existentes.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo se recogen en el siguiente listado, siguiendo el orden lógico seguido para su desarrollo:

- Revisión del **estado del arte**, conociendo en profundidad el estado presente del conocimiento global sobre las cubiertas verdes en cuanto a tipologías, bondades, defectos, características generales. Además, se tratará de identificar las vías de desarrollo actual de investigación en este campo.
- Identificar la **tipología de sustratos y geotextiles** que se ensayarán en laboratorio y extraer la adecuación a los criterios de sostenibilidad establecidos en base a un análisis multicriterio.
- Diseñar una **campaña experimental**, definiendo el tipo de ensayos y sus objetivos, siendo necesario identificar de forma justificada los parámetros en los que centrar el estudio.
- Discutir los **resultados** en base al conocimiento recogido en la bibliografía consultada y las conclusiones propias arrojadas por el estudio y la experiencia, en términos absolutos y relativos, de cada ensayo por separado y del conjunto mediante la comparación de los parámetros recogidos y su variabilidad.
- Extraer **conclusiones** y realizar una **propuesta** de una posible continuación futura del estudio o una nueva línea de trabajo, identificando los logros del trabajo y las posibles deficiencias en las que encaminar u orientar futuros proyectos que den continuidad al presente Trabajo Fin de Máster.



1.3 Metodología



Figura 2. Metodología del Trabajo (Fuente: elaboración propia)

Este proyecto, al tratarse de una tipología de investigación, requiere de fases diferenciadas en cuanto a forma y plazo, pero compenetradas desde el primer momento. Se comenzó con la consulta de abundante bibliografía referente a las cubiertas verdes y a materiales habituales, siguiendo con un repaso de las líneas de investigación previas llevadas a cabo en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. de Santander. Conjuntamente con los tutores, se discutieron los objetivos del proyecto, estableciéndose una primera aproximación a la campaña experimental a desarrollar, definiendo los principales hitos a alcanzar, y considerando los medios disponibles en el laboratorio y su disponibilidad.

Debido a condicionantes de fuerza mayor (emergencia sanitaria asociada al covid-19), la campaña experimental se vio alterada, sufriendo cambios que derivaron en un aplazamiento, con las consiguientes incompatibilidades que esto acarrearía respecto a suministros y disponibilidad de las partes participantes. La campaña de ensayos definitiva se muestra en la siguiente figura:



	20/07/2020	21/07/2020	22/07/2020	23/07/2020	24/07/2020	27/07/2020	29/07/2020	30/07/2020	31/07/2020	03/08/2020	04/08/2020	05/08/2020	06/08/2020	07/08/2020	10/08/2020	11/08/2020	12/08/2020	13/08/2020	14/08/2020	01/09/2020	
1 Preparación probetas	█																				
2 Masa por unidad de superficie	█	█																			
3 Oxidación	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
3.1 Llenado tanque + probetas	█	█	█																		
3.2 Horno				█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
3.3 Permeabilidad													█	█	█	█	█	█	█	█	█
3.4 Abertura característica													█	█	█	█	█	█	█	█	█
3.4.1 Sólido retenido													█	█	█	█	█	█	█	█	█
3.4.2 Filtrado sólido que pasa													█	█	█	█	█	█	█	█	█
3.4.3 Secado															█	█	█	█	█	█	█
3.4.4 Pesado sólido																	█	█	█	█	█
3.4.5 Tamizado																		█	█	█	█
4 Perforación dinámica			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
5 Punzonado estático (CBR)			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
6 Permeabilidad																					
7 Hidrólisis																					
7.1 Llenado tanque + probetas				█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
7.2 Retirada probetas																					
7.3 Colorimetría																					
7.4 Permeabilidad																					
8 Abertura característica																					
8.1 Sólido retenido																					
8.2 Filtrado sólido que pasa																					
8.3 Secado																					
8.4 Pesado sólido																					
8.5 Tamizado																					
9 Permeabilidad sección compuesta																					
9.1 Montaje sistema																					
9.2 Sustrato 1																					
9.3 Sustrato 2																					
9.4 Sustrato 3																					
9.5 MO sustrato y efluente																					



1.4 Estructura de la memoria

La memoria de este TFM se ha estructurado de tal forma que consta de una 'Introducción' donde se definen la motivación y los objetivos del proyecto, seguidos de la metodología empleada para su desarrollo. El siguiente capítulo es el de 'Estado del arte', donde se realiza una introducción de qué son las cubiertas verdes, beneficios y condicionantes, así como una explicación de los tipos de cubierta existentes y cuál es el estado actual de desarrollo de esta tipología constructiva y de las tecnologías o técnicas principales que sobre ella aplican.

A continuación, la 'Metodología' describe el método de análisis multicriterio empleado para evaluar y comparar los diferentes indicadores recogidos para este estudio, definiendo y justificando su empleo y objetivos; además de incluirse una descripción de los ensayos y estudios a realizar dentro de la campaña experimental, explicando sus diferentes pasos y la normativa aplicada para su adecuada operación. Se trata de un capítulo de gran importancia, ya que en él se describen procesos y características que condicionan en gran medida el resultado y las conclusiones fruto de este Trabajo Fin de Máster.

Estos resultados se valoran en el apartado de 'Análisis de resultados', donde se comentan los valores frutos de la experimentación y se aplica el método de análisis multicriterio mencionado en el párrafo anterior, elaborando así un análisis complejo del que se extraen la 'Valoración de resultados' y las 'Conclusiones', que se recogen en los últimos capítulos.

El proyecto se concluye con las fichas de laboratorio en las que se reflejan las medidas tomadas en el mismo durante el desarrollo de los experimentos, recogidas en 'Anejos' y, por último, la 'Bibliografía' consultada para la realización del proyecto.



2 ESTADO DEL ARTE

En este segundo capítulo se expondrá aquella información que se ha considerado relevante en relación con la temática en el que este Trabajo Fin de Máster se centrará. Se recogerán en primer lugar explicaciones y algunos detalles sobre la tecnología actual, desde las cubiertas convencionales hasta las cubiertas verdes (origen, propiedades y evolución), puntualizando aquellos aspectos en los que estas últimas dan un salto tecnológico importante para mejorar las prestaciones de nuestras viviendas. Se describirá a su vez la tipología más común de cubiertas vegetadas, describiendo las partes y elementos que las componen. Transversalmente se irán comentando los aspectos de los diseños o materiales empleados que contribuyen a lograr los aspectos positivos recogidos en el capítulo Introducción.



2.1 Cubiertas convencionales

Se define como cubierta al cerramiento superior de un edificio y que da protección a este contra agentes climáticos y otros factores como aislamiento acústico y térmico, entre otros. Se podrían considerar el origen de la edificación, pues satisfacen la necesidad de crear un espacio cubierto al abrigo de las inclemencias del tiempo y ofrecer un espacio íntimo y cobijado. En la **Figura 1** se recoge un esquema de las partes de la envolvente térmica de un edificio: cubiertas (C), muros (M), suelos (S) y demás elementos.

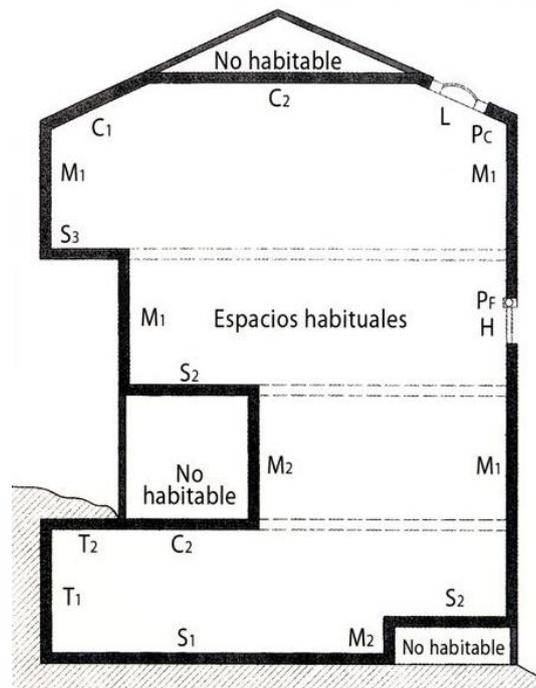


Figura 3. Partes de la envolvente térmica de un edificio (CEX v2.3)

En la actualidad, en España se exigen una serie de requisitos mínimos a la hora de diseñar y construir cubiertas en edificios, recogidos en el Código Técnico de la Edificación (CTE), tales como aislamiento térmico (Ministerio de Fomento, 2017), aislamiento frente a ruido (Ministerio de Fomento, 2009), salubridad-impermeabilidad (Ministerio de Fomento, 2017), seguridad frente a incendio (Ministerio de Fomento, 2010), además de condicionantes constructivos y formales. Las necesidades a satisfacer dependerán en gran medida del clima al que se van a ver expuestas y de la funcionalidad de la construcción.

A lo largo de la historia son muchas las tipologías, materiales y métodos constructivos que se han ido empleando según las necesidades y el grado de desarrollo de la tecnología. En la actualidad se distinguen dos tipologías claramente diferenciadas por su pendiente: cubiertas planas (conocidas también como azoteas, con una inclinación menor al 5 % respecto a la horizontal) e inclinadas (tejados). Por lo general, las primeras son propias de climas poco lluviosos, donde las cargas introducidas por nieve o agua no son problemáticas, mientras que las cubiertas inclinadas son propias de climas más húmedos en los que es necesario evacuar el agua o la nieve de forma natural.



Figura 4. Cubierta plana (interempresas.net, 2012)



Figura 5. Cubierta inclinada (vilssa.com, 2013)

El CTE se enumeran las capas que deben tener las cubiertas junto con sus características:

- **Soporte estructural:** elemento constructivo donde la cubierta transfiere sus cargas. No forma parte de ésta, sino que le otorga un soporte estructural.
- **Capa de formación de pendientes:** dispuesta cuando la pendiente no sea suficiente para evacuar el agua de lluvia hacia los sumideros. Es decir, es una capa que afecta a las cubiertas planas.
- **Barrera de vapor:** capa resistente al paso de vapor de agua, buscando evitar condensaciones intersticiales que generen humedad que pueda dañar la estructura.
- **Capa de impermeabilización:** dispuesta exclusivamente en cubiertas planas o inclinadas sin pendiente suficiente exigida por norma para evacuar el agua de lluvia.
- **Aislante térmico:** elemento dispuesto en una o varias capas de materiales aislantes que limitan las variaciones de temperaturas debidas al gradiente térmico entre exterior e interior, evitando pérdidas térmicas y condensación de humedad. La transmitancia térmica límite a satisfacer vendrá determinada por las condiciones climáticas de la zona de construcción.
- **Capas separadoras:** buscando la separación de otras capas cuando sea necesario, por motivos de incompatibilidad química entre materiales, posibilidad de adherencia entre capas o por razones de resistencia mecánica motivados por los materiales y sus características, el uso que se le vaya a dar a la cubierta o pensando en fallos/accidentes en la ejecución.
- **Capa de protección:** resistente a la intemperie y resistente a la succión del viento.
- **Cobertura del tejado:** propia de cubiertas inclinadas salvo que la impermeabilización sea autoprotegida y no la requiera.
- **Evacuación de aguas:** sistema de canalones, sumideros y rebosaderos que recojan el agua y la viertan fuera de la cubierta. Deberá estar conectado a la red de pluviales (en caso de redes separativas) o con la de aguas residuales (si es unitaria).

La clasificación de las cubiertas planas atiende a diferentes tipos:

- **Cubiertas planas:**
 - **Convencionales/ Invertidas:** las invertidas son cubiertas en las que el aislante se coloca por encima de la capa impermeabilizante, de tal forma que el aislante funciona como protección mecánica y de los gradientes térmicos a la capa impermeable, pro-



tegiéndola y disminuyendo la probabilidad de aparición de procesos patológicos derivados en la cubierta. Son las más empleadas en edificación, habiendo desplazado claramente a las convencionales gracias a sus prestaciones.

- **Transitable/ No transitable:** pudiéndoseles dar más usos o exclusivamente los de inspección y mantenimiento.
 - **Ventilada/ No ventilada:** en función de la existencia o no de una cámara de aire en contacto con el exterior que proteja de las condiciones climáticas externas a través de una renovación continua del aire que la ocupa. Estas cubiertas mejoran el comportamiento higrotérmico de la construcción considerablemente.
 - **Ajardinada/ Autoprotegida/ Acabado con cobertura.**
- **Cubiertas inclinadas:**
 - **Forjado inclinado/ Forjado horizontal + tabiques inclinados + tableros.**
 - **Ventilada/ No ventilada**
 - **Autoprotegida/ Acabado con cobertura + Capa de protección**

2.2 Cubiertas verdes

A lo largo de la historia se han empleado diferentes tipologías de cubiertas vegetadas, cada una con su función y complejidad, pero todas tratando de cubrir unas necesidades básicas de la construcción en la que estaban instaladas. Se podría considerar la ‘madre’ de las cubiertas verdes a las tumbas neolíticas presentes en el norte de Europa, conocidas como *tumbas de corredor*, en las que una bóveda de piedras era cubierta por tierra y hierba a modo de protección contra el frío y el viento, aislando los habitáculos interiores para una mayor comodidad a la hora de realizar rituales religiosos. Este tipo de construcción es muy primitiva y sus prestaciones muy limitadas, pero supone una primera aproximación a las cubiertas verdes.



Figura 6. Tumba de corredor en Newgrange, Irlanda, 3500 a.C (Fuente: 101viajes.com)

En Mesopotamia, alrededor del año 600 a.C., se construyeron los célebres Jardines Colgantes, zigurats con vegetación en su cubierta con un sistema de riego y drenaje que ya comenzaba a ser sofisticado y protegía la integridad estructural de edificios que estaban contruidos mayormente de adobe. Dando un salto en el tiempo, fue en los países nórdicos (Noruega, Suecia, Islas Faroe, Islandia), donde este tipo de cubiertas se convirtieron en la construcción habitual desde la Edad Media. Sus viviendas, coronadas por un tapete de



césped, permitían unas condiciones térmicas en el interior que hacían posible el descanso y las actividades cotidianas al resguardo del frío clima de la zona.



Figura 7. Recreación de la aldea vikinga de Stöng, Islandia (Museo Nacional de Islandia)

Se les puede considerar el prototipo fundamental del que derivan las actuales cubiertas vegetadas, las cuales vieron la luz en Alemania a finales del siglo XIX, durante tiempos de creciente industrialización y crecimiento de las ciudades, en las que se empleaba betún como material aislante. Este compuesto es altamente inflamable, por lo que la solución fue cubrir con arena y grava dicha impermeabilización reduciendo el riesgo de incendio. Dicha cobertura mineral comenzó a albergar vida vegetal de forma natural y espontánea, comenzando así a lo largo del siglo XX a estudiarse más en detalle como modelo constructivo estandarizado, disfrutando de una guía metodológica desde finales de los 90 (Rowe & Getter, 2006). Su valía ya se probó con anterioridad en la Exposición Universal de París en 1867 (Jim, 2017) pero la falta de un respaldo metodológico retrasó su expansión por Europa y el resto del mundo.



Figura 8. Terminal marítima de Yokohama, Japón. Construida entre los años 2000 y 2002 (Urbanarbolismo, s.f.)

En la actualidad el uso de este tipo de cubiertas está en aumento gracias a las importantes ventajas con respecto a las cubiertas tradicionales y a la cada vez más alta concienciación social. En países como Alemania la manera de fomentar su construcción fue mediante campañas de incentivación a nivel estatal que lograron suponer más del 10 % del total de edificaciones del país a principios de siglo, incrementándose anualmente el volumen de la industria de las cubiertas verdes entre un 10 y un 15 % (Rowe & Getter, 2006). En Tokyo, por ejemplo, existe una ordenanza municipal que obliga a aquellos edificios con una superficie en planta



mayor de 100 m² a implementar una cubierta vegetada (Baskaran & Liu, 2003). Estas campañas son sostenibles para los Ayuntamientos gracias al volumen de ahorro en infraestructuras de saneamiento que se consigue, tanto su construcción como su mantenimiento y reparación. Su uso se ha visto rápidamente extendido por todo el mundo y las experiencias son cada vez más positivas, con un continuo desarrollo de la tecnología y estudio de los materiales y procesos (Shafique, et al., 2018). Estos avances han llevado a abaratar costes de ejecución y mantenimiento, además de aligerar el peso de las secciones.

En nuestro país, ciudades como Barcelona destinan parte de sus presupuestos municipales para la financiación parcial de proyectos de vegetación de cubiertas de edificios (Congostrina, 2020). En el año 2017 la corporación municipal abrió el primer concurso para este fin, recibiendo 45 propuestas y resultando beneficiarias 10 de ellas con una financiación del 75 % del coste hasta un máximo de 100 000 €. Este año, debido al éxito de la iniciativa, se ha convocado un concurso de similares características lo cual hace evidente que se trata de una alternativa viable y con aceptación especialmente en ciudades de gran tamaño.

Entre las cubiertas verdes actuales, se pueden distinguir dos tipos en función del espesor de la capa de sustrato y el tipo de plantas que pueden soportar y, por consiguiente, su mantenimiento: extensivas e intensivas. Algunos autores incluyen una clasificación semi-intensiva que para este Trabajo no será de interés (Theodosiou, 2011). Las características de ambos tipos se recogen en la **Tabla 1** (Berardi, et al., 2013):

Tabla 1. Características de cubiertas extensivas e intensivas

<i>Características</i>	<i>Extensiva</i>	<i>Intensiva</i>
<i>Espesor del sustrato</i>	< 200 mm	> 200 mm
<i>Peso (kg/ m²)</i>	60-150	> 300 (puede requerir estructura de refuerzo)
<i>Accesibilidad</i>	Visitable/ No visitable	Visitable
<i>Vegetación</i>	Hierbas y pequeños arbustos	Arbustos y árboles
<i>Dificultad de la construcción</i>	Sencilla	Técnicamente compleja
<i>Riego</i>	Generalmente no necesaria	Necesidad de sistemas de riego y drenaje
<i>Mantenimiento</i>	Simple	Complejo
<i>Coste</i>	Bajo	Alto

Debido a estas características, las cubiertas extensivas encajan con cubiertas de gran superficie debido a su bajo coste y simplicidad de ejecución y mantenimiento. Sin embargo, su capacidad de gestión del agua de lluvia y su rendimiento térmico y acústico son limitados en comparación con las cubiertas intensivas, que logran unos resultados más satisfactorios además de tener una variedad de plantas disponibles mucho mayor. Dependerá entonces de las propiedades climáticas particulares de cada caso, el uso que se le pretenda dar y la disposición económica del promotor la idoneidad de un tipo u otro, repercutiendo directamente en la complejidad estructural y, por tanto, en el coste de la construcción.

Tal y como recogen algunos autores, en aquellos lugares en los que se ha fomentado la creación de cubiertas extensivas a una mayor escala, aprovechando su menor coste, se ha logrado un importante grado de visibilidad y concienciación entre la población. Esto se debe al impacto estético que causan en contraste con las edificaciones tradicionales, de un grado tal que un impulso por parte de las autoridades y el sector podría ser clave para un aumento potencial de su uso en el ámbito privado donde su aplicación se ve más limitado (Jungels, 2013). A esto se le suma el alto potencial de albergar sistemas capaces de generar energía, como pueden ser paneles termo-solares, sistemas de cogeneración o placas fotovoltaicas (Ghaffarian Hoseini, et



al., 2013); disparando así su rentabilidad sin alterar sus funciones primordiales. Para lograr que las propiedades de las cubiertas vegetadas sean efectivas, es necesario mantener un alto grado de información con los propietarios, pues se ha observado que, en una proporción importante de casos, el mantenimiento no es el adecuado y puede no hacer rentable la solución constructiva si la gestión y conservación no son las adecuadas (Teotónio, et al., 2019). Además, el uso excesivo de fertilizante repercute negativamente en la calidad del agua (Shafique, et al., 2018).



Figura 9. Cub. extensiva (Urbanarbolismo, s.f.)



Figura 10. Cubierta intensiva (Fuente: isopan.es)

Un aspecto muy destacable de este tipo de cerramientos es su alta polivalencia en cuanto a localizaciones de instalación. Tal y como se muestra en la Figura 11 (Ayuntamiento de Madrid, 2019) la variedad de usos en los que se han instalado cubiertas verdes en la capital española es muy amplia, correspondiendo aproximadamente el 50 % a uso residencial, con un reparto equilibrado entre viviendas unifamiliares y bloques comunitarios.

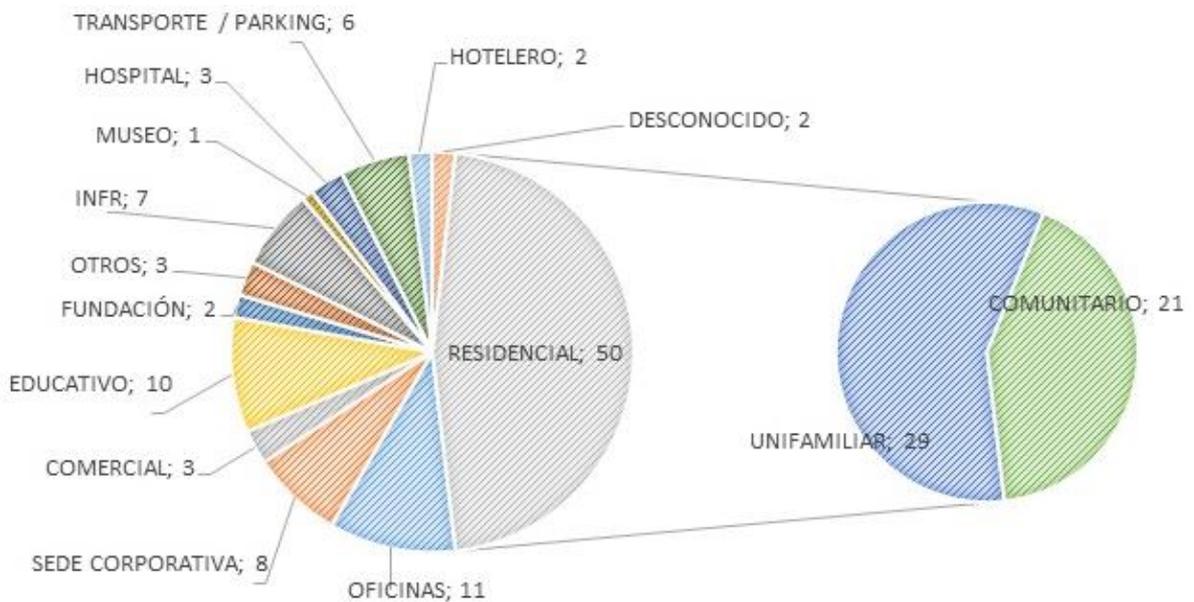


Figura 11. Cubiertas verdes por uso en la ciudad de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, 2019)

Cabe destacar, además, el papel fundamental que pueden desempeñar a la hora de conservar la biodiversidad al apostar por especies locales (Garrison, et al., 2012). Esto no siempre es sencillo debido a la poca presencia dentro del tejido empresarial de ejemplares autóctonos, pero supone una vía a tener en cuenta especialmente a la hora de reducir costes de la cubierta, fundamentalmente los debidos al mantenimiento, descontando las ganancias medioambientales que supone. Esto se justifica por la adaptación de dichas especies a las condiciones particulares de ese clima (temperatura, lluvia, exposición lumínica, entre otros) haciéndolas



más resistentes y, a su vez, más atractivas para insectos o aves locales. Esta tendencia está siendo especialmente seguida en Reino Unido, debido a las recomendaciones y concienciación de la Green Roof Organisation UK.

2.3 Estructura de una cubierta verde

Amén de su tipología, toda cubierta vegetada debe tener la siguiente estructura para garantizar su adecuado funcionamiento, desde la capa superficial hacia abajo:

- **Cobertura vegetal.** Dependerá de diferentes factores (Berardi, et al., 2013):
 - Objetivo de la cubierta vegetada: cada especie vegetal tiene sus propiedades particulares (tamaño, área cubierta, tolerancia a sequía/ viento/ contaminantes, etc.), influyendo en la retención de agua o la biodiversidad, entre otras muchas características.
 - Clima al que se verá expuesta (fundamental a la hora de seleccionar las especies de planta). Deberá resistir eficazmente las exigencias del clima en cuanto a lluvia, temperaturas, insolación, heladas, etc. También influirá la orientación del edificio, la exposición al viento y a la luz, entre otros. Deberá estudiarse con especial atención la resistencia a la contaminación, con especial detalle en las grandes urbes.



Figura 12. Cubierta verde en el barrio financiero de Londres (Fuente: livingroofs.org/gallery-home/)

- Uso que se le vaya a dar a la cubierta, siendo diferente una cubierta no visitable a una en la que se instale una terraza. El factor estético será muy importante.
- Condiciones de conservación y mantenimiento de las que vaya a disfrutar la cobertura, directamente relacionada con las especies empleadas.



Figura 13. Ejemplo de cubierta visitable (Fuente: ZinCo)



Existen diversos sistemas de implantación de la cobertura vegetal, como son: sistema modular (vegetación previamente cultivada, instalada sobre bandejas), alfombras vegetales (mallas enrolladas de fibra y vegetación que se extienden directamente sobre la cubierta), hidrosiembra (proyección de una mezcla acuosa que contiene fertilizantes y semillas sobre la capa inferior), siembra manual (para cubiertas de escasa entidad), re-plantación (para ejemplares de gran tamaño, empleado en cubiertas intensivas).



Figura 14. Sistema modular
(Fuente: todaslasplantas.blogspot.com)



Figura 15. Hidrosiembra (Fuente: Lipani Group)

El empleo de diferentes especies vegetales en una misma cubierta favorece la biodiversidad, facilitando la proliferación de especies de aves e insectos autóctonos que encontrarán en ella un espacio ideal.

- **Capa de sustrato.** Es la capa que da soporte físico y nutricional a la cobertura general, cumpliendo principalmente las funciones de:
 - Generación de espacio suficiente para el enraizamiento, función del espesor.
 - Aporte de agua a las plantas, función de la capacidad de retención hidráulica, así como de oxígeno y demás nutrientes.
 - Laminación de precipitaciones, reduciendo la escorrentía y erosión en función de la velocidad de infiltración y la cobertura vegetal.

El espesor de esta capa suele estar entre los 15 y 18 cm, aumentando el riesgo de desecación con espesores menores, con un valor mínimo fijado en 4 cm según la NTJ-11E (Colegio Oficial de Ingenieros técnicos agrícolas y peritos agrícolas de Catalunya, 1999) que, generalmente, es insuficiente para las exigencias de las especies vegetales empleadas. Con espesores mayores se podrán albergar especies vegetales más voluminosas con el inconveniente del aumento significativo de las cargas de la cubierta (Rodríguez-Parets Maleras, et al., 2014).



Figura 16. Diversidad de sustratos según las necesidades (Fuente: Portal Frutícola)



Con el fin de no condicionar el correcto desarrollo de la vegetación, se deberán conseguir las propiedades de capacidad de retención de agua, contenido en fracción mineral, contenido en materia orgánica (MO) de origen natural, bioestabilidad, homogeneidad, capacidad de rehumectación, baja inflamabilidad, baja salinidad, baja alcalinidad, bajo contenido en caliza activa, entre otros; según establece la Asociación Alemana para la Investigación del Desarrollo y Construcción del Paisaje (Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen, 1995).

- **Capa separadora y filtrante** (geotextil). En cubiertas extensivas de tipología plana es habitual la colocación de una capa filtrante que separe el sustrato de la capa drenante, bloqueando así el paso de finos desde la capa superior que pudieran colmatar la capa inferior y producir problemas que disminuirían el rendimiento de ambos estratos. De forma general está compuesta por fibras sintéticas que conforman una lámina que se conoce como geotextil, al cual se le exigen diversas características (Lemos Galíndez, et al., 2018):
 - Capacidad resistente a rotura y compresión, tanto durante la vida útil como durante su almacenamiento, manejo y colocación, así como durante las etapas de mantenimiento.
 - Imputrescible, evitando la pérdida parcial o total de material de forma puntual que produciría la pérdida de funcionalidad de la capa.
 - Compatibilidad con los materiales con los que establecerá contacto, desde el punto de vista fisicoquímico.
 - Permeabilidad 10 veces superior a la del sustrato, evitando de esta forma el encharcamiento de la capa superior.
 - Permisibilidad al crecimiento de las raíces, de forma que no interrumpa su normal desarrollo ni condicione su actividad, pudiendo éstas atravesarla para acceder al suministro de agua que representa la capa inferior drenante.
 - Durabilidad, manteniendo un mínimo de rendimiento durante al menos la vida útil.
 - Estabilidad fisicoquímica.
 - Resistente a la acción de los microorganismos, no sufriendo degradación provocada por su actividad.

La capa filtrante se debe disponer sobre el total de la capa drenante, con un solape de mínimo 10 cm sobre la capa adyacente según las Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo NTJ-11E (Colegio Oficial de Ingenieros técnicos agrícolas y peritos agrícolas de Catalunya, 1999), al igual que sobre la superficie del sustrato a lo largo del perímetro de la cubierta. En cubiertas inclinadas se podrá prescindir de esta capa cuando se disponga un dispositivo de protección frente a deslizamientos.



Figura 17. Detalle constructivo del solape de la capa filtrante (Fuente: chova.com, 2020)



- **Capa drenante.** Prescindible en aquellos casos en que la capa de sustrato sea suficientemente permeable al agua y la inclinación de la cubierta sea suficiente para drenar el exceso de lluvia, la capa drenante deberá reunir las siguientes características según la NTJ-11E (Colegio Oficial de Ingenieros técnicos agrícolas y peritos agrícolas de Catalunya, 1999):
 - Durabilidad y estabilidad
 - Estabilidad de forma y condiciones de filtro
 - Contenido en sales y carbonatos solubles adecuado, relación con la nocividad frente a las plantas
 - Estabilidad fisicoquímica
 - Reducida densidad, no suponiendo un aumento en las cargas que representa la cubierta
 - Susceptibilidad de acumular agua (caso de capa con reserva de agua)

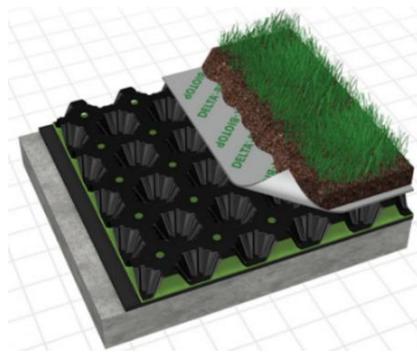


Figura 18. Ejemplo capa drenante "DELTA-FLORAXX" (Fuente: cosella-dorken.com)

Generalmente está materializada por materiales plásticos o polipropileno, encontrándose casos de uso de polietileno, poliestireno y fibras textiles recicladas en casos en que las cargas que deba soportar sean reducidas (Bozorg Chenani, et al., 2015). Otra tipología es el uso de fragmentos minerales, que pueden ser arenas, gravas, gravas volcánicas o arcillas expandidas, consiguiéndose un producto sostenible, natural, neutro, resistente a la congelación y relativamente ligero en algunos casos, entre otras cualidades interesantes (Lemos Galíndez, et al., 2018).

En los casos de sistemas con reserva de agua las propiedades se extienden, pudiendo ofrecer un espacio para la retención de agua que queda a disposición de las raíces profundas en épocas de mayor evapotranspiración, reduciendo así la duración de los periodos de sequía. Esto se consigue mediante sistemas alveolares, de aljibes o a través de fibras absorbentes.

- **Barrera anti-raíz** (geotextil). Protege las capas subyacentes de la acción directa de las raíces, usándose de forma más habitual en cubiertas intensivas debido a la mayor penetración de estas plantas en profundidad. Se suelen emplear geotextiles, aunque también es posible el uso de capas de polietileno o polipropileno.



Figura 19. Ejemplo de barrera anti-raíz (Fuente: Horticola de Pedralbes)

- **Aislante térmico.** La función de aislamiento térmico de las cubiertas vegetadas, como se ha comentado con anterioridad, es mejor que la de las cubiertas convencionales. A pesar de ello, es preciso colocar un aislamiento térmico en caso de que con la capa vegetal y el sustrato no se alcancen los niveles requeridos de transmitancia térmica por la normativa CTE DB HE1-Ahorro de energía (Ministerio de Fomento, 2017). El material más extendido para este uso es el poliestireno extruido.



Figura 20. Ejemplo poliestireno extruido XPS (Fuente: DANOSA)

- **Impermeabilización.** Debido a la degradación producida por las acciones mecánicas de la cubierta y a los gradientes térmicos entre el interior de la construcción y el exterior, el paso de humedad a través de la cubierta suele ser el factor más problemático, debiendo asegurar su buen comportamiento. Generalmente se emplea PVC en forma de láminas, así como pinturas bituminosas, resinas o polímeros plásticos.



Figura 21. Proceso de impermeabilización de una cubierta (Fuente: Impermeabilizaciones Jigón)



El motivo de que esta capa se encuentre bajo el aislante térmico (cubierta invertida) es para evitar la condensación de la humedad que pueda desarrollarse en éste.

- **Capa de formación de pendientes.** En aquellos casos en que sea necesario dotar a la cubierta de una mayor inclinación para conseguir evacuar el agua de lluvia, o proveniente del riego, en exceso hacia la recogida en sistemas de sumideros o canaletas. Se busca conseguir la inclinación en la totalidad de la cubierta, comprendida entre un 1% y un 5% según las condiciones de la cubierta y las características hídricas de su ubicación.



Figura 22. Ejecución de capa de formación de pendientes (Fuente: obrasonline.com, 2020)

- **Forjado.** Consiste en una estructura horizontal, generalmente formada por elementos unidireccionales de hormigón o metálicos. Su función es resistente y no relacionada con una tipología de cubierta específica.
- **Sistema de recogida de aguas.** El agua sobrante debe ser recogida y desaguada por gravedad fuera de la cubierta a través del sistema de sumideros y bajantes, de forma general en cualquier edificación. En el caso de las cubiertas vegetadas los sumideros deben cubrirse por una capa de grava (o por protecciones específicas) que eviten la colmatación por finos o la afectación directa de la vegetación.

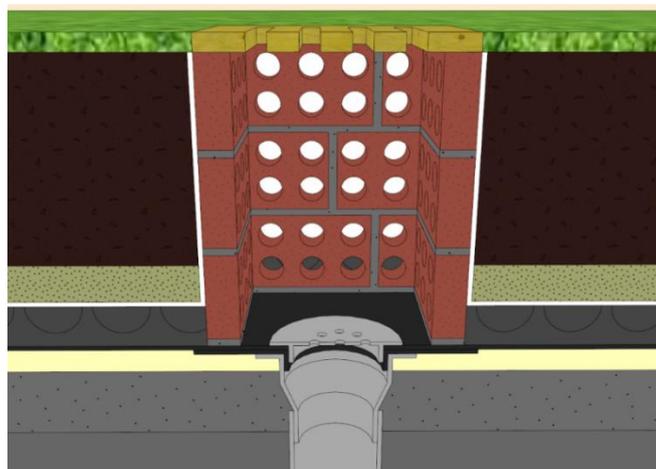


Figura 23. Sección de sumidero en cubierta vegetada (Fuente: quelepasaamicasa.com, 2019)



Según el caso, el agua será conducida a la red de alcantarillado unitaria o separativa, existiendo la posibilidad de que sea recogida en un sistema de aljibes para su almacenamiento y uso.

2.4 Sustrato y capa separadora

Para este Trabajo Fin de Máster, los objetivos marcados son el estudio y ensayo de las propiedades más significativas de las capas de sustrato y capa separadora o filtro, cuya información se ampliará en este apartado. De esta forma se pretende dar continuidad a los estudios previos realizados al proyecto “Caracterización mecánica de secciones filtrantes y estrategias de localización inteligente para un drenaje urbano sostenible a escala ciudad” (RTI2018-094217-B-C32, MCIU/AEI/FEDER, UE) (Lemos Galíndez, et al., 2018) y (Guzmán Sánchez, et al., 2018).

2.4.1 Sustrato

En las cubiertas verdes, la capa de sustrato es crucial para el suministro de nutrientes, agua y oxígeno que da soporte a la cobertura vegetal que sobre ella vive. Las raíces de las plantas se desarrollan y toman los nutrientes que necesitan, así como el agua que, en determinadas circunstancias y en algunos diseños, pueden tomar también de la capa drenante ubicada inmediatamente por debajo de ésta si tiene la capacidad de almacenaje hídrico (aunque su función principal sea el soporte físico de las capas superiores). El espesor estará directamente vinculado con las especies vegetales presentes en la cubierta debido a sus exigencias y características particulares, así como con las condiciones climatológicas a las que se verá expuesta a lo largo de su vida útil (fundamentalmente evapotranspiración). Por lo general, la densidad del sustrato saturado no sobrepasa los 1 300-1 400 kg/m³.

La capa de sustrato deberá resistir la erosión durante el tiempo que tarde en desarrollarse por completo la vegetación y cubra totalmente la cubierta, especialmente si la localización destaca por fuerte intensidad de viento y/o la cubierta es de tipo inclinado. Si algo está claro es que el tipo de sustrato está condicionado por la tipología vegetal y viceversa, por lo que será necesario disponer de una información adecuada del clima y las solicitaciones para llegar a dar una solución conjunta de estas dos capas.

El sustrato empleado deberá tener un adecuado comportamiento agronómico, siendo recomendable que posea las siguientes características (Premier Tech Horticulture, 2016):

- **Buena capacidad de retención de la humedad:** Alto volumen de agua retenido por el sustrato después de ser saturado y haber drenado toda el agua a través de la gravedad. La proporción de esta agua que esté disponible para las plantas deberá ser del mismo orden o estar cercano, por lo que el espesor del sustrato deberá controlarse en función de la capacidad de la vegetación.
- **Elevado contenido de fracción mineral:** Pues condiciona los iones nutritivos minerales de los que dispondrá la vegetación para su desarrollo. Además, esta porción otorga volumen a la capa sin aumentar excesivamente el peso, no sobrecargando en exceso las capas inferiores, y mejorando el drenaje.
- **Elevado contenido de materia orgánica natural:** De forma similar a la fracción mineral, el contenido en fósforo (P) y nitrógeno (N) del sustrato condiciona los nutrientes disponibles para la cobertura vegetal. Estos componentes se pueden agregar artificialmente, por lo que no será una característica estrictamente necesaria.
- **Alta bioestabilidad:** Resistencia a la degradación ante procesos fisicoquímicos.



- **Homogeneidad:** Para garantizar que en la totalidad de la cubierta se den condiciones similares tanto de carácter físico como químico, asegurando así un adecuado comportamiento del sistema.
- **Alta capacidad de rehumectación:** Evitando así que un sustrato con una edad avanzada se vuelva hidrofóbico y disminuya su capacidad de retención de agua, provocando una distribución anómala de la humedad a lo largo y ancho de la capa de sustrato.
- **Baja tasa de contracción:** Manteniendo un espesor estable a lo largo de la vida útil, sin verse alterado por los cambios de las condiciones a las que se expone.
- **Componentes de baja inflamabilidad:** Disminuyendo la probabilidad de aparición de fuego en cualquiera de los componentes de la cubierta.
- **Baja salinidad y alcalinidad:** Las cuales afectan negativamente al correcto desarrollo de las plantas.

Esta serie de características tiene un carácter general, no siendo necesario su total cumplimiento para algunas especies con menores exigencias. Desde el punto de vista de la retención del agua de lluvia en el sustrato, se han realizado estudios (Van Woert, et al., 2005) que muestran una retención de entre el 20 y el 80 % del total de precipitación, dependiendo de la intensidad y duración de ésta.

Los valores que se muestran a continuación en la **Tabla 2** son los recomendados en el NTJ-11E (Colegio Oficial de Ingenieros técnicos agrícolas y peritos agrícolas de Catalunya, 1999) para la aplicación de sustratos en cubiertas extensivas:

Tabla 2. Valores recomendados para los sustratos de uso en cubiertas extensivas

Propiedades	Recomendaciones para sustratos		Unidades	Método de control
	Con capa drenante	Sin capa drenante		
Granulometría				[DIN 19683] ¹
$d \leq 0,063 \text{ mm}$	≤ 15	≤ 5	% en peso	
$d = 0,063-2,0 \text{ mm}$		≥ 15	% en peso	
$d \geq 2,0 \text{ mm}$	30-60		% en peso	
Densidad				[FLL] ²
<i>Sobre materia seca</i>		0,6-1,2	g/cm ³	
<i>Sustratos-mezcla</i>	1,0-1,6		g/cm ³	
<i>Sustratos a base de fragmentos de materiales minerales</i>	0,6-1,3		g/cm ³	
<i>A máxima capacidad de agua</i>		0,8-1,4	g/cm ³	
<i>Sustratos-mezcla</i>	1,4-2,2		g/cm ³	
<i>Sustratos a base de fragmentos de materiales minerales</i>	1,0-1,8		g/cm ³	



Propiedades	Recomendaciones para sustratos		Unidades	Método de control
	Con capa drenante	Sin capa drenante		
Contenido de aire/agua				
<i>Porosidad total</i>	-	-	% en volumen	[VDLUFA] ³
<i>Máxima capacidad de agua</i>	≥ 35	≥ 20	% en volumen	[FLL] ²
<i>Contenido de aire a pF 1,8</i>	≥ 25		% en volumen	[FLL] ²
<i>Permeabilidad al agua (K_f)</i>	≥ 0,001	≥ 0,1	cm/s	[FLL] ²
	≥ 0,6	≥ 60	mm/min	
pH, carbonatos y salinidad				
<i>pH (rango de tolerancia)</i>	6,5-8,0	6,5-8,0		[CaCl ₂]
		≤ 9,5		
<i>Carbonatos</i>	≤ 25	≤ 25	g/l	[SCHEIBLER] ⁴
<i>Salinidad (ideal) (en caso necesario)</i>	≤ 3,5	≤ 3,5	g/l	[Extracto acuoso KCl]
	≤ 1,0	≤ 1,0	g/l	[VDLUFA] ³
	≤ 2,5	≤ 2,5	g/l	[Solución saturada de yeso]
Materia orgánica				
<i>Contenido en MO</i>	3,0-8,0		% en peso	[VDLUFA] ³
Relación C/N				
<i>Sustratos con cortezas/compost</i>	≤ 45		-	[VDLUFA] ³
<i>Sustratos con turba</i>	≤ 60		-	[VDLUFA] ³
Nutrientes				
<i>Capacidad de intercambio iónico</i>	≥ 60		mmol/Z/l	[ÖNORM L 1086] ₅
<i>Nitrógeno N</i>	≤ 60		mg/l	[VDLUFA] ³
<i>Fósforo P₂O₅</i>	≤ 150		mg/l	[VDLUFA] ³
<i>Potasio K₂O</i>	≥ 150		mg/l	[VDLUFA] ³
<i>Magnesio Mg</i>	≤ 120		mg/l	[VDLUFA] ³

¹ DIN 19683 (German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 1973)

² FLL: Method for investigating the resistance of root penetration of anti-rooting membranes

³ VDLUFA (Association of German Agricultural Analytic and Research Institutes, s.f.)



⁴ SCHEIBLER (Bąk, 1992)

⁵ ÖNORM L 1086 (Austrian Standards, 2014)

Por otro lado, los valores recomendados en la NTJ-11I para cubiertas intensivas (Colegio Oficial de Ingenieros técnicos agrícolas y peritos agrícolas de Catalunya, 2000) son:

Tabla 3. Valores recomendados para los sustratos de uso en cubiertas intensivas

Propiedades	Recomendaciones	Unidades	Método de control
Granulometría			[DIN 19683] ¹
$d \leq 0,063 \text{ mm}$	≤ 20	% en peso	
$d \geq 2,0 \text{ mm}$	≤ 60	% en peso	
Densidad aparente			[FLL] ²
<i>Sobre materia seca</i>			
<i>Sustratos-mezcla</i>	1,0-1,6	g/cm ³	
<i>Sustratos a base de fragmentos de materiales minerales</i>	0,6-1,3	g/cm ³	
<i>A máxima capacidad de agua</i>		g/cm ³	
<i>Sustratos-mezcla</i>	1,4-2,2	g/cm ³	
<i>Sustratos a base de fragmentos de materiales minerales</i>	1,0-1,8	g/cm ³	
Contenido de aire/agua			
<i>Porosidad total</i>	-	% en volumen	[VDLUFA] ³
<i>Máxima capacidad de agua</i>	≥ 45	% en volumen	[FLL] ²
<i>Contenido de aire a máxima capacidad de agua</i>	≥ 10	% en volumen	[FLL] ²
Contenido de aire a pF 1,8			[FLL] ²
<i>Sustratos-mezcla</i>	≥ 15	% en volumen	
<i>Sustratos a base de fragmentos de materiales minerales</i>	≥ 20	% en volumen	
<i>Permeabilidad al agua (K_f)</i>	$\geq 0,0005$	cm/s	[FLL] ²
	$\geq 0,3$	mm/min	
pH, carbonatos y salinidad			
<i>pH</i> <i>(rango de tolerancia)</i>	5,5-7,0		[CaCl ₂]
<i>Carbonatos</i>	≤ 25	g/l	[SCHEIBLER] ⁴



Propiedades	Recomendaciones	Unidades	Método de control
<i>Salinidad</i>	≤ 2,5	g/l	[Extracto acuoso KCl]
<i>(ideal)</i>	≤ 1,0	g/l	[VDLUFA] ³
<i>(en caso necesario)</i>	≤ 1,5	g/l	[Solución saturada de yeso]
Materia orgánica			
<i>Contenido en MO</i>	3,0-6,0	% en peso	[VDLUFA] ³
<i>Sustratos a base de fragmentos de materias minerales</i>	6,0-12,0	% en peso	[VDLUFA] ³
Relación C/N			
<i>Sustratos-mezcla</i>	≤ 45	-	[VDLUFA] ³
<i>Sustratos a base de fragmentos de materias minerales</i>	≤ 60	-	[VDLUFA] ³
Nutrientes			
<i>Capacidad de intercambio iónico</i>			
<i>Sustratos-mezcla</i>	≤ 120	mmol/Z/l	[ÖNORM L 1086] ⁵
<i>Sustratos a base de fragmentos de materias minerales</i>	≥ 100	mmol/Z/l	[ÖNORM L 1086] ⁵
<i>Nitrógeno N</i>	≤ 80	mg/l	[VDLUFA] ³
<i>Fósforo P₂O₅</i>	≤ 200	mg/l	[VDLUFA] ³
<i>Potasio K₂O</i>	≥ 150	mg/l	[VDLUFA] ³
<i>Magnesio Mg</i>	≤ 120	mg/l	[VDLUFA] ³

Comparando los valores anteriores se podrían sacar diferentes conclusiones. En primer lugar, las **granulometrías** de los sustratos de ambas tipologías de cubiertas vegetadas son similares, con valores ligeramente más acotados en las extensivas. La **densidad**, por lo general, es mayor en las cubiertas intensivas lo cual afecta de forma frontal a las solicitaciones que ejercerá sobre la estructura resistente pues al peso de una vegetación mayor hay que sumarle el del espesor de sustrato que puede llegar a una potencia de hasta 1 metro en algunos casos. A su vez, las cubiertas intensivas exigen una mayor **capacidad de retención** de agua debido a las características de las plantas que alojan. Esto, de la misma manera, repercutirá en forma de peso añadido en periodos húmedos de forma importante. Por otro lado, las cubiertas extensivas admiten **pH** ligeramente más básico que las intensivas, rondando el pH neutro. Por su parte, las intensivas presentan un **mayor contenido en sales** y menor en **materia orgánica**, requiriendo una mayor concentración de **nutrientes**. Estas características están muy vinculadas a las exigencias propias de cada tipo de vegetación y será necesario tenerlas en cuenta a la hora de proyectar una cubierta vegetada o, en nuestro caso, realizar los ensayos pertinentes en el laboratorio. La capacidad de fijación de contaminantes (metales pesados en general) determinará la posibilidad de empleo del agua efluente. Este uso no será en ningún caso de consumo humano (Razzaghamanesh, et al., 2014), pero existen diversas posibilidades como riego de jardines, cisternas, etc.



El documento NTJ-11I (Colegio Oficial de Ingenieros técnicos agrícolas y peritos agrícolas de Catalunya, 2000) también recoge los valores de los pesos aproximados orientativos de los materiales empleados en la capa de sustrato para cubiertas intensivas, basándose en estimaciones de los distintos compuestos y sirviendo a modo de guía para calcular las cargas actuantes. Los valores de la siguiente tabla están definidos para grosores de 1 cm:

Tabla 4. Pesos aproximados de materiales de la capa de sustrato para cubiertas intensivas

Materiales	Peso en seco (kg/m²)	Peso saturado (kg/m²)
<i>Sustrato-mezcla</i>	8-16	14-22
<i>Sustratos a base de fragmentos de materiales minerales</i>	6-13	10-18
<i>Horizonte superficial del suelo</i>	13	19
<i>Turba</i>	15	17
<i>Perlita</i>	10	52
<i>Placa de lana de roca</i>	3-7	46-92

Estos valores se definen para cubiertas intensivas y no para cubiertas extensivas debido a que las primeras, derivado de sus características particulares, condicionarán de una manera más crítica la estructura a través de los pesos propios. Por este motivo resulta conveniente fijar los valores que deberán tener los distintos materiales que la componen para el cálculo de las cargas de la capa.

En cuanto al potencial aislante de la capa de sustrato, es necesario relacionarlo con el clima al que se va a ver sometida la edificación (Susca, 2019). La función que provee en climas fríos es crucial para la reducción de consumo de energía para calentar la vivienda, alcanzando ahorros de entre el 20 y el 60 %. Por otro lado, en climas templados-cálidos su poder aislante permite ahorrar hasta un 75 % de la energía empleada en mantener frescas las estancias, en algunos casos. Esto evidencia la importancia que, fundamentalmente, recae en el espesor del sustrato, precisando de capa aislante en caso de espesores insuficientes para este fin. Esto está sujeto a un comportamiento no-lineal, pues cuanto más extrema sea la temperatura exterior más efectiva será la capa de sustrato en cuanto a su aislamiento térmico, además de verse penalizada en caso de precipitación, lo cual evidencia la necesidad de estudiar diferentes tipologías y materiales para cada localización concreta (Lin, et al., 2013).

