

# CUBIERTAS VERDES: ¿CÓMO? ¿DÓNDE? ¿POR QUÉ? MANUAL



*GREENO2 - Green Roofs in higher education institutions as sustainable cEnters for research, participation, ENvironmental consciousness and O2 generation*

**CUBIERTAS VERDES: ¿CÓMO? ¿DÓNDE? ¿POR QUÉ?**  
**MANUAL**

Desarrollado con Erasmus+ KA220 HED Project

**GREENO2 - Green Roofs in higher education institutions as sustainable cEnters for  
research, participation,  
ENVIRONMENTAL consciousness and O2 generation**

**2023-1-IT02-KA220-HED-000156281**

**Autores:**

**Andrea Colantoni, Giorgio Scavino, Andrea Petroselli, Rafaele Pelorosso, Francisco José Sánchez de la Flor, Vitaliy Kornieiev, Bogdana Nosova, Yurii Bondar, Anastasiia Volobuieva, Hanna Renska, Liudmyla Fedorchuk, Vyacheslav Ryabichev, Katarzyna Szyszko-Podgórska, Krystian Chołaszczński, Przemyslaw Pawlak, Paweł Łagoda, Sophia Messini, Yannis Skarpelos, Vassilis Bokolas, Dimitra Sitareniou, Maria Papadopoulou**

***Descargo de responsabilidad***

Esta publicación ha sido elaborada con la cofinanciación de la Comisión Europea (a través del programa ERASMUS, contrato n.º 2023-1-IT02-KA220-HED-000156281). El contenido es responsabilidad exclusiva del consorcio "GREENO2" y no puede considerarse como una expresión de las opiniones de la Comisión Europea.

**Imágenes de la portada (de arriba a la izquierda a abajo a la derecha):**

*Universidad de Denver: un techo verde que aporta belleza y beneficios ecológicos a la comunidad; techos verdes experimentales en Ingeniería, Universidad de Bolonia; claustro de la Universidad de Tuscia; Universidad de Tecnología de Delft, por Mecanoo Architecten, en Delft (Países Bajos); techo verde del Liceo Científico Keplero en Roma; techo verde del Departamento de Agricultura de la Universidad de Catania.*

**Edición: mayo 2025**

**© GREENO2, 2025**

Green Roofs in higher education institutions as sustainable cEnters for research,  
participation, ENvironmental consciousness and O2 generation

## **CUBIERTAS VERDES: ¿CÓMO? ¿DÓNDE? ¿POR QUÉ?**

### **MANUAL**

#### **ÍNDICE**

1. Cubiertas verdes: una premisa .....	5
2. Cubiertas verdes: introducción y estado del arte.....	10
3. Ventajas ambientales .....	14
4. Clasificación de las cubiertas verdes .....	16
5. Estructura de las cubiertas verdes.....	21
6. Elementos estructurales en detalle.....	23
7. Legislación sobre cubiertas verdes.....	27
8. Vegetación para las cubiertas verdes.....	31
9. Cubiertas verdes y aislamiento térmico de los edificios .....	33
10. Cubiertas verdes 5.0: contra el cambio climático .....	38
11. GREENO2 Casos de Estudios .....	46
12. Dimensiones comunicativas del concepto de cubierta verde en el discurso social: una perspectiva desde Ucrania .....	65
13. Referencias .....	75

***Cubiertas verdes como ecosoluciones modernas:  
una serie de entrevistas con expertos grabadas en el marco del  
Proyecto GREENO2 (Erasmus+ KA220 HED)***

1. **Andrea Colantoni**  
Profesor Asociado, Departamento de Ciencias Agrícolas y Forestales,  
Universidad de Tuscia (Italia)  
<https://www.youtube.com/watch?v=Go8VyDdpfYo&t=63s>
2. **Antonis Mavropoulos**  
Director General de “D-Waste” (Grecia)  
<https://www.youtube.com/watch?v=0hH-wWW4DBQ>
3. **Maria Meng-Papantoni**  
Vicerrectora de Asuntos Académicos e Internacionales, Profesora de Derecho Empresarial Europeo, Departamento de Estudios Internacionales, Europeos y Regionales, Universidad Panteion de Ciencias Sociales y Políticas (Grecia)  
<https://www.youtube.com/watch?v=07yAA1vVEis>
4. **Yannis Skarpelos**  
Profesor de Estudios de Cultura Visual, Departamento de Comunicación, Medios y Cultura, Decano de la Facultad de Estudios Internacionales, Comunicación y Cultura, Universidad Panteion de Ciencias Sociales y Políticas (Grecia)  
<https://www.youtube.com/watch?v=81WMcJUSmnk>
5. **Lamprini Tasoula**  
Agrónoma, Doctora, Investigadora, Universidad Agrícola de Atenas (Grecia)  
[https://www.youtube.com/watch?v=\\_jF2bjHXkOE](https://www.youtube.com/watch?v=_jF2bjHXkOE)
6. **Konstantinos Tatsis**  
Ingeniero Agrónomo, Máster, “Topio Domi Landscape Solutions” (Grecia)  
<https://www.youtube.com/watch?v=Lpfl0P4JBo4&t=114s>
7. **Página web del proyecto GREENO2**  
<https://greeno2.eu>

## 1. Cubiertas verdes: una premisa

Las cubiertas verdes (GR, por sus siglas en inglés) han surgido como una solución pionera a los numerosos desafíos medioambientales, transformando los paisajes urbanos en toda Europa (Oberndorfer et al., 2007). En los últimos años, se ha observado un aumento en la adopción de cubiertas verdes en Europa, impulsado por una confluencia de factores, entre ellos la necesidad urgente de mitigar el cambio climático, mejorar la biodiversidad urbana, optimizar la calidad del aire y gestionar la escorrentía de aguas pluviales (Comisión Europea, 2020). Esta innovación ecológica consiste en la instalación de sistemas vegetales sobre edificaciones, transformando efectivamente tejados áridos en ecosistemas prósperos. Si bien el concepto de las cubiertas verdes se remonta a tiempos antiguos, los avances modernos en tecnología, materiales y diseño han posicionado a Europa a la vanguardia de esta transformación ecológica urbana.

En el centro del proyecto GREENO2 se encuentra la necesidad de amplificar su impacto y alcance. Esto exige un esfuerzo conjunto para involucrar a los actores clave y al público en general, fomentando una comprensión profunda, alentando la participación activa y, en última instancia, impulsando acciones hacia la sostenibilidad y la adopción de tecnologías de cubiertas verdes. A través de iniciativas colaborativas, programas educativos y una comunicación transparente, el proyecto GREENO2 busca crear una comunidad cohesionada dedicada al desarrollo de infraestructuras verdes y a la promoción de un urbanismo ambientalmente responsable.

Uno de los principales impulsores de la amplia aceptación de las cubiertas verdes en Europa son sus incomparables beneficios medioambientales. Aprovechando el poder de la naturaleza, las cubiertas verdes actúan como aislantes naturales, reduciendo el consumo energético para calefacción y refrigeración de los edificios. Esto no solo se traduce en ahorros significativos para los propietarios, sino que también contribuye a la disminución de emisiones de carbono, alineándose así con los ambiciosos objetivos climáticos de la Unión Europea. Además, las cubiertas verdes constituyen una herramienta clave para combatir el efecto isla de calor urbana, especialmente notable en ciudades densamente pobladas. Al absorber y disipar la radiación solar, ayudan a mitigar los extremos de temperatura, promoviendo un entorno urbano más cómodo y sostenible para los residentes.