2.4.2 Capa separadora

Un geotextil es, tal y como lo define el IGS (*International Geosynthetics Society*) (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2015), una lámina continua de tejido, fibras o puntos de hilo de material flexible y permeable cuyas funciones principales son las de separación, filtración, drenaje, refuerzo y control de la erosión. Debido a estas propiedades, se hace adecuado su uso en cubiertas verdes para el desempeño de diversas funciones, estudiándose en este Trabajo Fin de Máster aquellas que guardan mayor relación con la sostenibilidad y la resiliencia de las ciudades.

Generalmente, en cubiertas vegetadas se dispone de una capa drenante colocada bajo el sustrato, buscando conseguir un drenaje adecuado (evitando la colmatación de la capa drenante por la migración de los finos del sustrato) y una protección mecánica de la membrana. De esta forma se puede lograr embalsar agua que sirva como reserva hídrica para la vegetación, ascendiendo ésta por capilaridad por el sustrato una vez vaya perdiéndose humedad por evapotranspiración en periodos de tiempo no lluviosos. Se debe asegurar el drenaje



ante las condiciones más críticas, siendo éstas asimilables a una situación de lluvia continuada de gran intensidad.

En cubiertas planas extensivas es habitual la colocación de una capa filtrante que separe el sustrato de la capa drenante, bloqueando así el paso de finos desde la capa superior evitando un lavado que pudiera colmatar la capa inferior y producir problemas que disminuirían el rendimiento de ambos estratos. De forma general, la capa filtrante está compuesta por una lámina resuelta a base de fibras sintéticas (geotextil), a la cual se le exigen diversas características (Lemos Galíndez, et al., 2018), recogidas en la página 25.

La capa filtrante se debe disponer sobre el total de la capa drenante, con un solape de mínimo 10 cm sobre la capa adyacente según las Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo NTJ-11E (Colegio Oficial de Ingenieros técnicos agrícolas y peritos agrícolas de Catalunya, 1999), al igual que sobre la superficie del sustrato a lo largo del perímetro de la cubierta. En cubiertas inclinadas se podrá prescindir de esta capa cuando se disponga un dispositivo de protección frente a deslizamientos.

Los **geotextiles** son una **parte esencial en cubiertas vegetadas a pesar de que su espesor representa una parte ínfima del total del sistema**. Su desarrollo a partir de los 60 (Jim, 2017) abrió una puerta a la notable mejora de las propiedades de las cubiertas ecológicas, destacando ya su uso desde la década de los 80 (Bostenaru Dan, 2013) y aumentando así de forma considerable el potencial de esta tipología constructiva, existiendo aún un importante margen de desarrollo especialmente con el uso de nuevos materiales. Los empleados en cubiertas verdes deben reunir una serie de características que los hagan resistentes ante las sollicitaciones a las que van a estar sometidos durante la colocación y la vida útil del elemento. Esto debe ocurrir sin penalizar las condiciones hidráulicas del sistema en su conjunto, de forma que la permeabilidad sea la adecuada para dejar circular agua suficiente hacia la capa inmediatamente inferior y la función de filtro sea efectiva, aislándola de los finos del sustrato que tenderán a circular con el agua y no colmatándose. Los materiales más empleados son el **polietileno** y el **polipropileno**, debido a sus excelentes cualidades mecánicas y a su alta durabilidad en condiciones de hidrólisis, oxidación y ataque de microorganismos (Bozorg Chenani, et al., 2015) (Industrial Fabrics Association International Narejo, 2006) (Peri, et al., 2012). A las adecuadas propiedades anteriores hay que sumar el hecho que ambos materiales puedan ser reutilizados o compuestos de material reciclado tras un proceso de granza, de esta forma la huella de carbono se reduce notablemente al ser componentes de origen fósil.

En este componente concreto es más acuciante la casi-necesidad planteada de emplear materiales reciclados, pues se ha demostrado que, en extensiones pequeñas y a corto plazo, podría darse el caso, según los polímeros empleados, que las sustancias tóxicas generadas en el proceso productivo del elemento superen las fijadas por la cubierta (Bianchini & Hewage, 2012). Esto es relativo, pues en el proceso productivo gran parte de las sustancias tóxicas emitidas se liberan en un ambiente controlado para su posterior tratamiento, pero es representativo de la importancia del reciclaje de estos materiales.



3 METODOLOGÍA

Tal y como se expuso en el apartado 'Definición de objetivos', uno de los objetivos de este TFM es la aplicación de un sistema objetivo de análisis que permita localizar y ponderar aquellos indicadores que sean más relevantes y que tengan mayor influencia sobre los resultados de la campaña experimental y la definición de las consiguientes conclusiones. Para ello, es necesario realizar un análisis multicriterio válido para identificar dichos indicadores presentes en la totalidad de sustratos o capas drenantes que son potenciales objetos de estudio o aplicación, permitiendo de este modo su comparación y comprobando la adecuación a los objetivos establecidos para la campaña experimental.



3.1 Análisis multicriterio

El objetivo de un análisis multicriterio es de forma general, por definición, la comparación entre dos o más proyectos o medidas en base a diferentes criterios, ponderando los parámetros que intervienen según su trascendencia. En el ámbito ingenieril se emplea fundamentalmente para realizar valoraciones *ex ante* de diferentes alternativas de proyecto hasta una serie de métodos constructivos.

La adecuada realización de este análisis proporciona unos resultados notablemente mejores para igualdad de recursos invertidos en cualquier estudio, ya que con él se detectan los parámetros con mayor incidencia y, por tanto, ayuda a focalizar el esfuerzo intelectual de los participantes. El estado actual de la economía es dinámico y competitivo, destaca por su complejidad y continuo cambio, por lo que una técnica de decisión racional y objetiva que permita la comprensión de los flujos de decisión es de gran utilidad.

Con el paso de los años, varios métodos de análisis multicriterio han destacado en su uso en el ámbito de la construcción (Jato Espino, et al., 2014):

- **ELECTRE** (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*, sus siglas en francés). Conjunto de técnicas dirigidas a comparar un grupo de alternativas a través de la aplicación de índices de concordancia y discordancia. Sus aplicaciones principales son la valoración de diferentes sistemas de toma de decisiones en Finlandia (Hokkanen, et al., 2001), la bondad de la implementación de tipología variada en buenas prácticas ambientales para la gestión de la escorrentía (BMPs), la selección de contratistas y los problemas que conlleva (Marzouk, 2010) o la localización óptima de instalaciones de residuos de construcción y demolición (RCDs).
- **DEA** (*Data Envelopment Analysis*, sus siglas en inglés). Sistema no-paramétrico empleado para medir la eficiencia de un conjunto de parámetros o unidades de toma de decisión. Destaca su aplicación en la mejora en voladura en roca en Noruega (Odeck, 1996), la eficiencia en la gestión del tráfico de camiones durante la construcción y mantenimiento de una carretera (Hjalmarsson & Odeck, 1996) o la eficiencia ecológica de acabados de muros exteriores (Tatari & Kucukvar, 2011).
- **AHP** (*Analytic Hierarchy Process*, sus siglas en inglés). Técnica estructurada para el análisis multicriterio de acuerdo con una comparación escalada de pares de parámetros. Entre otras aplicaciones ha sido empleado en la elección de grúas torre (Saaty, 1988).
- **ANP** (*Analytic Network Process*, sus siglas en inglés). Técnica que parte de generalizar el método AHP antes descrito, pero asumiendo interdependencia entre los criterios empleados. Es más complejo al tratar de detectar y explicar dichas interacciones. Ha sido empleado en el estudio de factores de riesgo en la construcción de puentes urbanos (Shih-Tong Lu, et al., 2007) o en la comparación de técnicas de construcción subterránea para la renovación de una red de alcantarillado (Bobylev, 2011).
- **TOPSIS** (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*, sus siglas en inglés). Basado en la idea de que la mejor alternativa es aquella que más se acerca a la solución ideal, partiendo de la base de que esta solución ideal no es viable a expensas del estado del arte actual de la técnica. Entre otras aplicaciones se encuentra la selección de materiales para tejados (Rahman, et al., 2012) o la optimización de dosificación de hormigones de alta resistencia autocompactantes (Şimşek, et al., 2013).

Los métodos más comunes pueden implicar el modelado matemático de los parámetros involucrados y sus interacciones para agilizar el proceso de toma de decisiones (Mahdiyar, et al., 2019). Dado que este no es el objetivo del presente proyecto se aplicará un modelo más simple pero no por ello menos eficaz. Estos métodos, a pesar de su escasa complejidad, son significativamente útiles a la hora de minorar la incertidumbre y



el riesgo presente en la toma de decisiones de cualquiera de los ámbitos del sector constructivo. Tal y como se mencionó en el apartado de 'Introducción', cualquier mejora en este campo puede ayudar a reducir en gran medida el amplio impacto sobre la economía, la calidad de vida y el medio ambiente, por lo que no solo mejorar sino acortar el proceso de toma de decisiones resulta un objetivo más que atractivo.

3.1.1 Método Electre

El más empleado de los mencionados anteriormente es el método Electre por lo que, sumado a la experiencia de los tutores del proyecto y su recomendación, es el elegido para el presente TFM. Este método se empezó a desarrollar en 1968 (Bernard, 1968) junto con la asesoría SEMA, y hasta la fecha ha ido actualizándose en diferentes versiones (Savadogo & Shanian, 2006). Una de las ventajas fundamentales de este método es que, mediante la aplicación de las mencionadas matrices de concordancia y discordancia, es relativamente sencillo descartar alternativas y restringir su número a uno más manejable en casos en los que el conjunto de alternativas de partida penalice en gran medida el tiempo de estudio.

El proceso de aplicación (Díez Olea, et al., 2019) es el que se describe a continuación:

1. Definición de los criterios a emplear para sopesar la conveniencia de las alternativas, basándose en los principios de economía, medio ambiente y técnica descritos en Criterios sobre indicadores - Justificación. Deben ser criterios específicos, preferiblemente cuantificables, que puedan compararse y ordenarse según el objetivo de cada.
2. Gradación de los criterios, asignando valores enteros de 1 a 10 en función de su importancia (peso). Cada caso estudiado precisa de una gradación propia, función de su relevancia o relación con cada parámetro o cualidad estudiada, además de la intención concreta del proyecto en cada caso.
3. Valoración una a una de las diferentes alternativas en función de cada uno de los criterios definidos, recogiendo junto con los pesos en la 'Matriz de pesos y calificaciones'. Deberán estar graduadas por números enteros de 1 a 10. Para que sea coherente a la alternativa más ventajosa le corresponderá la calificación más alta.
4. Cálculo de matrices de concordancia y discordancia y priorización de alternativas.

a. Matriz de concordancia entre A_i

Esta matriz surge de la comparativa entre las calificaciones de dos alternativas. Cuando una calificación es igual o superior a la calificación de la alternativa, el peso se multiplica por la unidad (por 0 si resulta menor). De forma sucesiva para cada criterio aplicado, se van sumando los valores o elementos que conforman la matriz.

$$C_{A_i/A_j} = \sum_{j=1}^{n_C} W_j g(A_i, A_j)$$

$$g(A_i, A_j) = 1 \quad \text{si } C_{A_{ik}} \geq C_{A_{jk}} \quad ; \quad g(A_i, A_j) = 0 \quad \text{si } C_{A_{ik}} \leq C_{A_{jk}}$$

$$p = \frac{\sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A} C_{A_i/A_j}}{n_A^2 - n_A}$$



b. Matriz de discordancia entre A_i

De forma análoga, la matriz de discordancia surge de restar la calificación de una alternativa a la de aquella con la que se compara para cada criterio, seleccionando finalmente el valor máximo el cual deberá ser siempre positivo. En el caso de que resulte menor de 0 se tomará valor nulo.

$$D_{A_i/A_j} = \max(C_{A_{ik}} - C_{A_{jk}}) \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots, n_C$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A} D_{A_i/A_j}}{n_A^2 - n_A}$$

Construidas ambas matrices, el siguiente paso es comprobar las dominancias probables, las cuales se dividen en dos grupos: “dominancia real hacia/desde”. Con ellos se define la probabilidad de que una alternativa domine/sea dominada a/por otra alternativa.

si $C_{A_i/A_j} \geq p$, es probable que A_i domine a A_j

si $C_{A_i/A_j} < p$, es probable que A_i sea dominada por A_j

Tras este paso debe comprobarse que se cumple la condición de dominancia real. Para ello y de forma análoga a la anterior, se define:

si $D_{A_i/A_j} \geq q$, A_i realmente domina sobre A_j

si $D_{A_i/A_j} < q$, entonces A_i es realmente dominada por A_j

Una vez hecho esto, se puede ya establecer un orden de aplicación de las alternativas seleccionadas.

3.1.2 Criterios sobre indicadores - Justificación

Los criterios más destacados a tener en cuenta se fijan en base a los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad, apoyándose en los criterios recogidos por el MITMA (MITMA, 2017), al ser este uno de los fines principales de las cubiertas vegetadas tal y como se expuso en el apartado 2.2 del presente documento.

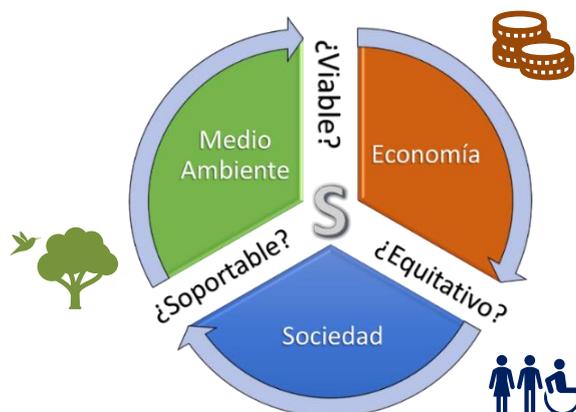


Figura 24. Criterios de sostenibilidad (Fuente: elaboración propia)

Esta manera de enfocar los proyectos y las tomas de decisiones se conoce por sus siglas anglosajonas como TBL, *Triple bottom line* (Ahi & Searcy, 2014), (Tabatabaee, et al., 2019) y da una visión holística



de la integración de estos tres puntos de manera interdisciplinar, conformando la perspectiva o filosofía ideal que debería tener todo proyecto o línea de investigación. Mediante la elección de los criterios a analizar más relevantes, realizada en el presente capítulo, y su evaluación mediante la aplicación de un MCDA (*Multicriteria Decision Analysis*) tal y como se establece en el capítulo 3.1.1 Método Electre, se seleccionará la mejor composición sustrato-geotextil desde el punto de vista de la sostenibilidad y la resiliencia de las ciudades actuales-futuras, siendo éste el propósito fundamental del proyecto.

En base a estos tres principios fundamentales, las cualidades más significativas cuantificables de una cubierta verde son:

ECONOMÍA

- **Costes:** presupuesto estimado en función de la tipología de cubierta verde a emplear y los requerimientos de su producción, en general entre un 10 y un 20 % menor que las cubiertas clásicas (Berardi, et al., 2013). Directamente relacionado con la superficie de la cubierta en el caso de los geotextiles y con superficie-espesor en el caso del sustrato y la complejidad de ésta, estando fuertemente condicionado por el clima a afrontar. Este coste se extiende en 3 etapas diferenciadas:
 - Producción y colocación
 - Mantenimiento + ahorros generados por los beneficios propios de la cubierta
 - Desmantelamiento
- **Mantenimiento:** necesidades de mantenimiento condicionadas por la tipología empleada y las características de la capa vegetal, principalmente. Vendrán dadas por las condiciones climatológicas a las que la cubierta hará frente (precipitación, helada, viento, temperatura, insolación, etc.) y el grado de aprovechamiento de ésta. Condicionará en gran medida el rendimiento de la cubierta vegetada, por lo que el mantenimiento de las propiedades originales de las secciones y materiales empleados en el diseño otorgará mayor peso en el análisis a los parámetros más críticos.
- **Calidad:** grado de calidad requerido y flexibilidad en torno a los valores de éste. Los requisitos serán estructurales para las capas inferiores y de características/propiedades para las superiores. Estos parámetros están establecidos con precisión para el caso de los sustratos tal y como se recoge en el capítulo 2.4.1. y condicionarán el funcionamiento adecuado del sistema.
- **Características resistentes y deformacionales** de cada uno de los componentes, junto con su evolución a lo largo del tiempo. Relacionadas con el peso unitario de la sección pueden arrojar una visión económica de los aspectos técnicos más relevantes de cada sección estudiada.
- **Peso:** condicionando de forma directa al forjado que deberá soportar la cubierta y repercutiendo así en el coste de ésta (también afecta al resto de la estructura del edificio). Está condicionado por la densidad de sus componentes y el espesor requerido para la configuración seleccionada.

MEDIO AMBIENTE

- **Aislamiento térmico:** función de los materiales constructivos seleccionados y su rendimiento una vez instalado el sistema. Prevalecen los sistemas constructivos y materiales que tengan un mejor grado de certificado ambiental, lo cual está vinculado con menores emisiones y consumos. Este aspecto también tiene relación directa con la dimensión Económica de la sostenibilidad, pues produce una reducción en ocasiones importante de los costes de regulación de la temperatura en el interior del edificio en cuestión.



- **Emisiones generadas** durante la fabricación de los elementos, construcción y gestión/aprovechamiento de sus residuos. Es un parámetro difícil de medir, pero se puede apoyar su estimación en estudios previos sobre el ciclo de vida. Es un criterio con cierta componente Social como se señala más adelante.
- **Reciclabilidad:** valoración del uso de los materiales empleados una vez concluida la vida útil, ya sea en transformación a materia prima o para aplicación en usos similares, así como el uso de materiales reciclados de desechos de construcción.
- **Riqueza nutricional**, de tal forma que se adecúe a las exigencias de las especies vegetales a las que da cobijo el sustrato.
- **Preservación de los ecosistemas urbanos.** Adecuación con las exigencias del hábitat propio de la localización en la que se encuentre cada cubierta. Relacionado con el contenido en materia orgánica del material, en este caso del sustrato.
- **Salinidad y alcalinidad**, medidas directamente sobre el sustrato y sobre el agua efluente. Condicionan en primer lugar el correcto desarrollo de la cobertura vegetal y, por otro lado, los posibles usos que se le puedan dar al agua y los requisitos de su tratamiento.
- **Permeabilidad**, de forma que la magnitud de la sección total condicionará la respuesta del sistema ante eventos importantes de precipitación y la laminación de éstos. Es un parámetro que varía su dimensión entre el sustrato y el geotextil, por lo que sería interesante medirlo en ambos componentes por separado y en el conjunto compuesto.
- **Fijación de dióxido de carbono**, con los beneficios sociales directos que conlleva a través del bienestar y la mejora de la salud de la ciudadanía. Esto se produce no sólo durante el uso del sistema gracias a la vegetación, sino también a través de la menor huella de carbono derivada del origen y características de los materiales empleados en la construcción del sistema de cubierta. También tiene un carácter también Medioambiental de primer orden.

SOCIEDAD

- **Aislamiento acústico:** capacidad de no transmitir ondas sonoras a través de la sección de cubierta empleada durante la vida útil del elemento. Tiene relación con el aspecto Social por su repercusión en el bienestar de las personas.
- **Seguridad:** desde el punto de vista de la facilidad en cuanto al transporte e instalación de todos los elementos que intervienen en la cubierta hasta la calidad de los efluentes (agua) y su uso posterior.
- **Aceptación** por parte de los ciudadanos, tanto por parte de aquellos que son usuarios directos de la cubierta por ser propietarios de la edificación como quienes de forma indirecta disfrutan de las ventajas de esta tipología. Son importantes tanto la opinión técnica sobre las cubiertas verdes, donde influye de forma considerable el conocimiento sobre ellas y sus ventajas, como el potencial estético.
- **Uso social** de la cubierta, adquiriendo una dimensión relevante en cubiertas intensivas y, especialmente, en tipologías transitables. También serían importantes aquellas a las que se les diera un uso agrícola.

Estos son algunos de los criterios genéricos relacionados con las cubiertas vegetadas que tratan de cuantificar (si es posible) o valorar de alguna forma las bondades de éstas y sus componentes. En este Trabajo Fin de Máster, al estudiar exclusivamente las capas de sustrato y geotextil, se hace necesario adaptar estas cualidades a una serie de criterios que puedan ser objeto de medición durante la campaña de ensayos o a través de



estimadores. Es por ello que los indicadores específicos desprendidos de la bibliografía (Emilsson, 2008) (Berretta, et al., 2014) (Stovin, et al., 2015) y (Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria (LAGUC)- Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), 2005), y la reflexión conjunta con los tutores atienden a cualidades más concretas y medibles en una campaña experimental.

Un indicador se define como la medida cuantitativa que se emplea para la valoración de una determinada cualidad. En el caso que ocupa el presente estudio, siendo el objetivo evaluar la contribución a la resiliencia y la sostenibilidad, se ha tratado de establecer una serie de indicadores que a través del Método Electre arrojen una propuesta de un par sustrato-geotextil lo más conveniente posible, buscando parámetros de carácter **objetivo y medible**. Para este fin, se ha confeccionado una lista de indicadores apoyados en el TBL en un proceso en continuo cambio, en función de la consulta de nueva bibliografía y el acopio de nueva información, tanto de la experiencia de miembros de LAGUC (Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria (LAGUC)- Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), 2005) como de catálogos de empresas del sector sobre productos consultados en internet (Projar, 2020), (ZinCo- Life on roofs, 2020), entre otros.

Con el fin de externalizar los criterios empleados en el proyecto, se decidió consultar a profesionales con experiencia en el campo de las cubiertas vegetadas con diferentes puntos de vista dentro del sector: profesionales de la construcción, investigadores, docentes, etc. Para realizar esta consulta se les envió un Modelo de Encuesta en formato Excel con la propuesta inicial de indicadores, con las correspondientes indicaciones para que éstos dieran su valoración de la importancia de cada uno de ellos. Además, se les dio la opción de proponer nuevos indicadores que no hubieran sido recogidos, en primera instancia, en esta propuesta; de modo que en caso de recibir propuestas que se adecuaban a la campaña se estuviera en disposición de valorar su inclusión en el proyecto. El Modelo de Encuesta se recoge en el apartado de 'Anejos', para su consulta.

La primera propuesta de indicadores, junto con el componente al que serían objeto de ensayo, que se enviaron a un panel de expertos en la materia fue la siguiente:

Tabla 5. Propuesta inicial de indicadores

<i>Indicador</i>	<i>Unidades</i>	<i>Sustrato</i>	<i>Geotextil</i>	<i>Compuesta</i>
<i>Coste de ciclo de vida</i>	€/m ²	X	X	
<i>Huella de carbono</i>	kg CO ₂ eq./m ²	X	X	
<i>Composición en MO</i>	% en peso	X		
<i>Aislamiento térmico (U)</i>	W/m ² ·K	X		
<i>Densidad aparente</i>	kg/m ³			
<i>en seco</i>				X
<i>saturado</i>				X
<i>Permeabilidad</i>	l/m ² ·s		X	X
<i>Contenido de MO del efluente</i>	mg/l			X
<i>Punzonamiento estático</i>	kN		X	
<i>Perforación dinámica</i>	mm		X	
<i>Abertura característica</i>	mm		X	
<i>Masa por unidad de superficie</i>	kg/m ²		X	
<i>Resistencia a la hidrólisis</i>			X	
<i>Resistencia a la oxidación</i>			X	
SUMATORIO		4	9	4

Esta lista se mantuvo abierta, a la espera de la respuesta del panel de expertos consultados para así valorar la conveniencia de incluir sus nuevas propuestas.



En la elaboración de este apartado se valoró la utilización de una serie de indicadores que surgen del análisis de los principios de sostenibilidad mencionados al inicio del presente capítulo. Algunos son parámetros que pueden resultar obvios en primera instancia, pero se ha considerado su no conveniencia por diversos motivos, como puede ser la irrelevancia con respecto a los objetivos del proyecto, su difícil conexión con otros parámetros a la hora de tratar de extraer conclusiones sobre su idoneidad o, simplemente, la imposibilidad de su medida por motivos de complejidad de los ensayos o disponibilidad de equipos, así como por falta de medios disponibles en los laboratorios. Algunos de estos **parámetros desechados** se explican y se justifica la decisión tomada a continuación:

- **Seguridad** en la instalación: a pesar de ser uno de los parámetros más a tener en cuenta en cualquier obra y su directa relación con la edificación, la subjetividad de su valoración hace que no resulte adecuado para el estudio.
- **Reciclabilidad**: se tendrá en cuenta de forma indirecta, pues se priorizará el uso de aquellos materiales o componentes que provengan de residuos de construcción. En cierto modo, al recoger el indicador de Huella de carbono ya se está favoreciendo este tipo de materiales por lo que el término Reciclabilidad no se incluye directamente. Se primará especialmente el uso de áridos provenientes de residuos de construcción y demolición (RCDs) en la fracción mineral de la capa de sustrato.
- **Uniformidad del material**: su relación con un mejor comportamiento de los sistemas es directa y se da en todo tipo de estructura y material, pero su inclusión en la lista de parámetros del proyecto supone aumentar el número de ensayos sin aportar una información de gran aporte. Es evidente que en la instalación se deberá tener en cuenta, pero no es objeto de estudio.
- **Porosidad**: propiedad que tiene relación directa con el peso que la capa de sustrato ejerce sobre la estructura resistente o forjado y, especialmente, con la permeabilidad (puede valorarse indirectamente a partir de este parámetro).
- **Capacidad de retención de agua**: descartado por el mismo motivo que la Porosidad se puede valorar indirectamente a partir de la permeabilidad).
- **Salinidad del efluente**: es una característica que influirá en los posibles usos posteriores del agua recogida por la cubierta vegetada, en caso de que se dieran, pero su rango está especialmente condicionado por el ambiente en que se ubique. Es por ello por lo que no resulta adecuado para este proyecto, pues no arroja información relevante para los objetivos.
- **Filtro de contaminantes**: del mismo modo que la salinidad, su dependencia excesiva del ambiente la hace una propiedad inadecuada para el presente estudio. Es una propiedad esencial y con relación directa con los objetivos de la instalación de cubiertas verdes, pero en este caso siendo los objetivos fundamentales el estudio de sustratos y geotextiles y su relación con la resiliencia y sostenibilidad hacen que, junto con la ausencia de las principales hacedoras de esta fijación de compuestos contaminantes, no resulte un aporte de información suficiente.
- **Resistencia a tracción** del geotextil: debido a los requisitos de la tipología en la que se van a emplear se antoja como propiedad irrelevante. Las solicitudes a tracción en cubiertas son relativamente reducidas, por lo que se considera suficiente con tomar como válidos los valores recogidos en la ficha de producto del fabricante. La mayor solicitud a tracción que se pudiera dar en este caso sería la dilatación térmica, pero la deformabilidad de hasta un 60% hace que esto no suponga un problema según el conocimiento de los tutores del presente



TFM. En caso de geotextiles reciclados tampoco resultaría problemático, pues para la confección de un nuevo geotextil se tritura y hace pasar por una granza, produciendo un material con las especificaciones del original.

- **Resistencia microbiológica:** es una propiedad que resultaría interesante de ensayar debido a que en el contacto entre el geotextil y sustrato debido a la humedad se crea una película de microbiota que puede repercutir sobre el geotextil (siempre que éste no esté hecho de polietileno o polipropileno, casos en los que no supondría ninguna afección relevante). Es un ensayo que se ha desechado debido a su complejidad y al alto consumo de tiempo, siendo los geosintéticos de polipropileno y polietileno poco sensibles a este ensayo según la experiencia técnica previa. En el caso de la Geoespuma, podría ser sensible a este ensayo, pero existen ensayos más sencillos como los de oxidación e hidrólisis que aportan una información similar.
- **Deterioro durante la instalación:** se trata de un ensayo de una agresividad excepcional, que no guarda relación con aquella a la que se vería sometido el geotextil en una cubierta vegetada. Es un ensayo concebido para geotextiles que serán colocados entre capas de áridos y posteriormente compactados, por lo que no es aplicable a la tipología de cubiertas vegetadas en ningún caso.
- **Capacidad de flujo en su plano:** indicador concebido especialmente para geodrenes. En nuestro caso no resulta relevante pues el flujo de agua será en cualquier caso perpendicular a la capa de geotextil.
- **Envejecimiento a la intemperie:** ensayo descartado debido a que se entiende que, en condiciones normales, un geotextil no se verá expuesto a agentes atmosféricos de forma directa y continuada debido a la rapidez y sencillez del proceso constructivo de una cubierta verde. Se recomienda que los geotextiles sean tapados en las 24 horas siguientes a su colocación, lo cual se entiende que se cumple en la mayor parte de los casos. Además, los rollos de este material son suministrados con la conveniente protección que los protege hasta su apertura.
- **Tracción de uniones y costuras:** ensayo descartado por el método de colocación de geotextiles empleado en cubiertas vegetadas, empleando solapes de 10 cm en lugar de cosido.
- **Espesor a presiones especificadas:** relevante cuando la capacidad de flujo en su plano es una propiedad fundamental en el correcto funcionamiento del sistema, el cual no es el caso.

3.1.3 Indicadores seleccionados - Definición

A continuación, se definen los criterios seleccionados en el apartado anterior para la aplicación de la metodología de análisis multicriterio en la presente investigación:

- **Coste del ciclo de vida (€/m²):** cuantía económica por unidad de superficie construida, independientemente del resto de parámetros referentes a la tipología en cuestión. Se incluirá la estimación del coste de los materiales, la instalación, el mantenimiento a lo largo de la vida útil de la cubierta, además de los posibles costes de operación si su uso así lo precisa.
- **Huella de carbono (kg CO₂ eq./m²):** indicador ambiental que busca mostrar la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos de forma directa o indirecta por un producto concreto. Aquellos componentes con menor huella de carbono resultarán más interesantes debido a la menor contaminación relacionada a la extracción y procesado de sus materiales, fabricación (si así lo requiriese), transporte e instalación entre otros. Como se ha explicado al hablar de



la reciclabilidad, se priorizará el uso de componentes reciclados con el fin de reducir la huella de carbono.

- **Composición en materia orgánica (% en peso):** porcentaje de la masa del producto que representa la MO. Se recoge por su relación con la preservación de ecosistemas urbanos al resultar necesaria para la vida, tanto de la vegetación colocada en la cubierta como de aquella que ha crecido en ella de forma natural, así como de los organismos y microorganismos que habiten en el sustrato y requieran de estos compuestos para el desarrollo de sus procesos vitales.
- **Aislamiento térmico:** se evaluará valorando la transmitancia térmica ($W/m^2 \cdot K$) del espesor de sustrato. Esta propiedad se define como la cantidad de calor que fluye a través de un medio conductor por unidad de tiempo y superficie al existir un gradiente térmico de 1 K. Está directamente relacionado con uno de los objetivos fundamentales de esta tipología de cubiertas, la capacidad de aislamiento. Por tanto, es un parámetro que repercute de forma evidente tanto sobre el aspecto medioambiental debido a la menor necesidad de consumir energía para calentar o enfriar los hogares, como sobre el económico debido al ahorro del coste que esto supone tanto para el usuario como para la sociedad.
- **Densidad (kg/m^3):** masa por unidad de volumen del sistema. Su valor condicionará las cargas a resistir por las capas subyacentes y el forjado, y se medirá tanto en estado seco como saturado. Tiene, por tanto, relación con la economía al repercutir negativamente en el dimensionado de la estructura resistente cuando las potencias de sustrato sean considerables. La razón por la que se mida sobre el sistema y no sobre el sustrato es la susceptibilidad del geotextil de empaparse y provocar la acumulación de agua en la parte inferior del sustrato.
- **Permeabilidad (cm/h):** es la capacidad de un material para permitir el paso de un fluido a su través sin alterar su composición, midiéndose en volumen por tiempo y unidad de superficie (lo cual resulta unidades de longitud partido tiempo). Esta propiedad depende, fundamentalmente, de tres factores: porosidad, viscosidad del fluido y presión. El fluido en cuestión será en este caso agua de precipitación a presión atmosférica.
- **Contenido de MO del efluente (mg/l):** porcentaje de la masa del agua efluente que representa la MO. Esto condicionará el posible uso posterior del agua, así como la potencial estabilidad de la composición en MO del sustrato a lo largo del tiempo y, por tanto, las necesidades de restauración de los valores óptimos recogidos en la 'Tabla 2. Valores recomendados para los sustratos de uso en cubiertas extensivas'.
- **Punzonamiento estático (kN):** mide la fuerza necesaria para empujar un émbolo con extremo plano a través del geotextil. La muestra está sujeta entre dos anillos metálicos y el émbolo avanza perpendicularmente a ella con una velocidad constante. Se monitorizan fuerza de perforación, desplazamiento del émbolo y curva fuerza-desplazamiento. El ensayo puede denominarse 'ensayo CBR', pues el émbolo empleado es el mismo que el del ensayo CBR de medida de capacidad portante de suelos lo cual hace posible la relación con la compactación de un suelo sobre un geotextil. Es un indicador importante debido a las sollicitaciones a las que se verá sometido el geotextil en la instalación y, en especial, durante la vida útil de la cubierta debido al posible contacto directo de áridos sobre la membrana. Además, resulta una buena forma de controlar la resistencia ante las raíces que puedan alcanzar el geotextil.
- **Perforación dinámica (mm):** mide a resistencia frente a la penetración de un cono de acero en caída libre desde una cierta altura, estando el geotextil estirado y dispuesto sobre unos



anillos. El comportamiento del producto se cuantifica a través del grado de penetración, representando de esta manera la posible caída de piedras angulosas sobre la membrana o golpes con herramientas durante la puesta en obra que suelen tener una alta ocurrencia.

- **Abertura característica:** la apertura característica de una capa de geotextil condicionará no sólo la permeabilidad sino la posibilidad de colmatación de ésta, influyendo de este modo en el rendimiento del sistema.
- **Masa por unidad de superficie (g/m^2):** no condiciona directamente el sistema, pero sí es necesario comprobar el producto debido a la alta variabilidad que se observa respecto a los valores especificados en la ficha de fabricante, cuantificando así la uniformidad del producto. Es un ensayo simple y coste reducido, por lo que resulta interesante cerciorarse de la adecuación del material a lo esperado sin entorpecer con ello la campaña experimental.
- **Resistencia a la hidrólisis:** determina la resistencia a través de la exposición de probetas a agua a temperatura elevada, evaluando los cambios en las propiedades que resultan de esta exposición. El objetivo es determinar un nivel mínimo de aceptación de la durabilidad del material, lo cual repercute en el plano económico a través del rendimiento del sistema.
- **Resistencia a la oxidación:** determina la resistencia a la oxidación de productos a base de polipropileno y polietileno por ser los más sensibles a este proceso de deterioro, ensayando las probetas durante un tiempo determinado en el interior de un horno ($100\text{-}110^\circ\text{C}$). Este ensayo es indicador directo de la durabilidad del componente.

Relacionando estos indicadores con los pilares de la Sostenibilidad mencionados en el capítulo 3.1.2, se ha elaborado un diagrama en el que se ilustran las relaciones que se observan de forma subjetiva, pero tratando de mostrar la conexión con el objetivo del estudio:

1. Coste del ciclo de vida
2. Huella de carbono
3. Composición en MO
4. Aislamiento térmico
5. Densidad aparente
6. Permeabilidad
7. Contenido MO efluente
8. Punzonamiento estático
9. Perforación dinámica
10. Abertura característica
11. Masa por unidad de superficie
12. Resistencia a hidrólisis
13. Resistencia a oxidación

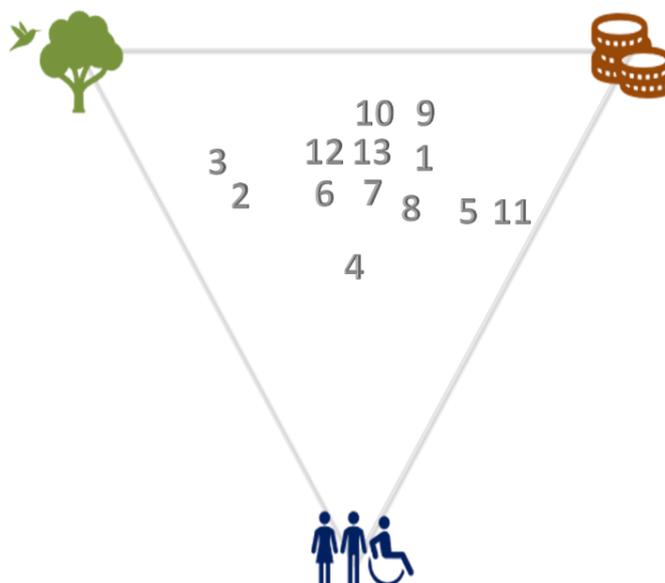


Figura 25. Relación indicadores y sostenibilidad
(Fuente: elaboración propia)

El objetivo fundamental sería que todo indicador tuviera relación con cada uno de los tres pies de la sostenibilidad, estando el ideal en el centro del triángulo. Esto lo cumplen con especial claridad el aislamiento térmico o la permeabilidad, siendo otros (especialmente la caracterización mecánica de los geotextiles) más difíciles de relacionar, aunque siempre existen vínculos indirectos.



3.1.4 Depuración de indicadores (panel de expertos)

A fin de dar una mejor justificación del empleo de los indicadores seleccionados y lograr objetividad en el proceso de selección, se decidió enviar la propuesta a un grupo de profesionales de diferentes sectores, con amplia y contrastada experiencia en cubiertas verdes y edificación, planificación y gestión de espacios urbanos o eficiencia energética. El propósito es conocer su valoración sobre la relevancia de los parámetros pre-seleccionados, externalizando así la toma de decisión de los indicadores a ensayar, incluyendo sus pesos en el análisis multicriterio seleccionado; escuchando posibles propuestas que no se hubieran contemplado durante la redacción del listado previo. Entre las personalidades consultadas se encuentran fabricantes, profesionales de la construcción y personal académico.

Los diferentes puntos de vista, motivados por la experiencia o la posición de cada individuo con respecto a las cubiertas vegetadas, aportan una visión global y más representativa que aleja la toma de decisiones de la subjetividad individual o particular de los participantes directos en el proyecto (autor y directores).

La forma de realizar este proceso ha consistido en el envío de un archivo Excel con tres pestañas, en las que se recogen:

- **Instrucciones:** explicando al encuestado el objetivo de la consulta y del estudio, dando instrucciones para el completado en la pestaña 'Valoración' de los pesos asignados a cada indicador según el nivel de importancia de cada uno. Esto se realiza mediante listas desplegables en las que se establecen los niveles: Muy importante, Importante, Ligeramente importante y Nada importante.
- **Indicadores:** mostrando el listado de indicadores y una breve descripción de la importancia de cada uno en términos de sostenibilidad.
- **Valoración:** mostrando el listado con los desplegables destinados para la valoración de los indicadores. Por último, se dispone un espacio en el que el encuestado puede añadir comentarios u observaciones sobre la encuesta en caso de que así lo vea conveniente, además de darle la posibilidad de proponer la fusión, eliminación o adición de nuevos indicadores.

De las encuestas enviadas se recibió un total de 10 respuestas, número que se considera suficientemente representativo y válido para las aspiraciones del proyecto. En base a los cuatro niveles de importancia marcados, los resultados de las encuestas derivaron en la confección de un índice basado en éstos. Consiste en la normalización de los grados de importancia respecto del total de respuestas recibidas, dando los siguientes pesos:

- *Muy importante (MI):* 4 puntos
- *Importante (I):* 3 puntos
- *Ligeramente importante (LI):* 2 puntos
- *Nada importante (NI):* 1 punto

Mediante un sumatorio de la importancia dada en las encuestas a cada indicador, los valores se normalizan y se divide dicho valor entre el número total de encuestas recibidas (10).

En la siguiente tabla se muestran los valores normalizados según las respuestas de los expertos:

**Tabla 6.** Normalización de las encuestas recibidas

Indicador	Nº de expertos				Σ (Imp · Peso)	Normalizado
	MI	I	LI	NI		
1- Coste de ciclo de vida	6	2	1	1	33	3,30
2- Huella de carbono	1	6	2	1	27	2,70
3- Composición en MO	2	4	3	1	27	2,70
4- Aislamiento térmico (U)	4	4	0	2	30	3,00
5- Densidad aparente	2	5	3	0	29	2,90
6- Permeabilidad	7	2	1	0	36	3,60
7- Contenido de MO del efluente	2	2	6	0	26	2,60
8- Punzonamiento estático	5	2	3	0	32	3,20
9- Perforación dinámica	5	3	2	0	33	3,30
10- Abertura característica	3	3	4	0	29	2,90
11- Masa por unidad de superficie	0	4	6	0	24	2,40
12- Resistencia a la hidrólisis	1	8	1	0	30	3,00
13- Resistencia a la oxidación	1	8	1	0	30	3,00

Mostrados los niveles de importancia otorgados por los expertos consultados que dieron respuesta, una vez normalizados, se obtiene como resultado el nivel de importancia que corresponde a cada indicador. Éste se recoge en la siguiente tabla de mayor a menor importancia:

Tabla 7. Resumen de la importancia de los indicadores

Indicador	Norm.	Importancia
6- Permeabilidad	3,60	Muy importante - Importante
1- Coste de ciclo de vida	3,30	Importante - Muy importante
9- Perforación dinámica	3,30	Importante - Muy importante
8- Punzonamiento estático	3,20	Importante - Muy importante
4- Aislamiento térmico (U)	3,00	Importante
12- Resistencia a la hidrólisis	3,00	Importante
13- Resistencia a la oxidación	3,00	Importante
5- Densidad aparente	2,90	Importante – Ligeramente importante
10- Abertura característica	2,90	Importante – Ligeramente importante
2- Huella de carbono	2,70	Importante – Ligeramente importante
3- Composición en MO	2,70	Importante – Ligeramente importante
7- Contenido de MO del efluente	2,60	Importante – Ligeramente importante
11- Masa por unidad de superficie	2,40	Ligeramente importante - Importante

Pese a que la finalidad principal de la consulta al panel de expertos es depurar el listado de indicadores, los resultados obtenidos en relación al nivel de importancia de los mismos también serán considerados a la hora de otorgar los pesos a cada indicador en el análisis multicriterio.



En base a los comentarios de los encuestados y la importancia media de los indicadores recogidos en la **Tabla 7**, se decide no retirar de la lista ninguno de los inicialmente contemplados. Todos resultan lo suficientemente relevantes, según los expertos, para formar parte del análisis, siendo la *Masa por unidad de superficie* el indicador que más se aleja de los demás. No obstante, no se ha contemplado renunciar a él debido a su sencillez de medición y a que es el único junto con la *Densidad aparente* que guardan relación con el aspecto estructural de la cubierta vegetada en su conjunto.

Entre los indicadores propuestos por los expertos se encuentran (entre paréntesis el grado de importancia otorgado en las propuestas):

- *Expansión-contracción del sustrato* (I), como relación entre la superficie ocupada por el sustrato entre sus estados seco y húmedo, propuesto por la posible aparición en ciertas zonas visibles del geotextil. Ha sido descartado por considerarse no relevante, en tanto que la fracción de tierra vegetal (más susceptible a sufrir este fenómeno) del sustrato mezcla será un tercio del total, garantizando la fracción mineral la total cobertura de la superficie. Sin embargo, asociado con esta propuesta, surge la idea de medir la compactación del sustrato tras el ensayo de permeabilidad, midiendo su espesor al comienzo y fin de la prueba. Esto no requeriría de un esfuerzo o ensayo añadido y daría una estimación de la adecuación de la mezcla ensayada para ciertos usos o coberturas vegetales que pudieran verse afectados por esta potencial compactación.
- *Pérdida de sustrato* (MI), a través de la disolución en el agua o la circulación por el drenaje. Se considera que es un indicador ya representado en los de *Abertura característica* del geotextil y *Contenido en MO del efluente*, no siendo necesaria una reiteración de este aspecto.
- *Resistencia a la fricción del geotextil* (LI). Durante la vida útil de la cubierta el geotextil no sufrirá solicitaciones que conlleven al desgaste, más allá de las propias de su instalación. Para contemplar estas últimas ya se recogen la *Perforación dinámica* y el *Punzonamiento estático* como ensayos normativos y representativos, considerándose excesivo un ensayo como el de Los Ángeles o similar.
- *Espesor del geotextil* (I), descartado debido a la mínima representatividad de esta dimensión en el conjunto de los componentes de una cubierta vegetada. Por lo general los geotextiles son, tanto en su tipología de tejidos como en no-tejidos, de muy reducido espesor, no afectando éste de forma representativa a su comportamiento hidráulico, térmico o de filtro. En el caso de la geoespuma el espesor del material tiene una dimensión considerable, especialmente en contraste con la que presentan los otros dos materiales ensayados, pero éste no condicionará el comportamiento del sistema más allá de sus características hidráulicas o de filtro, ya consideradas con otros indicadores. Por estos motivos no se considera necesario incluir este indicador en el proyecto.

Por tanto, por las razones esgrimidas, ninguno de los indicadores propuestos por los expertos ha sido recogido en la lista definitiva; a excepción del indicador *Compactación* derivado indirectamente de una de estas propuestas, aplicado sobre el conjunto sustrato-geotextil. En suma, la lista definitiva de indicadores sería:

Tabla 8. Lista definitiva de indicadores

Indicador	Unidades	Sustrato	Geotextil	Compuesta
<i>Coste de ciclo de vida</i>	€/m ²	X	X	
<i>Huella de carbono</i>	kg CO ₂ eq./m ²	X	X	
<i>Composición en MO</i>	% en peso	X		
<i>Aislamiento térmico (U)</i>	W/m ² ·K	X		
<i>Densidad aparente</i>	kg/m ³			



<i>en seco</i>			X
<i>saturado</i>			X
<i>Permeabilidad</i>	l/m ² ·s	X	X
<i>Contenido de MO del efluente</i>	mg/l		X
<i>Punzonamiento estático</i>	kN	X	
<i>Perforación dinámica</i>	mm	X	
<i>Abertura característica</i>	mm	X	
<i>Masa por unidad de superficie</i>	kg/m ²	X	
<i>Resistencia a la hidrólisis</i>		X	
<i>Resistencia a la oxidación</i>		X	
<i>Compactación</i>	%		X
SUMATORIO		4	9
			5

3.1.5 Criterios para Método ELECTRE

En base a los criterios de sostenibilidad contemplados en el apartado ‘Criterios sobre indicadores - Justificación’, se ha decidido utilizar un número criterios para cada caso práctico concreto correspondiente con los indicadores contemplados en la **Tabla 8**; esto es: 4 criterios para los sustratos, 9 para los geotextiles (capa separadora-filtrante) y 5 para las secciones compuestas (sustrato + capa separadora-filtrante). En cada caso práctico se establecerán los pesos desde 1 hasta el número de indicadores, en orden creciente de relevancia. Para establecer este orden se han considerado tanto los resultados obtenidos en relación al nivel de importancia de los indicadores obtenidos en las consultas realizadas a expertos (**Tabla 7**), como el criterio de los tutores y el alumno.

En el caso de indicadores referentes exclusivamente a sustratos, se asignan los siguientes pesos de 1 a 4:

Tabla 9. Pesos asignados a los indicadores adoptados para valorar los sustratos

Indicador	Peso
<i>Coste de ciclo de vida</i>	4
<i>Aislamiento térmico (U)</i>	3
<i>Huella de carbono</i>	2
<i>Composición en MO</i>	1

Dado que el principal criterio perseguido es la sostenibilidad, ésta comienza por los materiales o elementos empleados más allá del funcionamiento del sistema. Por ese motivo se ha otorgado mayor peso, acorde al juicio de los expertos consultados, al *Coste de ciclo de vida*. Seguidamente el *Aislamiento térmico* desempeña un papel fundamental, especialmente en viviendas; dejando los menores pesos para la *Huella de carbono*, el cual es un criterio importante pero superado por el anterior, y la *Composición en MO*.

En el caso de indicadores referentes a geotextiles, se asignan los siguientes pesos de 1 a 9:

Tabla 10. Pesos asignados a los indicadores adoptados para valorar los geotextiles

Indicador	Peso
<i>Permeabilidad</i>	9
<i>Coste de ciclo de vida</i>	8
<i>Perforación dinámica</i>	7
<i>Punzonamiento estático</i>	6
<i>Resistencia a la oxidación</i>	5
<i>Resistencia a la hidrólisis</i>	4



<i>Huella de carbono</i>	3
<i>Abertura característica</i>	2
<i>Masa por unidad de superficie</i>	1

La *Permeabilidad* se erige como el parámetro fundamental, debido a su relevancia a la hora de amortiguar las precipitaciones. De forma similar a como ocurre con los sustratos, el *Coste de ciclo de vida* supone uno de los principales indicadores, otorgándosele la segunda mayor valoración en el caso de los geotextiles debido a su gran relevancia. Le siguen los criterios resistentes de *Perforación dinámica* y *Punzonamiento estático* por estar directamente ligados con la integridad física del geosintético y, por tanto, con la durabilidad de éste y sus necesidades de mantenimiento. A continuación, se sitúan las *Resistencias a oxidación e hidrólisis* por los mismos motivos, pues el mantenimiento de sus cualidades dictará su comportamiento hidráulico y de filtro. Los criterios de menor relevancia son la *Huella de carbono*, la *Abertura característica* y la *Masa por unidad de superficie*; pues, a pesar de ser importantes, variaciones en sus magnitudes condicionarán en menor medida la sostenibilidad y el rendimiento del sistema.

Para la sección compuesta, los pesos se establecen de 1 a 5:

Tabla 11. Pesos asignados a los indicadores adoptados para valorar la sección compuesta

Indicador	Peso
<i>Permeabilidad</i>	5
<i>Densidad aparente</i>	
<i>Saturado</i>	4
<i>En seco</i>	3
<i>Compactación</i>	2
<i>Contenido de MO del efluente</i>	1

La *Permeabilidad* representa el indicador más relevante de la sección compuesta debido a su vital importancia en el amortiguamiento de precipitaciones. Le sigue la *Densidad aparente*, más relevante en estado saturado que en seco debido a su relación con la capacidad de absorción de agua, condicionante no solo estructural debido al peso (como resulta obvio en primera instancia) sino también respecto a la disponibilidad de agua (efecto aljibe) para la cobertura vegetal una vez finalizado y alejado en el tiempo el fenómeno de la precipitación. La *Compactación* recibe un peso de 2, seguido por el *Contenido de MO del efluente* en último lugar.

Esta asignación de pesos no debe dar lugar a malas interpretaciones. Anteriormente en este capítulo se ha justificado la importancia de todos los indicadores recogidos, suficiente en cualquiera de los casos para ser contemplada y cuantificada en este proyecto.

Una vez realizada la campaña experimental, el análisis multicriterio exige una calificación de las alternativas en cuanto a su rendimiento o prestaciones en relación con cada uno de los indicadores planteados. Con estos valores se procede a calcular las matrices de concordancia y discordancia, analizar las dominancias entre indicadores y concluir la validez -o no- de una o varias alternativas.

3.2 Definición de campaña experimental

En el presente capítulo se describirá con detenimiento la sucesión de decisiones tomadas respecto a los materiales a emplear en la campaña experimental, así como las características y especificaciones de los ensayos a realizar. De esta forma, se busca justificar la elección de los componentes del sustrato y de los



geotextiles de manera que los criterios empleados tengan conexión con los criterios de sostenibilidad buscados. Por otro lado, la descripción de los ensayos resulta necesaria para su comprensión y un mejor análisis de los resultados.

3.2.1 Elección de los sustratos y geotextiles (capa separadora-filtrante)

Para la elección de los 3 tipos de sustrato y los 3 de geotextil se han tratado de utilizar los siguientes criterios (para ambos casos), de forma que los resultados finales sean verdaderamente significativos y las conclusiones más enriquecedoras:

- Un componente o material **habitual**, de uso **recurrente** en la bibliografía consultada y en catálogos de diferentes fabricantes. De esta forma se tendrá un producto característico y representativo del mercado actual.
- Un elemento compuesto por **componentes reciclados o reutilizados**, de modo que se priorice la utilización de éste según los criterios explicados en el capítulo ‘Criterios sobre indicadores - Justificación’, debido a la voluntad de buscar soluciones lo más sostenibles posible (Bianchini & Hewage, 2012).
- Un material **novedoso**, de empleo nulo o muy reducido a escala global en esta tipología de cubiertas. De esta manera se busca comprobar su adecuación a los indicadores establecidos en el capítulo anterior y medir su repercusión sobre los parámetros que arroje el sistema. El objetivo de ello es proponer el empleo de nuevos materiales en caso de obtener resultados suficientemente satisfactorios.



Figura 26. Criterios de elección de materiales

3.2.1.1 Sustrato

La tierra de un jardín convencional no es adecuada para su empleo en cubiertas verdes. La tierra presenta unas características diferentes a las de los sustratos de cubiertas ajardinadas, teniendo una permeabilidad muy limitada, que perjudicaría una de las funciones principales de éstas como es la laminación de lluvias; un peso muy elevado, que penalizaría en gran medida la estructura resistente; y propiedades físico-químicas no adecuadas para el empleo en cubiertas, debido a las especificaciones particulares de esta tipología. Por otro lado, las tierras normales son propensas a la proliferación de malas hierbas y de gérmenes fitopatógenos que aumentan el riesgo de que las plantas seleccionadas para la cubierta enfermen, mermando así el rendimiento del sistema y elevando el coste y periodicidad del mantenimiento (ZinCo- Life on roofs, 2020). Es por ello que los sustratos empleados para cubiertas verdes son especialmente concebidos para tal fin, poseyendo características naturales y resistiendo las condiciones climáticas a las que se van a ver expuestos, diferentes a las de un suelo normal (viento fuerte, gradientes muy altos de temperatura, mayor exposición solar, etc.).

Las principales características que debe tener son:

- Buena **aireación** para las raíces, incluso durante episodios de lluvias intensas.
- Buena capacidad de **retención de agua**, para dar sustento a las plantas durante más tiempo aún en época seca.



- Otorgar un soporte adecuado a las plantas seleccionadas sin llegar a compactarse ni dificultar el correcto crecimiento y desarrollo de éstas.
- **Resistencia a la compactación**, garantizando así un buen drenaje.

Tal y como se ha explicado en capítulos anteriores, se dará prioridad a aquellos sustratos que tengan un mayor porcentaje de componente mineral proveniente de reciclaje de áridos de construcción.

Por norma general, tal y como se ha comprobado en la bibliografía consultada (Vijayaraghavan & Raja, 2015) (Peri, et al., 2012) (Laterlite, 2020) (Projar, 2020), los sustratos están compuestos principalmente por tres compuestos (aunque puede aumentarse la complejidad de la sección añadiendo más elementos sin mejoras significativas):

- En primer lugar, se emplea un **material pétreo inerte**, que habitualmente es grava de origen reciclado proveniente de la construcción, o cerámica cocida triturada. Su función es permitir el mantenimiento de la aireación en el interior del sustrato y evitar que éste se apelmace. Además, debido a la superficie de sus fracciones colabora notablemente en la capacidad de retención de agua del sustrato (Lin, et al., 2011). Además de las citadas anteriormente, otras ventajas a tener en cuenta son su resistencia a heladas y al fuego.
- En segundo lugar, un **material inerte de menor diámetro** como la arena de sílice o la perlita que colabore en la fijación de contaminantes (Vijayaraghavan & Raja, 2015) y se integre con el tercer componente.
- Finalmente, un **subproducto vegetal** (turba, tierra vegetal, compost, etc.). Este último puede acompañarse de fibras recicladas de coco provenientes de residuos agroindustriales, que aporten capacidad de aireación sin penalizar el peso del estrato además de tener una alta relación carbono/nitrógeno que mantenga químicamente estable el sustrato, o disponerse dos tipos de subproducto vegetal al mismo tiempo, función de las necesidades específicas de la cobertura vegetal que se desee colocar.

Como solución novedosa, se propone emplear **espuma fenólica** reciclada de construcción como un componente más del sustrato. Se trata de un material empleado para aislamiento térmico de pavimentos (aunque también se emplea en horticultura en forma de semilleros hidropónicos conocidos como '*foamy agrícola*' y, en menor grado, en otras aplicaciones como la ortopodología), pero ya ha sido empleado con éxito en estudios de producción vegetal (Alves Fernandes, et al., 2004) desde principios de los años 2000.



Figura 27. Espuma fenólica en forma de '*foamy agrícola*' (Hydro Environment, 2020)

Se dispone por lo general en paneles rígidos de espesores comprendidos entre 20 y 150 mm. Debido a su fragilidad resulta una tarea sencilla triturar los paneles y generar un producto listo para su mezcla con el sustrato. Esta propuesta de aplicación se sostiene en el reducido peso y la alta porosidad homogénea del material, aportando una gran capacidad de aireación y de retención de agua que mejore la adaptación y desarrollo de la cubierta vegetal. Se trata de un material estéril, libre de hongos y bacterias, por lo que no penalizará la salud de las plantas. Otra gran ventaja es su lenta descomposición, gracias a la cual no precisa de ser reemplazada antes de los 6 años en un cultivo hidropónico (Sánchez, 2015) en el que el contacto con las



raíces es directo; por lo que se entiende que cuando dicho material se integra en un sustrato esta durabilidad sería aún mayor. Su aplicación requeriría de un lavado y esterilización previa para evitar cualquier afección a los vegetales dispuestos en la cubierta.

PROPUESTAS DE SUSTRATOS:

Las propuestas originales para los sustratos fueron las siguientes:

1. CLÁSICO: Grava (%volumen/3) + Arena de sílice (%volumen/3) + Compost (%volumen/3)
2. RECICLADO: Ladrillo triturado (%volumen/3) + Arena de sílice (%volumen/3) + Compost (%volumen/3)
3. NOVEDOSO: Ladrillo triturado (%volumen/3) + Espuma fenólica (%volumen/3) + Compost (%volumen/3)

El aspecto que muestran los materiales contemplados en su estado de recepción es el siguiente:

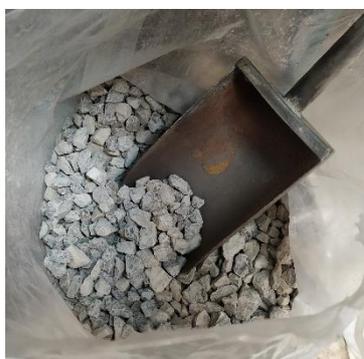


Figura 28. Grava



Figura 29. Arena sílice



Figura 30. Compost



Figura 31. Ladrillo triturado



Figura 32. Geoespuma

La elección del **compost** como porción orgánica común a los tres sustratos definidos responde, según criterios de practicidad, a la intención de establecer un compuesto común, en tipología y proporción, para así analizar las variaciones en la respuesta de las probetas ante los análisis a realizar en función de la fracción mineral que completa el sustrato. De esta forma, empleando un mismo compost con una dosificación que representa un tercio (en volumen) de la mezcla, se reduce la variabilidad de los componentes y se otorga protagonismo a la fracción mineral, que se supone más relevante, y la cual tiene mayor impacto, especialmente en términos hidráulicos, en el comportamiento del sistema; observando con mayor claridad cómo afectan en los ensayos.

En cuanto a la **cerámica triturada (ladrillo triturado)**, correspondiente a la porción de material mineral reciclado, su elección se apoya en representar (Berretta, et al., 2014):



- Un menor peso que el árido pétreo reciclado, dada su menor densidad que la gravilla calcárea, aspecto a tener en cuenta por el condicionamiento estructural en cubiertas.
- Una notoria mayor absorción de agua y aireación, contribuyendo a evitar el estancamiento de agua lo cual resulta positivo para la salud de las plantas.

Ambos aspectos permiten diseñar estructuras más livianas, incluso frente a casos de saturación total de agua. Gracias además a su estabilidad dimensional (Laterlite, 2020) se disminuye el riesgo de compactación del sustrato, aumentando su durabilidad y garantizando mejores prestaciones durante más tiempo.

La propuesta de emplear **geoespuma** en forma de dados mezclada con el resto de materiales que conforman el sustrato viene apoyada por la bibliografía consultada (Tziampou, et al., 2019), en la que se han hecho pruebas similares en firmes. En este caso se busca aportar la propiedad de retención de agua al sustrato que da soporte a la vegetación, permitiendo no sólo amortiguar las lluvias con mayor eficacia reduciendo el efluente y alejándonos de la escorrentía, sino también facilitar una reserva de agua para la cobertura vegetal. Debido a la falta de un material inerte y fino que fije el compost de la mezcla se decidió, durante la ejecución de los experimentos, modificar las proporciones de la mezcla 3 añadiendo arena de sílice en una porción similar y manteniendo el porcentaje de Compost de la mezcla:

3. **NOVEDOSO: Ladrillo triturado** (%volumen/5) + **Espuma fenólica** (%volumen/5) + **Compost** (%volumen/3) + **Arena de sílice** (%volumen 4/15)

El aspecto que muestran estas mezclas de sustrato se muestra en las siguientes figuras:



Figura 33. Aspecto sustrato S1



Figura 34. Aspecto sustrato S2



Figura 35. Aspecto sustrato S3

En el caso del sustrato S3, debido a la fragilidad que presenta la geoespuma, se hace necesario realizar la mezcla del resto de componentes sin incluir este material para ir vertiendo la mezcla en el recipiente de ensayo cuidadosamente para evitar la segregación y colocando de forma uniforme los bloques de geoespuma. De esta forma se trata de conseguir un reparto homogéneo lo más realista posible, sin dañar la integridad de la geoespuma y manteniendo en la medida de lo posible sus propiedades.



3.2.1.2 Geotextil (capa separadora-filtrante)

Los geotextiles son una parte esencial en cubiertas vegetadas pues, a pesar de que su reducido espesor y de representa una parte ínfima del total del sistema, sus propiedades son necesarias para el mantenimiento de la integridad física y funcional del sistema. Los empleados en cubiertas verdes deben reunir una serie de características que los hagan resistentes ante las sollicitaciones a las que van a estar sometidos durante la colocación y la vida útil del elemento, debiendo esto ocurrir sin penalizar las condiciones hidráulicas del sistema en su conjunto; de forma que la permeabilidad sea la adecuada para dejar circular agua suficiente hacia la capa inmediatamente inferior y la función de filtro sea efectiva, aislándola de los finos del sustrato que tenderán a circular con el agua y no colmatándose.

Los materiales más empleados son el **polietileno** y el **polipropileno**, debido a sus excelentes cualidades mecánicas y a su alta durabilidad en condiciones de hidrólisis, oxidación y ataque de microorganismos (Bozorg Chenani, et al., 2015) (Industrial Fabrics Association International Narejo, 2006) (Peri, et al., 2012). Su uso frecuente los hace además materiales baratos, de fácil acceso y con los que los operarios están habituados a tratar. Esto los hace dos materiales adecuados para esta aplicación concreta a lo que se le suma la posibilidad de que sean compuestos de material reciclado tras un proceso de granza, lo que se conoce como *biomaterial* (European Economic and Social Comitee, et al., 2014). De esta forma, la huella de carbono se reduce notablemente al ser componentes de origen fósil.

En este componente concreto es más acuciante la casi-necesidad planteada de emplear materiales reciclados, pues se ha demostrado que en extensiones pequeñas a corto plazo podría darse el caso, según los polímeros empleados, de que las sustancias tóxicas generadas en el proceso productivo del elemento superen las fijadas por la cubierta (Bianchini & Hewage, 2012). Esto es relativo, pues en el proceso productivo gran parte de las sustancias tóxicas emitidas se liberan en un ambiente controlado para su posterior tratamiento, pero es representativo de lo importante del reciclaje de estos materiales.

PROPUESTAS DE GEOTEXTILES:

1. **CLÁSICO: geocompuesto** formado por geotextil tejido negro de polipropileno (PP), unido a geotextil no tejido verde con 70% de polipropileno (PP) y 30% de polietileno (PE).
2. **RECICLADO: geotextil no tejido** -agujeteado- blanco de polipropileno (PP) reutilizado.
3. **NOVEDOSO: geoespuma (geofoam)** de poliestireno expandido (EPS).

Los dos primeros geotextiles contemplados tienen un consolidado bagaje tanto en construcción como en jardinería ((Laterlite, 2020), (Projar, 2020), (ZinCo- Life on roofs, 2020)), dando rendimientos notables y presentando un buen comportamiento en la mayoría de aplicaciones.

El tercer material contemplado, la **geoespuma o geofoam**, presenta unas cualidades particulares que hacen atractivo su uso en cubiertas vegetadas (Tziampou, et al., 2020) así como en Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS). Su porosidad y permeabilidad permiten un alto almacenamiento de agua, que ronda el 95-97 % de su volumen (Tziampou, et al., 2019), lo cual proporciona una retención de humedad que dota de una considerable reserva a la cubierta de cara a temporadas sin precipitaciones en beneficio de la cobertura vegetal instalada. Su diseño hidráulico y rendimiento varía en función de factores como la superficie instalada (Starke, et al., 2011), las condiciones climáticas (Göbel, et al., 2010) o los demás componentes que conformen el sistema de la cubierta (Tziampou, et al., 2019), así como la disposición de éstos (Gómez-Ullate, et al., 2010). Su aplicación es reducida debido al conocimiento aún limitado sobre su comportamiento en el campo de la construcción, por lo que ésta resulta una oportunidad atractiva para aportar conocimiento sobre su comportamiento y las virtudes que puede ofrecer el material a las cubiertas vegetadas.

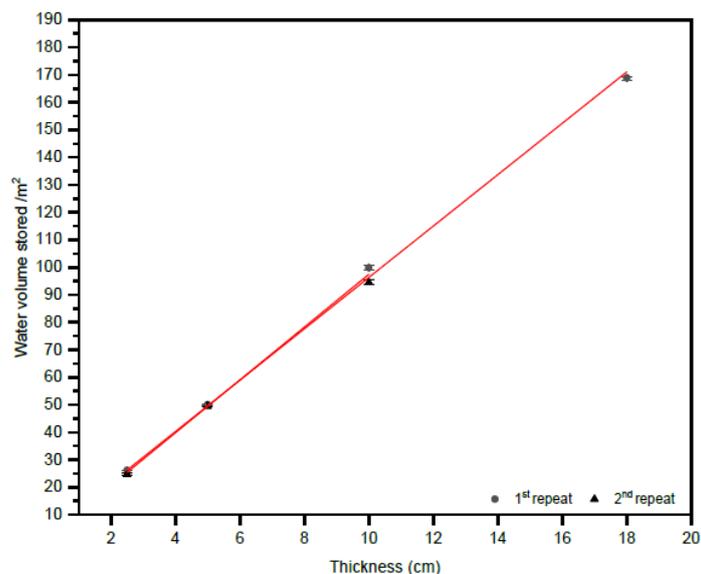


Figura 36. Agua almacenada en l/m² en función del espesor de muestra (Tziampou, et al., 2019)

El hecho de realizar ensayos a una escala menor de la que se dispondrá durante su uso supone alterar su comportamiento, afectando a las mecánicas de transporte del fluido a través del material, no siendo esto un problema debido a la estandarización de los ensayos y gracias al conocimiento de las mecánicas hidráulicas a mayor escala a través de modelos conceptuales. En cualquier caso, la escala en la que se realizan los ensayos es considerada macroescala, estudiando los procesos de transporte en un ‘continuo’, tal y como se ha hecho en la mayoría de investigaciones sobre procesos de transporte de fluidos en este tipo de materiales debido a la juventud de este campo concreto. El flujo de agua a través de estas geoespumas se fundamenta en la estructura celular de células abiertas, en las que la red de poros y la alta vinculación entre éstos permite que el fluido se disperse por todo el volumen del material con facilidad, gracias a la tensión superficial y la presión hidrostática del líquido.

Las espumas fenólicas se pueden clasificar en función de su estructura celular, resultando cuatro tipos de espuma con diversas densidades y características térmicas, pirorresistentes y estructurales (Ashida & Iwasaki, 1995):

Tabla 12. Tipos de espuma fenólica en función de la estructura celular (Ashida & Iwasaki, 1995)

Tipo	Tipo de célula	Densidad	Características
A	Cerrada (~90 %)	Media	Baja conductividad térmica, alta resistencia al fuego
B	Cerrada (~90 %)	Media	Baja conductividad térmica, baja resistencia al fuego
C	Abierta	Alta	Alta conductividad térmica, alta resistencia mecánica
D	Abierta	Baja	Alta conductividad térmica, baja resistencia mecánica

Esta composición versátil hace de estos compuestos una opción atractiva en diferentes aplicaciones de diversas industrias. En concreto, la *geofoam* OASIS pertenece al tipo D, con un 100 % de célula abierta, estando compuesta de sales de sulfonato de éter de alquilo, de alcohol y de alquilbenceno como agentes humectantes, así como de otros componentes más genéricos como resinas, surfactantes y catalizadores ácidos (Gardziella, et al., 2000)



3.2.2 Consideraciones previas a los ensayos

Los tres tipos de geotextil se van a combinar con las tres configuraciones de sustratos ya definidas. La proporción elegida para los materiales busca por un lado el equilibrio en cuanto a propiedades que cada uno de ellos aporta a la mezcla y, por otro, la igual representatividad de éstos en el rendimiento del compuesto y, especialmente, respetar las proporciones empleadas en la práctica para todo tipo de cultivos de este tipo con las que se persigue garantizar las funciones principales de aireación y drenaje. Esta decisión, además de estos motivos, fue necesario tomarla antes de comenzar con la campaña experimental ya que condiciona de forma unívoca el proceso de solicitud y aprobación de presupuestos para conseguir el material necesario, tanto en su trámite como en la especificación de los volúmenes necesarios para el proyecto.

El recinto a ensayar, vistas las dimensiones del laboratorio y la disponibilidad de materiales, se ha elegido de 30 x 30 cm de superficie con un fondo de 15 cm, de forma que a cada material le correspondan aproximadamente 5 l dentro de cada mezcla a ensayar. El volumen total de sustrato de cada experimento asciende a 13,5 dm³ y se alojará en un recinto de paredes rígidas, rejilla en el fondo que de soporte físico al geotextil a disponer y una pared de metacrilato perimetral que eleve el sistema de riego unos 20 cm por encima de la superficie del sustrato, repartiendo así su caída y simulando un efecto de lluvia más realista.

3.2.3 Descripción de los ensayos

En este subapartado se procederá a explicar con detalle cada uno de los ensayos realizados para el estudio, incidiendo en los procedimientos, condicionantes, objetivos y demás información relativa a su ejecución; apoyándose en las respectivas normativas que regulan los requisitos y proceder de cada prueba. Los ensayos que no estén normalizados y no respondan a una norma concreta, se describirán de forma detallada justificando los pasos y criterios seguidos.

3.2.3.1 Sustrato

a. Coste de ciclo de vida

Comprende los costes inducidos por la producción de los materiales, la construcción, el mantenimiento y la demolición del elemento, teniéndose en cuenta para ello un horizonte temporal o vida útil. Este concepto se encuentra definido en la Normativa UNE-EN ISO 14044 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2006) dentro del 'Análisis de ciclo de vida'. Se trata de un análisis que puede ayudar a:

- Identificar las oportunidades de mejora del desempeño ambiental de cualquier producto en todas las etapas de su ciclo de vida.
- Aportar información relevante para la toma de decisiones industriales, organizativas incluso políticas para la planificación de procesos, establecimiento de prioridades y re-diseño de productos, entre otros.
- Seleccionar los indicadores de desempeño ambiental pertinentes y las técnicas de medición.
- Mejorar el marketing, estableciendo un sistema de etiquetado ambiental y reivindicando el origen de los componentes del producto y su declaración ambiental.

El análisis consiste en una sucesión de las siguientes fases: definición de objetivo y alcance, donde se incluyen los niveles de detalle del estudio; fase de análisis del inventario, en la que se recopila la información de los componentes del sistema acorde con los objetivos del estudio; evaluación del impacto del ciclo de vida, evaluando los resultados del inventario a fin de comprender su importancia



ambiental; y por último la interpretación, extrayendo conclusiones del análisis de acuerdo con los objetivos.

En este caso la unidad funcional seleccionada será el precio por unidad de superficie ($\text{€}/\text{m}^2$) y el periodo de análisis 100 años. Este periodo se podrá modificar en función de las diferentes durabilidades de cada material, lo cual se definirá en capítulos posteriores. Una posible representación esquemática de los datos necesarios para analizar la producción del compuesto se representa en la **Figura 37**:



Figura 37. Recopilación de los datos para el análisis de la producción en el coste del ciclo de vida
(Fuente: elaboración propia, 2020)

Para realizar un correcto análisis, todos los datos de entrada y salida deben ser referenciados a la unidad funcional antes establecida, para hacer viable la evaluación conjunta y la correcta dimensionalidad del análisis. Para ello, la energía y materias primas, por ejemplo, se convertirán mediante su coste unitario a las unidades correspondientes. Los residuos producidos se asimilarán a la unidad funcional establecida mediante una estimación del coste de su reciclado o tratamiento si así se requiriese.

Un factor importante a tener en cuenta, particular de este parámetro por ser de carácter económico, es que el valor del dinero no se mantiene constante a lo largo del tiempo. Esto se deberá tener en cuenta a la hora de evaluar el Coste del ciclo de vida de cualquier producto o sistema.

Para la estimación de este indicador se ha trabajado conjuntamente con personal de GITECO (Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos), quienes han puesto a disposición de este TFM el uso de la base de datos del software GaBi 9.1, creado por Thinkstep. Se trata del software referencia a nivel mundial para el cálculo de Análisis de ciclo de vida (LCCA, *Life-Cycle Cost Analysis*) y la Huella de carbono (LCA, *Life Cycle Assessment*, en inglés). El software dispone de más de 10.000 inventarios de productos codificados para realizar estos cálculos, haciendo de esta tarea tan compleja algo accesible, acercando al usuario diversas aplicaciones como eco-eficiencia, eco-diseño, informes de sostenibilidad y los dos indicadores recogidos en este trabajo, entre otros. De igual forma, se ha acudido a la base de datos de precios de CYPE (Placo Saint-Gobain, s.f.) de la cual se han extraído costes asociados a instalación y mantenimiento que se han cruzado con los costes de los materiales ensayados en su recepción.

b. Huella de carbono

De forma análoga al punto anterior, este parámetro y su evaluación vienen recogidos en la Normativa UNE-EN ISO 14044 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2006). Se trata del total de emisiones generadas por un producto desde la extracción de sus materias primas hasta su fin de vida, expresado en unidades de masa de dióxido de carbono equivalente por unidad de superficie para este caso particular ($\text{kg CO}_2 \text{ eq.}/\text{m}^2$) en un periodo estimado de 100 años.

Un cuadro esquemático que se aproxima al conjunto de emisiones emitidas por un producto cualquiera podría ser el siguiente:

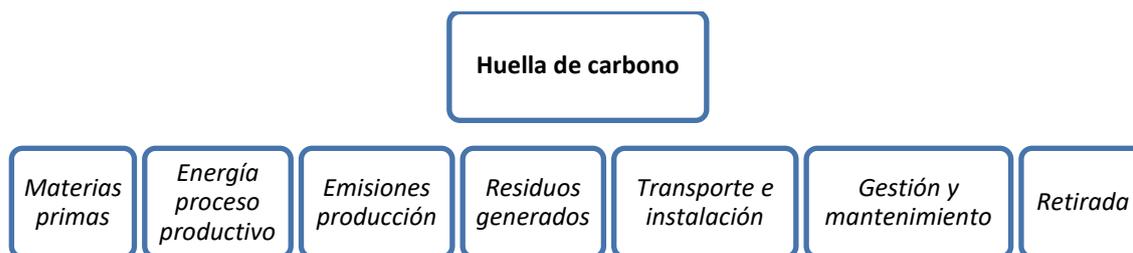


Figura 38. Factores que inciden sobre la huella de carbono de un producto
(Fuente: elaboración propia, 2020)

La capacidad de medición en todas las fases es limitada, por lo que algunos valores deberán ser valorados a partir de correlaciones o estimaciones justificadas. Para este fin, se trabajará con la información recogida en las bases de datos del software GaBi 9.1, referencia a nivel global en este tipo de cálculos y estimaciones.

c. Contenido de materia orgánica (MO)

Con el fin de evaluar el contenido en materia orgánica de los sustratos se ha seguido la norma 2540 SOLIDS (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012), aplicando dicha normativa sobre las muestras secas de cada una de las mezclas empleadas para el ensayo de Permeabilidad de las secciones compuestas. Este método se emplea para medir la materia orgánica contenida en una muestra, categorizando la calidad de ésta en función de la concentración en unidades porcentuales.

Para realizar este ensayo se deben emplear recipientes de porcelana, que eviten que el material se adhiera a las paredes del contenedor. La muestra debe conservarse refrigerada a 4 °C, minimizando así los procesos de descomposición microbiológica de los sólidos. El proceso de aclimatación previa al ensayo consiste en mantener las muestras 24 horas a una temperatura constante de 104 °C para, tras este tiempo, calcinarlas a 550 °C y medir la diferencia de masas, que corresponderá a la materia orgánica calcinada en el proceso.



Figura 39. Muestras de sustrato, previo a la calcinación (Fotografía tomada en laboratorio)

d. Aislamiento térmico

Con el objetivo de valorar el aislamiento térmico que proporciona la potencia de la capa de sustrato de cada una de las muestras, debido a la inexistencia de un equipo en la escuela que permita llevar a cabo los ensayos necesarios según se recoge en la Normativa UNE-EN ISO 6946:2007 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2015) por la que se establece el método de cálculo de esta propiedad en los componentes y elementos para la edificación, se ha decidido realizar una valoración apoyada en la consulta de fuentes bibliográficas relacionadas.



A este fin, se estiman las propiedades térmicas de la mezcla de sustrato en cuestión, siendo en esta aplicación importante debido a que se trata de uno de los factores fundamentales a los que se encomienda la correcta función de la tipología en estudio. No es el método más ortodoxo para su evaluación, pero, a falta de recursos experimentales en la Escuela, se considera la estimación a partir de bibliografía como una fuente válida. El método establece la forma de obtener la resistencia térmica de cada parte homogénea del componente, combinando las resistencias individuales para obtener la resistencia total del componente. A partir de este valor se induce la transmitancia térmica a través del espesor de la capa empleada. Por este motivo, se considera adecuada una estimación ponderada de las transmitancias térmicas de los componentes que componen cada muestra de sustrato o, en caso de que lo hubiese, tomar como válidos valores extraídos de la bibliografía medidos en muestras de similar composición a través de la norma UNE-EN ISO 6946:2007.

3.2.3.2 Geotextil (capa separadora-filtrante)

Todas las muestras se aclimatan debidamente en unas condiciones de temperatura de 20 ± 2 °C y con una humedad relativa de 65 ± 5 %, según ISO 554.



Figura 40. Probetas en acondicionamiento (Fotografía tomada en laboratorio)

e. Coste de ciclo de vida

(Mismo procedimiento que en el análisis del sustrato).

f. Huella de carbono

(Mismo procedimiento que en el análisis del sustrato).

g. Permeabilidad

La medición de esta propiedad se efectúa atendiendo a lo establecido en la Normativa UNE-EN ISO 11058:2010 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2010). En ella se establece el ensayo según el cual se hace circular un caudal unidireccional de agua perpendicularmente al plano del geotextil que forma parte de la probeta empleando una altura de carga variable decreciente, teniendo en cuenta así la heterogeneidad de condiciones de agua en la cubierta.

Para ello, se precisa de un aparato transparente de permeabilidad al agua compuesto por dos cilindros verticales interconectados de diámetro mínimo 50 mm en el que se introducirá la muestra a



ensayar. Deberá cumplir las diferentes condiciones establecidas en la Norma en cuanto a dimensiones, deformabilidad, pérdidas de carga y características de sus conexiones. Se precisa un alimentador de agua con la calidad y la temperatura establecidas por el método de ensayo, junto con un dosificador de oxígeno disuelto y un medio para medir la modificación de la carga hidráulica.

En este ensayo se colocan las probetas bajo agua a la temperatura establecida. Se sacuden suavemente para eliminar las burbujas de aire que pudieran quedar retenidas en las superficies de los componentes y se deja saturar. Se coloca comprobando la estanqueidad de las juntas y se llena hasta la carga hidráulica de 50 mm en la probeta. Se cierra la alimentación de agua y se abre la válvula una vez puestos en marcha los instrumentos necesarios, terminando el ensayo cuando la pérdida de carga y la velocidad de flujo se hacen cero.

El aparato de ensayo toma medidas de la altura de la columna de agua de forma cíclica cada 2 centésimas de segundo, siendo necesario un procesamiento de los datos registrados mediante una tabla de Microsoft Excel en el que se apliquen correcciones de viscosidad (motivo por el que se mide la temperatura del agua a la que se realiza el ensayo) y de incertidumbre. El resultado que se obtiene es en forma de velocidad promedio de paso del fluido (mm/s), desviación típica, k y grados de libertad.

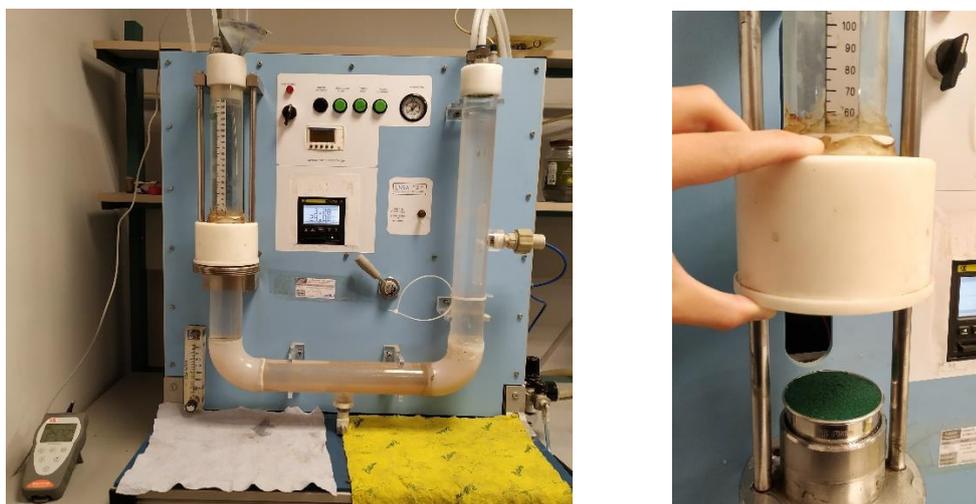


Figura 41. Ensayo de permeabilidad perpendicular al plano, máquina de ensayo y detalle de colocación de probeta (Fotografía tomada en laboratorio)

h. Punzonamiento estático

Este ensayo se encuentra definido en la Normativa UNE-EN ISO 12236 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2007) de Ensayo de punzonado estático. Esta norma define el ensayo mediante un método para la determinación de la resistencia al punzonamiento mediante la aplicación y medida de una fuerza puntual a través de un punzón con extremo plano, registrándose la fuerza necesaria para atravesar el geosintético. El ensayo se realiza sobre probetas secas a unas condiciones ambientales especificadas (recogidas en Anexos) y se emplea en la mayoría de geotextiles, estando limitado sólo a aquellos que no tengan aberturas características mayores de 10 mm. De igual forma en el caso del tercer geosintético empleado, el *geofoam*, su ensayo carece de sentido debido a la fragilidad del material, por la cual el resultado del ensayo no sería significativo ni aportaría información relevante. En la ejecución del ensayo, la probeta es sujeta entre dos anillos de acero, dejando avanzar el émbolo metálico perpendicularmente hacia la probeta con una velocidad constante. Se registra la resistencia al punzonado (kN), el hundimiento del émbolo (mm)



y la curva fuerza-desplazamiento, simulando la resistencia que ofrece el material al ser sometido a una carga constante.

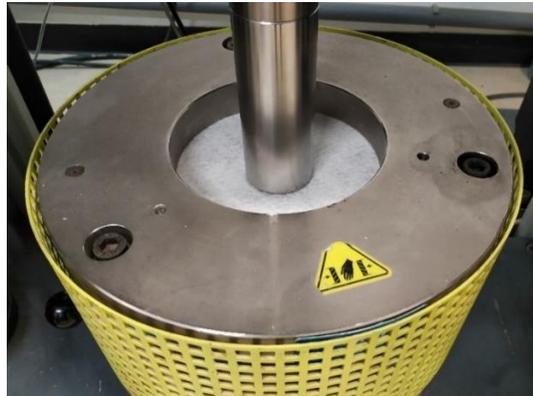


Figura 42. Ejemplo de ensayo de punzonado estático (Fotografía tomada en laboratorio)

El equipo de ensayo debe ser de clase 1 o 0, de acuerdo con la Norma ISO 7500-1 y debe permitir:

- Un gradiente de desplazamiento continuo de 50 ± 5 mm/min
- El registro de la fuerza y del hundimiento
- Una lectura gráfica de la fuerza y del hundimiento, de la siguiente forma

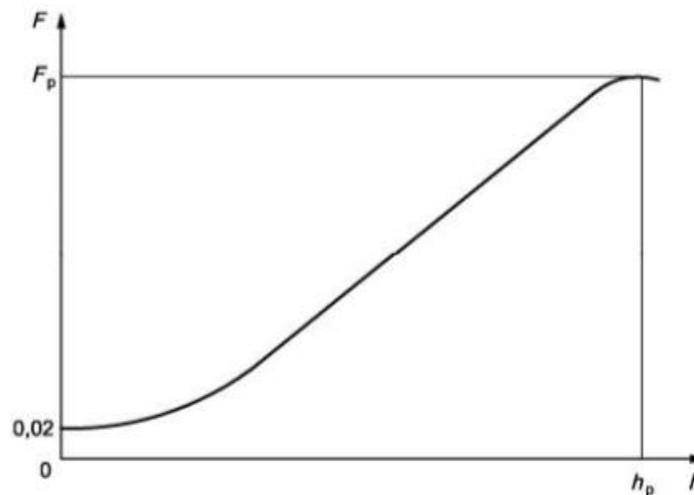


Figura 43. Ejemplo de curva típica Fuerza de punzonado - Hundimiento del punzonado (Fuente UNE-EN ISO 12236)

El punzón empleado es de acero inoxidable de diámetro $50 \pm 0,5$ mm con un radio del ángulo de ataque de $2,5 \pm 0,2$ mm. El sistema de fijación debe evitar desplazamientos o roturas de las probetas. El diámetro interno de los anillos está establecido en $150 \pm 0,5$ mm. Las superficies se colocan de forma que la distancia entre el diámetro interno del anillo y la zona de agarre no exceda de los 7 mm.

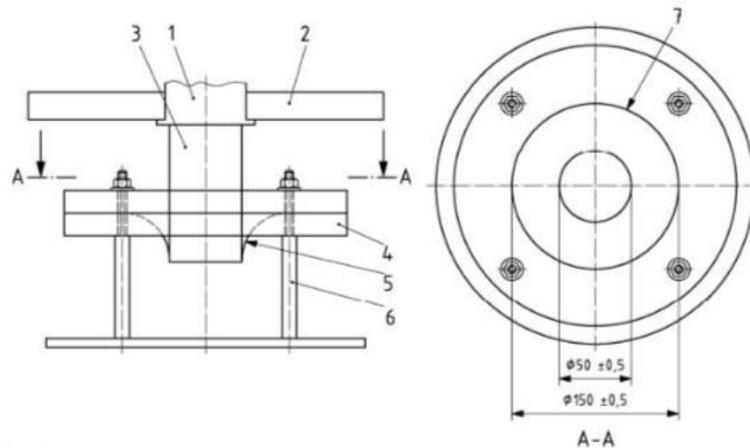


Figura 44. Ejemplo del sistema de fijación (Fuente: UNE-EN ISO 12236)

- | | |
|------------------------|---------------------------------|
| 1. Célula de carga | 5. Probeta |
| 2. Barra transversal | 6. Bancada soporte o módulo CBR |
| 3. Punzón | 7. Bordes internos redondeados |
| 4. Anillos de fijación | |

Se deben ensayar cinco probetas tomadas al azar de la muestra, según ISO 9862. Si el material presenta propiedades diferentes en las dos caras, el ensayo completo se debe realizar en ambas por separado. Este es el caso del geosintético compuesto por geotextil tejido negro y no tejido verde, el cual debe ser ensayado por el lado verde al ser el representativo debido a su colocación en obra. La temperatura de ensayo debe estar acondicionada a 20 ± 2 °C y la humedad relativa a 65 ± 5 %, según ISO 554, para lo cual las probetas están aclimatadas.

Este ensayo se conoce también como ensayo CBR, pues el émbolo empleado es el mismo que el que se utiliza en el ensayo CBR para la medición de capacidad portante de suelos. También es aplicable a plásticos (PEAD) y productos relacionados.

Esta caracterización carece de sentido hacerla con el tercer geosintético estudiado, la geoespuma, debido a su fragilidad. Se supone debe tener una colocación en obra en caso de aplicación cuidadosa y respetuosa con sus características, guardando unas buenas condiciones de almacenamiento y realizando un extendido del sustrato sobre su superficie desde una baja altura para no dañarlo.

i. Perforación dinámica

En este ensayo, definido en la Norma UNE-EN ISO 13433 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2007) para determinar la resistencia de geotextiles y productos relacionados, se mide la resistencia frente a la penetración de un cono de acero en caída libre, soltado desde una altura determinada y que atraviesa la probeta sujeta horizontalmente sobre unos anillos. El cono debe ser de acero inoxidable y la caída desde una altura de 500 mm. El grado de penetración caracteriza el comportamiento del producto a través de la medición de la penetración en el orificio del cono graduado, pudiendo éste estar producido en la puesta en obra por caída de piedras angulosas u otros objetos cortantes sobre la cara del geotextil.

El sistema de sujeción debe evitar cortes o deslizamientos de las probetas en el transcurso de los ensayos, estando conformado por anillos de fijación y bloque guía. El diámetro interno de los anillos debe ser de $150 \pm 0,5$ mm y las superficies estar dispuestas de forma que la distancia que exista entre



el diámetro interior del anillo y la zona de adherencia no sea mayor de 7 mm. El marco que sostiene la probeta debe estar equipado con un mecanismo de liberación del cono de acero, centrado sobre la probeta, mediante guías que no perturben los parámetros de la caída o mediante un dispositivo de liberación que no provoque rotación del cono. El conjunto debe situarse sobre una superficie dura y rígida, además de disponer de una pantalla de seguridad que proteja al operario de eventuales heridas producidas por el cono. Con el fin de proteger la integridad del cono, es aconsejable proteger la base del aparato con una capa que absorba los golpes en caso de que éste atraviese completamente la muestra ensayada.

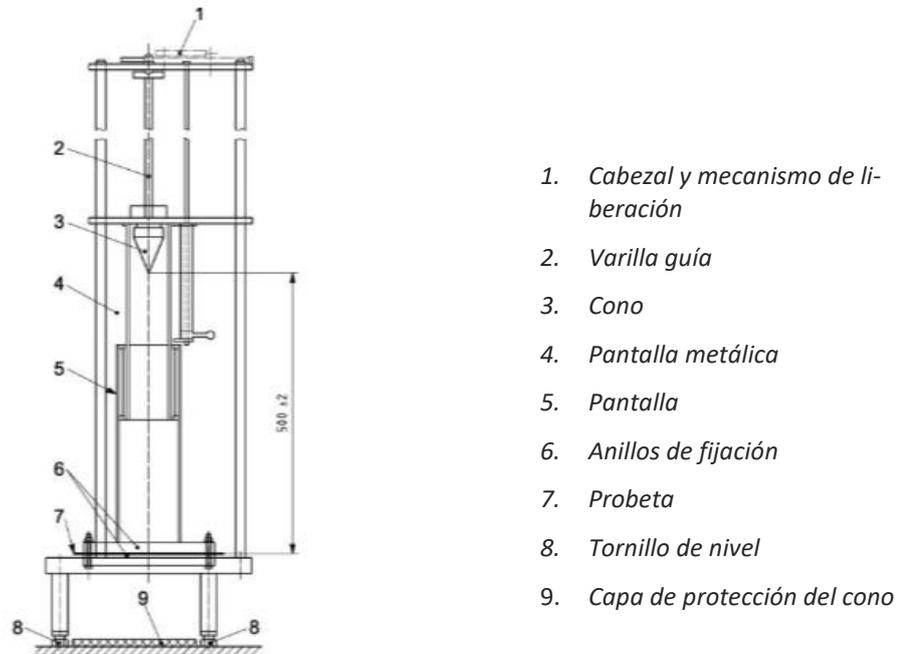


Figura 45. Dispositivo típico para el ensayo de caída de cono con pantalla de protección (Fuente: UNE-EN ISO 13433)

El cono debe ser de acero inoxidable, con un ángulo de la punta de 45° y superficie lisa y pulida, con una masa de $1\ 000 \pm 5$ g, que incluya la barra de guiado. Las dimensiones detalladas son las que se muestran en la siguiente figura:

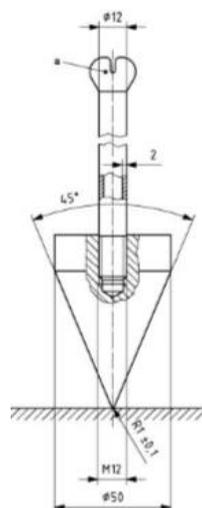


Figura 46. Ejemplo de cono y varilla guía (Fuente: UNE-EN ISO 13433)



Figura 47. Probeta ensayada a caída de cono (Fotografía tomada en laboratorio)

El número de probetas a ensayar será de cinco, siendo sus dimensiones compatibles con el aparato de ensayo empleado. Si el material presenta propiedades diferentes en las dos caras, el ensayo completo se debe realizar en ambas por separado. Este es el caso del geosintético compuesto por geotextil tejido negro y no tejido verde, el cual debe ser ensayado por el lado verde al ser el representativo debido a su colocación en obra. La temperatura de ensayo debe estar acondicionada a 20 ± 2 °C y la humedad relativa a 65 ± 5 %, según ISO 554.

Igual que sucede con el CBR, no resulta de aplicación sobre el tercer geosintético debido a sus características físicas particulares.

j. Abertura característica

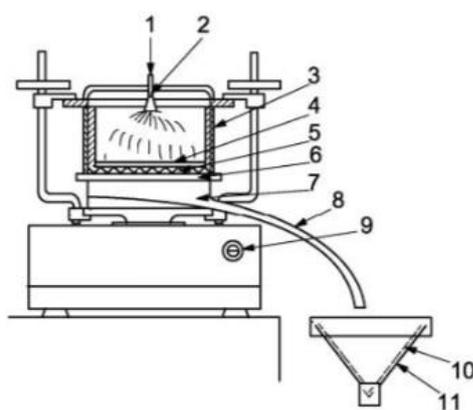
Recogido en la UNE-EN ISO 12956 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2010), este ensayo está orientado a determinar la medida de la abertura característica de una capa individual de geotextil o de un producto relacionado, aplicando el principio de tamizado por vía húmeda. La abertura característica corresponde a las dimensiones especificadas del material granular que atraviesa dicha capa.

El equipo de tamizado debe constar de los siguientes elementos:

- Unidad de tamizado, que permita ensayar la probeta con una superficie correspondiente a un diámetro mínimo de 130 mm, de acuerdo con los siguientes requisitos:
 - Dispositivo de tamizado con una frecuencia de tamizado de 50 a 60 Hz.
 - Movimiento esencialmente vertical del tamiz, que pueda mantener una amplitud de 1,5 mm (3 mm de oscilación total) durante el periodo de ensayo.
- Sistema de alimentación de agua.
- Boquillas de pulverización, con objeto de humidificar uniformemente la probeta dentro del cilindro transparente, evitando así la pérdida de suelo o material granular. Se recomienda pulverizar 0,5 l/min a una presión de servicio de 300 kPa aproximadamente.
- Dispositivo de sujeción de la probeta.
- Cubeta fijada sobre el aparato de tamizado, con un tubo de conexión al dispositivo colector de agua y del material granular que pasa a través de la probeta.



- Rejilla para evitar la deformación excesiva de la probeta bajo el peso del material granular durante el ensayo, debiendo reposar la probeta sobre una rejilla con alambre de diámetro 1 mm y de abertura de malla de 10 ± 1 mm.
- Material granular que cumpla los siguientes condicionantes:
 - Ausencia de cohesión de forma que las partículas no se aglomeren en el agua. Si no hay aglomeración visible durante el ensayo los resultados se toman como aceptables. En caso contrario, se procede a repetir el ensayo.
 - Forma de grano uniforme, esencialmente con partículas redondeadas y evitando aplastadas o angulosas.
 - Resistencia al corte sin drenaje (C_u) comprendida entre 3 y 20.
 - Para mejorar la exactitud de la medida, el material granular debe cumplir la relación $d_{20} < O_{90} \leq d_{80}$.
- Papel de filtro para recoger el material granular que ha pasado a través del geotextil que actúa como tamiz. Si el material calibrado contiene barro, el papel de filtro empleado debe tener una abertura característica de 10 micras.
- Estufa de secado que mantenga temperaturas entre 50 y 110 °C.
- Juego de tamices de tamaño R20.
- Balanza para la determinación de la masa del material granular con exactitud de 0,03 g.
- Cronómetro para la medición del tiempo con exactitud de ± 1 s.



1. Alimentación de agua
2. Boquilla de pulverización
3. Dispositivo de sujeción
4. Material granular
5. Probeta
6. Rejilla de soporte
7. Cubeta
8. Tubo de conexión
9. Regulador de amplitud
10. Papel de filtro
11. Dispositivo colector

Figura 48. Ejemplo de aparato de tamizado (Fuente: UNE-EN ISO 13433)

El material granular a emplear deberá cumplir las especificaciones granulométricas de la siguiente figura:

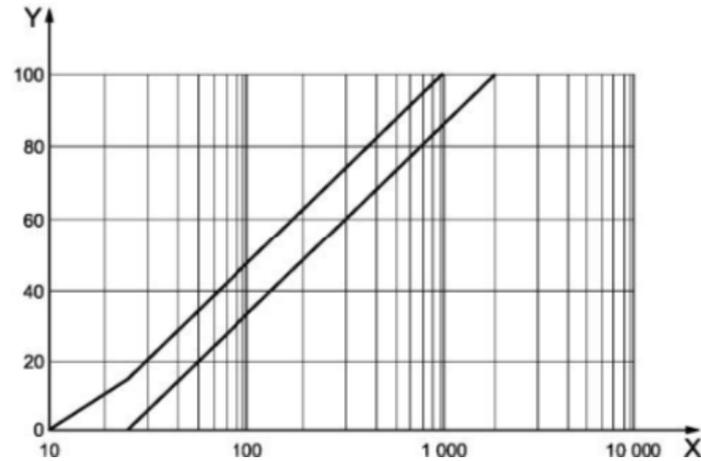


Figura 49. Zona requerida de la granulometría del material granular (Fuente: UNE-EN ISO 13433)

Las probetas ensayadas deben estar acondicionadas, manteniéndolas un periodo mayor de 24 h en un horno a temperatura constante de 50 °C y posteriormente en un desecador de campana, con el fin de que se encuentren libres de humedad a la hora de ser pesadas previamente al tamizado del material granular. La cuantificación de la porción que pasa a través del geotextil se realiza por diferencia de pesos entre el material retenido por la probeta y el que la atraviesa. Éste último requiere de un filtrado estricto del agua efluente, proceso del cual se extrae la siguiente figura:



Figura 50. Ensayo abertura característica (Fotografía tomada en laboratorio)



Figura 51. Filtrado ensayo abertura característica (Fotografía tomada en laboratorio)



k. Resistencia a la hidrólisis

Este ensayo, que se encuentra definido en la Norma UNE-EN ISO 12447 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2002), establece la resistencia de un geotextil a la hidrólisis, a través de la exposición de probetas sumergidas en agua desionizada tipo 3 (ISO 3696;1995) a temperatura elevada, después de la cual se efectúa una evaluación de los cambios de propiedades que sufren durante la exposición. El objetivo principal es establecer un mínimo aceptable de durabilidad del componente, habiéndose concebido para determinar la resistencia ante condiciones fuertemente ácidas o alcalinas; siendo el propósito fundamental de su aplicación en el presente proyecto el de caracterizar los cambios en las propiedades hidráulicas provocados por este proceso de deterioro controlado.

El recipiente empleado debe estar fabricado de un material inerte, para no verse afectado por las condiciones del ensayo, por lo que deberá ser de acero inoxidable o vidrio de borosilicato. Algunos tipos de vidrio son susceptibles de hidrolizarse, así como puede ocurrir con alguno de los componentes ensayados, por lo que se deberá controlar el pH de la muestra y del medio semanalmente. El volumen total de las probetas no debe exceder el 10 % del espacio libre del recipiente. Se deben suspender libres de cualquier carga y se deben exponer al medio del ensayo por las dos caras. El recipiente se equipa con un dispositivo de calentamiento y control de temperatura que la mantenga en 95 ± 1 °C y dispositivos separados de medición.