Asimismo, las cubiertas verdes desempeñan un papel crucial en la promoción de la biodiversidad y la preservación de ecosistemas frágiles en áreas urbanas. Estos oasis verdes proporcionan hábitat y fuentes de alimento para una amplia variedad de especies vegetales y animales, incluyendo

polinizadores como abejas y mariposas. A medida que los hábitats tradicionales siguen disminuyendo debido a la urbanización y la fragmentación del territorio, las cubiertas verdes se presentan como un salvavidas para la fauna, facilitando la formación de comunidades ecológicas prósperas en medio del entorno construido. En reconocimiento a su valor ecológico, muchas ciudades europeas han implementado políticas e incentivos - desde subvenciones económicas hasta mandatos regulatorios - que fomentan la adopción generalizada de cubiertas verdes.

Más allá de los beneficios ambientales, las cubiertas verdes ofrecen también una variedad de ventajas sociales y económicas cada vez más valoradas por las comunidades europeas. Además de su atractivo estético, permiten actividades recreativas, agricultura urbana y huertos comunitarios, fortaleciendo el vínculo de los ciudadanos con la naturaleza. También pueden incrementar el valor de las propiedades, atraer inquilinos y mejorar la habitabilidad de los edificios, contribuyendo así a la revitalización económica de áreas urbanas. En un contexto de urbanización acelerada y crecimiento poblacional, las cubiertas verdes se presentan como una solución escalable y rentable para construir ciudades sostenibles, resilientes y vibrantes.

Para aprovechar plenamente el potencial de las cubiertas verdes, investigadores, arquitectos y responsables políticos europeos han estado activamente comprometidos con el desarrollo y la implementación de tecnologías y prácticas innovadoras. Numerosas iniciativas de investigación, proyectos piloto y estudios demostrativos se han llevado a cabo para evaluar su rendimiento, viabilidad y costo-efectividad en distintas regiones climáticas y tipos de edificios. Gracias a la colaboración interdisciplinaria y el intercambio de conocimientos, Europa se ha consolidado como un centro de innovación en el diseño de cubiertas verdes, con una abundante oferta de soluciones vanguardistas y buenas prácticas en circulación.

Un área destacada de innovación es el desarrollo de sistemas modulares y pre-vegetales, que simplifican el proceso de instalación y reducen los requerimientos de mantenimiento. Estos módulos “plug-and-play” están diseñados para ser ligeros, duraderos y fáciles de instalar, lo que los hace adecuados tanto para la rehabilitación de edificios existentes como para su integración en nuevas construcciones. Además, los avances en la formulación de sustratos, la selección de plantas y las técnicas de riego han permitido desarrollar cubiertas más resilientes frente a factores de estrés ambiental como sequías, temperaturas extremas y contaminación del aire.

Otra tendencia clave en la evolución de las cubiertas verdes es la integración de tecnologías inteligentes y enfoques basados en datos para optimizar su rendimiento y maximizar sus beneficios. Gracias al uso de sensores, actuadores y plataformas de internet de las cosas (IoT), las cubiertas verdes

pueden ser monitoreadas y gestionadas en tiempo real de manera remota, lo que permite intervenciones oportunas y estrategias de gestión adaptativa. Por ejemplo, los sistemas de riego automatizados pueden ajustar sus horarios en función de las previsiones meteorológicas y los niveles de humedad del suelo, asegurando un uso eficiente del agua y promoviendo la salud de las plantas. De manera similar, las cubiertas equipadas con estaciones meteorológicas y sensores de calidad del aire pueden aportar datos valiosos para la investigación y la planificación urbana.

Cada vez se reconoce más la importancia de la colaboración interdisciplinaria y la participación de los interesados en la planificación, el diseño y la implementación de estos proyectos. Al incluir a profesionales de diversos campos - arquitectos, ingenieros, paisajistas, ecólogos, responsables políticos y miembros de la comunidad -, los proyectos de cubiertas verdes se benefician de un enfoque holístico e inclusivo que aborda la complejidad de los factores sociales, económicos y medioambientales. Los procesos de diseño participativo, los talleres comunitarios y las consultas a los interesados se utilizan cada vez más para garantizar que los proyectos respondan a las necesidades y aspiraciones locales, lo que mejora su sostenibilidad y resiliencia a largo plazo.

De cara al futuro, el panorama para las cubiertas verdes en Europa es muy prometedor, en la medida en que las ciudades sigan adoptando enfoques sostenibles y regenerativos para su desarrollo. A medida que se intensifica la urgencia del cambio climático y se reconocen cada vez más los beneficios de estas soluciones, se espera que su adopción continúe creciendo exponencialmente dentro y fuera de Europa. Con los avances tecnológicos continuos, el respaldo normativo y una mayor conciencia pública, las cubiertas verdes están llamadas a desempeñar un papel fundamental en la configuración de las ciudades del mañana, donde naturaleza y vida urbana coexisten en armonía, generando comunidades más saludables, resilientes y equitativas para las generaciones futuras.

Para resumir los factores que influyen en la implementación de cubiertas verdes entre los distintos actores del entorno urbano, la Tabla 1 proporciona una recopilación de impulsores, motivaciones y barreras.

**Tabla 1. Factores que influyen en la implementación de cubiertas verdes entre diversos actores involucrados (Fuente: Zhang y He, 2021)**

Drivers, motivations and barriers to green roof implementation among different groups of stakeholders.

	Designer	Engineer	Constructors and builders	Contractor	Building operator	Owner	End-user	Government agent
<b>Drivers</b>								
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓		✓	✓	✓	✓		✓
3	✓	✓	✓	✓	✓			✓
<b>Motivations</b>								
4	✓	✓			✓		✓	✓
5	✓	✓						✓
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓					✓	✓
8	✓	✓					✓	✓
9	✓	✓					✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
11	✓	✓					✓	✓
12	✓	✓		✓				✓
13	✓	✓					✓	✓
14	✓	✓		✓	✓	✓		✓
15			✓	✓	✓			✓
<b>Barriers</b>								
16	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
17	✓	✓	✓		✓			
18	✓			✓		✓	✓	✓
19	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓

Note : 1. Policy pressure, 2. Market pressure, 3. Innovation and technology advancement, 4. Energy efficiency, 5. Urban heat island mitigation, 6. Roof longevity prolongation, 7. Air purification, 8. Runoff control, 9. Water purification, 10. Urban infrastructure improvement, 11. Sound insulation and noise reduction, 12. Biodiversity increase 13. Recreation and aesthetics, 14. Property value enhancement, 15. Employment improvement, 16. Lack of government policy, 17. Unsound technological level, 18. Unsound economic benefit assessment, 19. Individual unwillingness.