En las siguientes figuras se muestra una fotografía de la disposición general de las probetas dentro del recipiente junto con otra fotografía de mayor detalle:



Figura 52. Disposición general y detallada de las probetas sumergidas para hidrólisis (Fotografía tomada en laboratorio)

l. Resistencia a la oxidación

El método de ensayo marcado en la UNE-EN ISO 13438 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2020) establece los procedimientos para ensayar probetas a temperatura elevada durante un tiempo determinado en un horno. Es un ensayo aplicable a productos de polipropileno (PP), polietileno (PE), poliamida (PA), aramida (AR) y alcohol polivinílico (PVAL).

Las probetas de ensayo, almacenadas en agua de grado 3 (destilada) según ISO 3696 a 80 ± 1 °C durante 28 días antes del ensayo, se exponen a una temperatura de 100 ± 1 °C en un horno regulado de laboratorio colgadas libremente en su interior. Por otra parte, las probetas de control deberían almacenarse en agua durante 6 h en las condiciones especificadas (proceso que no se ha llevado a cabo por no considerarse necesario, a criterio de los tutores del proyecto). El agua debe cambiarse



como mínimo a los 7 días y moverse al menos una vez por día. Después del periodo de envejecimiento, las probetas se someten a un ensayo de tensión, midiéndose fuerza de tensión y deformación a carga máxima en las probetas expuestas y en las de control, comprobando así los efectos del envejecimiento sobre su capacidad resistente. Los ensayos se deben realizar tanto en la dirección de la máquina como en la transversal. La duración del envejecimiento se establece según la vida de servicio tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 13. Temperaturas y duraciones de la etapa de envejecimiento (Fuente: UNE-EN ISO 13438)

Material	Aplicación del material	Vida de servicio	Primero: Temperatura y duración en agua	Segundo: Temperatura y duración en horno
polipropileno (PP), polietileno (PE), poliamida (PA) y aramida (AR)	Sin reforzar y reforzada	25 años	80° durante 28 días	100°C durante 28 días
		50 años	80° durante 28 días	100°C durante 56 días
		100 años	80° durante 28 días	100°C durante 112 días

Las siguientes consideraciones son importantes si se desea una buena reproducibilidad del ensayo:

- Las probetas se deben situar centradas en el horno.
- Las corrientes de aire cerca del horno se deben evitar si se ha de mantener un cambio de aire fresco reproducible.
- Se debe limpiar el aire y las fijaciones de residuos restantes antes de iniciar cualquier ensayo.
- La degradación termo-oxidativa del material puede liberar sustancias con efecto catalítico, por lo que no se deben ensayar polímeros que contengan estabilizantes al mismo tiempo con excepción de geotextiles integrados.

A estos efectos, la disposición de las probetas en el interior del horno de secado ha sido la que se muestra en la siguiente figura:



Figura 53. Disposición en el horno de las probetas sometidas a oxidación (Fotografía tomada en laboratorio)



m. Masa por unidad de superficie

En la UNE-EN ISO 9864 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2005) se establecen los requisitos y pasos para la medición de la masa por unidad de superficie de un geosintético con la finalidad de facilitar su identificación y uso. Este parámetro se calcula mediante el pesado de probetas cuadradas o circulares de dimensiones conocidas cortadas en diferentes proporciones y distribuidas por toda la longitud y anchura de la muestra.

Se cortan más de diez probetas de un tamaño nominal de 100 cm² empleando un troquel, de tal manera que representen el material a ensayar en su totalidad. Se miden con una exactitud del 0,5 %. Si la estructura es tal que dicho tamaño nominal no es representativo se puede emplear un tamaño superior para lograr la exactitud de medición requerida. Esto sucede con productos con tamaños de malla significativos (por ejemplo, geoparrillas o georedes), pero no es de aplicación para los geosintéticos ensayados en este proyecto. Se deben incluir al menos 5 elementos en ambas direcciones, determinando su superficie individualmente. La exactitud del pesado es de 10 mg.

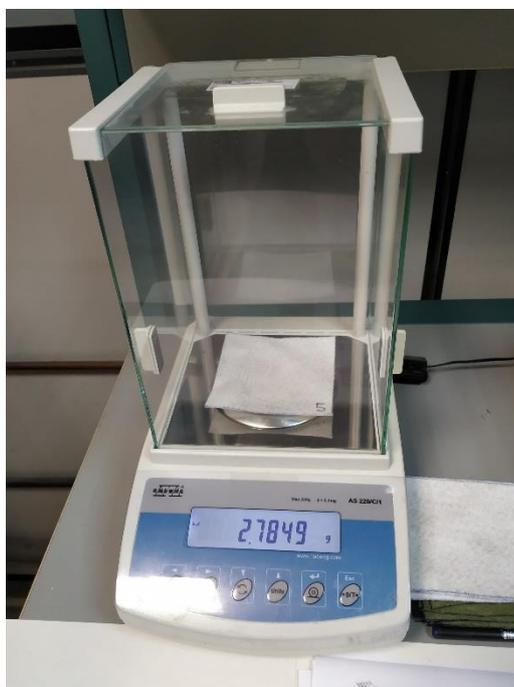


Figura 54. Ejemplo de pesado de probeta (Fotografía tomada en laboratorio)

3.2.3.3 Sección compuesta (sustrato + capa separadora-filtrante)

a. Densidad aparente en seco

Se mide la densidad de las muestras de sustrato ensayadas conjuntamente con el geotextil a través de un pesado del volumen total convenido a ensayar (procedimiento descrito más adelante en este capítulo). Se pesa el producto en condiciones de recepción, no estrictamente seco, por tratarse de las condiciones representativas de su instalación y puesta en obra. Para ello se hace necesario realizar el pesaje inmediatamente después de la recepción en laboratorio, evitando de esta forma que las condiciones ambientales de humedad y temperatura alteren esta medida.



b. Densidad aparente saturada

Una vez realizado el ensayo de Caudal de saturación, descrito en el punto siguiente, se toma el sustrato empleado en el menor tiempo posible, evitando su secado o el escurrimiento del agua retenida, procediendo a pesarlo. De igual forma que en el punto anterior, se calcula la densidad aparente en este caso saturada del producto.

c. Permeabilidad

En este caso, al tratarse de una sección compuesta en la que al sustrato debe dársele un espesor representativo de una posible disposición real, se hace necesario diseñar un dispositivo de ensayo *ad hoc*. La dimensión de la capa de sustrato a ensayar imposibilita el uso de los equipos dispuestos por la Normativa seguida para el ensayo de Permeabilidad perpendicular a un plano en geotextiles UNE-EN ISO 11058:2010 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2010).

La necesidad de comprobar este indicador, junto con las exigencias de los materiales empleados y las limitaciones de espacio y equipos en laboratorio han derivado en la adaptación de Permeabilidad a Caudal de saturación, como forma de representar la precipitación que es capaz de soportar la sección compuesta (sustrato-geotextil) hasta saturarse/encharcar.



Figura 55. Sistema de permeabilidad sobre sección compuesta (Fotografías tomadas en laboratorio)



Colocación de sistema de goteo sobre parrilla



Sistema de recogida de agua mediante recipientes de metacrilato y gomas

Para establecer este valor se comienza a verter agua de forma uniformemente repartida sobre la superficie de ensayo, que está delimitada por un cuadrado de 20 cm de lado en los que se garantiza una lluvia homogénea dentro de los 30 x 30 del cubículo ensayado, estableciendo diferentes hitos que marcan el proceder de la prueba. Se comienza con un caudal de 30 l/h (1,20 mm aproximadamente) hasta que comience a gotear agua a través del geotextil. Entonces se aumenta el caudal suministrado a 40 l/h (1,6 mm) y se toma una muestra al cabo de 5 mm del agua emanada que será



aprovechada para medir el indicador de *Contenido en MO del efluente* detallado en el punto siguiente.

Una vez hecho esto y al cabo de unos minutos se comienza a aumentar el caudal progresivamente a intervalos de 5 minutos hasta que se alcance la saturación del sustrato, momento en el cual se observa una fina lámina de agua acumulada en la superficie. En ese instante se retira la manguera del sistema de riego y se mide manualmente el caudal circulante empleando un recipiente de volumen conocido (en este caso un cubo de 5 l de capacidad) y un cronómetro. Esta medida manual es motivada por la inexistencia en laboratorio de caudalímetros que lean caudales de esta magnitud, por encima de 40 l/h.



Figura 56. Permeabilidad - Medida del caudal (Fotografías tomadas en laboratorio)

d. Contenido de MO del efluente

Para la cuantificación de este ensayo, según la norma 2540 SOLIDS (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012) se mide la diferencia de masas entre las muestras aclimatadas (24 horas a 104 °C) y calcinadas (a 550 °C). Esta diferencia corresponde a la materia orgánica presente en las muestras tomadas.

Tal y como se ha introducido en el punto anterior, la muestra se toma con una precipitación simulada de 1,6 mm (correspondiente con un caudal de 40 l/h) con la que se observa que se garantiza la suficiente circulación de agua. El momento de la toma es seguido a la instauración de este caudal, debido a que se considera representativo al haber pasado varios minutos de que circule agua y, por tanto, conteniendo el pico de MO sin esperar a la dilución de ésta provocada por el lavado del sustrato con el paso de los minutos y el aumento de la precipitación. Para la realización de este ensayo, y dado que se trata de muestras líquidas, se comienza con un filtrado de éstas a través de un disco de fibra de vidrio al que se le aplica el vacío con tres volúmenes sucesivos de 20 ml de muestra con un agitador magnético hasta eliminar todo rastro de agua. Con la muestra filtrada sobre un plato de evaporación pesado, se procede a la calcinación del contenido en un horno de mufla, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Figura 57. Calcinación a 550 °C en horno de mufla (Fotografía tomada en laboratorio)

El ensayo concluye con el secado, enfriado y pesado de la muestra calcinada, concluyendo con un nuevo ciclo de secado y pesado hasta medir un peso constante (diferencia menor al 4 % o 0,5 mg).

e. Compactación

Este indicador tiene una medida directa y sencilla, de forma que se compara el cambio de potencia de la capa de sustrato ensayada dispuesta sobre el geotextil entre la que tiene antes de comenzar con el vertido de agua y una vez finalizado el ensayo, expresada en tanto por ciento.



4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo de la memoria se describirá el proceso de análisis de los resultados derivados de la campaña experimental y/o la valoración de la bibliografía consultada relacionada con los parámetros contemplados. Dicha evaluación se llevará a cabo mediante la aplicación del análisis multicriterio expuesto en el capítulo Método Electre, empleando los pesos asignados a cada indicador y valorando los resultados arrojados por los ensayos acorde a los criterios establecidos como objetivo en este proyecto, una vez valorados los resultados arrojados por la campaña experimental con criterios técnicos y en contraste con bibliografía existente relacionada.



4.1 Resultados de los experimentos

A continuación, se recogen los resultados arrojados por los experimentos y/o la bibliografía de referencia, analizando éstos cuantitativa y cualitativamente, y comparando los componentes ensayados entre sí y en contraste con los valores habituales de otros elementos similares empleados en cubiertas verdes u otras aplicaciones con exigencias similares, tratando así de dar una visión local y general de su rendimiento.

En algunos casos, la medida o medidas son directas, mostrándose los resultados y acometiendo directamente la discusión o valoración de éstos. En otros, su cuantificación lleva asociada cálculos extensos / procesado de resultados de ensayos que se recogerán en Anejos en las respectivas fichas de laboratorio.

4.1.1 Coste de ciclo de vida

A partir de las bases de precios consultadas a través de los software GaBi 9.1 y CYPE, se establecen unos costes unitarios para el personal necesario para la instalación, así como sus rendimientos asociados a la instalación de cubiertas vegetadas. De forma paralela, se establecen los costes unitarios de los materiales (sustratos y geotextiles) empleados en las secciones de estudio. Al estar considerándose precios comerciales para el cálculo, extraídos de la base de datos de CYPE (Placo Saint-Gobain, s.f.), se engloban en ellos los costes correspondientes tanto a la obtención de las materias primas como las etapas de producción del material. Los rendimientos seleccionados para los materiales siguen unos criterios que se hace necesario justificar:

- El rendimiento de los geotextiles, por unidad de superficie (m^2), en lugar de ser unidad se toma de valor 1,1. Esto es debido a la necesidad de adaptar el material en su estado de recepción (bobinas para el caso de los geosintéticos G1 y G2, bloques para el G3) a las exigencias geométricas de la cubierta, existiendo siempre material no aprovechado. En el caso de la geoespuma (G3) se ha decidido emplear el coeficiente 1,2 ligeramente superior debido a la fragilidad del material y la complejidad de su manejo.
- El rendimiento asociado a los sustratos, en este caso por unidad de volumen (m^3), es necesario para reflejar el espesor dispuesto sobre la cubierta. Disponiendo un total de 15 cm de sustrato en cada uno de los supuestos ensayados, se considera adecuado introducir un rendimiento de 0,2; mayor del 0,15 estrictamente necesario a fin de contemplar posibles pérdidas, compactación natural y compactación asociada a las tareas de colocación y trasiego por la cubierta.

En lo concerniente a los costes unitario de los materiales, se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 14. Precio unitario de los materiales

Material	Unidad	Precio unitario
<i>G1</i>	€/m ²	1,00
<i>G2</i>	€/m ²	1,00
<i>G3</i>	€/m ³	30,00
<i>Ladrillo triturado</i>	€/m ³	300,00
<i>Tierra vegetal</i>	€/m ³	80,00
<i>Gravilla calcárea</i>	€/m ³	255,00
<i>Arena silíceo</i>	€/m ³	160,00
<i>Geoespuma</i>	€/m ³	1000,00



Para el cálculo del precio por unidad de volumen de las mezclas de sustrato se ha multiplicado el precio unitario de cada uno de sus componentes por el porcentaje en volumen que representa dentro de la composición de éste.

Hecho esto, los precios y rendimientos de materiales y de la mano de obra movilizada para la ejecución de las diferentes secciones de estudio son los que siguen:

Tabla 15. Precios y rendimientos de materiales y de la mano de obra por m^2 de cubierta verde

<i>Unidad</i>	<i>Material /Mano de obra</i>	<i>Rendimiento</i>	<i>Precio unitario</i>
m^2	Geotextil		
	G1	1,1	1,00
	G2	1,1	1,00
	G3	1,2	30,00
h	Oficial 1 ^a construcción	0,109	19,46
h	Peón ordinario construcción	0,352	18,13
m^3	Sustrato		
	S1	0,2	163,35
	S2	0,2	178,20
	S3	0,2	328,00
h	Oficial 1 ^a jardinero	0,841	19,46
h	Ayudante jardinero	0,841	18,55

Sin perder de vista que este indicador se ha diseñado para evaluarse sobre sustratos y geotextiles de forma separada y no como sección compuesta, se realizan los cálculos contemplando el par sustrato-geotextil para, en última instancia, acotar la influencia de cada componente sobre el coste de ciclo de vida total y poder ser así evaluado de forma diferenciada. Con estos precios y rendimientos de materiales y mano de obra se calcula el coste de la unidad de obra “Metro cuadrado de sección (geotextil y sustrato) de cubierta verde colocada” asociada a cada sección:

Tabla 16. Coste de la unidad de obra “Metro cuadrado de sección (geotextil y sustrato) acabada”

<i>Sección</i>	<i>Coste (€/m²)</i>	<i>Sección</i>	<i>Coste (€/m²)</i>	<i>Sección</i>	<i>Coste (€/m²)</i>
S1G1	74,24	S2G1	77,21	S3G1	107,17
S1G2	74,24	S2G2	77,21	S3G2	107,17
S1G3	109,14	S2G3	112,11	S3G3	142,07

Dado que los costes de mantenimiento se estiman en torno a los 104 €/m² cada 10 años, según la base de datos de precios de CYPE (Placo Saint-Gobain, s.f.), se hace necesario diferenciar entre tipos de mantenimiento, pues no es lo mismo uno rutinario, como el mencionado, a uno que conlleve la necesaria reposición o sustitución de una de las capas que conforman la cubierta. Dado que la geoespuma presenta una resistencia a procesos de hidrólisis y oxidación insuficiente, tal y como se detalla en los puntos correspondientes del



análisis en este capítulo, se hace necesario contemplar su restauración ya que se deben garantizar las propiedades de los materiales para un adecuado comportamiento del sistema.

De esta forma, las secciones sin geoespuma en el sustrato ni en forma de geosintético (S1G1, S1G2, S2G1 y S2G2) tendrán un coste fijo de mantenimiento rutinario de 104 €/m² cada 10 años. Aquellas secciones con geoespuma en el sustrato, pero no como geotextil (S3G1 y S3G2) deben contemplar 104 €/m² cada 10 años como mantenimiento superficial; al cual habría que añadirle un levantamiento de la cubierta y reemplazo del sustrato cada 20 años, debido a que la geoespuma representa una parte porcentual importante de la mezcla, considerando dicha actuación como coste de mantenimiento más el coste del material. En las secciones con geoespuma exclusivamente como capa separadora (S1G3 y S2G3) se debería considerar el levantamiento de la cubierta y reemplazo de la geoespuma cada 10 años, reservando el sustrato que debería haber conservado adecuadamente sus propiedades, considerando como coste de mantenimiento dichas operaciones. Por último, la sección que contempla la disposición de geoespuma como parte del sustrato y como capa separadora (S3G3) debe recoger un reemplazo de la capa separadora cada 10 años, conservando el sustrato, y una sustitución adicional de éste cada 20 años. Este proceso se trata de reflejar de forma esquemática a través de la siguiente figura, con su correspondiente coste asociado por unidad de superficie:

t (años)	10			20			30			40			50		
	Mantenimiento	Sustrato	Capa Separadora												
S1G1	104			104			104			104			104		
S1G2	104			104			104			104			104		
S1G3	104		44.50	104		44.50	104		44.50	104		44.50	104		44.50
S2G1	104			104			104			104			104		
S2G2	104			104			104			104			104		
S2G3	104		44.50	104		44.50	104		44.50	104		44.50	104		44.50
S3G1	104			104	97.57		104			104	97.57		104		
S3G2	104			104	97.57		104			104	97.57		104		
S3G3	104		44.50	104	97.57	44.50	104		44.50	104	97.57	44.50	104		44.50

Figura 58. Plan mantenimiento - Coste de ciclo de vida (elaboración propia)

De esta forma, al cabo de un periodo de 100 años, tal y como especifica la norma UNE-EN ISO 14044:2006 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2006), los costes asociados serían:

Tabla 17. Coste de ciclo de vida

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Total (€/m ²)
S1G1	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	1040.00
S1G2	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	1040.00
S1G3	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	1485.00
S2G1	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	1040.00
S2G2	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	1040.00
S2G3	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	148.50	1485.00
S3G1	104.00	201.57	104.00	201.57	104.00	201.57	104.00	201.57	104.00	104.00	1430.28
S3G2	104.00	201.57	104.00	201.57	104.00	201.57	104.00	201.57	104.00	104.00	1430.28
S3G3	148.50	246.07	148.50	246.07	148.50	246.07	148.50	246.07	148.50	148.50	1875.28



Se observa cómo el uso de geoespuma encarece el coste de ciclo de vida, aumentando en un 42,79 % al ser usado como capa separadora y en un 37,53 % al ser introducido como un componente más del sustrato (80,32 % conjuntamente).

4.1.2 Huella de carbono

De igual forma que el Coste de ciclo de vida, este indicador se estima a través del software GaBi 9.1, proporcionado por GITECO. El análisis se hace para una unidad de área de 1 m² equivalente de cada material, considerando la producción del mismo. No se tiene en cuenta la instalación ni el mantenimiento ya que las necesidades y requerimientos, así como las técnicas de instalación de cada uno de ellos no difiere de las del resto, por lo que no supondría una información añadida. Como consideración, se ha supuesto que en el caso del geocompuesto ambos componentes que lo forman son fabricados por el mismo fabricante y no existe un impacto adicional del transporte de uno en relación al otro hasta la conformación del producto final. El indicador se calcula por unidad de superficie en el caso de ambos materiales, tomando como referencia un espesor de 5 cm para cada uno de los componentes que conforman las mezclas de sustrato (en las que los 3 componentes de cada una suman el total de 15 cm estimados de espesor para el ensayo y como espesor habitual en aplicaciones prácticas).

En el caso de los geotextiles, se hace un desglose por componentes:

Tabla 18. Composición de los geotextiles

Nº	Nombre	Mat 1	% Mat 1	Mat 2	% Mat 2	g/m ²
1	Geotextil tejido negro	PP	100			141
	Geotextil no tejido verde	PP	70	PE	30	105
2	Geotextil agujeteado blanco	PP reutilizado	100			241
3	Geoespuma	EPS	100			22 kg/m ³

Para el cálculo de los impactos, GaBi sigue la metodología CML (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010), elaborada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden (Países Bajos), siendo ésta la más empleada y completa. Emplea diferentes categorías de impacto, como son el potencial de calentamiento global, acidificación de recursos hídricos y suelo, eutrofización, agotamiento de ozono estratosférico, agotamiento de recursos materiales no renovables, agotamiento de recursos abióticos, toxicidad humana, ecotoxicidad de agua dulce, potencial de formación de ozono fotoquímico y ecotoxicidad; tomando como valor reseñable el primero para este Trabajo Fin de Máster. Según este método de caracterización y a partir del software GaBi, se obtiene:

Tabla 19. Método de caracterización CML, estimado para 1 kg de material – Geotextiles (Base de datos GaBi 9.1)

Impacto	Uds. eq.	DE - Under roof membrane PP	DE - Polypropylene granulate PP mix ts.	DE - Polyethylene High Density	EU-28 Expanded polystyrene foam (EPS)
Abiotic Depletion (ADP elements)	kg Sb	6.25E-06	3.68E-07	3.31E-07	4.30E-07
Abiotic Depletion (ADP fossil)	MJ	65.17	66.2	66.66	88.04



<i>Acidification Potential (AP)</i>	kg SO ₂	0.004955	0.002497	0.002618	0.004537
<i>Eutrophication Potential (EP)</i>	kg Phosphate	0.000852	0.0003082	0.0003136	0.0005243
<i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP)</i>	kg DCB	0.01857	0.01915	0.01983	0.02328
<i>Global Warming Potential (GWP 100 years)</i>	kg CO ₂	2.514	1.685	1.561	2.93
<i>Human Toxicity Potential (HTP)</i>	kg DCB	0.1976	0.162	0.1571	0.2114
<i>Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (MAETP)</i>	kg DCB	78.55	74.46	66.64	84.33
<i>Ozone Layer Depletion Potential (ODP)</i>	kg R11	1.31E-14	1.15E-14	7.52E-15	6.05E-15
<i>Photochem. Ozone Creation Potential (POCP)</i>	kg Ethene	0.0008039	0.0004561	0.0005443	0.01591
<i>Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)</i>	kg DCB	0.01054	0.0006595	0.0006331	0.001046

Componiendo estos valores para cada geotextil, se obtiene la estimación del impacto por unidad de superficie:

Tabla 20. Impacto por unidad de superficie - Geotextiles

Impacto	Uds. eq.	Mat 1	Mat 2	Mat 3
<i>Abiotic Depletion (ADP elements)</i>	kg Sb	1.54E-06	1.42E-06	9.47E-09
<i>Abiotic Depletion (ADP fossil)</i>	MJ	1.60E+01	-2.48E-01	1.94E+00
<i>Acidification Potential (AP)</i>	kg SO ₂	1.22E-03	5.92E-04	9.98E-05
<i>Eutrophication Potential (EP)</i>	kg Phosphate	2.10E-04	1.31E-04	1.15E-05



<i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP)</i>	kg DCB	4.59E-03	-1.40E-04	5.12E-04
Global Warming Potential (GWP 100 years)	kg CO2	6.15E-01	2.00E-01	6.45E-02
<i>Human Toxicity Potential (HTP)</i>	kg DCB	4.85E-02	8.58E-03	4.65E-03
<i>Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (MAETP)</i>	kg DCB	1.91E+01	9.86E-01	1.86E+00
<i>Ozone Layer Depletion Potential (ODP)</i>	kg R11	3.10E-15	3.83E-16	1.33E-16
<i>Photochem. Ozone Creation Potential (POCP)</i>	kg Et-hene	2.01E-04	8.38E-05	3.50E-04
<i>Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)</i>	kg DCB	2.59E-03	2.38E-03	2.30E-05

El proceso de cálculo es similar para la Huella de Carbono de los sustratos. En este caso se hace necesario realizar dos asunciones debido a la complejidad de la estimación de los impactos de alguno de los materiales, fruto de su proceso de conformación o sus propiedades fisicoquímicas. En el caso del sustrato universal, el impacto ambiental de la turba es extremadamente complejo de calcular; al sacarla de las turberas se interacciona en el ciclo de carbono y se producen emisiones durante su descomposición. Por este motivo se hace necesario considerar exclusivamente la extracción y preparación del material. En el caso del ladrillo triturado, se considera el impacto de los procesos de machaqueo y cribado para el cálculo.

Tabla 21. Composición de sustratos

<i>Nº</i>	<i>Nombre</i>	<i>Mat 1</i>	<i>% Mat 1</i>	<i>Mat 2</i>	<i>% Mat 2</i>	<i>Mat 3</i>	<i>% Mat 3</i>	<i>kg/m³</i>
1	Sustrato universal Geolia	Turba marrón	70	Turba rubia	25	Compost verde	5	450
2	Arena silíceo 1-2 mm	Arena silíceo	100					1550
3	Gravilla calcárea 12-18 mm	Gravilla calcárea	100					1400
4	Ladrillo 100% triturado 5-12 mm	Ladrillo triturado	100					1000
5	Geoespuma	EPS	100					22



Según el método de caracterización y a partir del software GaBi 9.1, se obtiene:

Tabla 22. Método de caracterización CML, estimado para 1 kg de material – sustratos (Base de datos GaBi 9.1)

Global Warming Potential (GWP 100)	Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential	Impacto	Eutrophication Potential (EP)	Acidification Potential (AP)	Abiotic Depletion (ADP fossil)	Abiotic Depletion (ADP elements)	Impacto
kg CO2	kg DCB	Uds. eq.	kg Phosphate	kg SO2	MJ	kg Sb	Uds. eq.
0.002538	0.00001307	RAP processing (crush and screen)	0.000005539	0.00002228	0.03165	2.69E-10	RAP processing (crush and screen)
0.09782	0.000181	AT – Open window posting	0.0009603	0.003603	-1.691	-1.88E-08	AT – Open window posting
0.03211	0.00003798	DE – Crushed rock 16-32 mm (EN15804)	0.000006373	0.00003354	0.4373	5.95E-09	DE – Crushed rock 16-32 mm (EN15804)
0.01413	0.00003191	DE – Limestone, gravel 16-32 mm	0.000004478	0.00002342	0.1464	4.98E-09	DE – Limestone, gravel 16-32 mm (EN15804)
0.03826	0.00004759	DE – Silica sand (Excavation and pro-	0.00001248	0.00005499	0.5753	4.29E-09	DE – Silica sand (Excavation and pro-
2.93	0.02328	EU-28 Expanded polystyrene foam	0.0005243	0.004537	88.04	4.30E-07	EU-28 Expanded polystyrene foam
		Harvesting and packaging sphagnum peat					Harvesting and packaging sphagnum peat
					6.56		



Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)	Photochem. Ozone Creation Potential (POCP)	Ozone Layer Depletion Potential (ODP)	Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (MAETP)	Human Toxicity Potential (HTP)
kg DCB	kg Ethene	kg R11	kg DCB	kg DCB
0.000004066	0.00000199	5.67E-18	0.04286	0.0005913
-0.00002717	0.0002822	-1.98E-15	-26.8	-0.008352
0.00001983	0.000002374	4.73E-16	1.333	0.001887
0.00001947	9.518E-07	4.72E-16	1.322	0.000662
0.0000398	0.0000061	2.09E-16	0.6387	0.002556
0.001046	0.01591	6.05E-15	84.33	0.2114

Estos valores caracterizados arrojan un impacto por unidad de superficie de cada material que se muestran en la siguiente tabla. Debe tenerse en cuenta que estos materiales conformarán las tres tipologías contempladas en este proyecto de forma combinada, siendo la tipología 1 la suma de los materiales 1+2+3; la tipología 2 suma de 1+2+4; y la tipología 3 una suma de 1+2+4+5. En una primera aproximación se consideró que la tipología 3 estuviera conformada únicamente por los materiales 1+4+5 pero, tras una valoración de las exigencias del ensayo y de una aplicación práctica, se decidió modificar las proporciones añadiendo arena sílice a la mezcla. Esta decisión se apoya en que el ladrillo triturado y la geospuma, a pesar del geosintético colocado bajo esta capa, no lograrían fijar el sustrato universal, provocando una concentración de éste en la zona inferior con el paso del tiempo. Esto repercutiría negativamente en el crecimiento de las plantas, el cual es el objetivo fundamental de este componente, por lo que se decide modificar las proporciones a un 33% del material 1 (sustrato universal), 20% de 4 (ladrillo triturado), 20% del 5 (geospuma en dados) y el restante 27% del 2 (arena sílice).



Tabla 23. Impacto por unidad de superficie - Sustratos

Impacto	Uds. eq.	Mat 1	Mat 2	Mat 3	Mat 4	Mat 5
<i>Abiotic Depletion (ADP elements)</i>	kg Sb		3.33E-07	3.49E-07	1.34E-08	4.73E-07
<i>Abiotic Depletion (ADP fossil)</i>	MJ		4.46E+01	1.02E+01	1.58E+00	9.68E+01
<i>Acidification Potential (AP)</i>	kg SO ₂		4.26E-03	1.64E-03	1.11E-03	4.99E-03
<i>Eutrophication Potential (EP)</i>	kg Phosphate		9.67E-04	3.13E-04	2.77E-04	5.77E-04
<i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP)</i>	kg DCB		3.69E-03	2.23E-03	6.54E-04	2.56E-02
Global Warming Potential (GWP 100 years)	kg CO₂	4.22E-01	2.97E+00	9.89E-01	1.27E-01	3.22E+00
<i>Human Toxicity Potential (HTP)</i>	kg DCB		1.98E-01	4.63E-02	2.96E-02	2.33E-01
<i>Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (MAETP)</i>	kg DCB		4.95E+01	9.25E+01	2.14E+00	9.28E+01
<i>Ozone Layer Depletion Potential (ODP)</i>	kg R11		1.62E-14	3.31E-14	2.84E-16	6.65E-15
<i>Photochem. Ozone Creation Potential (POCP)</i>	kg Ethene		4.73E-04	6.66E-05	9.95E-05	1.75E-02
<i>Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)</i>	kg DCB		3.08E-03	1.36E-03	2.03E-04	1.15E-03

A modo de tabla-resumen, se han obtenido los siguientes valores de Potencial de Calentamiento Global (kg CO₂ equivalente) para cada geotextil y para composición de sustratos, para la cual se debe calcular la suma de los tres materiales que la conforman:

**Tabla 24.** Huella de carbono (Elaboración propia)

Componente	Potencial de Calentamiento Global (kg CO2 eq. 100 años)	
<i>Geotextil</i>	G1	6.15E-01
	G2	2.00E-01
	G3	6.45E-02
<i>Sustrato</i>	S1 (1+2+3)	4.38E+00
	S2 (1+2+4)	3.51E+00
	S3 (1+2+4+5)	4.79E+00

Como puede observarse, de entre los tres geotextiles contemplados aquel que tiene un menor impacto en forma de huella de carbono es la geoespuma, siendo éste notablemente más reducido que los otros dos materiales. Esto puede deberse a los procesos de su fabricación, en los que con escasa materia prima se logra gran cantidad de producto, repercutiendo en una menor huella de carbono. El geotextil blanco agujeteado tiene un menor impacto que el geocompuesto, como cabría esperar en un principio, en gran parte debido al origen reutilizado del material que lo conforma.

En el caso de los sustratos, las combinaciones realizadas presentan un mismo orden de magnitud. Esto en parte es debido a la normalización que supone emplear tres componentes diferentes en similar proporción para conformar las tipologías diseñadas. El que presenta un menor impacto es el 2, la combinación compuesta por sustrato universal, arena silíceo y ladrillo triturado reciclado. Esto se justifica en la sustitución de la gravilla calcárea de la combinación 1 (la de mayor impacto) por material reciclado, reduciendo notablemente el impacto de este componente al tratarse de un RCD que aporta una valoración positiva. La primera combinación presenta una huella de carbono intermedia, ligeramente menor que la 3 en la que la geoespuma que es la que tiene mayor impacto. En contraste con los geotextiles, en el caso de los sustratos la geoespuma supone una mayor huella de carbono en proporción al resto de materiales, al tratarse de un material que requiere de un proceso complejo y exigente de fabricación en contraste con la extracción y procesado que requieren, en general, los áridos.

4.1.3 Composición en materia orgánica del sustrato

Las concentraciones de materia orgánica obtenidas en este ensayo para las muestras de sustrato son las que siguen:

Tabla 25. Resultados composición MO sustratos

Muestra	MO (% sobre muestra seca)
S1	4,95
S2	3,55
S3	7,64

Como puede observarse, la muestra de sustrato con un contenido relativo mayor de materia orgánica es la número 3, correspondiente a la mezcla de Compost + Arena silíceo + Ladrillo triturado + Geoespuma. La presencia de este último componente, la cual diferencia esta muestra de la anterior, produce un salto cuantioso



en el contenido de materia orgánica, debido a la ligereza de este material; duplicando su valor a pesar de tener igual porcentaje en volumen. Entre los sustratos 1 y 2, se observa cómo la mayor granulometría de la gravilla implica un mayor volumen de materia orgánica sobre la muestra seca a igualdad de porcentaje volumétrico de Compost. Esto se debe a la granulometría de este componente que, a igualdad de volumen respecto a los demás materiales del sustrato, representa un porcentaje menor en masa en detrimento de la materia orgánica.

4.1.4 Aislamiento térmico

En base a la bibliografía consultada, en la cual se afirma que, por lo general, las muestras con mayor densidad presentan una mayor conductividad térmica (Coma, et al., 2017) por lo que aquellos sustratos que sean más pesados aportarán una menor capacidad de aislamiento térmico al sistema en condiciones secas; manteniendo conductividades comprendidas entre los 0,1 W/m·K y 0,25 W/m·K (Pianella, et al., 2016). Debido a la disposición de una proporción igual en volumen de compost vegetal en cada una de las mezclas, esta porción orgánica no condiciona la transmitancia del sustrato con lo que se deposita el condicionamiento de esta propiedad en el resto de materiales que la componen, permitiendo así una comparación más limpia y menos condicionada de la capacidad de aislamiento.

De este modo, y tomando como válidas las densidades medidas en el apartado siguiente de 'Densidad aparente', cabría esperar transmitancias térmicas decrecientes de forma escalonada desde el sustrato S1 hasta S3, pasando por S2; lo cual implica alcanzar una mejor capacidad de aislamiento con el sustrato que contiene geoespuma (S3). Asignando al sustrato S3 la menor conductividad contemplada, mencionada anteriormente, de valor 0,1 W/m·K y al sustrato S1 la mayor, de valor 0,25 W/m·K, al sustrato S2 le correspondería a través de una regresión lineal a partir de las densidades secas de las mezclas una conductividad de 0,1967 W/m·K.

En estado saturado, la transmitancia térmica varía. Debido a la heterogeneidad de las muestras y al estado relativamente dinámico del agua dentro de ellas (Pianella, et al., 2016) no es posible estimar con exactitud la transmitancia térmica, pero es posible realizar una estimación suficientemente acertada. Para ello existen modelos que tratan de aproximar la relación de la conductividad térmica en los estados seco y saturado de un sustrato (Sailor, et al., 2008), tal y como se recoge en la siguiente expresión:

$$\frac{k}{k_{dry}} = \frac{\alpha \cdot \exp(\beta \cdot S_r)}{1 + (\alpha - 1) \cdot \exp(\beta \cdot S_r)}$$

Donde $\alpha = 1,45$; $\beta = 4,411$ y S_r es igual al grado de saturación volumétrica. Aplicando esta formulación a los valores de conductividad estimados *grasso modo* a los sustratos del proyecto, resultan unas conductividades en estado saturado de 0,3791 W/m·K para S1, de 0,3211 W/m·K para S2 y de 0,2227 W/m·K para S3. Dichos valores se recogen en forma de tabla (**Tabla 31**. Variaciones porcentuales de densidad aparente a saturada para las distintas combinaciones S-G**Tabla 31**), pudiéndose calcular la transmitancia térmica a través de la siguiente fórmula:

$$U = \frac{1}{R_j}; R_j = \frac{e}{k_j}$$

Donde U es la transmitancia térmica en W/m²·K, R_j es la resistencia térmica en m²·K/W, k_j es la conductividad térmica en W/m·K y e el espesor de la capa (tomado de 15 cm).



Tabla 26. Transmitancias térmicas estimadas (elaboración propia)

Sustrato	K seca ($W/m\cdot K$)	K saturada ($W/m\cdot K$)	R_j ($m^2\cdot K/W$)	U ($W/m^2\cdot K$)
S1	0,2500	0,3791	0,3957	2,5273
S2	0,1967	0,3211	0,4671	2,1407
S3	0,1000	0,2227	0,6736	1,4847

Los valores de la transmitancia (U) obtenidos se encuentran dentro de los valores habituales presentados en la bibliografía consultada ((Coma, et al., 2017), (Niachou, et al., 2001), (Bevilacqua, et al., 2016)) por lo que se consideran razonables para esta estimación.

4.1.5 Densidad aparente

Las pesadas de las muestras de sustrato han sido realizadas antes y después de desarrollar el ensayo de permeabilidad, descrito en el siguiente punto. La pesada en aparente (con la humedad de recepción) se realiza en condiciones de recepción, evitando de esta manera la posible alteración de la densidad debido a la humedad del laboratorio. Para calcular el volumen de cada muestra, se ha realizado un promedio de las alturas de sustrato de cada uno de los cuatro lados del recinto de contención, junto con el área en planta de 30 x 30 cm que se mantiene constante, en cualquier caso. Realizadas las tres medidas, los valores arrojados son los siguientes:

Tabla 27. Densidad de recepción sustratos

Sustrato	Geotextil	Altura seca (cm)	Volumen (cm^3)	Peso (g)	Densidad recepción (kg/m^3)
S1	G1	12.88	11587.50	13189	1138.21
	G2	12.50	11250.00	13040	1159.11
	G3	12.75	10125.00	12855	1269.63
S2	G1	12.65	11385.00	11744	1031.53
	G2	13.33	11992.50	12359	1030.56
	G3	13.83	11092.50	11215	1011.04
S3	G1	13.85	12465.00	9584	768.87
	G2	14.38	12937.50	9485	733.14
	G3	13.80	11070.00	7826	706.96

Una vez realizado el ensayo de permeabilidad, se han tomado de nuevo medidas de las alturas del sustrato, en este caso ya saturado, calculando con ellas, y después del pesado del material, la densidad saturada de éste. Los valores resultantes son:

**Tabla 28.** Densidad saturada sustratos

<i>Sustrato</i>	<i>Geotextil</i>	<i>Altura sat. (cm)</i>	<i>Volumen sat. (cm³)</i>	<i>Peso sat. (g)</i>	<i>Densidad sat. (kg/m³)</i>
<i>S1</i>	G1	12.75	11475.00	17267	1504.75
	G2	12.40	11160.00	14896	1334.77
	G3	12.60	9990.00	12549	1256.16
<i>S2</i>	G1	12.58	11317.50	13956	1233.13
	G2	13.10	11790.00	14759	1251.82
	G3	13.78	11047.50	12853	1163.43
<i>S3</i>	G1	13.60	12240.00	12962	1058.99
	G2	13.88	12487.50	12633	1011.65
	G3	13.73	11002.50	10371	942.60

Realizando la comparativa de densidades de forma independiente, manteniendo como invariante el tipo de geotextil para observar la incidencia real de cada tipo de sustrato y viceversa, manteniendo el tipo de sustrato para ver la influencia del geotextil; se contrastan los resultados a través de las siguientes tablas:

Tabla 29. Densidad aparente combinación sustrato-geotextil

	G1	G2	G3
<i>S1</i>	1138.21	1159.11	1269.63
<i>S2</i>	1031.53	1030.56	1011.04
<i>S3</i>	768.87	733.14	706.96

Tabla 30. Densidad saturada combinación sustrato-geotextil

	G1	G2	G3
<i>S1</i>	1504.75	1334.77	1256.16
<i>S2</i>	1233.13	1251.82	1163.43
<i>S3</i>	1058.99	1011.65	942.6

Tabla 31. Variaciones porcentuales de densidad aparente a saturada para las distintas combinaciones S-G

	G1	G2	G3	
<i>S1</i>	32.20%	15.15%	-1.06%	15.43%
<i>S2</i>	19.54%	21.47%	15.07%	18.70%
<i>S3</i>	37.73%	37.99%	33.33%	36.35%
	29.83%	24.87%	15.78%	



Considerando el geotextil, la retención de agua es mayor, en decreciente, del geotextil 1 al geotextil 3 ($G1 > G2 > G3$). Resulta curioso que con el empleo de *geofom* como capa separadora se presente una menor variación porcentual que en los otros dos geotextiles al realizarse el ensayo de permeabilidad.

Considerando el sustrato, la retención de agua es mayor a medida que se adicionan compuestos con mayor retención de agua como el ladrillo triturado o la geoespuma ($S1 < S2 < S3$) lo cual resulta razonable, en contraste con lo esperado a partir de la bibliografía.

Puede observarse la relación directa de las propiedades de los materiales que contiene cada tipología de sustrato, expuestas anteriormente y motivo por el cual se seleccionaron, observadas en la bibliografía. Al sustituir la gravilla calcárea (S1) por ladrillo triturado (S2) la densidad aparente se reduce debido al menor peso propio del segundo material (1000 kg/m^3 frente a los 1400 de la gravilla), a pesar de tener una granulometría menor que permite un menor porcentaje de huecos en la mezcla. Esto permite cargar en menor medida la estructura, aligerando y simplificando el forjado que sostenga la cubierta verde. A su vez, la capacidad de retención de agua aumenta aproximadamente un 8,8% gracias a la alta capacidad relativa de retención del ladrillo triturado, mucho más poroso que la grava.

Asimismo, incorporando a esta mezcla (S2) una porción de geoespuma (S3) la densidad aparente se reduce de forma considerable, un 28% en el caso de la densidad aparente y un 17% en el caso de la saturada. Esto supone una reducción significativa de los pesos que el forjado y los demás elementos situados bajo esta capa deberán soportar. El salto entre las densidades seca y saturada es tanto o más significativo, aumentando más de un 36%. Esto sugiere la alta capacidad de retención de agua que aporta la geoespuma permitiendo, a pesar del importante aumento de peso en condiciones de saturación, permanecer por debajo de las densidades secas de los otros dos tipos de sustrato ensayados.

4.1.6 Permeabilidad

El ensayo de permeabilidad perpendicular a un plano requiere de un laborioso procesado de los datos, recogiendo por el permeámetro las variaciones de altura de columna de agua (carga variable decreciente, tal y como se conoce el método de cálculo del ensayo) en las conducciones cilíndricas. Esto lleva emparejada una corrección por viscosidad, para la cual se registra la temperatura del agua de ensayo; para ello, y dado que el registro del permeámetro se realiza cada 2 centésimas de segundo, se precisa de un procesado mediante tabla de Excel (los resultados completos se recogen en Anejos) que, tras ensayar tres muestras de cada uno de los geosintéticos, ha dado como resultado:

Tabla 32. Resultados permeabilidad

Geosintético	G1	G2	G3
\bar{v} (mm/s)	43,4	66,3	7,1
Uv (mm/s)	3,0	18,2	0,7
K	2,01	2,65	2,00
gdl	274	5	$1,92 \cdot 10^6$

donde:

\bar{v} es la velocidad media con la que permea el agua a través del geotextil

Uv es la incertidumbre expandida absoluta

k es el coeficiente de ajuste

gdl son los grados de libertad del ajuste



Como puede observarse claramente la *geofoam* (G3) destaca sobre los otros dos geosintéticos de forma clara debido a su baja permeabilidad. Es, además, un producto muy homogéneo debido a sus condiciones de fabricación, dando como resultado una variabilidad (incertidumbre) casi nula en las permeabilidades medidas en las tres muestras ensayadas para este experimento. Este valor tiene dos lecturas muy diferentes: en primer lugar se entiende que al mostrar oposición al paso del agua cabe esperar una retención de agua considerable respecto a los otros dos materiales, permitiendo tener una mayor cantidad de recurso disponible (efecto aljibe) para las plantas en el sustrato colocado sobre él; sin embargo esto no es siempre positivo, pues en eventos de lluvia copiosa cabe esperar un mayor y más rápido encharcamiento, perjudicando o imposibilitando los posibles usos que pudiera tener la cubierta vegetal y pudiendo perjudicar la integridad de la vegetación albergada a corto plazo, además de generar un incremento de cargas en la cubierta.

En cuanto a los dos geotextiles más convencionales, el geocompuesto (G1) presenta una permeabilidad un 35% menor que el geotextil agujeteado (G2) y una variabilidad menor (con un coeficiente k de ajuste de valor muy cercano a 2 y una baja incertidumbre).

En la siguiente figura, elaborada a partir de las mediciones del permeámetro, se muestra la curva promedio en función de la diferencia de cotas h (altura de columna de agua sobre la probeta ensayada):

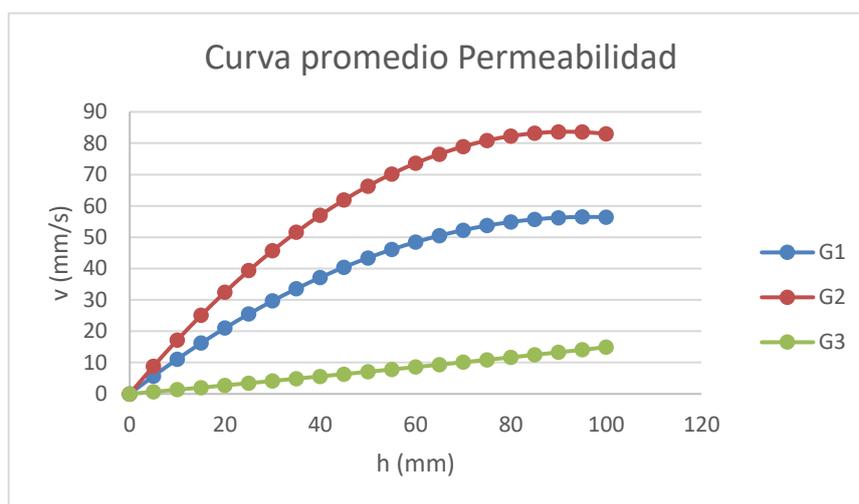


Figura 59. Resultados permeabilidad - Curva promedio (elaboración propia)

Como se observa en la gráfica, los geosintéticos G1 y G2 muestran una permeabilidad dependiente de h de forma parabólica, alcanzando su máxima permeabilidad en torno a los 90 mm. La geoespuma (G3), sin embargo, muestra una permeabilidad dependiente de h prácticamente lineal.

Con respecto a la permeabilidad observada en las secciones compuestas, cabe destacar la necesidad de relacionar el valor de ésta con el de la precipitación equivalente, a través de la superficie de lluvia recreada y de los caudales circulantes por el sistema de riego. Esta comparación se realiza en forma de tabla, en la cual se muestran los valores registrados durante los experimentos, representados más adelante en forma de gráfica:

Tabla 33. Resultados permeabilidad - Sección compuesta

Sust.	Geot.	$Q_{saturacion}$ (l/h)	Lluvia equiv. (mm/h)	Permeabilidad (mm/s)	Permeabilidad Geotext. (mm/s)	Permeabilidad Sust./Geotext.
S1	G1	105	1167	0.32	66.3	0.49 %
	G2	120	1333	0.37	43.4	0.85 %
	G3	70	778	0.22	7.1	3.04 %



S2	G1	109	1211	0.34	66.3	0.51 %
	G2	113	1256	0.35	43.4	0.80 %
	G3	85	944	0.26	7.1	3.70 %
S3	G1	74	822	0.23	66.3	0.34 %
	G2	78	867	0.24	43.4	0.55 %
	G3	78	867	0.24	7.1	3.39 %

Se antoja necesario poner en contraste la permeabilidad observada en las secciones compuestas con la que presenta cada uno de los geotextiles de forma individualizada:

Tabla 34. Variación media permeabilidades

Geotext.	Permeabilidad Sust./Geot. media
G1	0.45%
G2	0.74%
G3	3.38%

La disminución de la permeabilidad está condicionada, de forma unívoca, por los sustratos. Esto se observa en la diferencia existente entre los caudales de saturación de cada una de las muestras ensayadas y en las diferencias, dentro de cada tipo de sustrato, entre los geotextiles con los que se han llevado a cabo los experimentos. En el caso del sustrato S1, compuesto por sustrato universal, gravilla calcárea y arena, la variabilidad de permeabilidades entre los diferentes geotextiles que lo acompañan es notable en términos de lluvia equivalente admitida (desde los 778 mm/h con geoespuma G3, hasta los 1333 con geotextil agujeteado G2, con una desviación típica de la lluvia equivalente de 285 mm/h), normalizándose en términos de permeabilidad estricta (desde 0.22 mm/s hasta 0.37 mm/s). Esto es síntoma de que la mezcla S1 presenta una alta permeabilidad, admitiendo lluvias equivalentes muy cuantiosas.

En el caso del sustrato S2, compuesto por sustrato universal, ladrillo triturado y arena, la variabilidad de permeabilidades se reduce de forma significativa, registrándose lluvias equivalentes máximas de 944 mm/h en el ensayo con geoespuma G3 hasta los 1256 con geotextil agujeteado G2 (desviación típica de la lluvia equivalente de 168 mm/h). La permeabilidad se estabiliza en torno a los 0.30 mm/s, con un máximo de 0.35 mm/s para el geotextil agujeteado G2 y un mínimo de 0.26 con geoespuma G3.

Por último, el sustrato S3 en el que se adiciona al S2 la *geofoam*, presenta una permeabilidad que podría considerarse homogénea e igual a 0.24 mm/s. La desviación típica de la lluvia equivalente se reduce a los 26 mm/h, por lo que se podría considerar homogénea y de valor 78 mm/h debido a la precisión de la medida manual de los caudales de saturación y las limitaciones del sistema de ensayos.

Estos valores reflejan un condicionamiento total por parte del sustrato, debido a las diferencias perceptibles entre los resultados de cada geotextil en función de la mezcla con la que se les combine. La permeabilidad desciende de forma significativa con respecto a la propia de cada geotextil, experimentando la geoespuma G3 el menor descenso en términos porcentuales, lo cual no resulta significativo debido al menor valor que este material presenta (Tabla 32 y Tabla 34).