Aprovechando el espacio existente sobre los edificios, la integración de cubiertas verdes puede desempeñar un papel fundamental en el apoyo a la transición de las ciudades hacia la circularidad y la resiliencia. Estas cubiertas ofrecen una gran variedad de servicios ecosistémicos, funcionando como unidades versátiles y descentralizadas. Para aprovechar plenamente estos beneficios, es esencial incorporar y replicar de manera efectiva las cubiertas verdes en el paisaje urbano, considerando distintas configuraciones del sistema en función de los desafíos particulares que enfrenta cada ciudad, incluidos los edificios universitarios.

Para implementar exitosamente las cubiertas verdes, es crucial: (i) identificar y superar las barreras, (ii) establecer normas para garantizar la fiabilidad, (iii) definir e implementar políticas, incentivos y estrategias, (iv) aprovechar el potencial de las organizaciones que ofrecen servicios basados en soluciones basadas en la naturaleza (NBS, por sus siglas en inglés), y (v) promover la concienciación y la divulgación, incluyendo inversiones en educación.

Este enfoque integral garantiza que los edificios universitarios, además de otras estructuras urbanas, no solo contribuyan significativamente a la implementación y éxito de las cubiertas verdes en la promoción de entornos urbanos circulares y resilientes, sino que también sirvan como plataformas



para la concienciación de estudiantes y la sociedad en general, así como para la experimentación e innovación en soluciones sostenibles (Calheiros y Stefanakis, 2021).

## 2. Cubiertas verdes: introducción y estado del arte

Las cubiertas verdes (GR, por sus siglas en inglés) se presentan como soluciones basadas en la naturaleza (NBS) complejas y cuidadosamente diseñadas para proporcionar una amplia gama de beneficios ecosistémicos en entornos urbanos o periurbanos. Su importancia radica en su profunda capacidad para reducir la escorrentía, aliviando así la presión sobre los sistemas de drenaje, al tiempo que mitigan el efecto isla de calor urbana y conservan energía (Krauze y Wagner, 2018; Pelorosso et al., 2017). A pesar del amplio conjunto de beneficios asociados a las GR, con frecuencia no se diseñan para alcanzar todo su potencial (Cook et al., 2021). Además, las guías de diseño existentes, como las propuestas por Losken et al. (2018), a menudo se enfocan en aspectos como la vegetación y las características del sustrato con el fin de minimizar la carga estructural, el mantenimiento y el costo, descuidando en ocasiones si estas recomendaciones realmente se traducen en servicios ecosistémicos tangibles.

Los sedums, como plantas suculentas comunes, dominan la vegetación de las GR en la región mediterránea. Sin embargo, numerosos estudios han revelado que, en algunos casos, su capacidad de retención de escorrentía es similar a la del suelo desnudo y que ofrecen efectos de enfriamiento menores en comparación con otras especies y soluciones (Cook et al., 2021; He et al., 2022; Rocha et al., 2021). Por ejemplo, en climas mediterráneos, los techos fríos pueden presentar una relación costo-beneficio ligeramente más favorable que las GR en cuanto a capacidad de enfriamiento y reducción del efecto isla de calor urbana durante los períodos cálidos (Cook et al., 2021). De hecho, investigaciones recientes de Cuthbert et al. (2022) subrayan los desafíos que enfrentan las NBS para abordar simultáneamente el efecto isla de calor y los problemas de inundaciones urbanas en la mayoría de las ciudades. En regiones áridas, el riego se vuelve indispensable para la supervivencia de la vegetación, promoviendo así el enfriamiento. Además, se prevé que la variabilidad en la precipitación inducida por el cambio climático pueda perjudicar el rendimiento de las GR con capas delgadas de suelo frente a aquellas con sustratos más profundos y/o sistemas de almacenamiento de agua.

El agua surge como un factor clave que influye en el desempeño de las GR (Pelorosso et al., 2021). Su carácter indispensable para la supervivencia vegetal, junto con la evaporación que se produce en las cubiertas vegetadas durante condiciones calurosas y secas, convierte a la vegetación en un agente de enfriamiento más eficaz en comparación con otros tipos de cubiertas. Cabe destacar que los flujos

de calor latente y sensible se entrelazan con los procesos de evaporación, y una mayor evaporación atenúa el impacto del efecto isla de calor. Además, a mayor profundidad del sustrato y cobertura vegetal, mayor es la capacidad de una GR para interceptar el agua. A su vez, períodos más cortos de escasez hídrica favorecen el crecimiento de una mayor diversidad de especies vegetales, lo que genera paisajes eco-urbanos más variados y estéticamente atractivos. Un sistema de GR bien estructurado alberga vegetación saludable y estable, capaz de regenerar espacios subutilizados o degradados, fomentando la sociabilidad y regulando las partículas en suspensión del aire. No obstante, el agua también presenta desafíos: el manejo inadecuado de aguas pluviales contribuye a inundaciones pluviales y al desbordamiento de los sistemas de drenaje, lo que resalta la importancia de optimizar la infiltración y el almacenamiento en los procesos hidrológicos de las GR para mitigar estos problemas.

El desempeño hidrológico de las GR abarca tanto la retención como la detención. La retención se refiere a la capacidad de una GR para almacenar el agua de lluvia, que normalmente se pierde por evapotranspiración. Aunque el agua retenida puede almacenarse durante largos períodos, el control por parte del usuario sobre su liberación y reutilización es limitado. Por otro lado, la detención implica la capacidad de una GR para almacenar temporalmente el agua de lluvia con el fin de reducir o retrasar los picos de escorrentía. Esta agua puede ser liberada posteriormente en momentos oportunos por los usuarios, facilitando una gestión efectiva del agua y el control del escurrimiento (Li y Liu, 2023; Stovin et al., 2017). El agua almacenada puede ser aprovechada por la vegetación de la GR o para otros usos dentro del edificio (por ejemplo, para sistemas sanitarios o riego).

La capacidad reguladora del agua de las GR está influida por diversos factores de diseño (por ejemplo, tipo de sustrato, profundidad, especies vegetales), y por factores meteorológicos como la precipitación y la evaporación, que desempeñan un papel clave en la definición de las condiciones de humedad del suelo antes de los eventos meteorológicos (Cook et al., 2021). Por tanto, las tasas de retención de agua de las GR están marcadamente condicionadas por las especificidades del clima local (Cuthbert et al., 2022; Wong y Jim, 2015; Yan et al., 2022). En este sentido, una estrategia de resiliencia basada en la simulación continua de datos adquiere una importancia crucial, en contraste con un diseño basado en eventos que se apoya en supuestos de períodos de retorno seleccionados (Pons et al., 2022; Pumo et al., 2023a,b). No obstante, son necesarios esfuerzos coordinados para avanzar hacia una planificación basada en el rendimiento de las GR, lo cual requiere un análisis integral de las propiedades del diseño frente a distintos objetivos funcionales (Pelorosso, 2020). Dada la complejidad de las evaluaciones, la optimización de las características clave de las GR se convierte

en una prioridad para lograr implementaciones rentables, especialmente ante los cambios en los regímenes de escorrentía ocasionados por la urbanización. Además, consideraciones relacionadas con la circularidad de los recursos y la resiliencia hidrológica subrayan la importancia del reúso del agua y de la estimación del volumen de aguas pluviales almacenables en la planificación estratégica y el diseño de intervenciones con GR y del desarrollo más amplio de las NBS.

Considerando los elevados costos que implica la recopilación de datos empíricos para evaluar soluciones específicas, la modelización se presenta con frecuencia como una alternativa viable para simular el comportamiento hidrológico e hidráulico de las GR (Jeffers et al., 2022; Liu et al., 2021; Pelorosso et al., 2021). Los modelos se basan en relaciones analíticas entre los componentes de las GR y los sistemas urbanos, lo que permite realizar predicciones mediante la manipulación de los factores de entrada. Existen diversos enfoques y herramientas para simular el desempeño hidrológico e hidráulico de las GR. Si bien los modelos empíricos basados en el número de curva y el coeficiente de escorrentía son relativamente sencillos, los modelos numéricos como HYDRUS-1D, MIKE URBAN, SWMM y SWAP son comúnmente utilizados para simular eventos únicos o lluvias a largo plazo (Jeffers et al., 2022; Liu et al., 2021; Pelorosso et al., 2021). La variabilidad de los parámetros facilita la simulación de escenarios útiles para evaluar el rendimiento de los sistemas y apoyar las decisiones de diseño y planificación (Pelorosso, 2020). No obstante, los modelos presentan algunas limitaciones, particularmente en relación con su complejidad y necesidad de calibración. Muchos de sus parámetros son difíciles de definir o requieren mediciones in situ, lo que complica la calibración. Por el contrario, los datos empíricos pueden ser fundamentales para establecer relaciones entre el rendimiento hidrológico y ciertos indicadores vinculados al diseño y a factores climáticos (Li y Liu, 2023; Pumo et al., 2023a,b). A pesar de ello, los estudios experimentales siguen siendo indispensables para comprender de forma integral el comportamiento de las GR en condiciones hidrometeorológicas específicas de cada sitio.

## 2.1 Superar las barreras para la implementación de cubiertas verdes: estrategias y soluciones

Las principales barreras para la implementación de soluciones de cubiertas verdes incluyen los altos costos iniciales de diseño e instalación, así como los posibles costos operativos continuos. No obstante, existen soluciones innovadoras, como las cubiertas verdes extensivas que utilizan plantas autóctonas y resistentes a la sequía, las cuales requieren un mantenimiento mínimo. Otras tecnologías, como la aeroponía —que permite que las plantas crezcan con las raíces suspendidas en el aire y se rocíen periódicamente con nutrientes— pueden reducir aún más las necesidades de mantenimiento y mejorar la eficiencia en el uso del agua.

La falta de conocimientos técnicos entre los profesionales y la formación insuficiente representan obstáculos adicionales, junto con normativas de construcción que no siempre están actualizadas para facilitar este tipo de soluciones. La escasa concienciación sobre los beneficios a largo plazo de las cubiertas verdes entre propietarios y promotores reduce la demanda, lo cual se ve agravado por las condiciones climáticas extremas en algunas regiones que dificultan el cultivo vegetal. Además, no todos los edificios existentes pueden soportar el peso adicional sin modificaciones estructurales costosas.

Aunque las cubiertas verdes ofrecen beneficios económicos y medioambientales a largo plazo —como el ahorro energético y la gestión de aguas pluviales—, dichas ventajas no son inmediatamente evidentes, lo que desincentiva las inversiones iniciales. Superar estas barreras requiere incentivos financieros, actualizaciones normativas, programas de formación y concienciación, así como la promoción de la investigación sobre los beneficios de las cubiertas verdes.

Para superar los obstáculos en la implementación de cubiertas verdes, se requiere un enfoque multifacético. Los incentivos financieros, como subvenciones, exenciones fiscales y ayudas económicas, pueden contribuir a compensar los altos costos iniciales de instalación y diseño. La actualización de las normativas de edificación para incluir directrices y estándares sobre cubiertas verdes facilitará su implementación y fomentará su adopción.

Invertir en programas de formación y capacitación para arquitectos, ingenieros y constructores reforzará la experiencia técnica necesaria para diseñar y mantener cubiertas verdes de forma eficaz. Sensibilizar al público sobre los beneficios económicos y medioambientales a largo plazo de estas

soluciones, a través de campañas e iniciativas informativas, puede aumentar la demanda y el respaldo social.

Asimismo, promover la investigación y la innovación en tecnologías de bajo mantenimiento, como la aeroponía y el uso de plantas resistentes a la sequía, puede reducir aún más los costos de mantenimiento y mejorar la viabilidad de las cubiertas verdes en distintos contextos climáticos. La colaboración entre organismos gubernamentales, actores del sector industrial e instituciones académicas es esencial para impulsar estas iniciativas y crear un ecosistema favorable para los proyectos de cubiertas verdes.

### 3. Ventajas ambientales

Las cubiertas verdes, también conocidas como techos vivos o techos vegetales, representan un enfoque revolucionario en la infraestructura urbana que ofrece una gran cantidad de ventajas medioambientales en comparación con las cubiertas tradicionales. A la cabeza de estos beneficios se encuentra la mitigación del efecto isla de calor urbana (UHI, por sus siglas en inglés). Las cubiertas tradicionales, a menudo compuestas por materiales como asfalto o alquitrán, absorben y retienen el calor, contribuyendo al aumento de las temperaturas en las zonas urbanas. En cambio, las cubiertas verdes actúan como aislantes naturales, absorbiendo la radiación solar y utilizándola en la fotosíntesis, reduciendo así las temperaturas de la superficie y disminuyendo la temperatura del aire circundante a través de la evapotranspiración. Este efecto de enfriamiento no solo crea entornos urbanos más cómodos y habitables, sino que también reduce la dependencia del aire acondicionado intensivo en energía durante los meses cálidos, lo que conlleva una disminución del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a los sistemas de refrigeración. Al mitigar el efecto UHI, las cubiertas verdes también contribuyen a reducir los impactos del cambio climático, ya que las temperaturas elevadas intensifican la frecuencia y severidad de las olas de calor, las cuales pueden tener consecuencias graves para la salud y el bienestar humanos.

Además, las cubiertas verdes desempeñan un papel fundamental en la mejora de la calidad del aire al capturar contaminantes atmosféricos y partículas en suspensión. Las capas de vegetación y sustrato actúan como filtros naturales, atrapando contaminantes y absorbiendo dióxido de carbono mediante la fotosíntesis. Este proceso de filtración natural ayuda a purificar el aire, reduciendo la concentración de sustancias nocivas y mejorando la calidad del aire en general. En las zonas urbanas, donde los

niveles de contaminación suelen ser elevados debido al tráfico y las actividades industriales, las cubiertas verdes representan una solución sostenible para mitigar la contaminación del aire y proteger la salud pública. Al crear entornos urbanos más limpios y saludables, contribuyen a reducir la incidencia de enfermedades respiratorias y otros problemas de salud relacionados con la exposición a contaminantes atmosféricos.

Adicionalmente, las cubiertas verdes ofrecen un hábitat valioso y oportunidades de alimentación para polinizadores como abejas, mariposas y aves. La diversidad de especies vegetales presentes en estos techos favorece la biodiversidad y promueve la conectividad ecológica en los entornos urbanos, ayudando a conservar especies de flora y fauna nativas y a contrarrestar la pérdida de hábitat causada por la urbanización. En ciudades densamente pobladas, donde los espacios verdes son escasos, las cubiertas verdes se convierten en refugios importantes para la vida silvestre y contribuyen a preservar la biodiversidad urbana. Al favorecer a los polinizadores y otros insectos beneficiosos, las cubiertas verdes también desempeñan un papel crucial en la prestación de servicios ecosistémicos como la polinización y el control biológico de plagas, esenciales para mantener ecosistemas sanos y la productividad agrícola.