En la siguiente figura se muestran de forma gráfica los resultados de la permeabilidad de la sección conjunta, agrupados por tipo de sustrato:

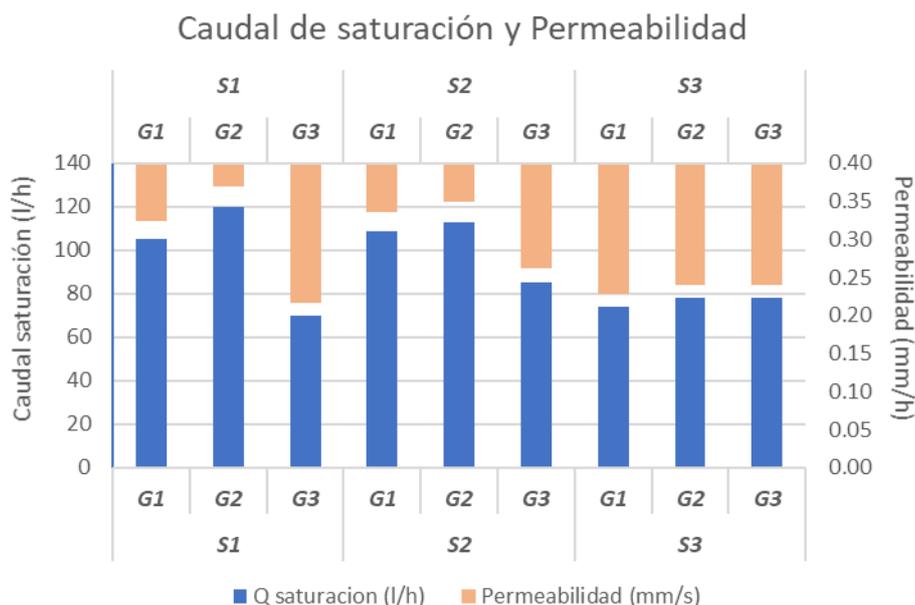


Figura 60. Resultados permeabilidad - Sección compuesta (Elaboración propia)

4.1.7 Contenido en materia orgánica del agua efluente

Una vez realizado el ensayo correspondiente, éste ha arrojado los siguientes resultados en forma de concentración de materia orgánica en el efluente:

Tabla 35. Resultados MO efluente

Muestra	MO (mg/l)
S1-G1	100
S1-G2	340
S1-G3	480
S2-G1	250
S2-G2	420
S2-G3	350
S3-G1	380
S3-G2	390
S3-G3	400

Todas las secciones ensayadas cumplen con el criterio de potabilidad establecido por la norma 2540 SOLIDS (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012), según el cual las aguas con valores menores a los 500 mg/l serían aptas. Obviamente esta condición no es unívoca, sería necesario comprobar otros criterios para dictaminar la aptitud del agua, pero debido a ser el indicador contemplado para el presente trabajo es la única exigencia que se aplica al efluente con respecto a la calidad presentada.

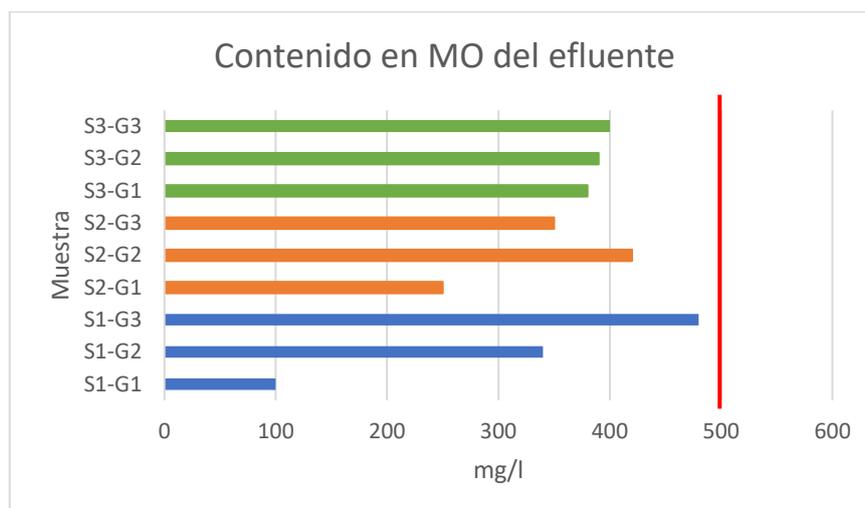


Figura 61. Contenido en MO del efluente

El sustrato S1 presenta una mayor variabilidad, experimentando el menor (para G1) y el mayor (para G3) de los resultados medidos. Esto puede interpretarse como una dependencia directa del geotextil empleado para esta mezcla, influyendo su permeabilidad y abertura característica en la retención de materia orgánica al paso del agua.

Con el sustrato S2 los valores se acotan más, resultando concentraciones de materia orgánica más homogéneas. Cabe destacar que, en este caso, la mayor concentración corresponde con el geotextil G2, lo cual puede deberse a la menor caída de sustrato a través de las juntas de los bloques de geoespuma en el caso del geotextil G3. Debido a la necesidad de precisión y dificultad de colocación de éstas, pueden presentarse saltos de valor de estas características; dando, a pesar de ello, valores representativos y acotados.

Por último, en el caso del sustrato G3 las concentraciones son homogéneas y se sitúan en torno a los 390 mg/l sin apenas variaciones entre geotextiles. Esto indica una fuerte dependencia del sustrato, con el cual se ha alcanzado un control de la materia orgánica contenida en el efluente sin dependencia notable del geosintético con el que se disponga.

4.1.8 Punzonamiento estático

El ensayo de CBR da como resultado dos valores, siendo éstos la fuerza máxima aplicada sobre la probeta hasta su rotura, F_{max} , y el desplazamiento asociado con el hundimiento del punzón hasta dicho instante, h_{max} . Estos valores se reflejan en la siguiente tabla, fruto del ensayo de las muestras a excepción de la geoespuma, cuyo descarte se ha justificado en apartados anteriores debido a su resistencia reducida:

Tabla 36. Resultados punzonado estático

Geosintético	G1	G2
F_{max} (kN)	3,19	2,48
h_{max} (mm)	38,9	48,4

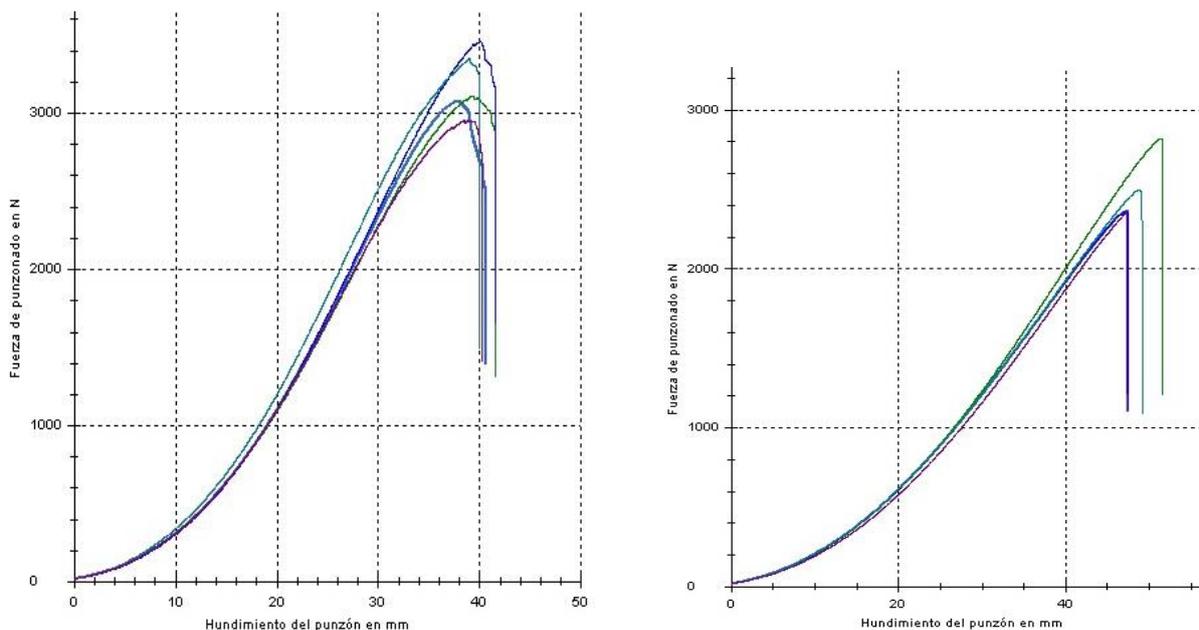


Figura 62. Resultados punzonamiento estático G1 y G2– Gráficas (extraído de testXpert V11.0)

En promedio, el geocompuesto (G1) resiste una fuerza un 28% mayor, soportando un hundimiento máximo un 20% inferior. Esto da idea de la mayor rigidez que aporta su componente tejido de polipropileno, que dota al conjunto de una mayor resistencia funcionando como refuerzo. El geotextil blanco (G2), sin embargo, al estar fabricado por medio de un agujeteado, presenta una estructura ‘textil’ que dota al material de mayor deformabilidad, pero menor resistencia máxima. Esto se ha evidenciado durante el desarrollo del ensayo cuando, al estar cerca de la rotura, es perceptible el sonido que hacen las fibras de polipropileno rompiéndose antes del desgarro total de la probeta.



Figura 63. Aspecto tras desgarro de las muestras de G1 y G2 ensayadas a CBR

En la aplicación sobre cubiertas verdes, la deformabilidad no sería una exigencia debido a su colocación directa sobre una estructura rígida, a menos que se dieran luces excesivas que hicieran importante este aspecto lo cual se supone que no debería pasar en ningún caso.



4.1.9 Perforación dinámica

El ensayo de caída de cono da como resultado la abertura del agujero dejado por el cono metálico tras su caída sobre el material ensayado. En los casos probados, ensayando 3 muestras de cada material, se han obtenido los resultados medios:

Tabla 37. Resultados perforación dinámica

<i>Geosintético</i>	1	2
<i>d (mm)</i>	15,0	18,4

De forma análoga a lo observado en el ensayo de punzonado estático, la estructura tejida del geocompuesto negro y verde (G1) dota al material de una resistencia mayor, dando como resultado una perforación de menor entidad que en el caso del geotextil blanco (G2). Ambas perforaciones tienen el mismo orden de magnitud, lo cual es indicador de que ambos geotextiles son concebidos para fines o usos similares y dan resultados aceptables ante este ensayo. Se considera que su respuesta es suficientemente buena y su uso en cubiertas verdes está justificado. El aspecto que muestran ambos materiales tras la realización del ensayo es el siguiente:

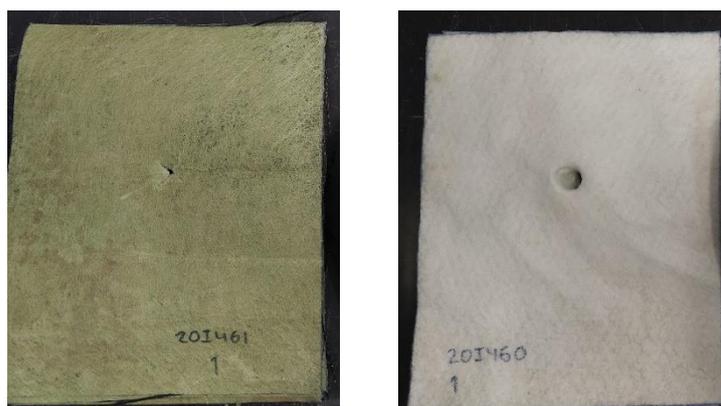


Figura 64. Aspecto tras desgarro de las muestras de G1 y G2 ensayadas a CBR

4.1.10 Abertura característica

El ensayo de abertura característica arroja como resultado el tamaño de la abertura eficaz de los poros o huecos del material ensayado. Los resultados de las pruebas han sido:

Tabla 38. Resultados abertura característica

<i>Geosintético</i>	G1	G2	G3
<i>Abertura (μm)</i>	204	76	~ 20

Como puede observarse, los resultados obtenidos para la abertura característica son muy dispares. El geocompuesto (G1) presenta una abertura característica notablemente superior al resto, con un valor que casi triplica al del geotextil agujeteado (G2). En cualquier caso, no se aprecia riesgo de lavado de finos en caso de



no existir ninguna alteración física de los materiales en caso de aplicación, más allá de la disolución de parte de la materia orgánica fruto del paso del agua.

En el caso de la geoespuma (G3), no se ha podido dar un valor concreto debido a la tan pequeña magnitud de sus poros. Para su estimación, se ha sustituido la pieza de filtro del cono de filtrado del material sólido que ha pasado (correspondiente al ensayo UNE-EN ISO 12956:2010) por una de igual forma y tamaño de geoespuma. Se ha realizado la prueba vertiendo agua junto con el fino normalizado propio del ensayo, obteniendo como efluente un agua limpia en la que, caso de existir partículas sólidas, éstas no son perceptibles en ningún caso. Hecha esta prueba, se está en condiciones de establecer un valor de abertura característica de unas 20 micras, en ningún caso superior de 25. En la siguiente figura se observa el proceso de prueba y el aspecto del agua clara efluente:



Figura 65. Ensayo abertura característica - Geoespuma (Fotografías tomadas en laboratorio)



Figura 66. Agua que pasa a través de la geoespuma, sin presencia apreciable de sólidos



Obtener valores tan dispares supone un aspecto positivo: la selección de tres materiales representativos de los presentes en el mercado, con aberturas que abarcan toda la gama, dentro de aquellos que tienen visos de ser usados en esta tipología de cubiertas. Al estar este parámetro relacionado con la capacidad de filtro, cabe esperar que los tres materiales proporcionen una capacidad de retención mayor a medida que disminuye su abertura característica, dificultando cada vez más el lavado de finos o materia orgánica contenida en la mezcla del sustrato y, por tanto, asegurando el mantenimiento de las propiedades iniciales del sustrato diseñado para la cubierta.

4.1.11 Masa por unidad de superficie

En el caso de la masa por unidad de superficie tiene sentido hacer este cálculo para los dos primeros geosintéticos. Dado que su tercera dimensión (grosor) no tiene una magnitud representativa en comparación con las dos que conforman la superficie del geotextil, cuantificar la masa por unidad de superficie supone información útil a la hora de dimensionar cubiertas. Sin embargo, en el caso de la geoespuma (G3) su espesor



llega a tener una entidad suficiente para ser tenido en cuenta. Esta diferenciación se hace necesaria, más aún si cabe, tras observar la variedad de espesores de las piezas de *geofoam* recibidas en laboratorio, habiendo espesores entre 1 cm y los 2,5 cm aproximadamente (debido a los procesos de corte de las piezas en fabricación).

Hecha esta diferenciación, se recogen en la siguiente tabla los valores obtenidos fruto del pesado y medición de las probetas:

Tabla 39. Resultados masa por unidad de superficie

Geosintético	G1	G2	G3
Masa/superficie (g/m^2)	241	246	-
Masa/volumen (kg/m^3)	-	-	22

Se observa que los geosintéticos G1 y G2 tienen una masa por unidad de superficie muy similar, lo cual es positivo ya que esto dará mayor relevancia al resto de parámetros a la hora de realizar el análisis multicriterio. De esta forma este indicador, no excesivamente relevante tal y como se ha establecido en la asignación de pesos, tendrá menor incidencia si cabe sobre las conclusiones del análisis y dará protagonismo a parámetros más relevantes.

La geoespuma (G3) presenta una variabilidad mayor que los otros dos materiales en las mediciones de masa por unidad de volumen, tal y como puede apreciarse en las tablas de registros recogidas en Anejos. Esto puede deberse a la alteración del estado de los bloques en su transporte o manipulación, debido a la gran fragilidad del material y a la necesidad de ser manipulado con cuidado. Dicha circunstancia podría afectar a la capacidad de almacenamiento de agua de la *geofoam* y, por ende, a su rendimiento en el ensayo de permeabilidad perpendicular al plano, especialmente en la sección compuesta.

4.1.12 Resistencia a la hidrólisis

El ensayo de hidrólisis se ha llevado a cabo según las condiciones de aclimatación pautadas por la norma UNE correspondiente, pero con el objetivo de ensayar los materiales no frente a tracción como ésta recoge sino a permeabilidad y abertura característica, comprobando de esta forma las alteraciones sufridas en sus propiedades hidráulicas y de filtro.

Debido a un fallo en el tanque de hidrólisis, que ha dejado de funcionar debido presumiblemente al contacto de un fusible con agua durante su uso, las probetas sólo han podido estar sometidas al baño correspondiente a 95 °C durante 4 jornadas. Esto ha sido suficiente para evidenciar la alta afección de este proceso sobre la *geofoam* (G3), la cual ha sufrido un cambio evidente de color en este breve periodo de tiempo correspondiente a 6,67 años según la equivalencia establecida por la UNE-EN ISO 12447:2002 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2002).

Esta alteración se ha medido a través de una colorimetría, aplicando el método CIEDE2000 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2017). En esta normativa, se genera un espacio cromático en tres dimensiones para representar los valores (X, Y, Z) sobre coordenadas rectangulares normalizadas como funciones no-lineales. Los valores numéricos representan diferencias relativas de color de forma euclídea y vectorial. Los tres ejes guardan relación con los espectros cromáticos blanco/negro (L), verde/rojo (a) y azul/amarillo (b). Se toman 3 muestras del material sometido a hidrólisis, comparándolas con el patrón medido sobre una pieza en estado de recepción, obteniendo:



Tabla 40. Resultados colorimetría - Hidrólisis

Medida	G1	G2	G3	Media
<i>L</i>	38,07	38,41	38,26	38,25
<i>a</i>	-11,66	-11,70	-11,27	-11,54
<i>b</i>	14,56	14,42	14,40	14,46
ΔL	-1,78	-1,44	-1,59	-1,60
Δa	3,70	3,66	4,08	3,81
Δb	6,28	6,14	6,11	6,18
ΔE_{00}	5,71	5,55	5,81	5,69

donde:

L, a, b son unidades relativas dentro del sistema coordinado de colores del método empleado

$\Delta L, \Delta a, \Delta b$ son las variaciones de dichas unidades

ΔE_{00} es el vector variación, resultado de la colorimetría

Una interpretación de los resultados podría ser que, en líneas generales, el material tiende a un tono ligeramente más blanquecino, con tendencia hacia el rojo y el amarillo. Son cambios ligeros pero evidentes, más si se tiene en cuenta el reducido tiempo que el material estuvo expuesto a condiciones de hidrólisis debido al fallo de la máquina de ensayo.



Figura 67. Colorimetría – Hidrólisis (Fotografías tomadas en laboratorio)

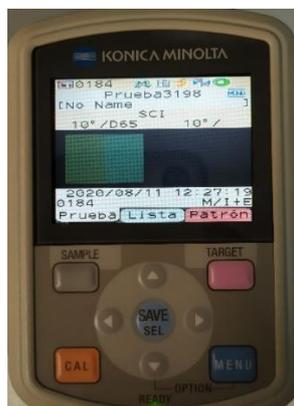
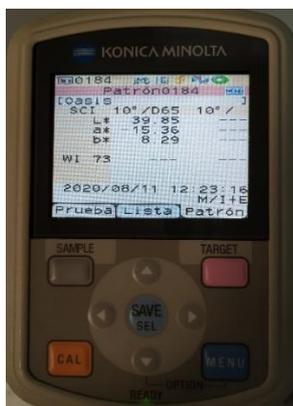




Figura 68. Diferencia de aspecto entre muestra en recepción (izda) y tras hidrólisis (dcha)

Además de esta comprobación, y debido a la considerable reducción en la permeabilidad apreciada en el geocompuesto (G1) en el ensayo de resistencia a la oxidación (4.1.13), se ha decidido comprobar la alteración de esta propiedad también respecto del proceso de hidrólisis. Las variaciones apreciadas son de una entidad similar, a pesar de corresponder a un periodo simulado de menos de 7 años tal y como se ha mencionado anteriormente en este capítulo:

Tabla 41. Resultados hidrólisis - Permeabilidad

Geosintético	G1	G1-hidro
\bar{v} (mm/s)	43,4	31,4
	↓ 27,65 %	
Uv (mm/s)	3,0	3,2
K	2,01	2,15
gdl	274	18

donde:

\bar{v} es la velocidad media con la que permea el agua a través del geotextil

Uv es la incertidumbre expandida absoluta

k es el coeficiente de ajuste

gdl son los grados de libertad del ajuste

Se puede observar que la reducción de la permeabilidad es muy similar a la experimentada en oxidación a 25, lo cual sugiere que el geocompuesto (G1) es más sensible a procesos de hidrólisis. Esto se podría asimilar al geosintético G2, aunque con una reducción de esta propiedad mucho menor.



4.1.13 Resistencia a la oxidación

El ensayo de oxidación, al igual que el de hidrólisis, no se ha llevado a cabo según la norma UNE correspondiente más allá de las condiciones de aclimatación descritas por ésta. El objeto no es medir la variación de las propiedades físico-resistentes de las probetas sino, acorde a las exigencias que los geotextiles dispuestos tendrían en una aplicación práctica, medir la alteración de sus capacidades hidráulicas y de filtro. Se han mantenido las probetas en un tanque de hidrólisis 2 días a 85 °C para, seguidamente, ser sometidas a una temperatura de 105 °C en seco dentro de un horno durante 14 días. Este tiempo, según la UNE - EN ISO 13438:2020 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2020) corresponde a un periodo de deterioro de 25 años.

En el caso de la *geofom* (G3) se observa una oxidación superficial importante. Un proceso de oxidación lleva consigo un aumento de volumen del material, lo cual hace suponer en primera instancia una disminución de la permeabilidad del material asociada con el cierre del sistema de poros. Esto se comprueba con un ensayo de permeabilidad en el que, efectivamente, se confirma la no-validez de la geoespuma (G3) de poliestireno expandido (EPS) para el ensayo normativo correspondiente; no se consigue equilibrar las columnas de agua en los dos cilindros con los que cuenta el aparato de ensayo, con lo que se concluye que el material no es permeable. Cortando el material se comprueba que la oxidación no es sólo superficial, sino que penetra de forma gradual hacia el interior del material.

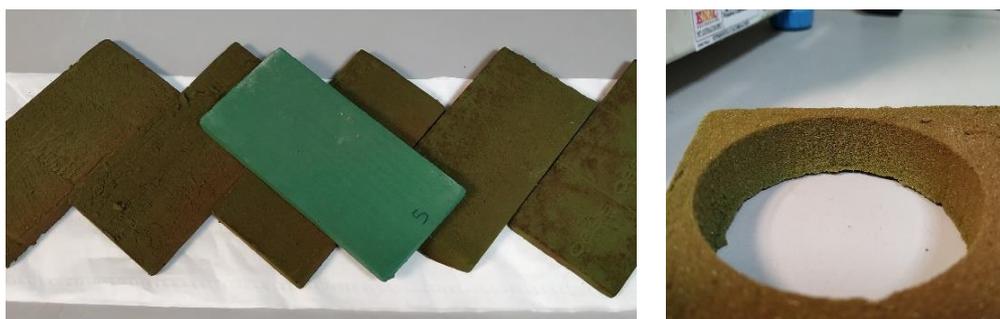


Figura 69. Resultados oxidación - Alteración geoespuma (Fotografías tomadas en laboratorio)

Esto tiene una clara lectura, y es que el EPS es muy sensible a condiciones severas de oxidación, notablemente más perjudicado tanto a simple vista como a través de ensayos que materiales como el PP y el PE. Es posible que se haya llevado a la geoespuma a condiciones extremas (105 °C), aunque sin llegar al límite de reblandecimiento del material (Scheirs & Priddy, 2003) en el que las cadenas se agitan y llegan a formar diferentes conexiones, modificando así la estructura interna de los huecos al deformarse con facilidad y afectando como se ha comprobado a la permeabilidad. De esta forma se hace evidente que existe el riesgo de obturación no sólo por colmatación de finos arrastrados por el flujo pasante, sino también por oxidación del material.

Se ha ensayado la abertura característica de los geosintéticos G1 y G2, buscando cuantificar la variación de esta propiedad ante 25 años de proceso de oxidación, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 42. Resultados oxidación - Abertura característica

Geosintético	G1	G1-oxi	G2	G2-oxi
Abertura (μm)	204	147 (\downarrow 27,94 %)	76	87 (\uparrow 14,47 %)



El geocompuesto G1 experimenta un considerable descenso de casi el 28% de su abertura característica, mientras que el geosintético G2 sufre un incremento de menor magnitud. Se podría considerar que el resultado de alteración de esta propiedad no es concluyente ya que la respuesta no es homogénea, como cabría esperar, no pudiendo establecer relaciones. Haría falta un número mayor de ensayos para reducir la incertidumbre estadística de la abertura para, así, tratar de obtener unos resultados que guarden relación y sean homogéneos. Uno de los motivos a los que se puede atribuir esta diferencia puede ser la irregularidad del G1. En su estado de recepción y debido a las características físicas del producto, especialmente del material no tejido verde, presenta zonas con ligeras ‘calvas’. A pesar de seleccionar las zonas del material a ensayar para tratar de desligar los resultados de estas zonas los resultados no terminan por ser concluyentes.

Asimismo, se observa que son valores congruentes con la afección a la permeabilidad, explicada a continuación. A pesar de ello, no se puede afirmar categóricamente que afecte hasta tal punto.

Por otro lado, la afección al EPS ha sido tal que la propiedad de absorción de agua mencionada en ‘Elección de los sustratos y geotextiles’ se ha perdido. En un estado normal, como el de recepción, bastaba con poner en contacto al material con agua para que éste la absorbiese de inmediato, embebiéndose y sumergiéndose al aumentar su densidad efectiva por encima de la del agua. Sin embargo, tras el proceso de oxidación al que se ha sometido, la geoespuma absorbe agua de forma ligera sin llegar a saturar y siempre de forma exclusivamente superficial, flotando sobre su superficie. Esto guarda relación con la pérdida de permeabilidad y hace una idea de la alteración de su estructura porosa interna.

Los geosintéticos G1 y G2 también han sido ensayados a permeabilidad, comparando su comportamiento hidráulico respecto al que tienen en condiciones de recepción. La comparativa se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 43. Resultados oxidación - Permeabilidad

Geosintético	G1	G1-oxi	G2	G2-oxi
\bar{v} (mm/s)	43,4	32,0	66,3	61,6
	↓ 26,27 %		↓ 7,09 %	
Uv (mm/s)	3,0	2,6	18,2	18,7
K	2,01	2,00	2,65	2,65
gdl	274	719	5	5

donde:

\bar{v} es la velocidad media con la que permea el agua a través del geotextil

Uv es la incertidumbre expandida absoluta

k es el coeficiente de ajuste

gdl son los grados de libertad del ajuste



Figura 70. Muestras extraídas del horno - Oxidación (Fotografía tomada en laboratorio)



Figura 71. Muestras en estado de recepción

Se observa un descenso de la permeabilidad en ambos materiales, siendo este más significativo en el geocompuesto verde y negro (G1) con un descenso del 26,27%. El geotextil agujeteado (G2) sufre un descenso más moderado, del 7%, dentro de la desviación obtenida en estado de recepción; manteniéndose en ambos casos desviaciones similares lo cual es síntoma de un deterioro homogéneo de las probetas ensayadas.

En la siguiente gráfica se muestran las diferencias con respecto a diferentes alturas de columna de agua (h):

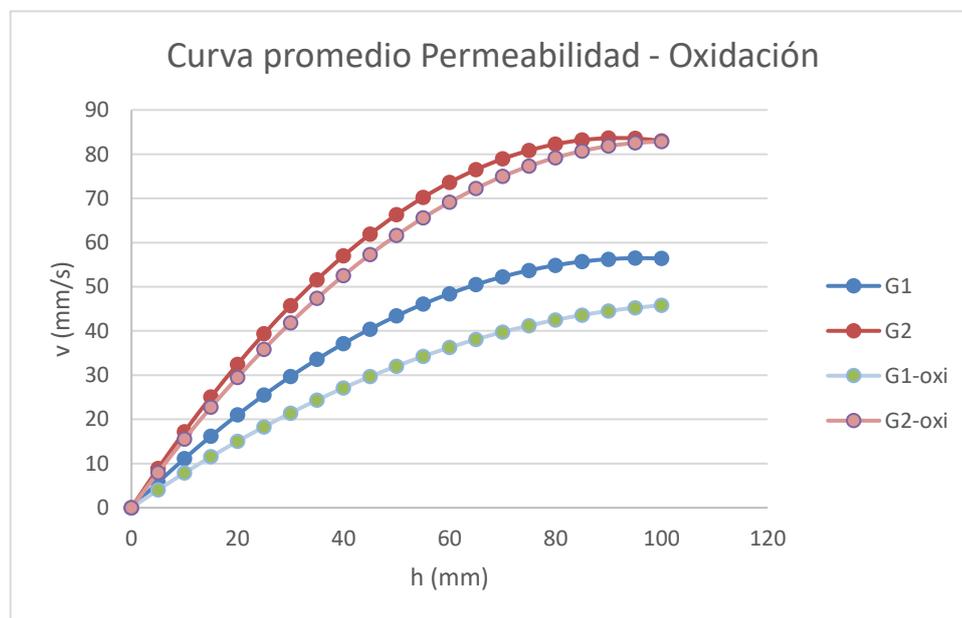


Figura 72. Resultados oxidación - Gráfica permeabilidad (elaboración propia)

Puede observarse cómo para el geocompuesto (G1) la permeabilidad disminuye ya en valores reducidos de h , despegándose de la curva de permeabilidad en estado de recepción de forma clara y evidente. En el caso del geotextil agujeteado (G2) las máximas diferencias se observan entre 40 y 60 mm, estando en los extremos de los valores calculados en valores muy próximos a la curva del estado original.



Esto muestra que ambos tienen un comportamiento aceptable frente a procesos oxidativos, siendo la resistencia del geotextil blanco de polipropileno (G2) notablemente superior sufriendo variaciones muy reducidas de permeabilidad.

Al igual que ocurre en la hidrólisis, la geoespuma (G3) sufre un cambio de color apreciable, en este caso más notorio y evidente. Esta alteración se ha medido a través de una colorimetría a través del método CIEDE2000 (AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2017), obteniéndose los siguientes valores en las tres mediciones realizadas:

Tabla 44. Resultados colorimetría - Oxidación

Medida	1	2	3	Media
<i>L</i>	33,22	32,20	33,16	32,86
<i>a</i>	1,42	6,77	2,94	3,71
<i>b</i>	20,70	20,81	20,79	20,77
ΔL	-6,63	-7,65	-6,69	-6,99
Δa	16,78	22,12	18,30	19,07
Δb	12,41	12,52	12,50	12,48
ΔE_{00}	19,50	24,81	20,97	21,76

donde:

L, *a*, *b* son unidades relativas dentro del sistema coordinado de colores del método empleado

ΔL , Δa , Δb son las variaciones de dichas unidades

ΔE_{00} es el vector variación, resultado de la colorimetría

Los cambios son evidentes, oscureciendo ligeramente el color y tomando un tono notablemente más rojizo y amarillento. Son tonalidades que se asocian claramente a la oxidación, evidenciando la magnitud de los cambios la fuerte sensibilidad de la geoespuma a este proceso.

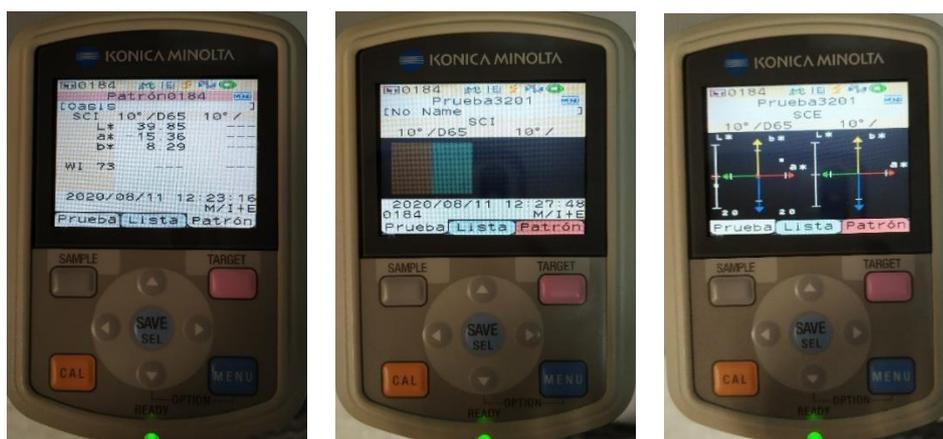


Figura 73. Colorimetría – Oxidación, registros del colorímetro

El cambio de color se aprecia en la **Figura 69** al comienzo del presente apartado.



Como conclusión, se puede afirmar que la oxidación afecta poco al geotextil G2, de forma considerable y evidente al G3, pero que haría falta un estudio en mayor profundidad para concluir el grado de afección sobre el geocompuesto G1.

4.1.14 Compactación

A partir de las tablas fruto del ensayo de Densidad aparente (Tabla 27 y Tabla 28), se está en condiciones de cuantificar la compactación media de cada sustrato tras ser sometido a la lluvia simulada. Cabe destacar que no se involucra el espesor del geotextil en ningún caso, no afectando de este modo esta dimensión a los valores aportados. Los resultados se muestran de forma cuantitativa, aportando las alturas medias (realizando medidas en cada uno de los cuatro lados del recinto de ensayo) de sustrato en cada caso, y de forma relativa a través del porcentaje de compactación observado:

Tabla 45. Resultados compactación

<i>Sustrato</i>	<i>Geotextil</i>	<i>Altura recepción (cm)</i>	<i>Altura saturada (cm)</i>	<i>Compactación (cm)</i>
S1	G1	12.88	12.75	0.13 (0.97%)
	G2	12.50	12.40	0.10 (0.80%)
	G3	12.75	12.60	0.15 (1.18%)
S2	G1	12.65	12.58	0.07 (0.59%)
	G2	13.33	13.10	0.23 (1.69%)
	G3	13.83	13.78	0.05 (0.36%)
S3	G1	13.85	13.60	0.15 (1.81%)
	G2	14.38	13.88	0.50 (3.48%)
	G3	13.80	13.73	0.07 (0.54%)

El sustrato S3, el que contiene piezas de geoespuma en su composición, es con diferencia el que presenta una mayor compactación. El volumen de las piezas y la fragilidad del material son, aparentemente, la causa de esta diferencia de volumen. Por su parte, la mezcla S1 presenta una compactación ligeramente superior a la observada en la S2. El tamaño de las partículas de gravilla, superiores a las de ladrillo triturado, hacen que el porcentaje de huecos inicial sea mayor, reduciéndose al paso del agua y provocando una compactación superior.

En cualquier caso, las tres compactaciones medidas no supondrían una diferencia sustancial que pudiera comprometer la integridad de la capa y un adecuado servicio a la cobertura vegetal, así como a los sistemas de desagüe en caso de que estos existieran. Es un cambio de volumen a tener en cuenta, pero en ningún caso condicionante del correcto funcionamiento de la cubierta ajardinada.

4.2 Resultados método Electre

Una vez analizados los indicadores, principalmente de forma cuantitativa a través de los valores arrojados por los cálculos y ensayos, se hace necesario llevar a cabo un análisis cualitativo que ponga en contraste el rendimiento de los materiales ensayados con respecto a lo que se espera de ellos (en función de valores habituales de productos contrastados sobre cubiertas verdes) y comparándolos entre sí. Para esta valoración



no se debe perder de vista el objetivo principal del estudio, la sostenibilidad, para lo cual no se han asignado únicamente los pesos a cada indicador, sino que se deberá realizar una reflexión sobre la adecuación de las propiedades de cada material y/o sección compuesta.

La evaluación se realiza de forma separada para indicador, de forma que a través de la matriz de valoración se agrupan los resultados para extraer una conclusión común a cada uno de los tres grupos contemplados: sustrato, geotextil y sección compuesta (sustrato-geotextil). De esta forma se evalúa el material ideal de forma separada y de forma conjunta, extrayendo la sección compuesta ideal para los criterios contemplados para el presente proyecto.

4.2.1 Sustrato

Los pesos asignados a los indicadores correspondientes a la evaluación de los sustratos, tal y como se detalla en el apartado 3.1.3, son los siguientes:

Tabla 46. Pesos indicadores de sustratos

<i>Indicador</i>	<i>Peso</i>
<i>Coste de ciclo de vida</i>	4
<i>Huella de carbono</i>	2
<i>Composición en MO</i>	1
<i>Aislamiento térmico (U)</i>	3

Dados los valores arrojados por los cálculos y los ensayos llevados a cabo, y aplicando los principios de sostenibilidad recogidos en el apartado de 'Metodología', se califican las diferentes alternativas contempladas (S1, S2 y S3):

Tabla 47. Calificación alternativas de sustrato

<i>Indicador</i>	<i>Peso</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>
<i>Coste de ciclo de vida</i>	4	5	5	3
<i>Huella de carbono</i>	2	4	5	3
<i>Composición en MO</i>	1	3	2	5
<i>Aislamiento térmico (U)</i>	3	2	3	5

Los criterios aplicados para asignar las respectivas calificaciones han sido:

- **Coste de ciclo de vida:** se ha asignado la mayor calificación (5) a los sustratos S1 y S2 por tener el menor coste de ciclo de vida según las estimaciones realizadas. Por su parte, el S3 obtiene una calificación de 3 puntos de forma proporcional al incremento del valor del indicador respecto de las otras dos alternativas mencionadas (37,53 % superior).
- **Huella de carbono:** se ha asignado la mayor calificación (5) al sustrato con un menor impacto (S2), disminuyendo en un punto por cada sustrato consecutivo en orden creciente de impacto en forma de huella de carbono.
- **Composición en MO:** se ha asignado la máxima calificación (5) al sustrato que presenta un mayor contenido en materia orgánica (S3). A las siguientes mezclas, en orden decreciente, se



les ha asignado las calificaciones de 3 y 2 respectivamente, no calificando ninguno de ellos con un 4 debido a la diferencia sustancial que existe entre ambos con respecto al sustrato S3.

- **Aislamiento térmico (U):** dados los resultados de la estimación realizada en el capítulo anterior, se le asigna la mayor nota (5) al sustrato S3 por presentar la menor transmitancia térmica y, por tanto, el mayor aislamiento. Siguiendo este razonamiento, se les asignan las calificaciones de 2 y 3 a los sustratos S1 y S2 respectivamente debido a la mayor magnitud de sus transmitancias.

Una vez hecho esto, y tal y como se recoge en el capítulo 3.1.1, se procede a calcular las matrices de concordancia y discordancia según la formulación:

$$C_{S_i/S_j} = \sum_{j=1}^{n_C} W_j g(S_i, S_j)$$

$$g(S_i, S_j) = 1 \text{ si } C_{A_{ik}} \geq C_{A_{jk}} ; g(S_i, S_j) = 0 \text{ si } C_{S_{ik}} \leq C_{S_{jk}}$$

$$p = \frac{\sum_{i=1}^{n_S} \sum_{j=1}^{n_S} C_{S_i/S_j}}{n_S^2 - n_S}$$

Siendo S_i la alternativa correspondiente a la fila de la celda, S_j la alternativa correspondiente a la columna de la celda y C_{S_i/S_j} el valor de la celda de la matriz de concordancia; donde la parte superior del cociente con el que se obtiene el valor de p es el sumatorio de todas las celdas de dicha matriz y el valor n_S del denominador el número de alternativas (en este caso igual a 3).

Tabla 48. Matriz de concordancia sustrato

	S1	S2	S3
S1	-	5	6
S2	9	-	6
S3	4	4	-

$$p = 34/6 = 5,67$$

La matriz de discordancia se calcula según:

$$D_{S_i/S_j} = \max(C_{S_{ik}} - C_{S_{jk}}) \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots, n_C$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^{n_S} \sum_{j=1}^{n_S} D_{S_i/S_j}}{n_S^2 - n_S}$$



Donde $D_{Si/Sj}$ es la diferencia máxima entre calificaciones de las alternativas, no tomando nunca valores negativos y tomando 0 en caso de serlo.

Tabla 49. Matriz de discordancia sustrato

	S1	S2	S3
S1	-	1	2
S2	1	-	2
S3	3	2	-

$$q = 11/6 = 1,83$$

Por último, se calculan las dominancias probables y reales (únicamente en caso de que exista dominancia probable se comprueba si hay dominancia real, certificando la superioridad de una alternativa frente a la otra):

Tabla 50. Dominancias sustratos

Dominancia probable hacia	Dominancia real hacia
Si $CSi/Sj \geq P$, es probable que Si domine a Sj	Si $DSi/Sj \leq Q$, es probable que Si domine a Sj
$9 > 5,67 \rightarrow$ S2 probablemente domine a S1 $6 > 5,67 \rightarrow$ S1 probablemente domine a S3 $6 > 5,67 \rightarrow$ S2 probablemente domine a S3	$1 < 1,83 \rightarrow$ S2 realmente domina a S1 No existen dominancias reales
Dominancia probable desde	Dominancia real desde
Si $CSi/Sj < P$, es probable que Si sea dominada por Sj	Si $DSi/Sj > Q$, es probable que Si sea dominada por Sj
$5 < 5,67 \rightarrow$ S1 probablemente sea dominada por S2 $4 < 5,67 \rightarrow$ S3 probablemente sea dominado por S1 $4 < 5,67 \rightarrow$ S3 probablemente sea dominado por S2	No existe dominancia real $3 > 1,83 \rightarrow$ S3 es realmente dominado por S1 $2 > 1,83 \rightarrow$ S3 es realmente dominado por S2

La lectura que arroja la tabla de dominancias de sustratos no es del todo determinante. Por un lado, a través de la matriz de concordancia se extrae que existe dominancia real de S2 sobre S1, sin concluir dominancia real alguna sobre S3. Sin embargo, a través de la matriz de discordancias se niega la dominancia de S2 sobre S1, pero se confirma la dominancia de estas dos sobre S3. De esto se puede concluir que ambas mezclas de sustrato son suficientemente válidas a un nivel similar, dentro de los indicadores seleccionados para este proyecto, siendo cada uno de ellos más adecuado para unas condiciones climatológicas y una cobertura vegetal específicas, función del uso que se le desee dar a la cubierta y de la localización de ésta. Es más, a la vista de los resultados alcanzados, dado que se ha manifestado una dominancia real de S2 hacia S1 (a pesar de que vía el análisis de discordancias no ha quedado refrendado que S1 sea realmente dominado por S2), cabría proponer como resultado del estudio el siguiente orden de elección: **(S2 > S1) >> S3**. En este caso, la componente de material reciclado ha jugado un papel determinante a favor del sustrato S2 al contener ladrillo triturado. Sin embargo, y a pesar de su alto rendimiento a niveles de aislamiento, el S3 ha sido notablemente penalizado



por su impacto tanto económico como ambiental a través de los indicadores de coste de ciclo de vida y huella de carbono.

4.2.2 Geotextil

Los pesos asignados a los indicadores correspondientes a la evaluación de los geotextiles, tal y como se detalla en el apartado 3.1.3, son los siguientes:

Tabla 51. Pesos indicadores de geotextiles

Indicador	Peso
<i>Permeabilidad</i>	9
<i>Coste de ciclo de vida</i>	8
<i>Huella de carbono</i>	3
<i>Punzonamiento estático</i>	6
<i>Perforación dinámica</i>	7
<i>Abertura característica</i>	2
<i>Masa por unidad de superficie</i>	1
<i>Resistencia a la hidrólisis</i>	4
<i>Resistencia a la oxidación</i>	5

Dados los valores arrojados por los cálculos y los ensayos llevados a cabo, y aplicando los principios de sostenibilidad recogidos en el apartado de 'Metodología', se califican las diferentes alternativas contempladas (G1, G2 y G3):

Tabla 52. Calificación alternativas de geotextiles

Indicador	Peso	G1	G2	G3
<i>Permeabilidad</i>	9	4	5	2
<i>Coste de ciclo de vida</i>	8	5	5	2
<i>Huella de carbono</i>	3	3	4	5
<i>Punzonamiento estático</i>	6	5	4	1
<i>Perforación dinámica</i>	7	4	5	1
<i>Abertura característica</i>	2	3	4	5
<i>Masa por unidad de superficie</i>	1	4	4	4
<i>Resistencia a la hidrólisis</i>	4	3	4	1
<i>Resistencia a la oxidación</i>	5	3	5	1

Los criterios aplicados para asignar las respectivas calificaciones han sido:



- **Permeabilidad:** dada la importante cualidad de las cubiertas verdes de amortiguar las precipitaciones, especialmente las de mayor magnitud, se exige a sus componentes una alta permeabilidad, permitiendo así que el agua no se acumule aumentando el peso del sistema y generando unas condiciones no adecuadas para las plantas. Debido a esto, se califica con la mayor puntuación al geotextil (G2) que presente una mayor permeabilidad. La geoespuma será calificada con una nota menor, debido a la diferencia de magnitud de esta propiedad respecto a las de los otros materiales.
- **Coste de ciclo de vida:** se ha asignado la mayor calificación (5) a los geotextiles G1 y G2 por tener el menor coste de ciclo de vida según las estimaciones realizadas. Por su parte, el G3 obtiene una calificación de 3 puntos de forma proporcional al incremento del valor del indicador respecto de las otras dos alternativas mencionadas (42,78 % superior).
- **Huella de carbono:** se ha asignado la mayor calificación al geotextil (G3) que provoca un menor impacto en forma de emisiones de carbono equivalente, disminuyendo la calificación a medida que este impacto aumenta.
- **Punzonamiento estático:** en este caso los geotextiles G1 y G2 presentan resultados muy similares, pudiendo asignarles a ambos materiales la máxima puntuación. Sin embargo, se ha decidido asignarles respectivamente la máxima calificación y la sucesiva respectivamente debido a la importancia (peso) del indicador. De esta forma se pone en valor la resistencia adicional que presenta el geotextil G1.
- **Perforación dinámica:** el razonamiento seguido para este indicador es el mismo que el seguido en el indicador que lo precede.
- **Abertura característica:** el criterio seguido para otorgar las calificaciones de este indicador es relacionado con la capacidad de filtro. De este modo la geoespuma (G3) alcanza la máxima calificación por tener la menor abertura característica, ya que retendrá una mayor cantidad de finos que el resto de materiales, si no todos. Consecuentemente las calificaciones otorgadas a los otros dos materiales se ven reducidas a medida que su abertura característica aumenta.
- **Masa por unidad de superficie:** a los tres geotextiles se les asigna una calificación de 4 por presentar masas por unidad de superficie (unidad de volumen en el caso del G3) de una magnitud similar y a su escasa variación respecto a los efectos que pudiera tener sobre una cubierta vegetada.
- **Resistencia a la hidrólisis:** debido al fallo del tanque, y dadas las comprobaciones realizadas para el reducido periodo simulado, se otorga una calificación intermedia (3) al G1, vista la considerable reducción de su permeabilidad. La geoespuma (G3) sufre evidentes alteraciones por lo que la calificación que se le otorga es la más reducida; siendo de valor 4 la otorgada al G2, al cual no se le asigna la de máximo valor debido a que se tienen fundamentos para considerar que la afección es reducida, pero no suficientes para afirmar que es nula o casi nula.
- **Resistencia a la oxidación:** en este caso la afección sobre el G1 no es del todo clara, sería necesario un estudio en mayor profundidad para sacar conclusiones más categóricas, por lo que se le otorga una nota intermedia (3) visto el empeoramiento en sus propiedades. En el caso del geotextil G2 la afección es escasa por lo que se le otorga la máxima calificación, asignándole la más baja a la geoespuma (G3) dados los pésimos resultados que presenta.

Una vez hecho esto, y tal y como se recoge en el capítulo 3.1.1, se procede a calcular las matrices de concordancia y discordancia:



Tabla 53. Matriz de concordancia geotextiles

	G1	G2	G3
G1	-	15	40
G2	39	-	40
G3	6	6	-

$$p = 146/6 = 24,33$$

La matriz de discordancia:

Tabla 54. Matriz de discordancia geotextiles

	G1	G2	G3
G1	-	1	4
G2	2	-	4
G3	2	1	-

$$q = 14/6 = 2,33$$

Por último, se calculan las dominancias probables y reales:

Tabla 55. Dominancias geotextiles

Dominancia probable hacia	Dominancia real hacia
<i>Si $CS_i/S_j \geq P$, es probable que S_i domine a S_j</i>	<i>Si $DS_i/S_j \leq Q$, es probable que S_i domine a S_j</i>
40 > 24,33 → G1 probablemente domine a G3	No existen dominancias reales
40 > 24,33 → G2 probablemente domine a G3	
39 > 24,33 → G2 probablemente domine a G1	2 < 2,33 → G2 realmente domina a G1
<i>Dominancia probable desde</i>	<i>Dominancia real desde</i>
<i>Si $CS_i/S_j < P$, es probable que S_i sea dominada por S_j</i>	<i>Si $DS_i/S_j > Q$, es probable que S_i sea dominada por S_j</i>
15 < 24,33 → G1 probablemente sea dominada por G2	No existe dominancia real
6 < 24,33 → G3 probablemente sea dominado por G1	
6 < 24,33 → G3 probablemente sea dominado por G2	No existen dominancias reales

Esta tabla sugiere que existe un dominio considerable del geosintético G2 sobre el G1, sin garantizarse la dominancia de ninguno de ellos sobre la geoespuma (G3). Sin embargo, el bajo rendimiento de ésta se evidencia en la matriz de concordancia además de mostrar claramente su insuficiente resistencia ante varios de los ensayos contemplados, no garantizando el correcto funcionamiento del sistema sin un mantenimiento adecuado y, en cualquier caso, notablemente más costoso.



De forma paralela a lo observado con las mezclas de sustrato analizadas, la segunda opción toma ventaja sobre las otras dos, entre otros motivos gracias a su composición en parte reciclada o reutilizada y la relevancia de los indicadores que tienen vinculación con este aspecto. De este modo, se puede concluir que para un caso genérico el orden de dominancia de los geotextiles estudiados es de $(G2 > G1) >> G3$, estando clara la superioridad del geotextil blanco agujeteado en aplicaciones sobre cubiertas verdes a modo de capa separadora.