Asimismo, las cubiertas verdes actúan como barrera contra la contaminación acústica, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas, donde el ruido constituye una fuente importante de estrés y malestar para los residentes. Las capas de sustrato, vegetación y otros elementos naturales presentes en las cubiertas verdes absorben y desvían las ondas sonoras, reduciendo la transmisión del ruido exterior hacia el interior de los edificios y creando espacios interiores más tranquilos y confortables. Este aislamiento acústico no solo mejora la calidad de vida de los residentes y trabajadores en entornos urbanos, sino que también favorece la salud mental y el bienestar al disminuir los efectos negativos del ruido sobre el sueño, la concentración y el confort general.

Además de sus beneficios para la calidad del aire, la biodiversidad y la reducción del ruido, las cubiertas verdes desempeñan un papel fundamental en la gestión de las aguas pluviales, uno de los principales desafíos en las zonas urbanas. Las capas de vegetación y sustrato absorben el agua de lluvia y ralentizan su liberación hacia el sistema de drenaje, lo que reduce el volumen y la velocidad de la escorrentía. Este proceso natural de retención y filtración del agua ayuda a aliviar la presión sobre la infraestructura pluvial, disminuye el riesgo de inundaciones y erosión, y protege la calidad del agua al reducir la cantidad de contaminantes que llegan a los cuerpos hídricos. Además, al capturar y almacenar agua de lluvia, las cubiertas verdes contribuyen a la recarga de los acuíferos y a reducir

el riesgo de sequía y escasez de agua en entornos urbanos, especialmente en regiones propensas a este tipo de fenómenos.

La realización de comunidades carbono neutrales puede lograrse mediante la adopción de cubiertas verdes y otras Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS, por sus siglas en inglés). Las cubiertas verdes son eficaces para reducir el consumo energético de los edificios y capturar carbono atmosférico. Aunque se están desarrollando directrices y políticas de apoyo a la implementación de las NBS a escala urbana, la evaluación cuantitativa de la contribución específica de las cubiertas verdes a la neutralidad de carbono en toda la ciudad presenta desafíos. Estas dificultades surgen por la incertidumbre en los datos de entrada, los métodos de cuantificación y las discrepancias en las conclusiones de los estudios, derivadas de diferencias en escalas temporales y espaciales (Xiao et al., 2023).

En resumen, las cubiertas verdes ofrecen un enfoque integral y sostenible para la infraestructura de techado urbano que proporciona numerosos beneficios medioambientales: desde la mitigación del efecto isla de calor urbana y la mejora de la calidad del aire, hasta el fomento de la biodiversidad, la gestión de aguas pluviales y la reducción de la contaminación acústica. A medida que las ciudades continúan enfrentando los desafíos de la urbanización, el cambio climático y la degradación ambiental, las cubiertas verdes representan una solución prometedora para la creación de entornos urbanos más saludables, resilientes y sostenibles, tanto para las generaciones actuales como para las futuras.

## 4. Clasificación de las cubiertas verdes

Las cubiertas verdes representan una categoría versátil y dinámica de sistemas de techado, que ofrecen una gran variedad de beneficios para los entornos urbanos. Estas cubiertas pueden clasificarse de múltiples formas según diversos criterios como el diseño, el tipo de vegetación o su función. Un método de clasificación común las divide en tres tipos principales: extensivas, semi-intensivas e intensivas (véase Tabla 2).

Las cubiertas verdes extensivas se caracterizan por su construcción ligera y una profundidad de sustrato reducida, que generalmente oscila entre 5 y 15 centímetros (2 a 6 pulgadas). Están diseñadas específicamente para albergar vegetación de bajo crecimiento y resistente a la sequía, como sedums, musgos y gramíneas. Debido a su escasa profundidad de suelo y bajos requerimientos de mantenimiento, estas cubiertas son frecuentemente elegidas por su rentabilidad y facilidad de

instalación. A pesar de su simplicidad, ofrecen varios beneficios medioambientales, como la gestión de aguas pluviales, el aislamiento térmico y la mejora de la biodiversidad, aunque en menor medida que las cubiertas semi-intensivas e intensivas.

Las cubiertas verdes semi-intensivas ocupan un punto intermedio entre las extensivas y las intensivas en cuanto a profundidad del sustrato, diversidad vegetal y necesidades de mantenimiento. Con profundidades de suelo que varían entre 15 y 30 centímetros (6 a 12 pulgadas), pueden soportar una mayor variedad de especies vegetales, incluyendo pequeños arbustos, plantas perennes y hierbas. Estas cubiertas ofrecen beneficios ecológicos y estéticos superiores a las extensivas, tales como una mayor biodiversidad, mejora de la calidad del aire y un atractivo visual más elevado. Sin embargo, requieren más mantenimiento y riego debido a la mayor profundidad del sustrato y a la diversidad de las comunidades vegetales.

Las cubiertas verdes intensivas representan la categoría más compleja y con mayor demanda de recursos. Se distinguen por su profundo perfil de sustrato, vegetación diversa y altos requerimientos de mantenimiento. Estas cubiertas suelen tener profundidades superiores a los 30 centímetros (más de 12 pulgadas) y pueden albergar una amplia gama de especies, incluyendo árboles, arbustos grandes y plantas ornamentales. Ofrecen el mayor potencial para el fomento de la biodiversidad, la creación de hábitats y el uso recreativo. Son especialmente adecuadas para parques urbanos, jardines y espacios públicos, donde proporcionan valiosos espacios verdes para residentes y visitantes. No obstante, requieren un soporte estructural considerable, sistemas de riego adecuados y un mantenimiento intensivo para mantener la viabilidad de las diversas comunidades vegetales a largo plazo.

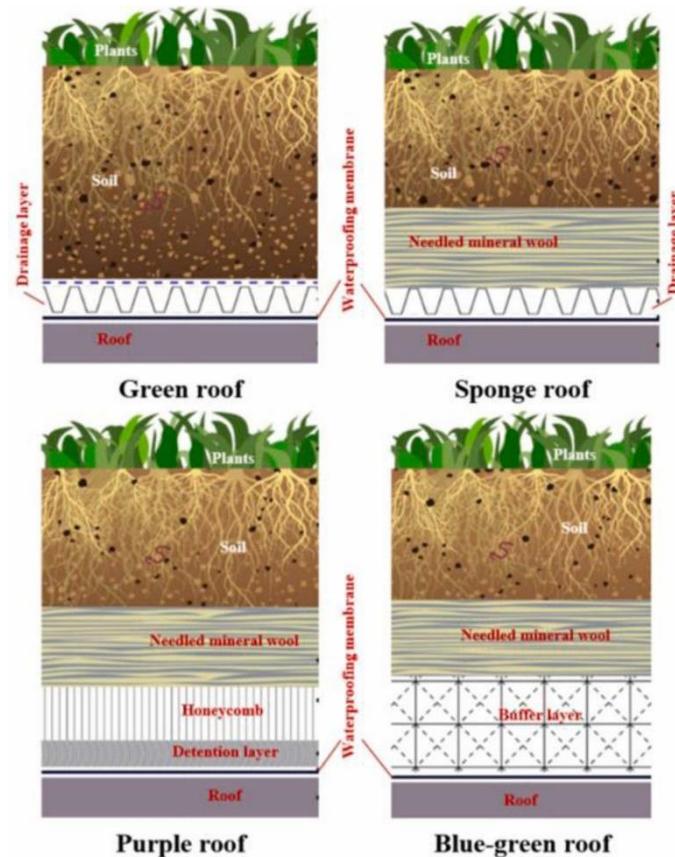
En resumen, la clasificación de las cubiertas verdes en categorías extensiva, semi-intensiva e intensiva proporciona un marco útil para comprender sus características de diseño, tipos de vegetación y necesidades de mantenimiento. Cada tipo ofrece beneficios y desafíos específicos, y la elección debe basarse en factores como los objetivos del proyecto, el presupuesto disponible, las condiciones del sitio y la capacidad de mantenimiento. Al seleccionar el tipo y diseño adecuado, los urbanistas, arquitectos y propietarios de edificios pueden maximizar los beneficios ambientales, sociales y económicos que ofrecen las cubiertas verdes en sus comunidades.

**Tabla 2. Tipo de cubierta verde y características principales (Fuente: Calheiros y Stefanakis, 2021)**

<i>Criterio</i>	<i>Tipos de cubierta verde</i>		
	Cubierta verde Intensiva	Cubierta verde Semi-Intensiva	Cubierta verde Extensiva
<i>Matenimiento</i>	Alto	Periódico/Moderado	Bajo
<i>Capa Sustrato</i>	>25 cm	15-25 cm	8-15 cm
<i>Vegetación</i>	Árboles, arbustos, césped	Hierbas gramíneas, arbustos	Suculentas (sedum), musgos, hierba
<i>Peso del sistema</i>	>350 kg/m <sup>2</sup>	150-350 kg/m <sup>2</sup>	80-180 kg/m <sup>2</sup>
<i>Accesibilidad</i>	(3,43 kN/m <sup>2</sup> ) En general, sin limitaciones	(1,47-3,43 kN/m <sup>2</sup> ) Tránsito limitado	Sin tránsito, salvo para mantenimiento

Un sistema alternativo de clasificación para las cubiertas verdes consiste en categorizarlas como cubiertas de retención y cubiertas de detención. Las cubiertas de detención se diferencian de las de retención por la presencia de capas adicionales bajo el sustrato, capaces de recoger temporalmente el agua infiltrada. El objetivo principal es reducir o retrasar el caudal máximo de escorrentía. Un sistema inteligente de vertedero puede gestionar eficientemente los niveles de agua según las necesidades y objetivos del usuario, como el uso en sistemas sanitarios domésticos o riego.

Estas cubiertas de detención también se conocen como cubiertas azul-verde multicapa (Pelorosso et al., 2024) o cubiertas púrpuras (Alim et al., 2023). Estas últimas facilitan la detención de aguas pluviales mediante capas específicas de almacenamiento y amortiguación (véase Figura 1).



**Figura 1. Diferencia en el diseño de una cubierta de retención (cubierta verde tradicional y cubierta esponja) y cubiertas de detención (cubiertas púrpura y azul-verde) (Fuente: Alim et al., 2023).**

Finalmente, una clasificación adicional se relaciona con las cubiertas verdes inclinadas o a dos aguas. En esta sección, se profundiza en la clasificación de las cubiertas verdes según la pendiente de la cubierta, analizando las características y consideraciones particulares asociadas a cada tipo.

### **I. Cubiertas verdes planas o de baja pendiente:**

Las cubiertas planas o de baja pendiente, con inclinaciones que suelen oscilar entre 0 y 10 grados, representan el tipo más común de instalación de cubierta verde. Estas cubiertas se encuentran frecuentemente en entornos urbanos, donde las limitaciones arquitectónicas impiden el uso de pendientes más pronunciadas. La clasificación de cubiertas verdes en superficies planas o de baja pendiente incluye sistemas extensivos e intensivos.

## **II. Cubiertas Verdes de Pendiente Moderada:**

Las cubiertas verdes de pendiente moderada, con inclinaciones que van desde 10 hasta 45 grados, sirven como un punto intermedio entre las cubiertas planas y las de pendiente pronunciada. Estas cubiertas ofrecen un equilibrio entre atractivo estético y funcionalidad, permitiendo una variedad de diseños de cubierta verde basados en las características específicas de la pendiente.

### **a) Cubiertas Verdes en Bandejas o Modulares**

En cubiertas con pendiente moderada, las cubiertas verdes en bandejas o modulares son una opción viable. Estos sistemas utilizan bandejas o contenedores preplantados que pueden instalarse y retirarse fácilmente, lo que simplifica el mantenimiento y la selección de plantas. El enfoque modular también facilita la gestión del agua y reduce el riesgo de erosión en las pendientes.

### **b) Cubiertas Verdes con Bordes Inclinados**

Las cubiertas verdes con bordes inclinados están diseñadas para adaptarse a las inclinaciones cambiantes de un techo. Utilizando un enfoque escalonado, estas cubiertas acomodan diferentes especies de plantas en varios niveles de pendiente. Este diseño no solo mejora el atractivo visual, sino que también optimiza la retención de aguas pluviales y proporciona un hábitat natural para una flora y fauna diversa.

## **III. Cubiertas Verdes de Pendiente Pronunciada:**

Las cubiertas verdes en superficies con pendiente pronunciada, caracterizadas por inclinaciones mayores a 45 grados, presentan desafíos y oportunidades únicas. Aunque las pendientes pronunciadas limitan la interacción humana directa y aumentan el riesgo de erosión, estas cubiertas ofrecen ventajas estéticas y pueden contribuir a la biodiversidad de maneras inesperadas.

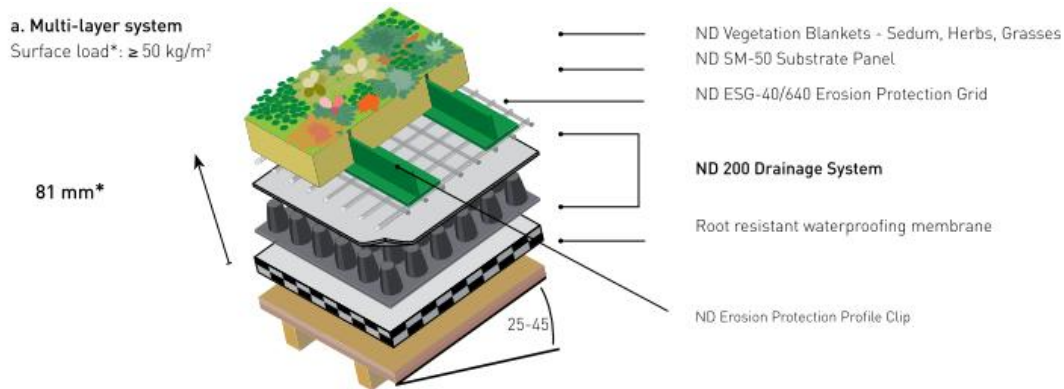
### **a) Cubiertas Verdes en Manta o Alfombra:**

Las cubiertas verdes en manta o alfombra están diseñadas para aplicaciones en pendientes pronunciadas, y cuentan con una capa de mantas o alfombras de vegetación preplantada que proporcionan una cobertura inmediata. Estos sistemas son efectivos para prevenir la erosión del suelo, promover la retención de agua y mejorar el atractivo estético general de los edificios con pendientes pronunciadas.