4.2.3 Sección compuesta (sustrato-geotextil)

Los pesos asignados a los indicadores correspondientes a la evaluación de las secciones compuestas, tal y como se detalla en el apartado 3.1.3, son los siguientes:

Tabla 56. Pesos indicadores sección compuesta

<i>Indicador</i>	<i>Peso</i>
<i>Densidad aparente en seco</i>	3
<i>Densidad aparente saturada</i>	4
<i>Permeabilidad</i>	5
<i>Contenido de MO del efluente</i>	1
<i>Compactación</i>	2

Dados los valores arrojados por los cálculos y los ensayos llevados a cabo, y aplicando los principios de sostenibilidad recogidos en el apartado de 'Metodología', se califican las 9 diferentes alternativas contempladas para las secciones compuestas (Si-Gj):

Tabla 57. Calificación alternativas de sección compuesta

<i>Indicador</i>	<i>Peso</i>	<i>S1G1</i>	<i>S1G2</i>	<i>S1G3</i>	<i>S2G1</i>	<i>S2G2</i>	<i>S2G3</i>	<i>S3G1</i>	<i>S3G2</i>	<i>S3G3</i>
<i>Densidad aparente</i>	3	2	2	2	3	3	3	5	5	5
<i>Densidad aparente saturada</i>	4	2	3	3	3	3	3	3	3	4
<i>Permeabilidad</i>	5	4	5	2	5	5	3	3	3	3
<i>Contenido de MO del efluente</i>	1	5	3	2	4	2	3	3	3	2
<i>Compactación</i>	2	4	4	3	4	2	5	2	1	4

Los criterios aplicados para asignar las respectivas calificaciones han sido:

- **Densidad aparente:** la máxima calificación se asigna a las secciones en las que se dispone el sustrato S3 ya que presentan, con diferencia, la menor densidad seca. Respectivamente a aquellos en los que se disponen los sustratos S1 y S2 se les otorgan calificaciones menores debido a la mayor densidad medida.
- **Densidad aparente saturada:** al igual que sucede en el indicador anterior, se le otorga la mayor calificación a aquella sección con menor densidad. En este caso las densidades se asemejan bastante, por lo que la S3G3 recibe un 4 (no la máxima nota ya que ha sufrido un aumento



más considerable), la S1G1 un 2 por tener la más alta con diferencia respecto al resto, y un 3 al resto de secciones ensayadas.

- **Permeabilidad:** aquellos pares sustrato-geotextil que hayan presentado una permeabilidad superior a los 1200 mm/h de lluvia equivalente reciben la calificación máxima contemplada (5). Entre 1000 mm/h y 1200 mm/h se asigna una calificación de 4, seguido por un 3 asignado a aquellas con lluvia equivalente comprendida entre 800-1000 mm/h. Por último, a la sección compuesta con permeabilidad inferior a 800 mm/h se le otorga un 3. Es necesario mencionar que, tal y como se ha explicado, los rendimientos de todas las combinaciones ensayadas son buenos y cumplen con los requerimientos exigidos a una cubierta verde según lo contemplado. La diferenciación en términos de calificación asignada a todos ellos se debe a la necesidad de resaltar los diferentes órdenes de magnitud, dada la gran importancia del indicador en cuestión
- **Contenido de MO del efluente:** en este caso, al cumplir todos los resultados con el límite de 500 mg/l, todas las aguas efluentes serían potables si se atendiera únicamente a este indicador. Sin embargo, y dado que se pretende comparar alternativas y no cumplir con estándares (del mismo modo que ocurre con la permeabilidad), se ve conveniente asignar calificaciones que resalten las diferencias respecto a este parámetro. Por este motivo, se decide otorgar un 5 a aquellas muestras que presenten un contenido en MO del efluente entre 100-200 mg/l, un 4 para las que den valores comprendidos entre 200-300 mg/l, un 3 para valores entre 300-400 mg/l y un 2 a las que presenten un contenido entre 400 mg/l y el límite de 500 mg/l.
- **Compactación:** las secciones ensayadas presentan compactaciones de mínima entidad, pero se decide diferenciar los resultados a través de las calificaciones, de forma que se asigna: un 5 a compactaciones comprendidas entre 0-0,5 %, un 4 a las que estén entre 0,5-1,0 %, un 3 a las comprendidas entre 1,0-1,5 %, un 2 hasta el 2,0 % y un 1 a las superiores.

Una vez hecho esto, y tal y como se recoge en el capítulo 3.1.1, se procede a calcular las matrices de concordancia y discordancia:

Tabla 58. Matriz de concordancia sección compuesta

	S1G1	S1G2	S1G3	S2G1	S2G2	S2G3	S3G1	S3G2	S3G3
S1G1	-	6	11	3	3	6	8	8	8
S1G2	14	-	15	7	12	10	12	12	8
S1G3	7	7	-	4	7	4	6	6	1
S2G1	14	15	15	-	15	13	12	12	8
S2G2	12	12	13	12	-	12	11	11	6
S2G3	9	10	15	9	10	-	12	12	8
S3G1	7	8	13	7	10	13	-	15	9
S3G2	7	8	13	7	8	13	13	-	9
S3G3	9	9	15	9	10	12	14	14	-

$$p = 715/72 = 9,93$$



La matriz de discordancia:

Tabla 59. Matriz de discordancia sección compuesta

	S1G1	S1G2	S1G3	S2G1	S2G2	S2G3	S3G1	S3G2	S3G3
S1G1	-	2	3	1	3	2	2	3	3
S1G2	1	-	3	0	1	2	2	3	2
S1G3	1	0	-	0	1	0	1	2	0
S2G1	1	1	3	-	2	2	2	3	2
S2G2	1	1	3	0	-	2	2	2	2
S2G3	1	1	1	1	3	-	3	4	1
S3G1	3	3	3	2	2	2	-	1	1
S3G2	3	3	3	2	2	2	0	-	1
S3G3	3	3	3	2	2	2	2	3	-

$$q = 135/72 = 1,875$$

Por último, se calculan las dominancias probables y reales (únicamente en caso de que exista dominancia probable se comprueba si hay dominancia real, certificando la superioridad de una alternativa frente a la otra):

Tabla 60. Dominancias sección compuesta

Dominancia probable hacia	Dominancia real hacia
Si $CS_i/S_j \geq P$, es probable que S_i domine a S_j	Si $DS_i/S_j \leq Q$, es probable que S_i domine a S_j
$15 > 9,93 \rightarrow S1G2$ probablemente domine a $S1G3$	No hay dominancia real de $S1G2$ sobre $S1G3$
$15 > 9,93 \rightarrow S2G1$ probablemente domine a $S1G2$, $S1G3$ y $S2G2$	$1 < 1,875 \rightarrow S2G1$ realmente domina a $S1G2$, pero no existe dominancia real sobre $S2G2$ y $S2G3$
$15 > 9,93 \rightarrow S2G3$ probablemente domine a $S1G3$	$1 < 1,875 \rightarrow S2G3$ realmente domina a $S1G3$
$15 > 9,93 \rightarrow S3G1$ probablemente domine a $S3G2$	$1 < 1,875 \rightarrow S3G1$ realmente domina a $S3G2$
$15 > 9,93 \rightarrow S3G3$ probablemente domine a $S1G3$	No existe dominancia real de $S3G3$ sobre $S1G3$
$14 > 9,93 \rightarrow S1G2$ probablemente domine a $S1G1$	$1 < 1,875 \rightarrow S1G2$ realmente domina a $S1G1$
$14 > 9,93 \rightarrow S2G1$ probablemente domine a $S1G1$	$1 < 1,875 \rightarrow S2G1$ realmente domina a $S1G1$
$14 > 9,93 \rightarrow S3G3$ probablemente domine a $S3G1$ y $S3G2$	No hay dominancias reales
$13 > 9,93 \rightarrow S2G1$ probablemente domine a $S2G3$	No hay dominancia real
$13 > 9,93 \rightarrow S2G2$ probablemente domine a $S1G3$	No hay dominancia real
$13 > 9,93 \rightarrow S3G1$ probablemente domine a $S1G3$ y $S2G3$	No hay dominancias reales
$13 > 9,93 \rightarrow S3G2$ probablemente domine a $S1G3$, $S2G3$ y $S3G1$	$0 < 1,875 \rightarrow S3G2$ realmente domina a $S3G1$, pero no existe dominancia real sobre $S1G3$ ni $S2G3$



<p>$12 > 9,93 \rightarrow$ S1G2 probablemente domine a S2G2, S3G1 y S3G2</p> <p>$12 > 9,93 \rightarrow$ S2G1 probablemente domine a S3G1 y S3G2</p> <p>$12 > 9,93 \rightarrow$ S2G2 probablemente domine a S1G1, S1G2, S2G1 y S2G3</p> <p>$12 > 9,93 \rightarrow$ S2G3 probablemente domine a S3G1 y S3G2</p> <p>$12 > 9,93 \rightarrow$ S3G3 probablemente domine a S2G3</p> <p>$11 > 9,93 \rightarrow$ S1G1 probablemente domine a S1G3</p> <p>$11 > 9,93 \rightarrow$ S2G2 probablemente domine a S3G1 y S3G2</p>	<p>$1 < 1,875 \rightarrow$ S1G2 realmente domina a S2G2, pero no existe dominancia real sobre S3G1 y S3G2</p> <p>No existen dominancias reales</p> <p>$1 y 0 < 1,875 \rightarrow$ S2G2 realmente domina a S1G1, S1G2 y S2G1, pero no sobre S2G3</p> <p>No existen dominancias reales</p> <p>No existen dominancias reales</p> <p>No existe dominancia real</p> <p>No existen dominancias reales</p>
<p>$10 > 9,93 \rightarrow$ S1G2 probablemente domine a S2G3</p> <p>$10 > 9,93 \rightarrow$ S2G3 probablemente domine a S1G2 y S2G2</p> <p>$10 > 9,93 \rightarrow$ S3G1 probablemente domine a S2G2</p> <p>$10 > 9,93 \rightarrow$ S3G3 probablemente domine a S2G2</p>	<p>No existe dominancia real</p> <p>$1 < 1,875 \rightarrow$ S2G3 realmente domina a S1G2, pero no existe dominancia real sobre S2G2</p> <p>No existen dominancias reales</p>
<p>Dominancia probable desde</p>	<p>Dominancia real desde</p>
<p>Si $CS_i/S_j < P$, es probable que Si sea dominada por Sj</p>	<p>Si $DS_i/S_j > Q$, es probable que Si sea dominada por Sj</p>
<p>$9 < 9,93 \rightarrow$ S2G3 probablemente sea dominada por S1G1 y S2G1</p> <p>$9 < 9,93 \rightarrow$ S3G1 probablemente sea dominada por S3G3</p> <p>$9 < 9,93 \rightarrow$ S3G2 probablemente sea dominada por S3G3</p> <p>$9 < 9,93 \rightarrow$ S3G3 probablemente sea dominada por S1G1, S1G2 y S2G1</p>	<p>No existen dominancias reales</p> <p>No existe dominancia real</p> <p>No existe dominancia real</p> <p>$3 y 2 > 1,875 \rightarrow$ S1G1, S1G2 y S2G1 realmente dominan a S3G3</p>
<p>$8 < 9,93 \rightarrow$ S1G1 probablemente sea dominada por S3Gj</p> <p>$8 < 9,93 \rightarrow$ S1G2 probablemente sea dominada por S3G3</p> <p>$8 < 9,93 \rightarrow$ S2G1 probablemente sea dominada por S3G3</p> <p>$8 < 9,93 \rightarrow$ S2G3 probablemente sea dominada por S3G3</p> <p>$8 < 9,93 \rightarrow$ S3G1 probablemente sea dominada por S1G2</p> <p>$8 < 9,93 \rightarrow$ S3G2 probablemente sea dominada por S1G2 y S2G2</p>	<p>$3 y 2 > 1,875 \rightarrow$ S3Gj realmente dominan a S1G1</p> <p>$2 > 1,875 \rightarrow$ S3G3 realmente domina a S1G2</p> <p>$2 > 1,875 \rightarrow$ S3G3 realmente domina a S2G1</p> <p>No existe dominancia real</p> <p>$3 > 1,875 \rightarrow$ S1G2 realmente dominan a S3G1</p> <p>$3 y 2 > 1,875 \rightarrow$ S1G2 y S2G2 realmente dominan a S3G2</p>
<p>$7 < 9,93 \rightarrow$ S1G2 probablemente sea dominada por S2G1</p> <p>$7 < 9,93 \rightarrow$ S1G3 probablemente sea dominada por S1G1, S1G2 y S2G2</p> <p>$7 < 9,93 \rightarrow$ S3G1 probablemente sea dominada por S1G1 y S2G1</p> <p>$7 < 9,93 \rightarrow$ S3G2 probablemente sea dominada por S1G1 y S2G1</p>	<p>No existe dominancia real</p> <p>No existen dominancias reales</p> <p>$3 y 2 > 1,875 \rightarrow$ S1G1 y S2G1 realmente dominan a S3G1</p> <p>$3 y 2 > 1,875 \rightarrow$ S1G1 y S2G1 realmente dominan a S3G2</p>



6 < 9,93 → S1G1 probablemente sea dominada por S1G2 y S2G3	2 > 1,875 → S1G2 y S2G3 realmente dominan a S1G1
6 < 9,93 → S1G3 probablemente sea dominada por S3G1 y S3G2	2 > 1,875 → S3G2 realmente domina a S1G3, pero no así S3G1
6 < 9,93 → S2G2 probablemente sea dominada por S3G3	2 > 1,875 → S3G3 realmente domina a S2G2
4 < 9,93 → S1G3 probablemente sea dominada por S2G1 y S2G3	No existen dominancias reales
3 < 9,93 → S1G1 probablemente sea dominada por S2G1 y S2G2	3 > 1,875 → S2G2 realmente domina a S1G1, pero no así S2G1
1 < 9,93 → S1G3 probablemente sea dominada por S3G3	No existe dominancia real

Las dominancias reales fruto del análisis no son clarividentes, mostrando cierto grado de contradicción en lo que respecta a la dominancia de algunos pares de secciones compuestas. En líneas generales, las secciones en las que se emplea el tercer tipo de sustrato (S3Gj) parecen ser dominadas por el resto, a excepción de la sección S3G3 que aparentemente es superior a otras. Esta superioridad no se explica atendiendo a los resultados obtenidos para la geoespuma como capa separadora (G3) ni incluida en la mezcla de sustrato (S3), casos en los que se demostró su peor rendimiento acorde a los criterios definidos para este proyecto.

Fruto de la tabla de dominancias, y a modo de primera aproximación a pesar de las contradicciones surgidas en ella, se recoge el orden de idoneidad de las secciones compuestas: **S3G3 > (S2G1, S2G2, S2G3) > S1G2 > (S3G1, S3G2, S1G1) > S1G3**. Este orden no es definitivo, debiendo ser analizado, criticado y depurado hasta establecer uno definitivo que sea válido como resultado del proyecto.

Fundamentalmente en lo que se refiere a las densidades del material, tanto en estado de recepción como en saturación, el sustrato S3 marca la diferencia dando ventaja a las secciones compuestas que lo contienen sobre las demás gracias a su ligereza. Respecto a la permeabilidad, indicador más relevante según lo establecido para este proyecto, su rendimiento es bueno al cumplir con los estándares que se requieren para la instalación en una cubierta vegetada, pero inferiores al resto por lo que recibe una penalización reseñable. Dentro de estas secciones compuestas que contienen S3, no existe una dominancia real que las relacione, por lo que atendiendo a este análisis no se podría establecer un orden de prioridad entre ellas. Sin embargo, atendiendo a las conclusiones extraídas del análisis pormenorizado de capa separadora, parece lógico afirmar que S3G2 > S3G1 > S3G3. Establecido este orden entre las secciones S3Gj, la sección S3G3 se vería relegada dentro de la primera aproximación arriba realizada. Esto responde, como se ha explicado, a los resultados arrojados por los ensayos de los capítulos 4.2.1 y 4.2.2.

Una vez criticados los resultados relativos a las secciones S3Gj, es necesario destacar la superioridad de las secciones S2Gj. En estas secciones compuestas, en las que se dispone de material reciclado dentro de la mezcla de sustrato, se logran rendimientos superiores en lo que se refiere a densidades aparente y saturada y permeabilidad; los cuales son parámetros claros y fundamentales de una cubierta verde tal y como se refleja en los pesos asignados a dichos indicadores.

En lo que se refiere a las secciones S1Gj, su prioridad es menor a las antes citadas y superior a las secciones S3Gj, a excepción de la sección S1G3 cuyo rendimiento es el menor de las opciones contempladas según los criterios establecidos.



De forma resumida y simplificada, a fin de establecer un orden de preferencia que sea visual y condense las conclusiones extraídas del estudio de forma directa, se está en condiciones de afirmar que el orden de idoneidad es: **(S2G2 > S2G1) >> S2G3 >> S1G2 >> S1G1 >> (S3G1 > S3G2 > S3G3) >> S1G3**. Este orden de preferencia se representa a través de la siguiente figura:

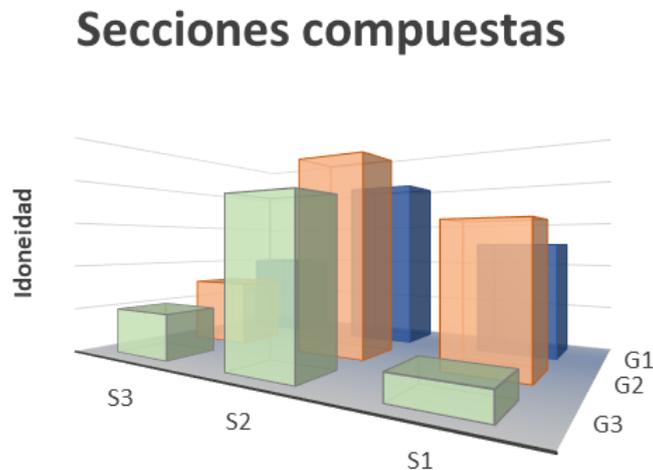


Figura 74. Orden de prevalencia sobre secciones compuestas (elaboración propia)

Se hace necesario matizar que, dada la no adecuación de la geoespuma como capa separadora (G3), su uso no se considera adecuado en esta aplicación para cubiertas vegetales lo cual no se ve reflejado en este orden de idoneidad de secciones compuestas debido a que las propiedades que hacen que se descarte corresponden al análisis pormenorizado de geotextiles y no del total de la sección.

A modo de conclusión general, vistos los resultados del análisis realizado sobre las secciones compuestas y los pormenorizados para sustratos y capas separadoras, la conclusión fundamental es que, a fin de mejorar la resiliencia de las ciudades y realizar construcciones lo más sostenibles posibles, es necesario emplear materiales reciclados o reutilizados y que favorezcan un adecuado comportamiento hidráulico de la cubierta, siempre y cuando presenten propiedades que se ajusten a los requisitos mínimos exigidos a cualquier material empleado en construcción de cubiertas.



5 VALORACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizarán los resultados arrojados por el Análisis Multicriterio, valorando las conclusiones extraídas de éste y poniéndolas en contraste con el rendimiento esperado para los diferentes materiales y disposiciones a través de la bibliografía consultada para el ejercicio de la campaña experimental y el estado del arte. A través de este análisis se podrán extraer conclusiones más generales, que den una idea del resultado global del proyecto, más allá de los resultados numéricos obtenidos de los ensayos, tratando así de generar un conocimiento que ponga en valor el trabajo realizado y le dé una justificación, cumpliendo con los objetivos establecidos para el mismo.



Se puede afirmar que se han alcanzado los **objetivos de sostenibilidad** requeridos para estas capas superiores de una cubierta vegetada, resultando tipologías suficientemente **válidas para ser de aplicación** de entre las estudiadas. Por lo general, las mezclas de **sustrato** contempladas han ofrecido **rendimientos adecuados** que cumplen con los esperados según la bibliografía consultada y los estándares existentes. Los valores relativos al coste de ciclo de vida y huella de carbono evidencian la bondad del uso de materiales reciclados, más aún cuando proceden del mismo sector de la construcción, facilitando de este modo la creación y consolidación de sinergias en lo que al aprovechamiento de materiales y procesos se refiere. Esta posibilidad de aplicación supone un claro avance para el sector, dentro de la línea perseguida de sostenibilidad y reducción de emisiones, dando continuidad a otros avances que se han logrado en cuestión de procesos y tipologías constructivas.

A la hora de seleccionar una de las tipologías recogidas en el presente TFM o, más concretamente, a la hora de seleccionarla y aplicar ligeras variaciones en cuanto a la composición y/o los espesores dispuestos, será necesario comprobar la adecuación de sus características con respecto a la cobertura vegetal que se desea disponer, además de lo relativo a superficie a construir y clima a afrontar. Las mezclas de sustrato estudiadas responden de manera suficientemente apropiada a las exigencias de estos dos últimos puntos, al haber tratado de hacer un análisis lo más objetivo y genérico posible que aporte conocimiento e información aplicable al mayor número de posibilidades de cubierta vegetada.

En lo referente a los geotextiles empleados como capa separadora, es importante señalar la **no adecuación de la geoespuma** para esta aplicación. A pesar de haber dado buen resultado en su incorporación a la capa de sustrato, en el caso de la capa separadora sus propiedades, especialmente las hidráulicas y físicas, además de su resistencia a procesos de deterioro, no alcanzan los mínimos exigibles para ser considerado un material adecuado en este caso. El hecho de no garantizar un correcto funcionamiento hidráulico hace que sea un material a descartar, ya que comprometería el funcionamiento del sistema al penalizar en el indicador más importante de los contemplados. Los otros dos materiales estudiados, geocompuesto verde-negro (G1) y geotextil blanco agujeteado (G2), han tenido un desempeño adecuado; han respondido de forma adecuada frente a procesos de deterioro ambiental (especialmente G2), además de haber mostrado suficiente resistencia a solicitaciones propias de puesta en obra como son el punzonamiento estático y la caída de cono.

A la hora de seleccionar uno de estos dos geotextiles sería preferible elegir el geotextil reutilizado (G2), dado su mejor rendimiento hidráulico y, especialmente y dado que esto no penaliza a sus propiedades, por su condición de material reutilizado siempre que se disponga de él. En este punto se antoja interesante sugerir el estudio, similar o de mayor extensión, de otros geotextiles reutilizados de potencial aplicación en cubiertas vegetadas y el contraste de los resultados con respecto al material totalmente nuevo. De esta forma podría comprobarse su adecuación para este uso ya que, en caso de mostrar un desempeño adecuado para esta aplicación, se ampliaría el espectro de geocompuestos potencialmente válidos para su uso como capa separadora en cubiertas verdes.

Respecto al geocompuesto negro-verde (G1), vistos los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a hidrólisis y oxidación, parece necesario ampliar su profundidad mediante el ensayo de un mayor número de probetas que dispersen la variabilidad observada en el impacto sobre sus propiedades.

Con relación a las secciones compuestas estudiadas, combinación de los sustratos y geotextiles mencionados, los resultados arrojados por el análisis multicriterio siguen en la línea de lo esperado tras observar los análisis pormenorizados de sus componentes. En este caso siguen imponiéndose los materiales número 2 propuestos según los criterios del proyecto, referente a un **material reutilizado o reciclado**, mostrando un desempeño superior al del resto de secciones estudiadas. De este modo, la **sección S2G2** seguida por la S2G1 es la sección que da mejor resultado y **responde de una manera más adecuada a los indicadores propuestos y los criterios marcados**. Su gran permeabilidad, bajo contenido en materia orgánica del efluente y densidad adecuada lo hacen una sección con alto atractivo para ser dispuesta en una cubierta vegetal. Las propiedades hidráulicas de este par de materiales (sustrato-geotextil) garantizan un óptimo amortiguamiento de precipitaciones de



entidad, siendo adecuado para climas muy lluviosos o aquellos en que los fenómenos de lluvia sean cortos, pero de una intensidad considerable. Es digno de mención el **correcto funcionamiento en términos hidráulicos de todas las secciones** ensayadas, resistiendo precipitaciones equivalentes de entidad y garantizando una buena respuesta ante fenómenos pico de lluvia. Con estas secciones se garantiza la conservación de la estructura del sistema sustrato-geotextil, manteniéndose su espesor prácticamente constante y sin pérdida de finos que disminuirían las propiedades del sustrato y, por tanto, podrían llegar a comprometer a medio o largo plazo la disponibilidad de nutrientes a la cobertura vegetal.

Con cualquiera de las secciones contempladas, la calidad del agua efluente sería adecuada para el consumo humano en términos de contenido en materia orgánica, requiriéndose del análisis de otros compuestos para que este consumo sea garantizado, pero sirviendo la materia orgánica como indicador, además, de la capacidad de retención de finos de la capa separadora. De este modo las posibilidades de empleo de este recurso se amplían, haciéndose necesario un estudio de potenciales usos y necesidades para cada aplicación particular, partiendo de la base de que se podría disponer de un agua con una calidad aceptable y, por tanto, con una reducida necesidad de tratamiento.



6 CONCLUSIONES

En este capítulo se tratará de exponer las conclusiones principales alcanzadas con el proyecto, recogiendo las observaciones principales y realizando críticas y propuestas que se consideran oportunas con respecto al mismo. De esta forma se busca destilar el conocimiento generado, realizar propuestas reales relativas a las cubiertas verdes y al grado de sostenibilidad alcanzado con ellas y con los materiales empleados en su diseño y construcción y, por último, extraer conclusiones procedentes tanto de los resultados alcanzados como del proceso seguido para llegar hasta ellos.



El **método de análisis multicriterio** empleado ha mostrado tener ciertas **limitaciones** a la hora de señalar la opción más adecuada de entre las secciones compuestas estudiadas, no concretando la dominancia entre algunos pares lo cual hace necesaria una intervención subjetiva para establecer un orden definitivo. Puede haber varias causas de este déficit de concreción, entre las cuales se destacan:

- **Interdependencia entre algunos indicadores**, afectando de forma directa e inversamente proporcional las variaciones de uno en el rendimiento de otros, no recogiendo el método empleado una vía o corrección alternativa para reflejar estas relaciones en el análisis. Esto provoca que, a la hora de asignar pesos y calificaciones a los indicadores, se produzcan sobreestimaciones en parámetros respecto de otros con los que guardan relación, no incidiendo de esta forma en las diferencias entre secciones estudiadas o, en su caso, incidiendo tanto que el efecto sobre el análisis es desproporcionado.
- Número de secciones compuestas estudiadas, dando lugar a matrices de concordancia y discordancia de gran entidad de las que resultan valores más próximos y, por tanto, se diluyen las diferencias.

El método ELECTRE empleado es un método con un uso muy extendido en estudios de esta índole, por lo que su aplicación en este caso parece la adecuada. Por este motivo, se considera que la lista de indicadores referidos a las secciones compuestas podría precisar de una revisión o depuración, siendo lo ideal un estudio en el que se dispusiera de herramientas de laboratorio que permitiesen el estudio de algunos indicadores descartados que no guardan vinculación directa con los ensayados para los pares sustrato-geotextil, como es el caso de la transmitancia térmica. Una mayor disponibilidad de espacio y aparatos de ensayo permitiría ampliar las miras con las que se observa un estudio de este calibre, pudiendo ajustar en mayor grado la elección de indicadores en estudio. Esto no descarta que la aplicación de otros métodos de análisis multicriterio, como los recogidos en el capítulo de 'Análisis multicriterio', pudieran aportar mejores soluciones al estudio de estos u otros indicadores, permitiendo alcanzar conclusiones más evidentes y fundamentadas.

Mostrada la adecuación de los materiales estudiados a los criterios establecidos para este TFM, parece necesaria una **continuidad de estudios** que ambicionen comparar tipologías y materiales bajo la lupa de la sostenibilidad, ya sean de aplicación habitual como novedosos tal y como se ha considerado en este proyecto. Lo que sí resulta claro es la **necesidad de aumentar el ratio de materiales reciclados o reutilizados empleados** en las nuevas construcciones, reduciendo así las emisiones generadas por unidad de superficie construida y minorando en la medida de lo posible la cantidad de residuos que se generan en un sector de alto impacto como es el de la construcción.

Siendo más específicos, y refiriéndonos a lo estudiado y concluido en este proyecto, resulta necesario ampliar el conocimiento sobre el comportamiento del geocompuesto negro-verde estudiado ya que los valores que resultan de su análisis no son del todo concluyentes. Alcanzar conclusiones más firmes podrían hacer que este material se mostrase como totalmente válido para su uso en cubiertas verdes o, por el contrario, se concluyese que no es adecuado. En cualquier caso, se generaría conocimiento que colaboraría en el avance de esta línea de investigación alineada con la sostenibilidad y el medio ambiente, surgiendo la posibilidad de estudiar otros geotextiles o alternativas de sustrato que mejoren el rendimiento de las cubiertas.

Condensando estas conclusiones, parece claro que una futura línea de trabajo podría ser la propuesta y **estudio de nuevos materiales a emplear** sobre las capas de sustrato y separadora. Además, siguiendo las consideraciones y estructura marcadas en el presente proyecto, un estudio pormenorizado de las capas sucesivas del total que conforma una cubierta vegetada permitiría ampliar el conocimiento existente sobre su rendimiento en términos de sostenibilidad. Esto podría dar lugar, en última instancia, a desarrollar un **sistema de ayuda a la elección** de materiales y tipologías en función de los condicionantes particulares de cada localización y aplicación, orientado a contribuir al cumplimiento de los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**.



A modo de cierre, cabe remarcar que la adopción de las cubiertas verdes como tipología estructural extendida supondría un cambio radical en las estrategias de sostenibilidad de las ciudades, mejorando la eficiencia energética de los edificios y la calidad de vida en los entornos urbanos. Para ello sería necesaria una alta implicación de las Administraciones Públicas a través de elementos jurídicos y normas urbanísticas alineadas con este criterio, además de un fortalecimiento, tanto de la opinión pública como de los promotores, proyectistas y constructores, de la visión sobre las cubiertas verdes.



7 BIBLIOGRAFÍA

Bąk, K., 1992. Possibilities of Scheibler method application in researches on calcium carbonate content in solid carbonate rocks. *Prace Geograficzne*, Volumen 14, pp. 131-139.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 1989. *UNE-EN ISO 7703:1989 Determinación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Método de dilución y siembra*. Madrid: AENOR.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2002. *UNE-EN ISO 12447:2002 Geotextiles y productos relacionados: Método para la determinación de la resistencia a la hidrólisis*. Madrid: AENOR.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2005. *UNE-EN ISO 9864 Geosintéticos: Método de ensayo para la determinación de la masa por unidad de superficie de geotextiles y productos relacionados*, Madrid: AENOR.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2006. *UNE-EN ISO 14044:2006 Gestión Ambiental - Análisis del ciclo de vida*. Madrid: AENOR.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2007. *UNE-EN ISO 12236:2007 Geotextiles y productos relacionados: Ensayo de punzonado estático (ensayo CBR)*. Madrid, España: AENOR.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2007. *UNE-EN ISO 13433:2007 Geosintéticos: Ensayo de Perforación Dinámica (ensayo de caída de cono)*. Madrid: AENOR.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2010. *UNE-EN ISO 11058:2010 Geotextiles y productos relacionados. Determinación de las características de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga*. Madrid: AENOR.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2010. *UNE-EN ISO 12956:2010 Geotextiles y productos relacionados: Determinación de la medida de abertura característica*. Madrid: AENOR.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2015. *UNE-EN ISO 10318-1:2015 Términos y definiciones*, Madrid: s.n.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2015. *UNE-EN ISO 6946:2007 Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo*. Madrid: AENOR.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2017. *UNE-EN ISO 11664-6:2017 Colorimetría. Parte 6: Fórmula de diferencia de color CIEDE2000 (ISO/CIE 11664-6:2014)*, Madrid: s.n.

AENOR, CEN, Organización Internacional de Normalización, 2020. *UNE-EN ISO 13438:2020 Geosintéticos: Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la oxidación de geotextiles y productos relacionados*, Madrid: AENOR.

Ahi, P. & Searcy, C., 2014. Assessing sustainability in the supply chain: A triple bottom line approach. *Applied Mathematical Modelling*, Volumen 39, pp. 2882-2896.

Alves Fernandes, A., Prieto Martínez, H. E., Henriques da Silva, D. J. & Geraldo Barbosa, J., 2004. Produção de mudas de tomateiro por meio de estacas enraizadas em hidroponia. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 39(4), pp. 343-348.



- American Express, 2019. *cincodias.elpais.com*. [En línea]
Available at: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2019/08/29/companias/1567086634_731386.html
[Último acceso: 12 Noviembre 2019].
- Ashida, K. & Iwasaki, K., 1995. Thermosetting Foams. *Science Direct*
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815513575500048>), Volumen 2, pp. 11-220.
- Association of German Agricultural Analytic and Research Institutes, s.f. *VDLUFA - Soil analysis*, Berlin: s.n.
- Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen, 1995. *Richtlinien für die Planung*, s.l.: s.n.
- Austrian Standards, 2014. *ÖNORM L 1086*, s.l.: s.n.
- Ayuntamiento de Madrid, 2019. *madrid.es*. [En línea]
Available at: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Educacion-Ambiental/Energia-y-cambio-climatico/?vnextfmt=default&vnextoid=0ca36936042fc310VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vnextchannel=abd279ed268fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&rm=%2C0ca3693604>
[Último acceso: 11 Diciembre 2019].
- Baskaran, B. & Liu, K., 2003. Thermal performance of green roofs through field evaluation. *Proceedings for the First North American Green Roof Infrastructure Conference Awards and Trade Show*.
- Berardi, U., Ghaffarian Hoseini, A.-H. & Ghaffarian Hoseini, A., 2013. State-of-the-art analysis of environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, Volumen 115, pp. 411-428.
- Bernard, R., 1968. Classement et choix en présence de points de vue multiples. *La Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle*, 2(75), p. 57.
- Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V., 2014. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology*, Volumen 511, pp. 374-386.
- Bevilacqua, P., Mazzeo, D., Bruno, R. & Arcuri, N., 2016. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. *Energy and Buildings*, Volumen 122, pp. 63-79.
- Bianchini, F. & Hewage, K., 2012. How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, Volumen 48, pp. 57-65.
- Bobylev, N., 2011. Comparative analysis of environmental impacts of selected underground construction technologies using the analytic network process. *Automation in Construction*, 20(8), pp. 1030-1040.
- Bostenaru Dan, M., 2013. Innovative geotextile materials for the extension of urban green space - Contribution to urban sustainability. *Environmental Science Biotechnology*, Volumen 13, pp. 5-9.
- Bozorg Chenani, S., Lehvavirta, S. & Häkkinen, T., 2015. Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, Volumen 90, pp. 153-162.
- Cabello Herce, A. & Juárez Castelló, C. A., 2017. *Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones*, s.l.: s.n.
- Colegio Oficial de Ingenieros técnicos agrícolas y peritos agrícolas de Catalunya, 1999. *Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo- Cubiertas Ecológicas extensivas NTJ 11E*, Barcelona: s.n.



Colegio Oficial de Ingenieros técnicos agrícolas y peritos agrícolas de Catalunya, 2000. *Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo- Cubiertas Ecológicas intensivas NTJ 11I*, Barcelona: s.n.

Coma, J. y otros, 2017. Thermal characterization of different substrates under dried conditions for extensive green roofs. *Energy and Buildings*, Volumen 144, pp. 175-180.

Congostrina, A. L., 2020. *Azoteas verdes contra el cambio climático*. [En línea]
Available at: <https://elpais.com/espana/catalunya/2020-03-11/azoteas-verdes-contra-el-cambio-climatico.html>
[Último acceso: 12 Marzo 2020].

Díez Olea, C., Lombillo Vozmediano, I. & Rodríguez Hernández, J., 2019. *Estudio de alternativas para hacer frente a problemas de contaminación acústica. Aplicación a varios casos prácticos en Los Corrales de Buelna*, Santander: s.n.

Emilsson, T., 2008. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering*, 33(3-4), pp. 265-277.

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment*. 1 ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

European Economic and Social Committee, Architects' Council of Europe & European Concrete Platform, 2014. *Let's speak sustainable construction-Multilingual Glossary*, Bruselas: European Union.

European Union / Evaluation Unit DEVCO, 2015. *europa.eu*. [En línea]
Available at: https://europa.eu/capacity4dev/evaluation_guidelines/minisite/es-bases-metodol%C3%B3gicas-y-enfoque/herramientas-de-evaluaci%C3%B3n/an%C3%A1lisis-multicriterio
[Último acceso: 10 Diciembre 2019].

Gardziella, A., Pilato, L. A. & Knop, A., 2000. *Phenolic Resins - Chemistry, applications, standardization, safety and ecology*. 2 ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Garrison, N., Horowitz, C. & Ann Lunghino, C., 2012. *How green roofs and cool roofs can reduce energy use, address climate change, and protect water resources in Southern California*, s.l.: NRDC Report.

German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 1973. *DIN 19683 - Methods of soil analysis for water management for agricultural purposes - Physical laboratory tests - determination of grain size distribution by sieving*, s.l.: s.n.

Ghaffarian Hoseini, A. H. y otros, 2013. Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 25, pp. 1-17.

Göbel, P., Starke, P. & Coldewey, W. G., 2010. Urban evaporation rates for water-permeable pavements. *Water Science and Technology*, 62(5), pp. 1161-1169.

Gómez-Ullate, E., Rodríguez Bayón, J., Coupe, S. J. & Castro Fresno, D., 2010. Performance of previous pavement parking bays storing rainwater in the north of Spain. *Water Science and Technology*, 62(3), pp. 615-621.



- Guzmán Sánchez, S., Lombillo Vozmediano, I. & Jato Espino, D., 2018. *Análisis de la contribución a la sostenibilidad de diferentes diseños de cubierta*, Santander: s.n.
- Hideki, T. & Masakazu, M., 2008. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 42(8), pp. 2971-2979.
- Hjalmarsson, L. & Odeck, J., 1996. Efficiency of trucks in road construction and maintenance: An evaluation with data envelopment analysis. *Computers & Operations research*, 23(4), pp. 393-404.
- Hokkanen, J., Salminen, P. & Lahdelma, R., 2001. Using multicriteria methods in environmental planning and management. *Environmental Management*, 26(6).
- Hydro Environment, 2020. *hydroenv.com*. [En línea]
Available at: <https://hydroenv.com.mx/catalogo/>
- IGS-International Geosynthetic Society, s.f. *geosyntheticssociety.org*. [En línea]
Available at: <https://www.geosyntheticssociety.org/>
[Último acceso: Diciembre 2020].
- Industrial Fabrics Association International Narejo, 2006. Green roof market growth: Opportunities and challenges. *Geosynthetics*, 28(5), pp. 35-43.
- Jato Espino, D., Castillo López, E., Rodríguez Hernández, J. & Canteras Jordana, J. C., 2014. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction.
- Jim, C., 2017. Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants. *Sustainable Cities and Society*, Volumen 35, pp. 69-82.
- Jungels, J., 2013. Attitudes and aesthetic reactions toward green roofs in the Northeastern United States. *Landscape and Urban Planning*, Volumen 117, pp. 13-21.
- Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria (LAGUC)- Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), 2005. Santander: Universidad de Cantabria.
- Laterlite, 2020. *laterlite.es*. [En línea]
Available at: <https://www.laterlite.es/>
[Último acceso: 29 Febrero 2020].
- Lemos Galíndez, A., Lombillo Vozmediano, I. & Andrés-Valeri, V. C., 2018. Análisis teórico-experimental de la resiliencia de cubiertas verdes frente a varios efectos derivados del cambio climático.
- Lin, B.-S., Yu, C.-C., Su, A.-T. & Lin, Y.-J., 2013. Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. *Building and Environment*, Volumen 67, pp. 26-33.
- Lin, Y.-J., Lin, H.-T. & Chou, C.-Y., 2011. Physical properties and thermal performance of calcined sludge as planting substrate in green roofs. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 71-78, pp. 3-11.
- Mahdiyar, A. y otros, 2019. A prototype decision support system for green roof type selection: A cybernetic fuzzy ANP method. *Sustainable Cities and Society*, Volumen 48.
- Marzouk, M. M., 2010. *An application of ELECTRE III to Contractor Selection*. s.l., Construction Research Congress.



Ministerio de Fomento, 2009. *Documento Básico HR - Protección frente al ruido*. s.l.:s.n.

Ministerio de Fomento, 2010. *Documento Básico SI - Seguridad en caso de incendio*. s.l.:s.n.

Ministerio de Fomento, 2017. *Documento Básico HE - Ahorro de energía*. s.l.:s.n.

Ministerio de Fomento, 2017. *Documento Básico HS - Salubridad*. s.l.:s.n.

MITMA, 2017. *Guía Metodológica para los sistemas de Auditoría, Certificación o Acreditación de la Calidad y Sostenibilidad en el Medio Urbano*, s.l.: s.n.

Naciones Unidas, 2018. *un.org*. [En línea]

Available at: <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>

[Último acceso: 12 Noviembre 2019].

Niachou, A. y otros, 2001. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, Volumen 33, pp. 719-729.

Odeck, J., 1996. Evaluating efficiency of rock blasting using Data-Envelopment Analysis. *Journal of Transportation Engineering*, 122(1).

Peri, G., Traverso, M., Finkbeiner, M. & Rizzo, G., 2012. Embedding "substrate" in environmental assessment of green roofs life cycle: evidences from an application to the whole chain in a Mediterranean site. *Journal of Cleaner Production*, Volumen 35, pp. 274-287.

Pianella, A. y otros, 2016. Steady-state and transient thermal measurements of green roof substrates. *Energy and Buildings*, Volumen 131, pp. 123-131.

Placo Saint-Gobain, s.f. *placo.es*. [En línea]

Available at: https://www.placo.es/bases-de-datos-de-precios-y-http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Fachadas_y_particiones/Entramados_autoportantes/De_placas_de_yeso_laminado/FBY050_Entramado_autoportante_de_placas_de.html#gsc.tab=0

[Último acceso: Agosto 2020].

Premier Tech Horticulture, 2016. *pthorticulture.com/es/*. [En línea]

Available at: <https://www.pthorticulture.com/es/>

[Último acceso: Diciembre 2019].

Projar, 2020. *projar.es*. [En línea]

Available at: <https://www.projar.es/>

[Último acceso: 29 Febrero 2020].

Rahman, S., Odeyinka, H., Perera, S. & Bi, Y., 2012. Product-cost modelling approach for the development of a decision support system for optimal roofing material selection. *Expert Systems with Applications*, 39(8), pp. 6857-6871.

Razzaghmanesh, M., Beecham, S. & Kazemi, F., 2014. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment. *Science of the Total Environment*, Volumen 470, pp. 651-659.

Rodríguez-Parets Maleras, G. O., Rodríguez Hernández, J. & Valle Álvarez, A., 2014. *Estudio de alternativas para la construcción de cubiertas verdes en Cantabria*, Santander: s.n.



- Rowe, D. B. & Getter, K. L., 2006. The role of extensive green roofs in sustainable development. *Hort Science: a publication of the American Society for Horticultural Science*, 41(5), p. 1276.
- Saaty, T. L., 1988. What is the Analytic Hierarchy Process?. *Mathematical Models for Decision Support. NATO ASI Series*, 48(I), pp. 109-121.
- Sailor, D. J., Hutchinson, D. & Bokovoy, L., 2008. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S.. *Energy and Buildings*, 40(7), pp. 1246-1251.
- Sánchez, S., 2015. *agricultureros.com*. [En línea]
Available at: <http://agricultureros.com/conoce-los-tipos-de-sustrato-para-tu-cultivo-hidroponico/>
[Último acceso: 28 Febrero 2020].
- Savadogo, O. & Shanian, A., 2006. A non-compensatory compromised solution for material selection of bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) using ELECTRE IV. *Electrochimica Acta*, 51(25), pp. 5307-5315.
- Scheirs, J. & Priddy, D., 2003. *Modern Styrenic Polymers*. s.l.:Wiley.
- Shafique, M., Kim, R. & Rafiq, M., 2018. Green roof benefits, opportunities and challenges - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 90, pp. 757-773.
- Shih-Tong Lu, Cheng-Wei Lin & Ping-Hui Ko, 2007. *Application of Analytic Network Process (ANP) in assessing construction risk of urban bridge project*. s.l., Second International Conference of Innovative Computing, Information and Control, ICICIC 2007.
- Şimşek, B., Iş, Y. T. & Şimşek, E. H., 2013. A TOPSIS-based Taguchi optimization to determine optimal mixture proportions of the high strength self-compacting concrete. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Volumen 125, pp. 18-32.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012. *2540 SOLIDS*. 22 ed. s.l.:s.n.
- Starke, P., Göbel, P. & Coldewey, W. G., 2011. Effects on evaporation rates from different water-permeable pavement designs. *Water Science and Technology*, 63(11), pp. 2619-2627.
- Stovin, V., Poë, S., De-Ville, S. & Berretta, C., 2015. The influence of substrate and vegetation configuration on green roofs hydrological performance. *Ecological Engineering*, Volumen 85, pp. 159-172.
- Susca, T., 2019. Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. *Building and Environment*, Volumen 162.
- Tabatabaee, S. y otros, 2019. An assessment model of benefits, opportunities, costs and risks of green roof installation: A multi criteria decision making approach. *Journal of Cleaner Production*, Volumen 238.
- Tatari, O. & Kucukvar, M., 2011. *Evaluating Eco-Efficiency of construction materials*. s.l., A frontier approach, Computing in Civil Engineering.
- Teotónio, I., Cabral, M., Oliveira Cruz, C. & Matos Silva, C., 2019. Decision support system for green roofs investments in residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, Volumen 249.
- Theodosiou, T., 2011. Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental behaviour. *Advances in Building Energy Research*, Volumen 3, pp. 271-288.



Tziampou, N., Coupe, S., Sañudo Fontaneda, L. & Castro Fresno, D., 2019. *Evaluation of an open-cell phenolic foam as a water barrier system for permeable pavement systems to control stormwater*, Santander: Universidad de Cantabria, Coventry University.

Tziampou, N. y otros, 2020. Fluid transport within permeable pavement systems: A review of evaporation processes, moisture loss measurement and the current state of knowledge. *Construction and Building Materials*, Issue 243, p. 118179.

Urbanarbolismo, s.f. [urbanarbolismo.es/blog/](https://www.urbanarbolismo.es/blog/). [En línea]

Available at: <https://www.urbanarbolismo.es/blog/>

[Último acceso: Diciembre 2019].

Van Woert, N. D. y otros, 2005. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*, 34(3), pp. 1036-1044.

Vijayaraghavan, K. & Raja, F. D., 2015. Pilot-scale evaluation of green roofs with Sargassum biomass as an additive to improve runoff quality. *Ecological Engineering*, Volumen 75, pp. 70-78.

ZinCo- Life on roofs, 2020. <https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/>. [En línea]

Available at: https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/preguntas_frecuentes/sustrato.php

[Último acceso: 27 Febrero 2020].



8 ANEJOS

8.1 Encuesta a expertos

A continuación, se muestra el modelo de encuesta enviada al panel de expertos consultados para el proyecto.

CUESTIONARIO RELATIVO AL ESTUDIO DEL SUSTRATO Y CAPA SEPARADORA EN CUBIERTAS VERDES					
<p>El objetivo del presente cuestionario es estudiar la importancia del sustrato y de la capa separadora en las cubiertas verdes, con el fin de optimizar la resiliencia de esta tipología de cubiertas. Para este fin, se ha conformado una lista con una serie de indicadores, accesibles en la pestaña "Indicadores", considerados significantes y para los que se tiene capacidad experimental / analítica para su valoración y posterior integración en un análisis multicriterio. Igualmente, se presenta una descripción somera de los mismos.</p> <p>Finalmente, en la pestaña "Valoración" se establece la importancia de los indicadores, dándoles un valor en una serie de pestañas desplegables de acuerdo con la siguiente escala:</p>					
<table border="1"> <tr><td>Muy importante</td></tr> <tr><td>Importante</td></tr> <tr><td>Ligeramente importante</td></tr> <tr><td>Nada importante</td></tr> </table>		Muy importante	Importante	Ligeramente importante	Nada importante
Muy importante					
Importante					
Ligeramente importante					
Nada importante					
<p>Las pestañas desplegables están en las celdas grises de la pestaña "Valoración", que serán las que tendrán que editar los expertos. También se agradece la incorporación, eliminación o fusión de indicadores que, a juicio del encuestado, sean necesarios para el estudio del sustrato y de la capa de la capa separadora de cubiertas verdes. A tal efecto, se han dejado una serie de huecos libres en color verde donde se podrán añadir nuevos indicadores y su valoración.</p>					

Figura 75. Pestaña de 'Instrucciones' del fichero Excel

INDICADOR	DESCRIPCIÓN
1 Coste de ciclo de vida	Cuantía económica estimada por superficie construida durante todo el ciclo de vida
2 Huella de carbono	Gases de efecto invernadero emitidos de forma directa o indirecta por un producto completo
3 Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	Porcentaje en masa del producto que representa la materia orgánica que contiene, por su relación con la capa vegetal y los organismos que la habiten
4 Aislamiento térmico del sustrato	Transmitancia térmica del espesor de sustrato
5 Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capas separadora	Masa por unidad de volumen en estado seco y completamente saturado de agua
6 Permeabilidad del sistema sustrato-capas separadora	Capacidad de permitir el paso de agua a su través sin alterar su composición
7 Contenido en MO del efluente	Concentración de MO en el efluente, en relación a la porción fina que lava a su paso
8 Punzonamiento estático de la capa separadora	Relacionado con las solicitudes durante instalación y con el contacto geotextil-árido (UNE-EN ISO 12236)
9 Perforación dinámica de la capa separadora	Relacionado con posibles cortes con el árido o durante la puesta en obra (UNE-EN ISO 13433)
10 Abertura característica de la capa separadora	Condicionante de la permeabilidad (UNE-EN ISO 12956)
11 Masa por unidad de superficie de la capa separadora	Relacionado con la uniformidad del producto y su relación con los valores de la ficha técnica (UNE-EN ISO 9864)
12 Resistencia a hidrólisis de la capa separadora	Condicionante de la durabilidad del producto (UNE-EN 12447)
13 Resistencia a oxidación de la capa separadora	Condicionante de la durabilidad del producto (UNE-EN ISO 13438)

Figura 76. Pestaña de 'Indicadores' del fichero Excel

INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1 Coste de ciclo de vida	X	X		
2 Huella de carbono	X	X		
3 Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			
4 Aislamiento térmico del sustrato	X			
Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capas separadora			X	
6 Permeabilidad del sistema sustrato-capas separadora			X	
7 Contenido en MO del efluente			X	
8 Punzonamiento estático de la capa separadora		X		
9 Perforación dinámica de la capa separadora		X		
10 Abertura característica de la capa separadora		X		
11 Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		
12 Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		
13 Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		

En la tabla de la izquierda, figuran los indicadores propuestos, y en la columna de VALORACIÓN los distintos grados de importancia en una lista desplegable.