### **b) Cubiertas Verdes Reforzadas en Pendientes:**

Las cubiertas verdes reforzadas en pendientes utilizan soluciones de ingeniería para crear un ambiente estable en techos inclinados. El uso de terrazas, muros de contención y materiales especiales de refuerzo ayuda a mitigar los riesgos de erosión y proporciona una base estable para una diversidad de

plantaciones. Estos sistemas requieren una planificación cuidadosa para garantizar la seguridad y la durabilidad de la cubierta verde en superficies inclinadas.



**Figura 2. Ejemplo de cubierta verde en pendiente pronunciada (Fuente: Nophdrain, 2010)**

La clasificación de las cubiertas verdes basada en la pendiente del techo ofrece una comprensión integral de cómo estos sistemas innovadores pueden adaptarse a diversas condiciones arquitectónicas y ambientales. Ya sea en superficies planas, de pendiente moderada o pronunciada, las cubiertas verdes contribuyen significativamente al desarrollo urbano sostenible al mitigar el efecto de isla de calor urbana, reducir la escorrentía de aguas pluviales y mejorar la biodiversidad. A medida que la demanda de soluciones de construcción ecológicas continúa creciendo, la exploración de las clasificaciones de cubiertas verdes según la pendiente del techo brinda valiosos conocimientos para arquitectos, ingenieros y urbanistas que buscan integrar prácticas amigables con el medio ambiente en el entorno construido.

## 5. Estructura de las cubiertas verdes

Las cubiertas verdes están compuestas por varias capas que trabajan conjuntamente para soportar la vegetación y brindar numerosos beneficios ambientales. La estructura de una cubierta verde puede variar según factores como el clima, el diseño del edificio y el uso previsto, pero generalmente incluye varios componentes clave: la plataforma del techo, la membrana impermeabilizante, la capa de drenaje, el sustrato o medio de cultivo, la vegetación y capas adicionales opcionales para aislamiento, barrera de raíces y sistemas de riego.

La primera capa de una cubierta verde es la plataforma del techo, que sirve como la base estructural para todo el sistema. Esta puede estar hecha de diversos materiales como madera, concreto o metal, dependiendo del diseño del edificio y su capacidad de carga. La plataforma del techo proporciona el soporte necesario para las capas adicionales de la cubierta verde y garantiza la integridad estructural del edificio.

A continuación, está la membrana impermeabilizante, fundamental para proteger la plataforma de la cubierta y la estructura del edificio contra la infiltración de agua. Esta membrana suele estar fabricada con materiales sintéticos como PVC (cloruro de polivinilo) o caucho EPDM (etileno propileno dieno monómero) y se instala sobre la plataforma del techo para crear una barrera impermeable. La membrana evita que el agua penetre en el edificio y cause daños en los espacios interiores.

La capa de drenaje está diseñada para facilitar el movimiento del agua fuera de la superficie del techo y alejarla del edificio. Esta capa generalmente consiste en un material ligero y poroso como grava, agregado de arcilla expandida o alfombrillas de drenaje especialmente diseñadas. La capa de drenaje permite que el exceso de agua drene libremente, evitando acumulaciones y reduciendo el riesgo de filtraciones o daños estructurales.

Sobre la capa de drenaje se encuentra el medio de cultivo o sustrato, que proporciona el soporte para el crecimiento de las plantas. El sustrato está formulado especialmente para ser ligero, con buen drenaje y rico en nutrientes, permitiendo que las plantas se establezcan y prosperen en la superficie del techo. Normalmente está compuesto por una mezcla de materiales orgánicos como compost, turba y agregados ligeros, con una composición ajustada según las necesidades específicas de la vegetación y el clima.

La capa de vegetación es el componente más visible y reconocible de una cubierta verde, conformada por las plantas que cubren la superficie del techo. Las cubiertas verdes pueden albergar una gran variedad de especies vegetales, incluyendo pastos, sedums, flores silvestres, hierbas, arbustos e incluso pequeños árboles, dependiendo de factores como el clima, la exposición solar y los requisitos de mantenimiento. Esta capa no solo mejora el atractivo estético de la cubierta, sino que también aporta múltiples beneficios ambientales, como la mejora de la calidad del aire, la creación de hábitats para la fauna y la reducción del efecto isla de calor urbano.

Además de estos componentes principales, las cubiertas verdes pueden incluir capas adicionales opcionales para aislamiento, barrera de raíces y sistemas de riego. Las capas de aislamiento, como espuma rígida o concreto ligero, pueden instalarse debajo de la membrana impermeabilizante para mejorar la eficiencia energética y el rendimiento térmico. Las membranas barreras de raíces se usan

a veces para evitar que las raíces penetren y dañen la membrana impermeabilizante, mientras que los sistemas de riego pueden instalarse para proporcionar agua suplementaria a la vegetación durante períodos secos.

En resumen, la estructura de una cubierta verde está cuidadosamente diseñada para crear un ambiente favorable al crecimiento vegetal, proteger la estructura del edificio contra daños por agua y asegurar la durabilidad y buen desempeño a largo plazo. Al incorporar múltiples capas de materiales y componentes, las cubiertas verdes ofrecen una solución sostenible y respetuosa con el medio ambiente para reducir la escorrentía de aguas pluviales, mejorar la calidad del aire y aumentar la biodiversidad urbana.

## 6. Elementos estructurales en detalle

Como se mencionó anteriormente, una cubierta verde, también conocida como techo vegetalizado o eco-techo, es un sistema complejo que consiste en varios elementos estructurales que trabajan juntos para soportar la vegetación y proporcionar beneficios ambientales. Comprender los componentes individuales de una cubierta verde es esencial para diseñar, instalar y mantener un sistema exitoso. A continuación se detallan técnicamente los elementos estructurales principales de una cubierta verde, con énfasis en sus materiales, características físicas y criterios de selección:

### 1. Plataforma de la cubierta:

La plataforma del techo sirve como la base para todo el sistema de la cubierta verde. Es la superficie estructural sobre la cual se instalan todos los demás componentes. Las plataformas pueden estar hechas de diversos materiales, incluyendo madera, concreto, metal o materiales compuestos. La elección del material depende de factores como el diseño del edificio, la capacidad de carga y las condiciones ambientales. Las plataformas de madera se usan comúnmente en edificios residenciales por su bajo costo y facilidad de instalación, mientras que las de concreto son más adecuadas para estructuras comerciales o industriales que requieren mayor capacidad de carga. Las plataformas metálicas son ligeras y duraderas, adecuadas para una amplia variedad de aplicaciones. Las plataformas compuestas, hechas de materiales como fibra de vidrio o plástico reforzado, ofrecen una combinación de resistencia, durabilidad y resistencia a la humedad y corrosión. La preparación y mantenimiento adecuados de la plataforma son esenciales para garantizar el desempeño e integridad a largo plazo del sistema.