En la tabla que se muestra debajo, figuran los huecos donde se podrán añadir, si se estima conveniente, nuevos indicadores, así como su valoración y una descripción somera.

NUEVOS INDICADORES	VALORACIÓN	DESCRIPCIÓN
1 Nuevo indicador		

Figura 77. Pestaña de 'Valoración' del fichero Excel



A continuación, se muestran las respuestas recibidas con el modelo de encuesta cumplimentado, añadiendo los comentarios o propuestas de nuevos indicadores en aquellos casos en que se añadieran.

8.1.1 Experto 1

Tabla 61. Valoraciones del Experto 1

	INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1	Coste de ciclo de vida	X	X		Muy importante
2	Huella de carbono	X	X		Ligeramente importante
3	Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			Ligeramente importante
4	Aislamiento térmico del sustrato	X			Muy importante
5	Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capa separadora			X	Muy importante
6	Permeabilidad del sistema sustrato-capa separadora			X	Muy importante
7	Contenido en MO del efluente			X	Ligeramente importante
8	Punzonamiento estático de la capa separadora		X		Ligeramente importante
9	Perforación dinámica de la capa separadora		X		Ligeramente importante
10	Abertura característica de la capa separadora		X		Ligeramente importante
11	Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		Importante
12	Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		Importante
13	Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		Importante

Comentario:

- Nuevo indicador: Expansión – Contracción del sustrato
- Valoración: Importante
- Descripción: Superficie ocupada por el sustrato en húmedo – seco. Posible aparición de zonas visibles de geotextil

8.1.2 Experto 2

Tabla 62. Valoraciones del Experto 2

	INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1	Coste de ciclo de vida	X	X		Importante
2	Huella de carbono	X	X		Importante
3	Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			Ligeramente importante
4	Aislamiento térmico del sustrato	X			Muy importante
5	Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capa separadora			X	Ligeramente importante
6	Permeabilidad del sistema sustrato-capa separadora			X	Muy importante
7	Contenido en MO del efluente			X	Ligeramente importante
8	Punzonamiento estático de la capa separadora		X		Muy importante
9	Perforación dinámica de la capa separadora		X		Muy importante
10	Abertura característica de la capa separadora		X		Ligeramente importante
11	Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		Ligeramente importante
12	Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		Importante
13	Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		Importante

Sin comentarios.



8.1.3 Experto 3

Tabla 63. Valoraciones del Experto 3

	INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1	Coste de ciclo de vida	X	X		Muy importante
2	Huella de carbono	X	X		Muy importante
3	Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			Importante
4	Aislamiento térmico del sustrato	X			Nada importante
5	Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capa separadora			X	Importante
6	Permeabilidad del sistema sustrato-capa separadora			X	Importante
7	Contenido en MO del efluente			X	Importante
8	Punzonamiento estático de la capa separadora		X		Muy importante
9	Perforación dinámica de la capa separadora		X		Muy importante
10	Abertura característica de la capa separadora		X		Muy importante
11	Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		Importante
12	Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		Muy importante
13	Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		Muy importante

Sin comentarios.

8.1.4 Experto 4

Tabla 64. Valoraciones del Experto 4

	INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1	Coste de ciclo de vida	X	X		Muy importante
2	Huella de carbono	X	X		Ligeramente importante
3	Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			Importante
4	Aislamiento térmico del sustrato	X			Importante
5	Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capa separadora			X	Importante
6	Permeabilidad del sistema sustrato-capa separadora			X	Muy importante
7	Contenido en MO del efluente			X	Ligeramente importante
8	Punzonamiento estático de la capa separadora		X		Ligeramente importante
9	Perforación dinámica de la capa separadora		X		Ligeramente importante
10	Abertura característica de la capa separadora		X		Importante
11	Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		Ligeramente importante
12	Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		Importante
13	Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		Importante

Sin comentarios.



8.1.5 Experto 5

Tabla 65. Valoraciones del Experto 5

	INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1	Coste de ciclo de vida	X	X		Importante
2	Huella de carbono	X	X		Importante
3	Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			Muy importante
4	Aislamiento térmico del sustrato	X			Importante
5	Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capa separadora			X	Importante
6	Permeabilidad del sistema sustrato-capa separadora			X	Importante
7	Contenido en MO del efluente			X	Ligeramente importante
8	Punzonamiento estático de la capa separadora		X		Importante
9	Perforación dinámica de la capa separadora		X		Muy importante
10	Abertura característica de la capa separadora		X		Importante
11	Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		Ligeramente importante
12	Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		Importante
13	Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		Importante

Sin comentarios.

8.1.6 Experto 6

Tabla 66. Valoraciones del Experto 6

	INDICADOR	Substrate	Geotextile	System	RATING
1	Life cycle cost	X	X		Very important
2	Carbon footprint	X	X		Important
3	Organic matter composition of the substrate	X			Very important
4	Thermal insulation of the substrate	X			Important
5	Apparent density (dry and saturated) of the substrate-layer separation system			X	Slightly important
6	Permeability of the substrate-layer system			X	Very important
7	Effluent organic matter content			X	Very important
8	Static punching of the separating layer		X		Important
9	Dynamic drilling of the separating layer		X		Important
10	Characteristic opening of the separating layer		X		Slightly important
11	Mass per unit area of the separating layer		X		Important
12	Resistance to hydrolysis of the separating layer		X		Important
13	Resistance to oxidation of the separating layer		X		Important

Sin comentarios.



8.1.7 Experto 7

Tabla 67. Valoraciones del Experto 7

	INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1	Coste de ciclo de vida	X	X		Ligeramente importante
2	Huella de carbono	X	X		Importante
3	Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			Importante
4	Aislamiento térmico del sustrato	X			Muy importante
5	Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capa separadora			X	Muy importante
6	Permeabilidad del sistema sustrato-capa separadora			X	Muy importante
7	Contenido en MO del efluente			X	Importante
8	Punzonamiento estático de la capa separadora		X		Ligeramente importante
9	Perforación dinámica de la capa separadora		X		Importante
10	Abertura característica de la capa separadora		X		Muy importante
11	Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		Ligeramente importante
12	Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		Importante
13	Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		Importante

Sin comentarios.

8.1.8 Experto 8

Tabla 68. Valoraciones del Experto 8

	INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1	Coste de ciclo de vida	X	X		Muy importante
2	Huella de carbono	X	X		Importante
3	Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			Nada importante
4	Aislamiento térmico del sustrato	X			Muy importante
5	Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capa separadora			X	Ligeramente importante
6	Permeabilidad del sistema sustrato-capa separadora			X	Muy importante
7	Contenido en MO del efluente			X	Ligeramente importante
8	Punzonamiento estático de la capa separadora		X		Muy importante
9	Perforación dinámica de la capa separadora		X		Muy importante
10	Abertura característica de la capa separadora		X		Importante
11	Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		Ligeramente importante
12	Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		Importante
13	Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		Importante

Sin comentarios.



8.1.9 Experto 9

Tabla 69. Valoraciones del Experto 9

	INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1	Coste de ciclo de vida	X	X		Muy importante
2	Huella de carbono	X	X		Importante
3	Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			Ligeramente importante
4	Aislamiento térmico del sustrato	X			Nada importante
5	Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capa separadora			X	Importante
6	Permeabilidad del sistema sustrato-capa separadora			X	Muy importante
7	Contenido en MO del efluente			X	Muy importante
8	Punzonamiento estático de la capa separadora		X		Muy importante
9	Perforación dinámica de la capa separadora		X		Muy importante
10	Abertura característica de la capa separadora		X		Muy importante
11	Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		Ligeramente importante
12	Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		Ligeramente importante
13	Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		Ligeramente importante

Comentario 1:

- Nuevo indicador: Pérdida de peso del sustrato (Sustrato)
- Valoración: Muy importante
- Descripción: Cantidad de sustrato que se pierde por disolución o circulación del drenaje

Comentario 2:

- Nuevo indicador: Resistencia a la fricción (Geotextil)
- Valoración: Ligeramente importante
- Descripción: Desgaste del material

Comentario 3:

- Nuevo indicador: Espesor (Geotextil)
- Valoración: Importante
- Descripción: Dimensión del geotextil

8.1.10 Experto 10

Tabla 70. Valoraciones del Experto 10

	INDICADOR	Sustrato	Geotextil	Compuesta	VALORACIÓN
1	Coste de ciclo de vida	X	X		Nada importante
2	Huella de carbono	X	X		Nada importante
3	Composición en Materia Orgánica (MO) del sustrato	X			Importante
4	Aislamiento térmico del sustrato	X			Importante
5	Densidad aparente (en seco y saturado) del sistema sustrato-capa separadora			X	Importante
6	Permeabilidad del sistema sustrato-capa separadora			X	Ligeramente importante
7	Contenido en MO del efluente			X	Ligeramente importante
8	Punzonamiento estático de la capa separadora		X		Muy importante
9	Perforación dinámica de la capa separadora		X		Importante
10	Abertura característica de la capa separadora		X		Ligeramente importante
11	Masa por unidad de superficie de la capa separadora		X		Importante
12	Resistencia a hidrólisis de la capa separadora		X		Importante
13	Resistencia a oxidación de la capa separadora		X		Importante



Sin comentarios.

8.2 Informe de laboratorio – LAGUC

En las páginas siguientes se añade adjunto el informe oficial de laboratorio elaborado a partir de los ensayos de laboratorio normalizados realizados, formando éste parte del registro llevado a cabo por LAGUC.



E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**INFORME DE
EXPEDIENTE**

EXPEDIENTE N°:	EXP20028
CLIENTE:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
DIRECCIÓN:	ETSI Caminos, Canales y Puertos 39005 Santander Cantabria
CONTACTO:	Diego Carrera Pérez
TELÉFONO:	648 15 73 27
E-MAIL:	diego.carrera@alumnos.unican.es

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INFORMACIÓN GENERAL.....	3
ANEXO I: INFORMES DE ENSAYO	6
FIN DEL INFORME DE EXPEDIENTE.....	59

INFORMACIÓN GENERAL

Diego Carrera Pérez, alumno de Máster de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de Santander, solicitó la realización de los siguientes ensayos, en los que participó el mismo en su realización, dentro de las actividades realizadas para elaborar su proyecto fin de Máster durante el curso 2019-2020:

MUESTRAS ENSAYADAS:

- Geotextil no tejido reutilizado de polipropileno blanco de aproximadamente 200 g/m² de los habitualmente utilizados en cubiertas verdes
- Geocompuesto de geotextil tejido negro de aproximadamente 100 g/m² y geotextil no tejido verde INBITEX de polipropileno y polietileno.
- Geoespuma de polímero expandido marca OASIS.

ENSAYOS SOBRE LAS MUESTRAS:

- Masa por unidad de superficie según UNE-EN ISO 9864:2005 (masa por unidad de volumen para la geoespuma).
- Ensayo de permeabilidad normal al plano según UNE-EN ISO 11058:2010.
- Ensayo de abertura característica según UNE-EN ISO 12956:2010.
- Ensayo de resistencia a hidrólisis según UNE-EN 12447:2002: este ensayo solo se pudo realizar 4 días, no los 28 previstos en norma, por avería del equipo. El cliente decidió evaluar las muestras tal y como estaban debido a condicionantes de tiempo en el proyecto, aunque solo se pudo evaluar la muestra de geocompuesto de GTX no tejido + GTX tejido en lo referente a permeabilidad normal al plano.
- Ensayo de resistencia a oxidación según UNE-EN ISO 13438:2005: como esta norma ha cambiado recientemente a una edición de año 2020 en la que se introduce una hidrólisis a 80°C, se realizó una hidrólisis previa a 80°C durante 2 días antes de introducir las muestras en horno de oxidación a 105°C, donde estuvieron 14 días.

La evaluación tras los ensayos de oxidación e hidrólisis se hizo a través de los ensayos hidráulicos de abertura característica y permeabilidad normal al plano, en vez de propiedades mecánicas previstas en la norma UNE-EN 12226, por decisión del cliente.

La orden de trabajo fue emitida por LAGUC a partir del día 21 de julio de 2020.

Se muestra a continuación un cuadro resumen con los resultados obtenidos por LAGUC. Se ordenan según la muestra.

CARACTERÍSTICAS	NORMA	UNIDAD	RESULTADOS
Geotextil no tejido blanco aprox. 200 g/m² (muestra EXP20028-1)			Media ± incertidumbre
- Masa por unidad de superficie	UNE-EN ISO 9864	g/m ²	246 ± 17
- Abertura característica	UNE-EN ISO 12956	mm	0,076 ± 0,015
- Permeabilidad perpendicular al plano	UNE-EN ISO 11058	mm/s	66 ± 18
- Resistencia a hidrólisis (4 días) - Permeabilidad normal al plano residual - Abertura característica residual	UNE-EN 12447	% %	No se realizó el ensayo No se realizó el ensayo
- Resistencia a oxidación (2 días hidrólisis a 80°C y 14 días a 105°C) - Permeabilidad normal al plano residual - Abertura característica residual	UNE-EN ISO 13438	% %	93 ± 26 114 ± 28

CARACTERÍSTICAS	NORMA	UNIDAD	RESULTADOS
Geocompuesto de GTX tejido negro + GTX no tejido verde INBITEX (muestra EXP20028-2)			Media ± incertidumbre
- Masa por unidad de superficie	UNE-EN ISO 9864	g/m ²	241 ± 10
- Abertura característica	UNE-EN ISO 12956	mm	0,204 ± 0,020
- Permeabilidad perpendicular al plano	UNE-EN ISO 11058	mm/s	43,4 ± 3,0
- Resistencia a hidrólisis (4 días) - Permeabilidad normal al plano residual - Abertura característica residual	UNE-EN 12447	% %	72 ± 12 No se realizó el ensayo
- Resistencia a oxidación (2 días hidrólisis a 80°C y 14 días a 105°C) - Permeabilidad normal al plano residual - Abertura característica residual	UNE-EN ISO 13438	% %	93 ± 26 114 ± 28

CARACTERÍSTICAS	NORMA	UNIDAD	RESULTADOS
Geospuma marca OASIS (muestra EXP20028-3)			Media ± incertidumbre
- Masa por unidad de volumen	No aplica	kg/m ³	22,0 ± 2,3
- Abertura característica	UNE-EN ISO 12956	mm	< 0,020 (por debajo del límite de medición del ensayo)
- Permeabilidad perpendicular al plano	UNE-EN ISO 11058	mm/s	7,1 ± 0,7
- Resistencia a hidrólisis (4 días) - Permeabilidad normal al plano residual - Abertura característica residual	UNE-EN 12447	% %	No se realizó el ensayo No se realizó el ensayo
- Resistencia a oxidación (2 días hidrólisis a 80°C y 14 días a 105°C) - Permeabilidad normal al plano residual - Abertura característica residual	UNE-EN ISO 13438	% %	0 0

El cliente, además, realizó, en las instalaciones de LAGUC, ensayos de determinación de la permeabilidad de sistemas geosintético + sustrato para terrazas verdes usando el infiltrómetro cántabro fijo. Los informes y resultados de esos ensayos se incluyen en su trabajo fin de máster, debido a su grado de especificidad y a que son ensayos de investigación que van más allá de los ensayos solamente sobre geosintéticos a los que se dedica LAGUC.

Anexos:

Este informe técnico, que contiene además 12 informes de ensayo y 5 anejos a informes de ensayo, ordenados por número de informe de LAGUC, tiene un total de 59 páginas.

ANEXO I:

INFORMES DE ENSAYOS

GEOTEXTILES. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA MASA POR UNIDAD DE SUPERFICIE (UNE-EN ISO 9864:2005)

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201457

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 9864:2005

Identificación de la muestra (Cliente): Geotextil PP blanco no tejido

Identificación de la muestra (LAGUC): EXP20028-1

Número de probetas ensayadas: 10

Forma: probetas cuadradas

Dimensiones nominales de las probetas: 10 x 10 cm

Norma de acondicionamiento: UNE 7520:1994

Temperatura: 20°C±2°C

Humedad: 65%±5%

Atmósfera real de acondicionamiento y ensayo: Temperatura: 19,9°C-20,7°C

Humedad: 61,3 % - 67,6 %

Báscula utilizada: RADWAG AS/220/C/1

Equipo de medida de longitud utilizado: E-026 de LAGUC.

Resultados obtenidos:

Probeta Nº	Masa (g)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Superficie (cm ²)	Masa por unidad de superficie (g/m ²)
1	2,1450	10,13	10,03	101,6	211,11
2	2,5382	10,07	10,03	101,0	251,30
3	2,1760	9,97	10,10	100,7	216,09
4	2,4733	10,00	10,07	100,7	245,61
5	2,7848	10,03	10,07	101,0	275,72
6	2,4186	10,00	10,10	101,0	239,47
7	2,3257	10,07	10,03	101,0	230,26
8	2,4676	10,10	10,03	101,3	243,59
9	2,8753	10,07	10,07	101,4	283,55
10	2,6385	10,07	10,03	101,0	261,23

Estadística (*):

Media aritmética de las probetas ensayadas (\bar{x}):	246 g/m ²
Desviación típica de las probetas ensayadas (s):	23,48 g/m ²
Coefficiente de variación ($s/\bar{x} \cdot 100$):	9,54 %

Resultado con su incertidumbre:

Masa por unidad de superficie: 246 ± 17 g/cm²

La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,32$ en base a una distribución t de Student con 9 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

(*) Los resultados sólo se refieren a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la incertidumbre propia del método de ensayo.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio

Fecha de inicio del ensayo: 21/7/2020 12:00 H

Fecha de finalización del ensayo: 21/7/2020 13:00 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 20/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

GEOTEXTILES. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA MASA POR UNIDAD DE SUPERFICIE (UNE-EN ISO 9864:2005)

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201458

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 9864:2005

Identificación de la muestra (Cliente): Geocompuesto GTX tejido+ GTX no tejido

Identificación de la muestra (LAGUC): EXP20028-2

Número de probetas ensayadas: 10

Forma: probetas cuadradas

Dimensiones nominales de las probetas: 10 x 10cm.

Norma de acondicionamiento: UNE 7520:1994

Temperatura: 20°C±2°C

Humedad: 65%±5%

Atmósfera real de acondicionamiento y ensayo: Temperatura: 19,9°C-20,7°C

Humedad: 61,3 % - 67,6 %

Báscula utilizada: RADWAG AS/220/C/1

Equipo de medida de longitud utilizado: E-026 de LAGUC.

Resultados obtenidos:

Probeta Nº	Masa (g)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Superficie (cm ²)	Masa por unidad de superficie (g/m ²)
1	2,5160	10,07	10,07	101,4	248,11
2	2,2200	10,03	10,03	100,6	220,67
3	2,5562	10,07	10,03	101,0	253,08
4	2,3921	9,97	10,10	100,7	237,55
5	2,4703	10,00	10,03	100,3	246,29
6	2,5391	10,10	10,03	101,3	250,64
7	2,6249	10,10	10,00	101,0	259,89
8	2,2825	10,10	9,97	100,7	226,67
9	2,2499	10,03	10,00	100,3	224,32
10	2,4309	9,93	10,07	100,0	243,10

Estadística (*):

Media aritmética de las probetas ensayadas (\bar{x}):	241 g/m ²
Desviación típica de las probetas ensayadas (s):	13,28 g/m ²
Coefficiente de variación ($s/\bar{x}\cdot 100$):	5,51 %

Resultado con su incertidumbre:

Masa por unidad de superficie: 241 ± 10 g/cm²

La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura k=2,25 en base a una distribución t de Student con 11 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

(*) Los resultados sólo se refieren a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la incertidumbre propia del método de ensayo.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio

Fecha de inicio del ensayo: 21/7/2020 12:15 H

Fecha de finalización del ensayo: 21/7/2020 13:15 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 20/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

GEOTEXTILES. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA MASA POR UNIDAD DE VOLUMEN

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201459

Norma de ensayo: método propio

Identificación de la muestra (Cliente): geospuma OASIS

Identificación de la muestra (LAGUC): EXP20028-3

Número de probetas ensayadas: 10

Forma: probetas cuadradas

Dimensiones nominales de las probetas: 23 x 11 x 2 cm.

Norma de acondicionamiento: UNE 7520:1994

Temperatura: 20°C±2°C

Humedad: 65%±5%

Atmósfera real de acondicionamiento y ensayo: Temperatura: 19,9°C-20,7°C

Humedad: 61,3 % - 67,6 %

Báscula utilizada: RADWAG AS/220/C/1

Equipo de medida de longitud utilizado: E-026 de LAGUC

Resultados obtenidos:

Probeta Nº	Masa (g)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Volumen (cm ³)	Masa por unidad de volumen (g/m ³)
1	9,2910	22,90	10,80	1,67	413,0	22,50
2	8,6525	22,73	10,83	1,50	369,2	23,43
3	10,5019	22,87	10,83	1,97	487,9	21,52
4	9,2282	22,70	10,93	1,83	454,0	20,32
5	9,9501	22,70	10,80	1,83	448,6	22,18
6	8,9704	22,83	10,80	1,63	401,9	22,32
7	9,4746	22,90	10,83	1,50	372,0	25,47
8	8,7190	22,80	10,83	1,53	377,8	23,08
9	9,6340	22,87	10,80	1,87	461,9	20,86
10	10,4250	22,87	10,77	2,24	551,7	18,89

Estadística (*):

Media aritmética de las probetas ensayadas (\bar{x}):	22,00 kg/m ³
Desviación típica de las probetas ensayadas (s):	1,81 g/m ²
Coefficiente de variación ($s/\bar{x} \cdot 100$):	8,24 %

Resultado con su incertidumbre:

Masa por unidad de superficie: 22,0 ± 2,3 g/cm²

La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura k=2,02 en base a una distribución t de Student con 129 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

(*) Los resultados sólo se refieren a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la incertidumbre propia del método de ensayo.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio

Fecha de inicio del ensayo: 20/7/2020 13:00 H

Fecha de finalización del ensayo: 21/7/2020 13:00 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 21/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

**GEOTEXTILES Y PRODUCTOS RELACIONADOS.
DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA HIDRÓLISIS EN AGUA
(UNE-EN 12447:2002)**

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201465

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 12447: 2002

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-2

Identificación del material ensayado (Cliente): Geocompuesto GTX tejido+GTX no tejido

Temperatura nominal de ensayo: 95°C ± 1°C

Temperatura real del ensayo: 95°C ± 1°C

Fecha y hora de inicio de la exposición: 23/7/2020 13:00 H

Fecha y hora del fin de la exposición: 27/7/2020 10:00 H (se paró por avería)

Duración del ensayo: 4 días (se paró por avería)

Evaluación después del ensayo de durabilidad (UNE-EN 12226:2012):

Tipo de geotextil (tejido o no tejido): no tejido

Norma de ensayo de evaluación:

- Permeabilidad normal al plano: UNE-EN ISO 11058
- Abertura característica: UNE-EN ISO 12956 (no se realizó este ensayo ya que el tiempo de exposición se consideró muy corto como para obtener diferencias)

apreciables con las probetas de control, teniendo en cuenta la precisión del ensayo).

Numero de muestras ensayadas: 8 envejecidas (5 permeabilidad, 5 abertura característica) y 8 de control (5 permeabilidad, 5 abertura característica).

Dimensiones de las muestras: según las normas de ensayo.

Norma de acondicionamiento: UNE-EN 7520:1994

Temperatura: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

Humedad: $65\% \pm 5\%$.

Atmósfera real de acondicionamiento: Temperatura: $19,8^{\circ}\text{C}-20,8^{\circ}\text{C}$

Humedad: $60,8\%-68,6\%$

Fecha y hora de inicio de acondicionamiento: 14/8/2020 8:30 H

Fecha y hora de final de acondicionamiento: 14/8/2020 10:15 H (menos de 12 horas, pero las probetas quedaron bien humectadas)

Equipo de acondicionamiento: Sala climatizada LAGUC E-036

Equipo de ensayo: Máquina de ensayos Zwick Z100

Examen visual: no se aprecia envejecimiento a simple vista.

Examen microscópico: no solicitado por el cliente

Resultados con su incertidumbre:

Cambio en las propiedades hidráulicas:

Permeabilidad normal al plano residual: $\frac{31,4}{43,4} \times 100 = 72\% \pm 12\%$

($k=2,01-2,15; v=18-274$)

Abertura característica residual: ensayo no realizado

Observaciones:

(*) Los resultados obtenidos se refieren únicamente a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la variabilidad debida al propio método de ensayo.

(***) A continuación se adjuntan como anejos a este informe la serie completa de ensayos de permeabilidad. Los datos de las probetas de control se sacan del informe 201478 (permeabilidad)

(****) Las probetas de control no se sometieron a oxidación durante 6 horas por decisión del cliente y por la avería del equipo.

(*****) Los ensayos elegidos son hidráulicos, no mecánicos, por indicación del cliente.

Ensayo realizado por:

Fecha de inicio del ensayo de evaluación tras la durabilidad:

Fecha de finalización del ensayo de evaluación tras la durabilidad:

Fecha de emisión del informe de ensayo de evaluación tras la durabilidad:

FIN DE INFORME DE ENSAYO

GEOTEXTILES. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD AL AGUA PERPENDICULAR AL PLANO (UNE-EN ISO 11058:2010)

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de anejo de informe: 201465-1

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 11058:2010

Método: Altura de carga variable decreciente

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-2.

Identificación del material ensayado (Cliente): Geocompuesto gtx tejido + gtx no tejido

Descripción del material: Geotextil tejido de PP negro + geotextil no tejido verde de PP+PE.

Forma y dimensiones de las probetas: probetas circulares de 55 mm de diámetro.

Número de probetas ensayadas: 5

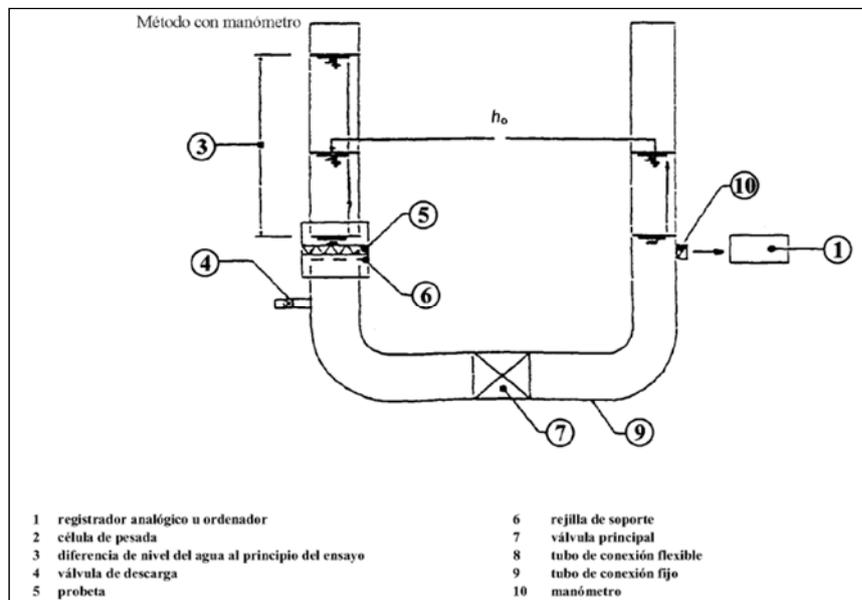
Tipo de agua empleada: Almacenada

Rango real de temperaturas del agua: 20,4°C-21,7°C.

Descripción del equipo empleado: Equipo de permeabilidad perpendicular al plano sin carga LAGUC E-003 (ENSA 3HL8-200) (Ver figura adjunta).

Tipo de velocímetro: sensor de presión TPR-16/LP conectado a un registrador de datos

Oxígeno disuelto: 8,85 mg /L < 10,0 mg/L



Resultados obtenidos:

Consideraciones previas:

Se han ensayado 5 probetas calculando para cada una de ellas los valores de índice de velocidad a una pérdida de carga de 50 mm ($V_{H=50}$). Los valores de índice de velocidad se han corregido por el efecto de la temperatura. A continuación se muestra una tabla con los valores individuales del citado índice de velocidad, el valor medio, el máximo y el mínimo.

Probeta Nº	$V_{H=50}$ (mm/s)
1	31,3
2	26,8
3	29,3
4	21,7
5	47,9
PROMEDIO	31,4
s	9,9
MAX	47,9
MIN	21,7

Índice de Velocidad para carga hidráulica de 50mm a 20°C (con su incertidumbre):

$$V_{H=50} = 31,4 \text{ mm/s} \pm 3,2 \text{ mm/s}$$

La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,15$ en base a una distribución t de Student con 18 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

(*) Los resultados sólo se refieren a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la incertidumbre propia del método de ensayo.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García y Diego Carrera (en formación)

Fecha de inicio del ensayo: 14/8/2020 10:20 H

Fecha de finalización del ensayo: 14/8/2020 10:50 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 21/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

GEOTEXTILES. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA OXIDACIÓN A LA INTEMPERIE (UNE-EN ISO 13438:2005)

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201467

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 13438: 2005

Identificación del material ensayado (cliente): Geotextil agujeteado de polipropileno blanco

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-1

Modelo de la estufa: P-SELECTA DIGITHEAT 80L

Dimensiones de la estufa: alto 50cm x ancho 40cm x fondo 40cm (80litros)

Método de ensayo: HIDRÓLISIS a 80°C + A1

Hidrólisis: en baño MEMMERT de 30 L a 80°C, entre 21-7-20 de 12:00 a 23/7/2020 a 12:00.

Temperatura de ensayo: 105°C (por indicación del cliente)

Duración del ensayo: 14 días

Temperatura real del ensayo: 100-105°C

Fecha y hora de inicio del ensayo: 23/7/2020 12:30 H

Fecha y hora de finalización del ensayo: 6/8/2020 8:45 H

Evaluación después del ensayo de durabilidad (UNE-EN 12226:2012):

Tipo de geotextil (tejido o no tejido): no tejido

Normas de ensayo de evaluación:

- Permeabilidad normal al plano: UNE-EN ISO 11058

- Abertura característica: UNE-EN ISO 12956

Numero de muestras ensayadas: 8 envejecidas (5 permeabilidad, 5 abertura característica) y 8 de control (5 permeabilidad, 5 abertura característica).

Dimensiones de las muestras: según las normas de ensayo.

Norma de acondicionamiento: UNE-EN 7520:1994

Temperatura: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

Humedad: $65\% \pm 5\%$.

Atmósfera real de acondicionamiento: Temperatura: $19,8^{\circ}\text{C}-20,8^{\circ}\text{C}$

Humedad: $60,8\%-68,6\%$

Fecha y hora de inicio de acondicionamiento probetas control: 23/7/20 12:30 H

Fecha y hora de final de acondicionamiento probetas control: 6/8/2020 8:45 H

Equipo de acondicionamiento: Sala climatizada LAGUC E-036

Equipo de ensayo: equipo ENSA 3HL8-200 para permeabilidad

equipo E-004 de LAGUC para abertura característica

Examen visual: no se ha observado cambio alguno en el color

Examen microscópico: No ha sido solicitado por el cliente

Resultados con su incertidumbre:

Cambio en las propiedades hidráulicas:

Permeabilidad normal al plano residual: $\frac{61,6}{66,3} \times 100 = 93\% \pm 26\%$

($k=2,65; v=5$)

Abertura característica residual: $\frac{87}{76} \times 100 = 114\% \pm 28\%$

($k=2,00; v>500$)

La incertidumbre ha sido calculada con los factores de cobertura k indicados en base a una distribución t de Student con los grados de libertad v indicados, que corresponden a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

- (*) Los resultados obtenidos se refieren únicamente a las probetas ensayadas.
- (**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la variabilidad debida al propio método de ensayo.
- (***) A continuación se adjuntan como anejos a este informe las 2 series completas de ensayos de permeabilidad y abertura de las probetas expuestas. Los datos de las probetas de control se sacan de los informes 201470 (para abertura) y 201477 (permeabilidad)
- (****) Las probetas de control no se sometieron a oxidación durante 6 horas por decisión del cliente.
- (*****) Los ensayos elegidos son hidráulicos, no mecánicos, por indicación del cliente.
- (***** Se aplica una hidrólisis inicial a 80°C con permiso del cliente para seguir las indicaciones de las normas EN 13249 y ss. y las indicaciones de la nueva norma UNE-EN ISO 13438:2020, hacia la que LAGUC está evolucionando.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio y Diego Carrera (en formación)

Fecha de inicio del ensayo de evaluación tras durabilidad: 7/8/2020

Fecha de finalización del ensayo de evaluación tras durabilidad: 10/8/2020

Fecha de emisión del informe de ensayo: 25/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

GEOTEXTILES. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD AL AGUA PERPENDICULAR AL PLANO (UNE-EN ISO 11058:2010)

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201467-1

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 11058:2010

Método: Altura de carga variable decreciente

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-1 (tras oxidación).

Identificación del material ensayado (Cliente): Geotextil blanco pp agujeteado aprox. 200 g/m².

Descripción del material: Geotextil no tejido de polipropileno blanco agujeteado.

Forma y dimensiones de las probetas: probetas circulares de 55 mm de diámetro.

Número de probetas ensayadas: 5

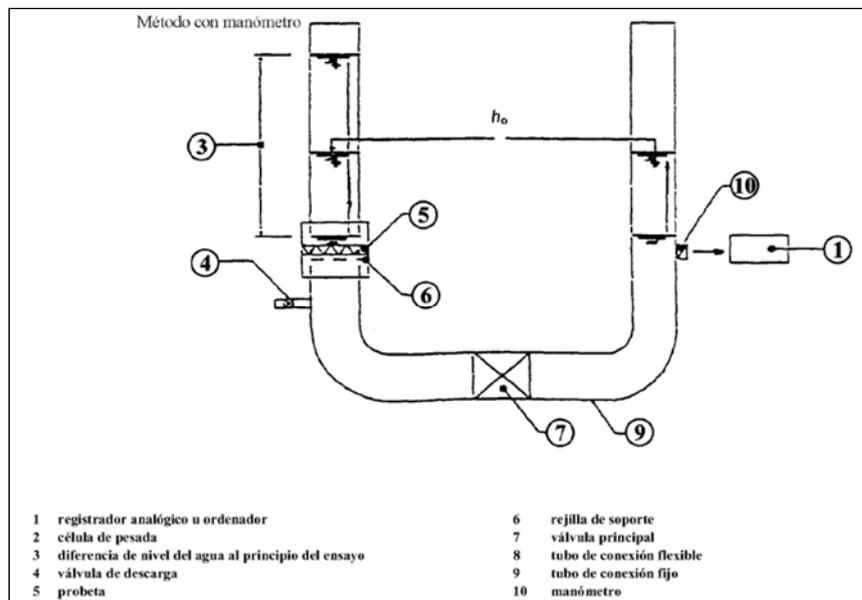
Tipo de agua empleada: Almacenada

Rango real de temperaturas del agua: 19,7°C-20,6°C.

Descripción del equipo empleado: Equipo de permeabilidad perpendicular al plano sin carga LAGUC E-003 (ENSA 3HL8-200) (Ver figura adjunta).

Tipo de velocímetro: sensor de presión TPR-16/LP conectado a un registrador de datos

Oxígeno disuelto: 8,86 mg /L < 10,0 mg/L



Resultados obtenidos:

Consideraciones previas:

Se han ensayado 5 probetas calculando para cada una de ellas los valores de índice de velocidad a una pérdida de carga de 50 mm ($V_{H=50}$). Los valores de índice de velocidad se han corregido por el efecto de la temperatura. A continuación se muestra una tabla con los valores individuales del citado índice de velocidad, el valor medio, el máximo y el mínimo.

Probeta Nº	$V_{H=50}$ (mm/s)
1	98,6
2	81,4
3	41,3
4	39,4
5	47,5
PROMEDIO	61,6
s	26,8
MAX	98,6
MIN	39,4

Índice de Velocidad para carga hidráulica de 50mm a 20°C (con su incertidumbre):

$$V_{H=50} = 62 \text{ mm/s} \pm 19 \text{ mm/s}$$

La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,65$ en base a una distribución t de Student con 5 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

(*) Los resultados sólo se refieren a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la incertidumbre propia del método de ensayo.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García y Diego Carrera (en formación)

Fecha de inicio del ensayo: 6/8/2020 10:25 H

Fecha de finalización del ensayo: 6/8/2020 10:55 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 25/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

**GEOTEXTILES Y PRODUCTOS RELACIONADOS.
DETERMINACIÓN DE LA MEDIDA DE ABERTURA CARACTERÍSTICA
UNE-EN ISO 12956:2010**

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201470

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 12956:2010

Identificación de la muestra (LAGUC): EXP20028-1 (tras oxidación)

Identificación de la muestra (Cliente): geotextil blanco PP agujeteado aprox. 200 g/m²

Número de probetas ensayadas: 3

Forma: circulares

Dimensiones de la zona expuesta de la probeta: 130 mm de diámetro

Norma de secado de probeta: UNE-EN ISO 12956:2010

Temperatura: (50±1)°C (para evitar deterioro del material)

Atmósfera real de secado de probeta antes de tamizado: (50±1)°C

Tiempo de inicio de secado de probeta antes de tamizado: 23/7/2020 12:30 H

Tiempo de fin de secado de probeta antes de tamizado: 6/8/2020 8:45 H (oxidación)

Equipo empleado: ver Fig. 1

Material granular empleado: ver Fig. 2

Fecha y hora del tamizado: 7/8/2020 9:00 H

Atmósfera real de secado de probeta tras el tamizado: (50±1)°C

Tiempo de inicio de secado de probetas tras el tamizado: 7/8/2020 9:35 H

Tiempo de fin de secado de probetas tras el tamizado: 10/8/2020 10:30 H

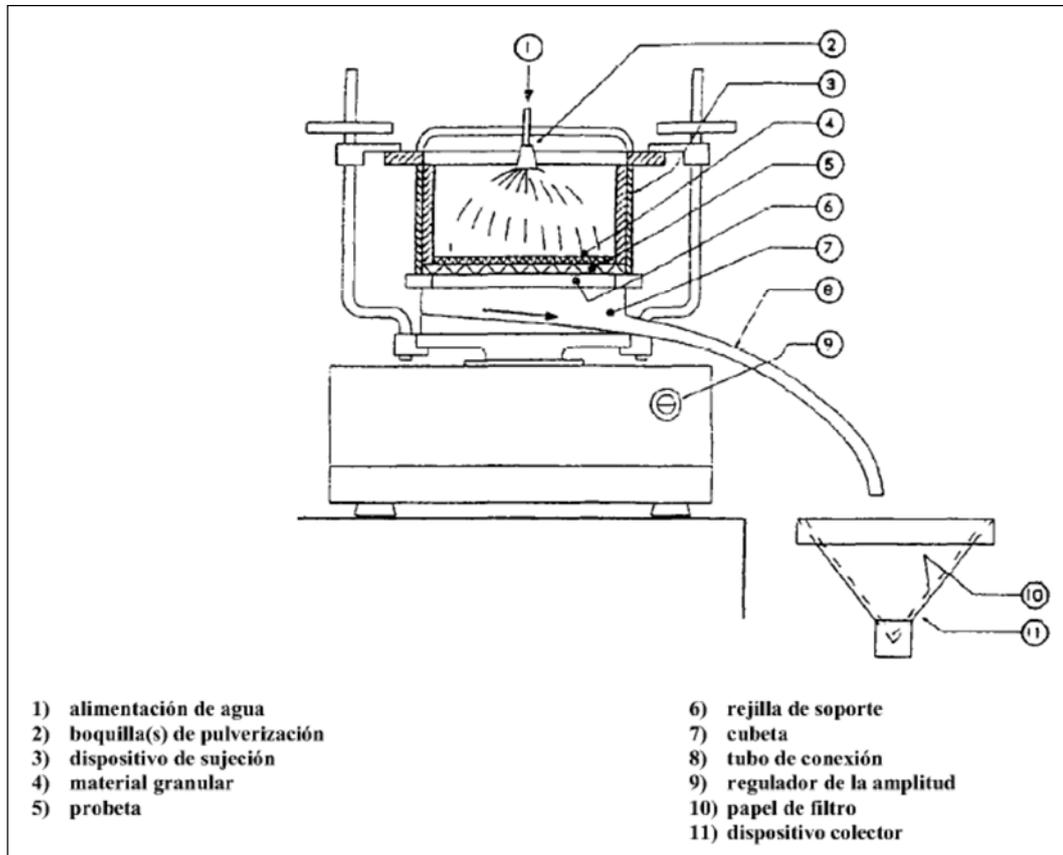


Fig. 1.- Equipo empleado

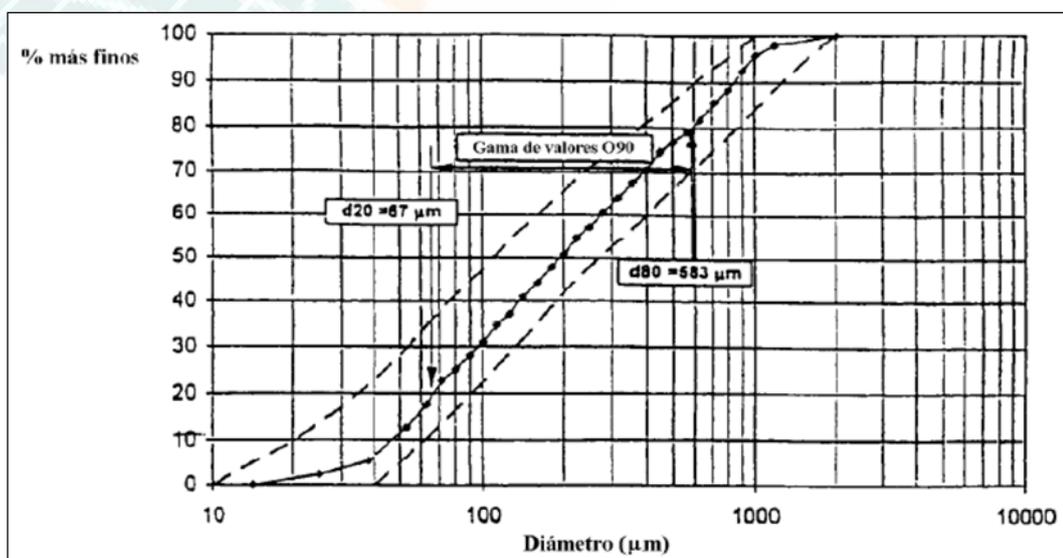


Fig. 2.- Curva granulométrica del material angular empleado

Resultados obtenidos:

Masas del material granular retenido y del que pasa:

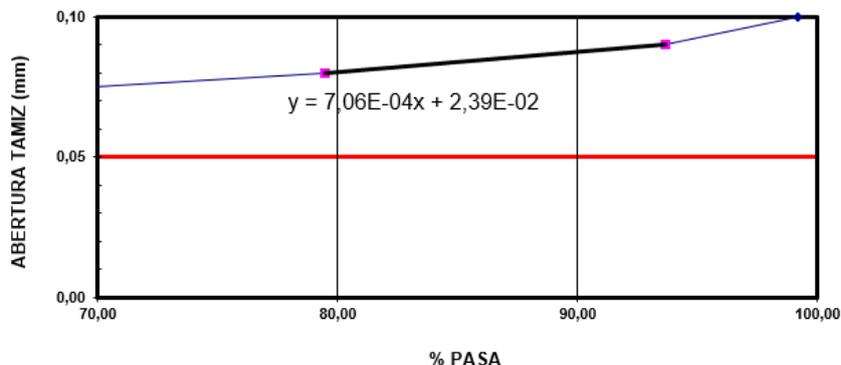
Probeta	Material granular inicial (1) g	Material granular que ha pasado (2) g	Material granular retenido (3) g	Material granular perdido $100[(1)-(2)-(3)]/(1)$ %	Material granular que ha pasado $100[(2)/(1)]$ %	$ \bar{p} - p_i $ %	$\left \frac{\bar{p} - p_i}{\bar{p}} \right \times 100$ %
1	123,00	31,63	90,20	0,95	25,72	0,24	0,92
2	123,00	31,62	90,16	0,99	25,71	0,25	0,95
3	123,00	32,52	89,74	0,60	26,44	0,49	1,87
TOTAL	369,00	95,77	270,10	MEDIA= 0,26	$\bar{p} =$ 31,87		

Análisis granulométrico del material retenido por las probetas:

Abertura del tamiz mm	Masa del tamiz vacío g	Masa del tamiz y del material granular g	Material granular retenido g	Material granular retenido acumulado g	Masa acumulada de material granular que ha pasado g	Porcentaje acumulado del material granular que ha pasado %
Inferior	198,42	228,83	30,41	91,37	0,00	0,00
0,056	210,36	221,20	10,84	60,96	30,41	33,28
0,063	216,03	231,55	15,52	50,12	41,25	45,15
0,071	213,94	229,79	15,85	34,60	56,77	62,13
0,080	216,62	229,57	12,95	18,75	72,62	79,48
0,090	219,40	224,45	5,05	5,80	85,57	93,65
0,100	218,95	219,70	0,75	0,75	90,62	99,18
TOTAL			91,37			100,00

Vía de tamizado: Seca

Curva granulométrica del material retenido por las probetas (escalas reales):



Curva de regresión de la granulometría: $y = 2,39E-02 + 7,06E-04x$

Donde:

- x: % que pasa por el tamiz
- y: valor de la abertura del tamiz (mm)

x	y
90	0,087

Resumen de resultados con su incertidumbre:

Abertura característica (O_{90}): **0,087 mm \pm 0,016 mm**

(*) Los valores aquí mostrados representan únicamente las características de las probetas ensayadas.

(**) La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,00$ en base a una distribución t de Student con 9189 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García y Diego Carrera (en formación)

Fecha y hora de inicio de determinación de O_{90} : 10/8/2020 13:45 H

Fecha y hora de fin de determinación de O_{90} : 10/8/2020 14:30 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 25/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

**GEOTEXTILES. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA
OXIDACIÓN A LA INTEMPERIE
(UNE-EN ISO 13438:2005)**

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201468

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 13438: 2005

Identificación del material ensayado (cliente): Geocompuesto GTX tejido+GTX no tejido

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-2

Modelo de la estufa: P-SELECTA DIGITHEAT 80L

Dimensiones de la estufa: alto 50cm x ancho 40cm x fondo 40cm (80litros)

Método de ensayo: HIDRÓLISIS a 80°C + A1

Hidrólisis: en baño MEMMERT de 30 L a 80°C, entre 21-7-20 de 12:00 a 23/7/2020 a 12:00.

Temperatura de ensayo: 105°C

Duración del ensayo: 14 días

Temperatura real del ensayo: 100-105°C

Fecha y hora de inicio del ensayo: 23/7/2020 12:30 H

Fecha y hora de finalización del ensayo: 6/8/2020 8:45 H

Evaluación después del ensayo de durabilidad (UNE-EN 12226:2012):

Tipo de geotextil (tejido o no tejido): tejido+no tejido

Normas de ensayo de evaluación:

- Permeabilidad normal al plano: UNE-EN ISO 11058

- Abertura característica: UNE-EN ISO 12956

Numero de muestras ensayadas: 8 envejecidas (5 permeabilidad, 5 abertura característica) y 8 de control (5 permeabilidad, 5 abertura característica).

Dimensiones de las muestras: según las normas de ensayo.

Norma de acondicionamiento: UNE-EN 7520:1994

Temperatura: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

Humedad: $65\% \pm 5\%$.

Atmósfera real de acondicionamiento: Temperatura: $19,8^{\circ}\text{C}-20,8^{\circ}\text{C}$

Humedad: $60,8\%-68,6\%$

Fecha y hora de inicio de acondicionamiento probetas control: 23/7/20 12:30 H

Fecha y hora de final de acondicionamiento probetas control: 6/8/2020 8:45 H

Equipo de acondicionamiento: Sala climatizada LAGUC E-036

Equipo de ensayo: equipo ENSA 3HL8-200 para permeabilidad

equipo E-004 de LAGUC para abertura característica

Examen visual: no se ha observado cambio alguno en el color

Examen microscópico: No ha sido solicitado por el cliente

Resultados con su incertidumbre:

Cambio en las propiedades hidráulicas:

Permeabilidad normal al plano residual: $\frac{32}{43,4} \times 100 = 74\% \pm 11\%$

($k=2,00-2,01; v=200-700$)

Abertura característica residual: $\frac{0,147}{0,204} \times 100 = 72\% \pm 16\%$

($k=2,00; v>500$)

La incertidumbre ha sido calculada con los factores de cobertura k indicados en base a una distribución t de Student con los grados de libertad v indicados, que corresponden a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

- (*) Los resultados obtenidos se refieren únicamente a las probetas ensayadas.
- (**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la variabilidad debida al propio método de ensayo.
- (***) A continuación se adjuntan como anejos a este informe las 2 series completas de ensayos de permeabilidad y abertura de las probetas expuestas. Los datos de las probetas de control se sacan de los informes 201471 (para abertura) y 201478 (permeabilidad)
- (****) Las probetas de control no se sometieron a oxidación durante 6 horas por decisión del cliente.
- (*****) Los ensayos elegidos son hidráulicos, no mecánicos, por indicación del cliente.
- (***** Se aplica una hidrólisis inicial a 80°C con permiso del cliente para seguir las indicaciones de las normas EN 13249 y ss. y las indicaciones de la nueva norma UNE-EN ISO 13438:2020, hacia la que LAGUC está evolucionando.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio y Diego Carrera (en formación)

Fecha de inicio del ensayo de evaluación tras durabilidad: 7/8/2020

Fecha de finalización del ensayo de evaluación tras durabilidad: 14/8/2020

Fecha de emisión del informe de ensayo: 25/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

GEOTEXTILES. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD AL AGUA PERPENDICULAR AL PLANO (UNE-EN ISO 11058:2010)

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201468-1

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 11058:2010

Método: Altura de carga variable decreciente

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-2 (tras oxidación).

Identificación del material ensayado (Cliente): geocompuesto GTX no tejido + GTX tejido

Descripción del material: Geocompuesto GTX no tejido verde + tejido negro

Forma y dimensiones de las probetas: probetas circulares de 55 mm de diámetro.

Número de probetas ensayadas: 5

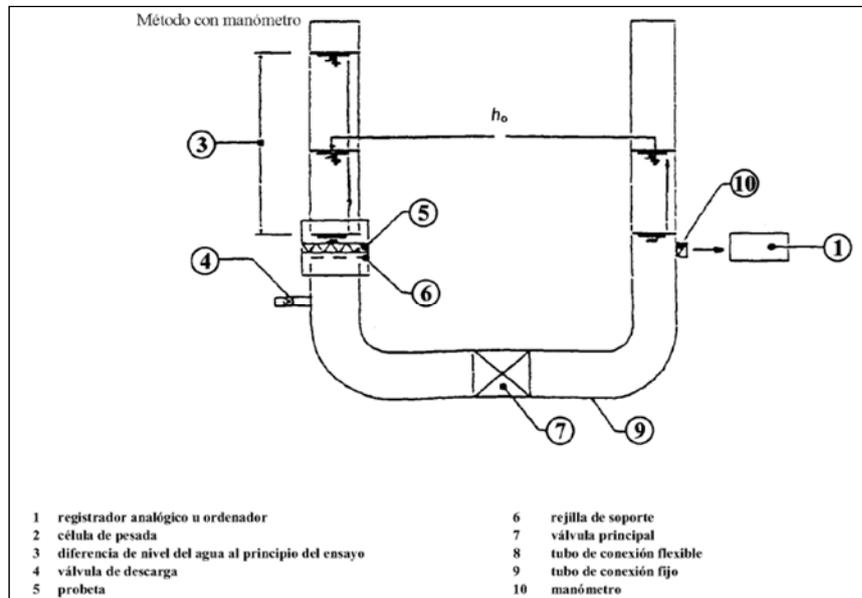
Tipo de agua empleada: Almacenada

Rango real de temperaturas del agua: 19,3°C-21,2°C.

Descripción del equipo empleado: Equipo de permeabilidad perpendicular al plano sin carga LAGUC E-003 (ENSA 3HL8-200) (Ver figura adjunta).

Tipo de velocímetro: sensor de presión TPR-16/LP conectado a un registrador de datos

Oxígeno disuelto: 8,86 mg /L < 10,0 mg/L



Resultados obtenidos:

Consideraciones previas:

Se han ensayado 5 probetas calculando para cada una de ellas los valores de índice de velocidad a una pérdida de carga de 50 mm ($V_{H=50}$). Los valores de índice de velocidad se han corregido por el efecto de la temperatura. A continuación se muestra una tabla con los valores individuales del citado índice de velocidad, el valor medio, el máximo y el mínimo.

Probeta Nº	$V_{H=50}$ (mm/s)
1	34,6
2	31,2
3	35,7
4	29,8
5	28,9
PROMEDIO	32,0
s	3,0
MAX	35,7
MIN	28,9

Índice de Velocidad para carga hidráulica de 50mm a 20°C (con su incertidumbre):

$$V_{H=50} = 32 \text{ mm/s} \pm 2,6 \text{ mm/s}$$

La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,00$ en base a una distribución t de Student con 719 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

(*) Los resultados sólo se refieren a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la incertidumbre propia del método de ensayo.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García y Diego Carrera (en formación)

Fecha de inicio del ensayo: 6/8/2020 10:55 H

Fecha de finalización del ensayo: 6/8/2020 11:30 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 25/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

**GEOTEXILES Y PRODUCTOS RELACIONADOS.
DETERMINACIÓN DE LA MEDIDA DE ABERTURA CARACTERÍSTICA
UNE-EN ISO 12956:2010**

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201468-2

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 12956:2010

Identificación de la muestra (LAGUC): EXP20028-2 (tras oxidación)

Identificación de la muestra (Cliente): geocompuesto GTX no tejido + GTX tejido

Número de probetas ensayadas: 3

Forma: circulares

Dimensiones de la zona expuesta de la probeta: 130 mm de diámetro

Norma de secado de probeta: UNE-EN ISO 12956:2010

Temperatura: (50±1)°C (para evitar deterioro del material)

Atmósfera real de secado de probeta antes de tamizado: (50±1)°C

Tiempo de inicio de secado de probeta antes de tamizado: 23/7/2020 12:30 H

Tiempo de fin de secado de probeta antes de tamizado: 6/8/2020 8:45 H (oxidación)

Equipo empleado: ver Fig. 1

Material granular empleado: ver Fig. 2

Fecha y hora del tamizado: 7/8/2020 14:00 H

Atmósfera real de secado de probeta tras el tamizado: (50±1)°C

Tiempo de inicio de secado de probetas tras el tamizado: 7/8/2020 14:25 H

Tiempo de fin de secado de probetas tras el tamizado: 10/7/2020 8:30 H

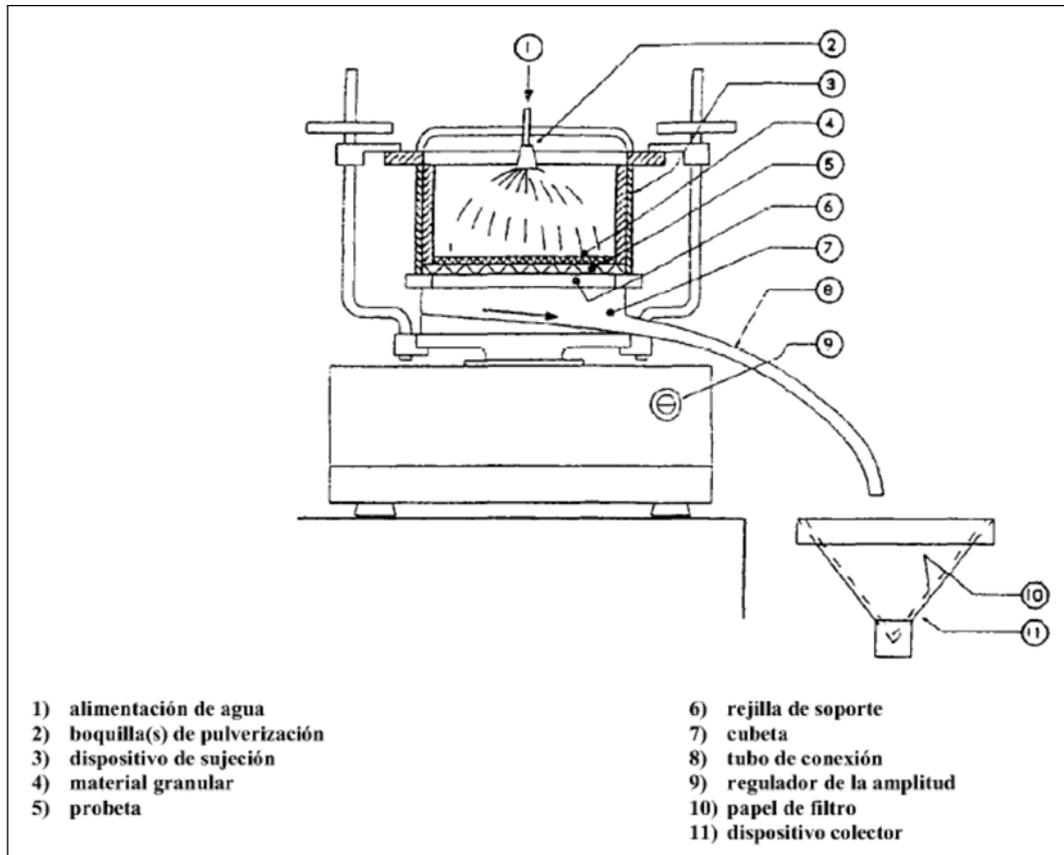


Fig. 1.- Equipo empleado

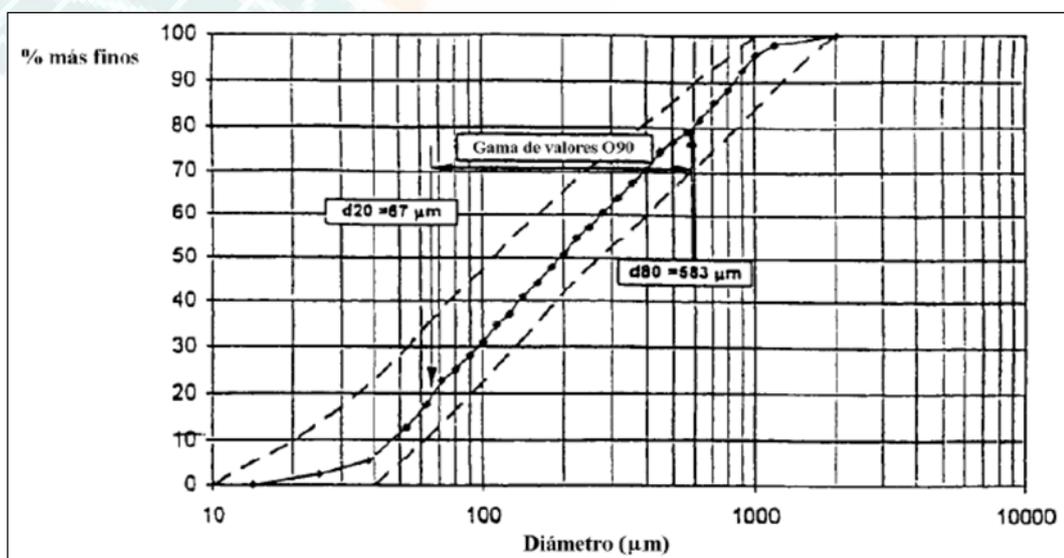


Fig. 2.- Curva granulométrica del material angular empleado

Resultados obtenidos:

Masas del material granular retenido y del que pasa:

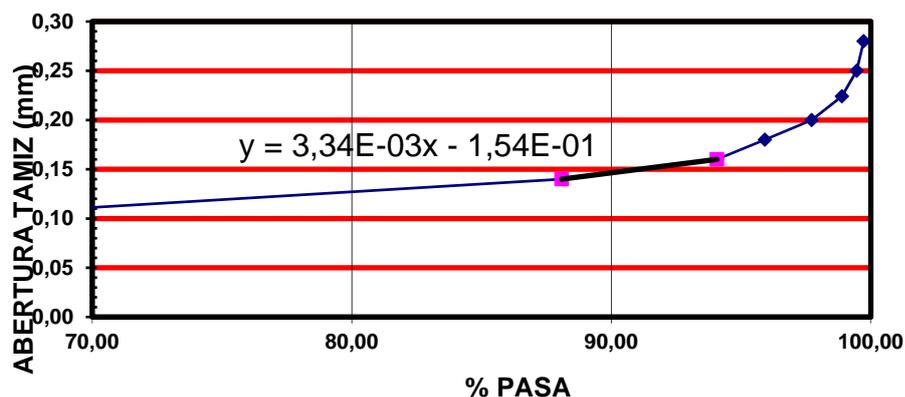
Probeta	Material granular inicial (1) g	Material granular que ha pasado (2) g	Material granular retenido (3) g	Material granular perdido $100[(1)-(2)-(3)]/(1)$ %	Material granular que ha pasado $100[(2)/(1)]$ %	$ \bar{p} - p_i $ %	$\left \frac{\bar{p} - p_i}{\bar{p}} \right \times 100$ %
1	123,00	50,68	71,21	0,90	41,20	0,31	0,77
2	123,00	48,10	74,85	0,04	39,11	1,78	4,36
3	123,00	52,10	70,31	0,48	42,36	1,47	3,59
TOTAL	369,00	150,88	216,37	MEDIA= 0,47	$\bar{p} =$ 40,89		

Análisis granulométrico del material retenido por las probetas:

Abertura del tamiz mm	Masa del tamiz vacío g	Masa del tamiz y del material granular g	Material granular retenido g	Material granular retenido acumulado g	Masa acumulada de material granular que ha pasado g	Porcentaje acumulado del material granular que ha pasado %
Inferior	198,43	331,18	132,75	150,71	0,00	0,00
0,14	222,10	231,12	9,02	17,96	132,75	88,08
0,160	213,61	216,39	2,78	8,94	141,77	94,07
0,180	218,01	220,73	2,72	6,16	144,55	95,91
0,200	224,79	226,55	1,76	3,44	147,27	97,72
0,224	227,08	227,94	0,86	1,68	149,03	98,89
0,250	222,82	223,22	0,40	0,82	149,89	99,46
0,280	224,65	225,07	0,42	0,42	150,29	99,72
TOTAL			150,71			100,00

Vía de tamizado: Seca

Curva granulométrica del material retenido por las probetas (escalas reales):



Curva de regresión de la granulometría: $y = 3,34E-03x - 1,54E-01$

Donde:

- x: % que pasa por el tamiz
- y: valor de la abertura del tamiz (mm)

x	y
90	0,147

Resumen de resultados con su incertidumbre:

Abertura característica (O_{90}): **0,147 mm \pm 0,024 mm**

(*) Los valores aquí mostrados representan únicamente las características de las probetas ensayadas.

(**) La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,00$ en base a una distribución t de Student con 9189 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García y Diego Carrera (en formación)

Fecha y hora de inicio de determinación de O_{90} : 14/8/2020 8:40 H

Fecha y hora de fin de determinación de O_{90} : 14/8/2020 11:30 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 26/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

GEOTEXTILES. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA OXIDACIÓN A LA INTEMPERIE (UNE-EN ISO 13438:2005)

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201469

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 13438: 2005

Identificación del material ensayado (cliente): geospuma OASIS

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-3

Modelo de la estufa: P-SELECTA DIGITHEAT 80L

Dimensiones de la estufa: alto 50cm x ancho 40cm x fondo 40cm (80litros)

Método de ensayo: HIDRÓLISIS a 80°C + A1

Hidrólisis: en baño MEMMERT de 30 L a 80°C, entre 21-7-20 de 12:00 a 23/7/2020 a 12:00.

Temperatura de ensayo: 105°C

Duración del ensayo: 14 días

Temperatura real del ensayo: 100-105°C

Fecha y hora de inicio del ensayo: 23/7/2020 12:30 H

Fecha y hora de finalización del ensayo: 6/8/2020 8:45 H

Evaluación después del ensayo de durabilidad (UNE-EN 12226:2012):

Tipo de geotextil (tejido o no tejido): no tejido

Normas de ensayo de evaluación:

- Permeabilidad normal al plano: UNE-EN ISO 11058

- Abertura característica: UNE-EN ISO 12956

Numero de muestras ensayadas: 8 envejecidas (5 permeabilidad, 5 abertura característica) y 8 de control (5 permeabilidad, 5 abertura característica).

Dimensiones de las muestras: según las normas de ensayo.

Norma de acondicionamiento: UNE-EN 7520:1994

Temperatura: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

Humedad: $65\% \pm 5\%$.

Atmósfera real de acondicionamiento: Temperatura: $19,8^{\circ}\text{C}-20,8^{\circ}\text{C}$

Humedad: $60,8\%-68,6\%$

Fecha y hora de inicio de acondicionamiento probetas control: 23/7/20 12:30 H

Fecha y hora de final de acondicionamiento probetas control: 6/8/2020 8:45 H

Equipo de acondicionamiento: Sala climatizada LAGUC E-036

Equipo de ensayo: equipo ENSA 3HL8-200 para permeabilidad

equipo E-004 de LAGUC para abertura característica

Examen visual: no se ha observado cambio alguno en el color

Examen microscópico: No ha sido solicitado por el cliente

Resultados con su incertidumbre:

Cambio en las propiedades hidráulicas: se comprobó que la permeabilidad normal al plano de la muestra era nula tras la oxidación. En cuanto a la abertura característica, se comprobó que la abertura característica de las probetas de control era $< 20 \mu\text{m}$, y la de las probetas de oxidación era nula, por tanto, los resultados son:

$$\text{Permeabilidad normal al plano residual: } \frac{0}{7,1} \times 100 = 0\%$$

$$\text{Abertura característica residual: } \frac{0}{0 < \text{abertura prob control} < 20} \times 100 = 0\%$$

Observaciones:

(*) Los resultados obtenidos se refieren únicamente a las probetas ensayadas.

(**) No se adjuntan como anejos a este informe las 2 series completas de ensayos de permeabilidad y abertura de las probetas expuestas, porque los ensayos no se pudieron realizar. Los datos de las probetas de control se sacan del informe 201479 para

permeabilidad y se comprobó que las probetas de control de la muestra eran permeables, pero su abertura característica era menor al límite de determinación de 20 μm del ensayo (***) Las probetas de control no se sometieron a oxidación durante 6 horas por decisión del cliente.

(****) Los ensayos elegidos son hidráulicos, no mecánicos, por indicación del cliente.

(*****) Se aplica una hidrólisis inicial a 80°C con permiso del cliente para seguir las indicaciones de las normas EN 13249 y ss. y las indicaciones de la nueva norma UNE-EN ISO 13438:2020, hacia la que LAGUC está evolucionando.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio y Diego Carrera (en formación)

Fecha de inicio del ensayo de evaluación tras durabilidad: 6/8/2020 13:20 H

Fecha de finalización del ensayo de evaluación tras durabilidad: 6/8/2020 13:50 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 26/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

**GEOTEXILES Y PRODUCTOS RELACIONADOS.
DETERMINACIÓN DE LA MEDIDA DE ABERTURA CARACTERÍSTICA
UNE-EN ISO 12956:2010**

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201470

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 12956:2010

Identificación de la muestra (LAGUC): EXP20028-1

Identificación de la muestra (Cliente): geotextil blanco PP agujeteado aprox. 200 g/m²

Número de probetas ensayadas: 3

Forma: circulares

Dimensiones de la zona expuesta de la probeta: 130 mm de diámetro

Norma de secado de probeta: UNE-EN ISO 12956:2010

Temperatura: (50±1)°C (para evitar deterioro del material)

Atmósfera real de secado de probeta antes de tamizado: (50±1)°C

Tiempo de inicio de secado de probeta antes de tamizado: 24/7/2020 9:00 H

Tiempo de fin de secado de probeta antes de tamizado: 24/7/2020 12:00 H

Equipo empleado: ver Fig. 1

Material granular empleado: ver Fig. 2

Fecha y hora del tamizado: 24/7/2020 12:35 H

Atmósfera real de secado de probeta tras el tamizado: (50±1)°C

Tiempo de inicio de secado de probetas tras el tamizado: 27/7/2020 11:45 H

Tiempo de fin de secado de probetas tras el tamizado:

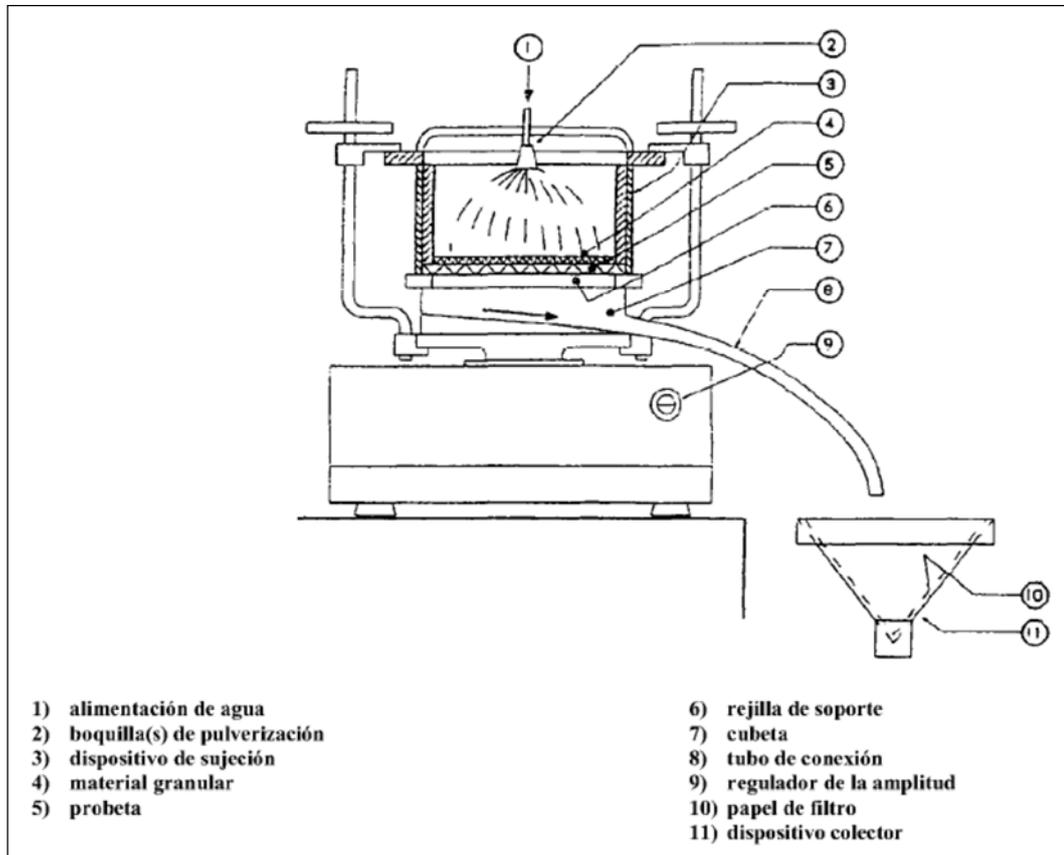


Fig. 1.- Equipo empleado

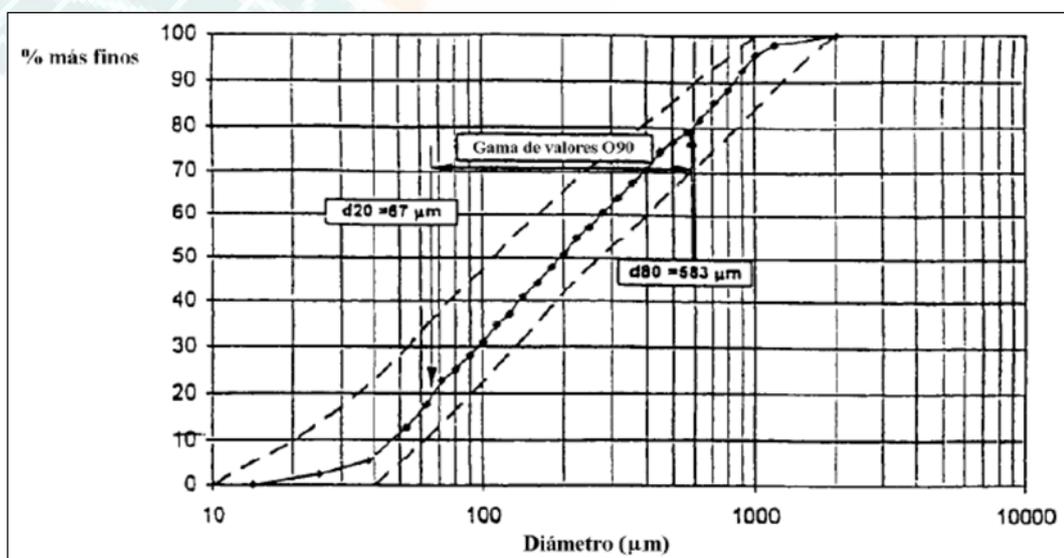


Fig. 2.- Curva granulométrica del material angular empleado

Resultados obtenidos:

Masas del material granular retenido y del que pasa:

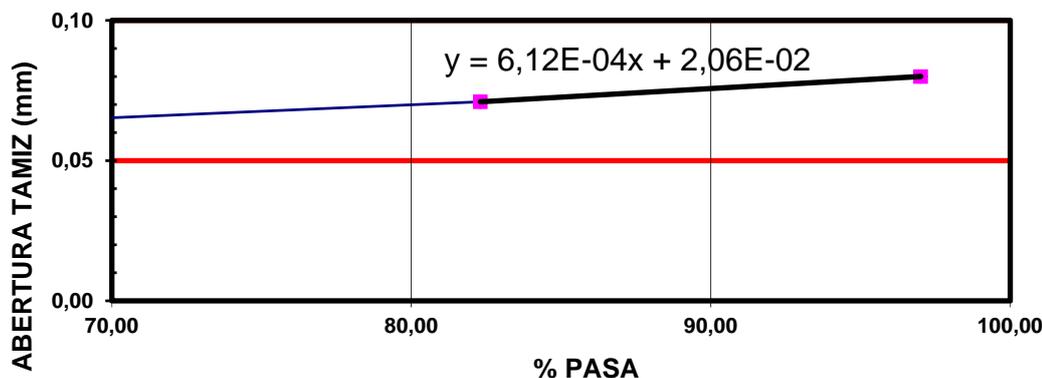
Probeta	Material granular inicial (1) g	Material granular que ha pasado (2) g	Material granular retenido (3) g	Material granular perdido $100[(1)-(2)-(3)]/(1)$ %	Material granular que ha pasado $100[(2)/(1)]$ %	$ \bar{p} - p_i $ %	$\left \frac{\bar{p} - p_i}{\bar{p}} \right \times 100$ %
1	123,00	38,11	84,77	0,10	30,98	0,88	2,77
2	123,00	37,79	84,25	0,78	30,72	1,14	3,59
3	123,00	41,69	81,43	-0,10	33,89	2,03	6,36
TOTAL	369,00	117,59	250,45	MEDIA= 0,26	$\bar{p} =$ 31,87		

Análisis granulométrico del material retenido por las probetas:

Abertura del tamiz mm	Masa del tamiz vacío g	Masa del tamiz y del material granular g	Material granular retenido g	Material granular retenido acumulado g	Masa acumulada de material granular que ha pasado g	Porcentaje acumulado del material granular que ha pasado %
Inferior	198,40	222,64	24,24	117,37	0,00	0,00
0,040	215,71	232,67	16,96	93,13	24,24	20,65
0,050	210,79	226,30	15,51	76,17	41,20	35,10
0,056	210,74	230,41	19,67	60,66	56,71	48,32
0,063	215,78	236,00	20,22	40,99	76,38	65,08
0,071	213,76	231,02	17,26	20,77	96,60	82,30
0,080	216,56	220,07	3,51	3,51	113,86	97,01
TOTAL			117,37			100,00

Vía de tamizado: Seca

Curva granulométrica del material retenido por las probetas (escalas reales):



Curva de regresión de la granulometría: $y = 2,06E-02 + 6,12E-04x$

Donde:

- x: % que pasa por el tamiz
- y: valor de la abertura del tamiz (mm)

x	y
90	0,076

Resumen de resultados con su incertidumbre:

Abertura característica (O_{90}): **0,076 mm \pm 0,015 mm**

(*) Los valores aquí mostrados representan únicamente las características de las probetas ensayadas.

(**) La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,00$ en base a una distribución t de Student con 9189 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García

Fecha y hora de inicio de determinación de O_{90} : 31/7/2020 9:30 H

Fecha y hora de fin de determinación de O_{90} : 31/7/2020 10:00 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 19/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

**GEOTEXILES Y PRODUCTOS RELACIONADOS.
DETERMINACIÓN DE LA MEDIDA DE ABERTURA CARACTERÍSTICA
UNE-EN ISO 12956:2010**

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201471

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 12956:2010

Identificación de la muestra (LAGUC): EXP20028-2

Identificación de la muestra (Cliente): geocompuesto gtx tejido+gtx no tejido

Número de probetas ensayadas: 3

Forma: circulares

Dimensiones de la zona expuesta de la probeta: 130 mm de diámetro

Norma de secado de probeta: UNE-EN ISO 12956:2010

Temperatura: $(50\pm 1)^{\circ}\text{C}$ (para evitar deterioro del material)

Atmósfera real de secado de probeta antes de tamizado: $(50\pm 1)^{\circ}\text{C}$

Tiempo de inicio de secado de probeta antes de tamizado: 27/7/2020 12:30 H

Tiempo de fin de secado de probeta antes de tamizado: 29/7/2020 10:00 H

Equipo empleado: ver Fig. 1

Material granular empleado: ver Fig. 2

Fecha y hora del tamizado: 30/7/2020 10:10 H

Atmósfera real de secado de probeta tras el tamizado: $(50\pm 1)^{\circ}\text{C}$

Tiempo de inicio de secado de probetas tras el tamizado: 30/7/2020 10:30 H

Tiempo de fin de secado de probetas tras el tamizado:

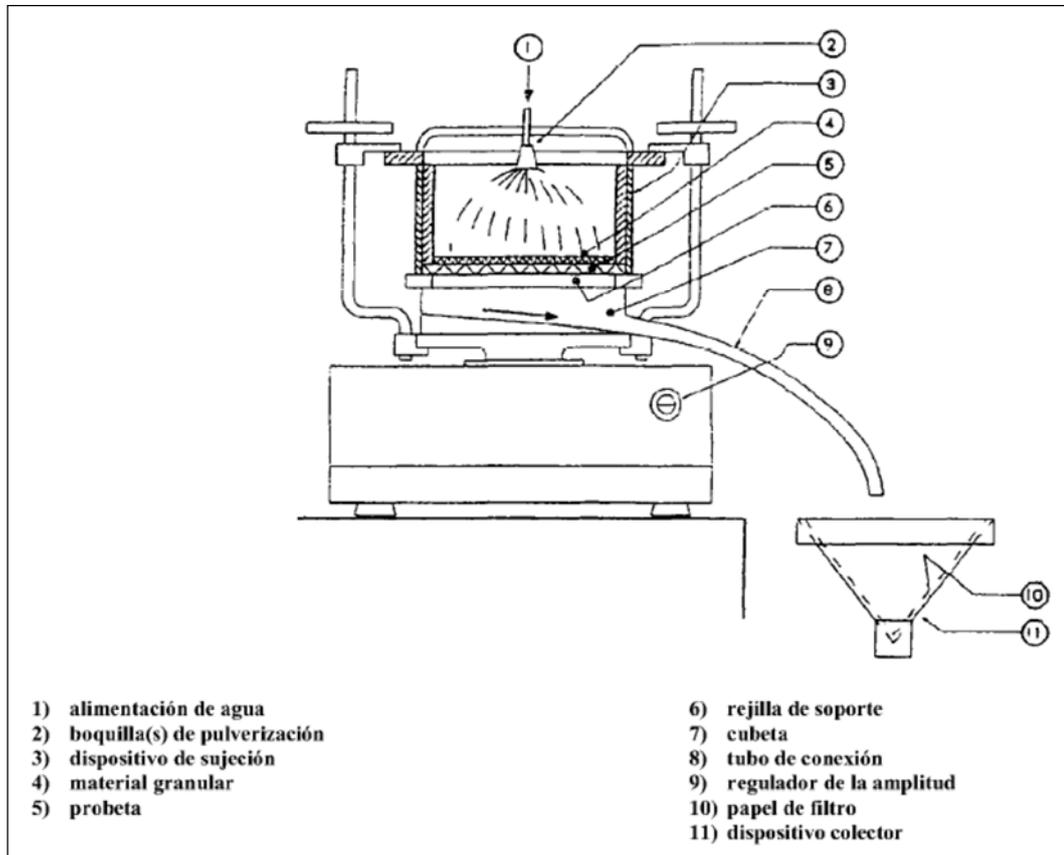


Fig. 1.- Equipo empleado

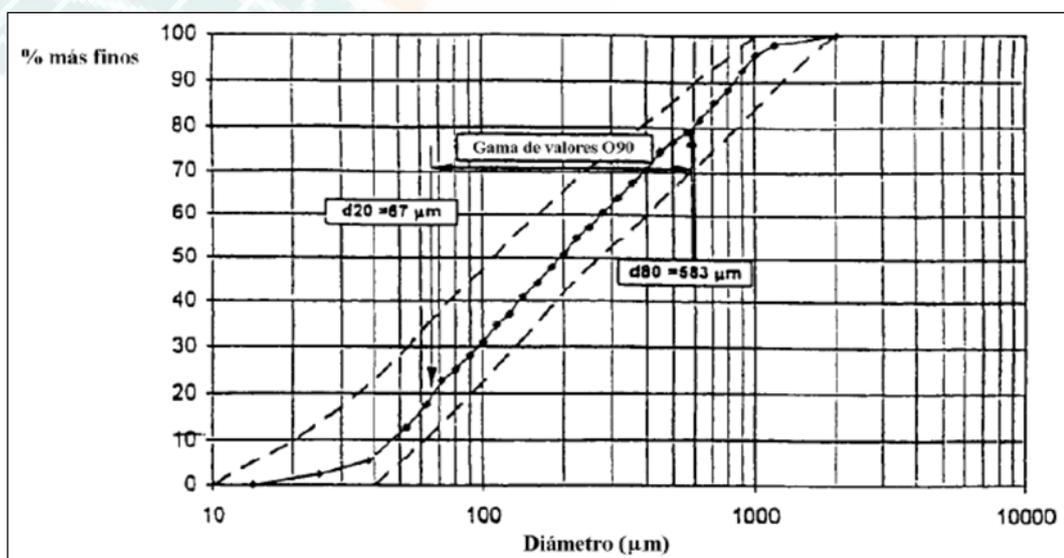


Fig. 2.- Curva granulométrica del material angular empleado

Resultados obtenidos:

Masas del material granular retenido y del que pasa:

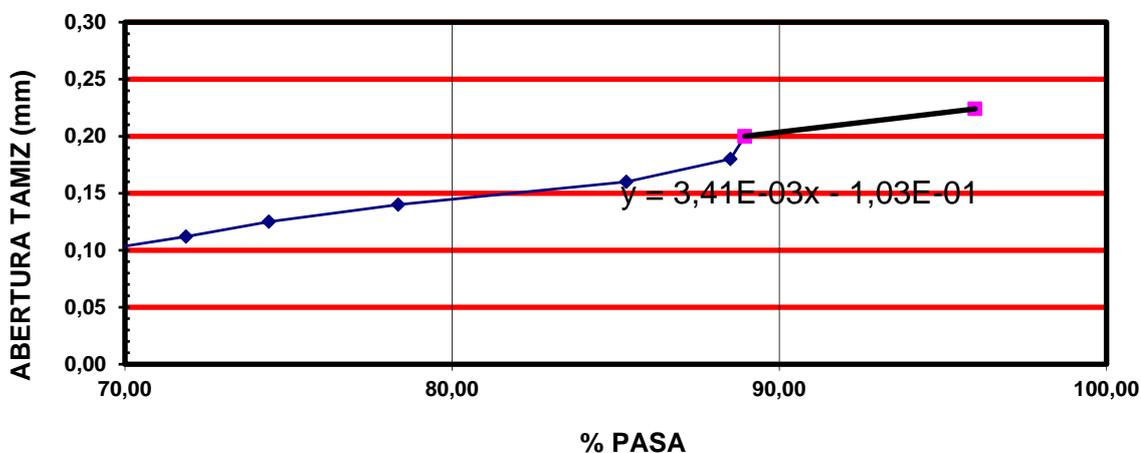
Probeta	Material granular inicial (1) g	Material granular que ha pasado (2) g	Material granular retenido (3) g	Material granular perdido $100[(1)-(2)-(3)]/(1)$ %	Material granular que ha pasado $100[(2)/(1)]$ %	$ \bar{p} - p_i $ %	$\left \frac{\bar{p} - p_i}{\bar{p}} \right \times 100$ %
1	123,00	67,56	54,77	0,54	54,93	0,83	1,49
2	123,00	71,99	50,69	0,26	58,53	2,77	4,97
3	123,00	66,20	55,94	0,70	53,82	1,94	3,48
TOTAL	369,00	205,75	161,40	MEDIA= 0,50	$\bar{p} =$ 55,76		

Análisis granulométrico del material retenido por las probetas:

Abertura del tamiz mm	Masa del tamiz vacío g	Masa del tamiz y del material granular g	Material granular retenido g	Material granular retenido acumulado g	Masa acumulada de material granular que ha pasado g	Porcentaje acumulado del material granular que ha pasado %
Inferior	198,43	288,12	89,69	205,05	0,00	0,00
0,071	213,74	241,87	28,13	115,36	89,69	43,74
0,080	216,62	232,38	15,76	87,23	117,82	57,46
0,090	219,38	227,67	8,29	71,47	133,58	65,15
0,100	218,97	224,46	5,49	63,18	141,87	69,19
0,112	219,79	224,98	5,19	57,69	147,36	71,87
0,125	218,72	226,83	8,11	52,50	152,55	74,40
0,140	222,04	236,34	14,30	44,39	160,66	78,35
0,160	213,57	220,09	6,52	30,09	174,96	85,33
0,180	224,77	225,67	0,90	23,57	181,48	88,51
0,200	217,97	232,40	14,43	22,67	182,38	88,94
0,224	227,11	235,35	8,24	8,24	196,81	95,98
TOTAL			205,05			100,00

Vía de tamizado: Seca

Curva granulométrica del material retenido por las probetas (escalas reales):



Curva de regresión de la granulometría: $y = -1,03E-01 + 3,41E-03x$

Donde:

- x: % que pasa por el tamiz
- y: valor de la abertura del tamiz (mm)

x	y
90	0,204

Resumen de resultados con su incertidumbre:

Abertura característica (O_{90}): **0,204 mm \pm 0,020 mm**

(*) Los valores aquí mostrados representan únicamente las características de las probetas ensayadas.

(**) La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,00$ en base a una distribución t de Student con 9189 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García

Fecha y hora de inicio de determinación de O_{90} : 31/7/2020 9:30 H

Fecha y hora de fin de determinación de O_{90} : 31/7/2020 10:00 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 19/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

GEOTEXTILES. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD AL AGUA PERPENDICULAR AL PLANO (UNE-EN ISO 11058:2010)

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201477

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 11058:2010

Método: Altura de carga variable decreciente

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-1.

Identificación del material ensayado (Cliente): Geotextil blanco pp agujeteado aprox. 200 g/m².

Descripción del material: Geotextil no tejido de polipropileno blanco agujeteado.

Forma y dimensiones de las probetas: probetas circulares de 55 mm de diámetro.

Número de probetas ensayadas: 5

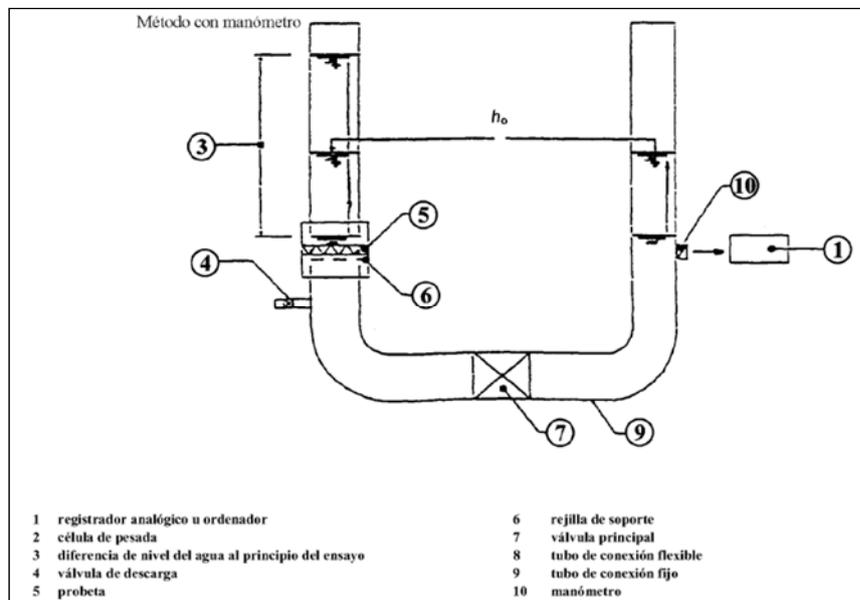
Tipo de agua empleada: Almacenada

Rango real de temperaturas del agua: 19,6°C-21,3°C.

Descripción del equipo empleado: Equipo de permeabilidad perpendicular al plano sin carga LAGUC E-003 (ENSA 3HL8-200) (Ver figura adjunta).

Tipo de velocímetro: sensor de presión TPR-16/LP conectado a un registrador de datos

Oxígeno disuelto: 8,84 mg /L < 10,0 mg/L



Resultados obtenidos:

Consideraciones previas:

Se han ensayado 5 probetas calculando para cada una de ellas los valores de índice de velocidad a una pérdida de carga de 50 mm ($V_{H=50}$). Los valores de índice de velocidad se han corregido por el efecto de la temperatura. A continuación se muestra una tabla con los valores individuales del citado índice de velocidad, el valor medio, el máximo y el mínimo.

Probeta Nº	$V_{H=50}$ (mm/s)
1	87,7
2	28,2
3	66,6
4	57,7
5	91,2
PROMEDIO	66,3
s	25,5
MAX	91,2
MIN	28,2

Índice de Velocidad para carga hidráulica de 50mm a 20°C (con su incertidumbre):

$$V_{H=50} = 66 \text{ mm/s} \pm 18 \text{ mm/s}$$

La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,65$ en base a una distribución t de Student con 5 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

(*) Los resultados sólo se refieren a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la incertidumbre propia del método de ensayo.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García y Diego Carrera (en formación)

Fecha de inicio del ensayo: 23/7/2020 9:30 H

Fecha de finalización del ensayo: 23/7/2020 10:15 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 19/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

GEOTEXTILES. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD AL AGUA PERPENDICULAR AL PLANO (UNE-EN ISO 11058:2010)

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201478

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 11058:2010

Método: Altura de carga variable decreciente

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-2.

Identificación del material ensayado (Cliente): Geocompuesto gtx tejido + gtx no tejido

Descripción del material: Geotextil tejido de PP negro + geotextil no tejido verde de PP+PE.

Forma y dimensiones de las probetas: probetas circulares de 55 mm de diámetro.

Número de probetas ensayadas: 5

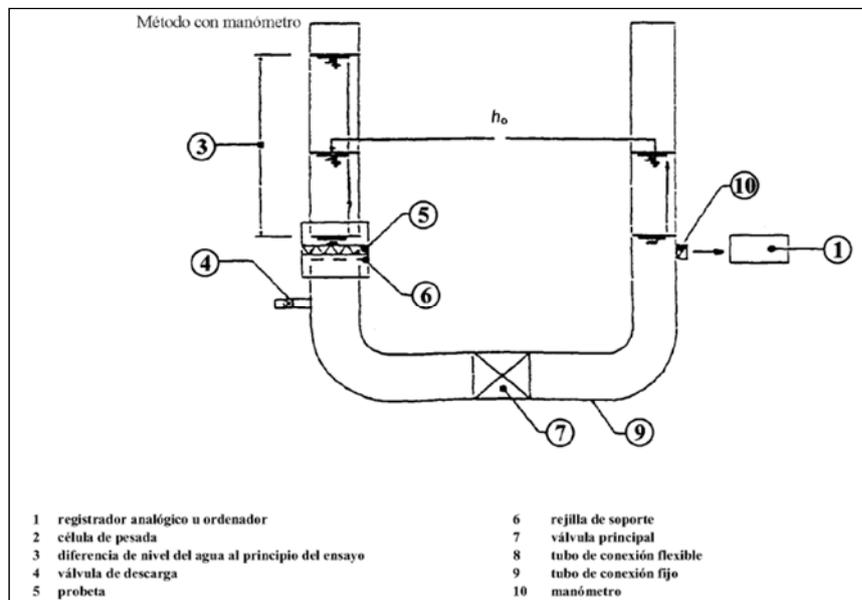
Tipo de agua empleada: Almacenada

Rango real de temperaturas del agua: 20,5°C-20,9°C.

Descripción del equipo empleado: Equipo de permeabilidad perpendicular al plano sin carga LAGUC E-003 (ENSA 3HL8-200) (Ver figura adjunta).

Tipo de velocímetro: sensor de presión TPR-16/LP conectado a un registrador de datos

Oxígeno disuelto: 8,84 mg /L < 10,0 mg/L



Resultados obtenidos:

Consideraciones previas:

Se han ensayado 5 probetas calculando para cada una de ellas los valores de índice de velocidad a una pérdida de carga de 50 mm ($V_{H=50}$). Los valores de índice de velocidad se han corregido por el efecto de la temperatura. A continuación se muestra una tabla con los valores individuales del citado índice de velocidad, el valor medio, el máximo y el mínimo.

Probeta Nº	$V_{H=50}$ (mm/s)
1	44,2
2	48,3
3	45,3
4	40,6
5	38,5
PROMEDIO	43,4
s	3,9
MAX	48,3
MIN	38,5

Índice de Velocidad para carga hidráulica de 50mm a 20°C (con su incertidumbre):

$$V_{H=50} = 43,4 \text{ mm/s} \pm 3,0 \text{ mm/s}$$

La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,01$ en base a una distribución t de Student con 274 grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

(*) Los resultados sólo se refieren a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la incertidumbre propia del método de ensayo.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García y Diego Carrera (en formación)

Fecha de inicio del ensayo: 23/7/2020 10:15 H

Fecha de finalización del ensayo: 23/7/2020 10:50 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 19/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

GEOTEXTILES. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD AL AGUA PERPENDICULAR AL PLANO (UNE-EN ISO 11058:2010)

Informe de Ensayo

Información general:

Datos del cliente:

Cliente:	ETSI Caminos, Canales y Puertos
Dirección:	Avda. Los Castros, 44 39005 Santander, Cantabria
Persona de contacto:	Diego Carrera Pérez
Teléfono:	648 157 327
Fax	

Nº de Expediente: EXP20028

Nº de Informe: 201479

Norma de ensayo: UNE-EN ISO 11058:2010

Método: Altura de carga variable decreciente

Identificación del material ensayado (LAGUC): EXP20028-3.

Identificación del material ensayado (Cliente): Geospuma OASIS

Descripción del material: Geospuma de polímero expandido color verde

Forma y dimensiones de las probetas: probetas circulares de 55 mm de diámetro.

Número de probetas ensayadas: 5

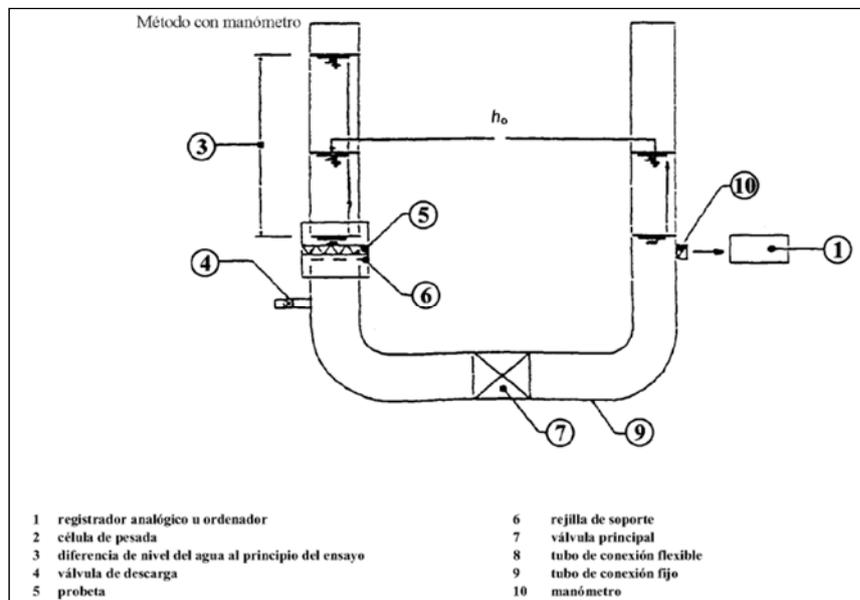
Tipo de agua empleada: Almacenada

Rango real de temperaturas del agua: 19,5°C-20,4°C.

Descripción del equipo empleado: Equipo de permeabilidad perpendicular al plano sin carga LAGUC E-003 (ENSA 3HL8-200) (Ver figura adjunta).

Tipo de velocímetro: sensor de presión TPR-16/LP conectado a un registrador de datos

Oxígeno disuelto: 8,84 mg /L < 10,0 mg/L



Resultados obtenidos:

Consideraciones previas:

Se han ensayado 5 probetas calculando para cada una de ellas los valores de índice de velocidad a una pérdida de carga de 50 mm ($V_{H=50}$). Los valores de índice de velocidad se han corregido por el efecto de la temperatura. A continuación se muestra una tabla con los valores individuales del citado índice de velocidad, el valor medio, el máximo y el mínimo.

Probeta Nº	$V_{H=50}$ (mm/s)
1	7,4
2	6,5
3	7,0
4	7,5
5	7,0
PROMEDIO	7,1
s	0,4
MAX	7,5
MIN	6,5

Índice de Velocidad para carga hidráulica de 50mm a 20°C (con su incertidumbre):

$$V_{H=50} = 7,1 \text{ mm/s} \pm 0,7 \text{ mm/s}$$

La incertidumbre ha sido calculada con un factor de cobertura $k=2,00$ en base a una distribución t de Student con $1,9E06$ grados de libertad que corresponde a un intervalo de confianza aproximado del 95%.

Observaciones:

(*) Los resultados sólo se refieren a las probetas ensayadas.

(**) Las incertidumbres de los resultados incluyen tanto la variabilidad del material, dependiente de la desviación típica de dichos resultados, como la incertidumbre propia del método de ensayo.

Ensayo realizado por: Jaime Carpio García y Diego Carrera (en formación)

Fecha de inicio del ensayo: 24/7/2020 9:10 H

Fecha de finalización del ensayo: 24/7/2020 10:00 H

Fecha de emisión del informe de ensayo: 19/8/2020

*****FIN DE INFORME DE ENSAYO*****

NOTA:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita de LAGUC.
- La Universidad de Cantabria y la Fundación Leonardo Torres Quevedo no asumirán ninguna responsabilidad frente a terceros y serán totalmente ajenas a litigios derivados de la utilización de los resultados de los trabajos.

Fecha de emisión del informe de expediente: 26/8/2020

**VºBº del
Técnico:**

**VºBº del
Directora Técnica del Laboratorio:**

Jaime Carpio García

Elena Blanco Fernández



CONFORMIDAD AL TRABAJO FIN DE MASTER MASTER EN INGENIERIA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Nombre y Apellidos: Diego Carrera Pérez

D.N.I.: 71527590-M

Título del TFM: "Estudio de las propiedades de las cubiertas verdes con el objetivo de mejorar la resiliencia de las ciudades"

Título del TFM (en inglés): "Study of the properties of the green roofs with the aim of improving the resilience of cities"

Mención: _____

Área de conocimiento: _____

Convocatoria: _____

Director/es: Ignacio Lombillo Vozmediano

Jaime Carpio García

Idioma en Acto de Defensa (Español – Inglés): Español

Comentarios sobre el desarrollo del TFM:

TFM con aportación original, destaca por su enfoque teórico-práctico, sustentado en una completa revisión bibliográfica, el desarrollo de múltiples y variados ensayos de laboratorio y empleo de herramientas multicriterio para la toma de decisiones.

El alumno ha destacado por su tesón y diligencia a lo largo de todo el desarrollo de los trabajos, cualidades que le han permitido culminar con éxito las tareas planificadas a pesar de que las mismas se han visto afectadas por la coyuntura existente.

EL/LOS DIRECTOR/ES Y LA COMISIÓN DE TFM DAN SU CONFORMIDAD A LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO ARRIBA MENCIONADO, PARA QUE SEA DEFENDIDO ANTE EL TRIBUNAL CORRESPONDIENTE.

DIRECTOR/ES	COMISIÓN TFM
 	
14 de octubre de 2020	FECHA Y FIRMA