## **2. Membrana impermeabilizante:**

La membrana impermeabilizante es un componente crucial del sistema, que proporciona una barrera protectora contra la infiltración de agua y daños por humedad. Se instala directamente sobre la plataforma del techo para crear un sello impermeable y evitar que el agua penetre en la estructura del edificio. Estas membranas suelen estar hechas de materiales sintéticos como PVC (cloruro de polivinilo), TPO (poliolefina termoplástica), EPDM (caucho etileno propileno dieno monómero) o betún (asfalto). Estos materiales ofrecen excelente resistencia al agua, radiación UV y fluctuaciones de temperatura, asegurando la durabilidad y el rendimiento del sistema. La instalación y mantenimiento adecuados son esenciales para prevenir filtraciones, daños por agua y deterioro prematuro.

## **3. Capa de drenaje:**

La capa de drenaje está diseñada para facilitar el movimiento del agua fuera de la superficie del techo y alejarla del edificio. Se instala sobre la membrana impermeabilizante y cumple funciones importantes como evitar acumulaciones de agua, reducir la presión hidrostática y promover un drenaje eficiente. Normalmente está compuesta por materiales livianos y porosos como grava, agregado de arcilla expandida o alfombrillas de drenaje especialmente diseñadas. Estos materiales permiten que el exceso de agua drene libremente, previniendo acumulaciones y riesgos de filtraciones o daños estructurales. Un diseño e instalación adecuados de esta capa son vitales para asegurar un drenaje óptimo y evitar infiltraciones.

## **4. Medio de cultivo (sustrato):**

El medio de cultivo, también conocido como sustrato o suelo, proporciona el soporte para el crecimiento de las plantas en la cubierta verde. Se instala sobre la capa de drenaje y funciona como zona radicular para la vegetación. Está formulado para ser ligero, con buen drenaje y rico en nutrientes, permitiendo que las plantas se establezcan y prosperen en el ambiente riguroso del techo. La composición varía según el clima, tipo de vegetación y requerimientos de mantenimiento, e incluye materiales orgánicos como compost, turba y agregados livianos. El medio de cultivo provee nutrientes esenciales, humedad y soporte para las raíces, permitiendo que la vegetación florezca. La selección e instalación correcta del sustrato son fundamentales para la salud y vitalidad a largo plazo de la vegetación, y para evitar erosión, compactación o agotamiento de nutrientes.

## **5. Vegetación:**

La capa de vegetación es el componente más visible y reconocible del sistema, constituida por las plantas que cubren la superficie del techo. Las cubiertas verdes pueden soportar una amplia variedad

de especies, incluyendo pastos, sedums, flores silvestres, hierbas, arbustos e incluso pequeños árboles, dependiendo del clima, exposición solar y necesidades de mantenimiento. Esta capa no solo mejora el atractivo estético, sino que también ofrece múltiples beneficios ambientales, como la mejora de la calidad del aire, la creación de hábitats para fauna y la reducción del efecto isla de calor urbana. La selección e instalación adecuada de la vegetación son esenciales para garantizar la compatibilidad con el sustrato, el clima y el uso previsto. El mantenimiento es también importante para evitar crecimiento de malezas, conservar la salud de las plantas y asegurar la viabilidad a largo plazo del sistema.

### 6. Capas adicionales (opcionales):

Además de los elementos estructurales principales, las cubiertas verdes pueden incluir capas adicionales para mejorar su desempeño y funcionalidad. Estas capas pueden incluir aislamiento, membranas barrera de raíces y sistemas de riego. Las capas de aislamiento, como espuma rígida o concreto ligero, se instalan bajo la membrana impermeabilizante para mejorar la eficiencia energética y el desempeño térmico. Las membranas barrera de raíces se usan para evitar que las raíces dañen la membrana impermeabilizante, mientras que los sistemas de riego proporcionan agua suplementaria a la vegetación en periodos secos. La inclusión de estas capas depende de factores como los objetivos del proyecto, presupuesto, condiciones del sitio y capacidades de mantenimiento.

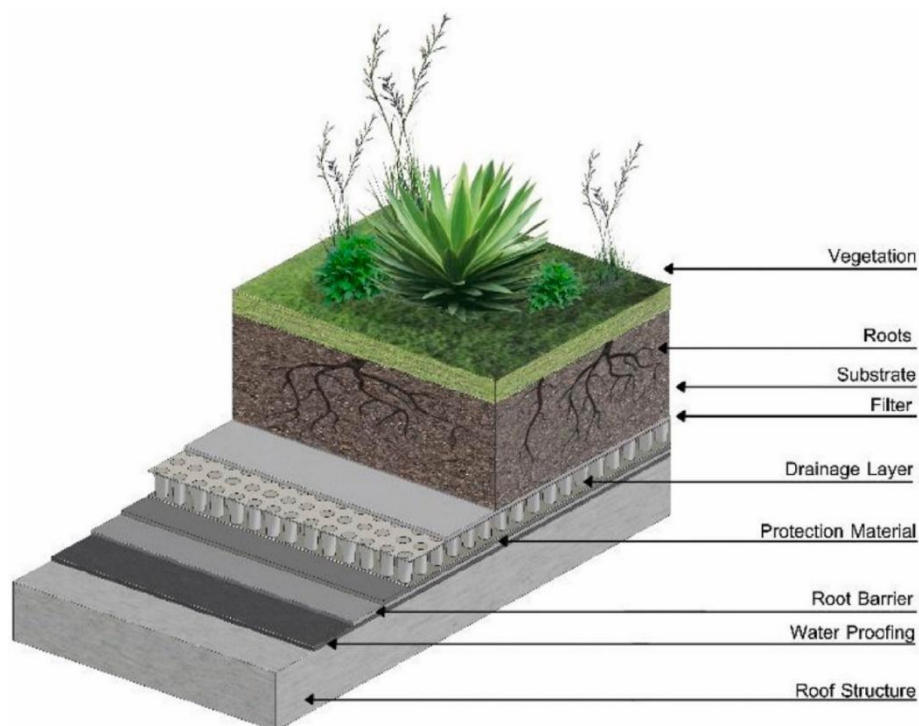


Figura 3. Capas típicas de una cubierta verde (Fuente: Mihalakakou et al., 2023).

En resumen, los elementos estructurales de una cubierta verde trabajan en conjunto para crear un sistema de techado sostenible y ecológico que ofrece numerosos beneficios, incluyendo la gestión de aguas pluviales, aislamiento térmico, aumento de la biodiversidad y mejora de la calidad del aire. El diseño, la instalación y el mantenimiento adecuados de cada componente son fundamentales para asegurar el desempeño y la viabilidad a largo plazo del sistema de cubierta verde. Al incorporar estos elementos estructurales en sus proyectos, arquitectos, ingenieros y propietarios pueden crear cubiertas verdes que contribuyan a un entorno construido más saludable y sostenible.

## 7. Legislación sobre cubiertas verdes

No existe una legislación específica de la Unión Europea (UE) dedicada exclusivamente a las cubiertas verdes. Sin embargo, varias directivas y regulaciones de la UE influyen indirectamente en la promoción e implementación de cubiertas verdes en los estados miembros. La UE pone énfasis en la sostenibilidad, conservación de la biodiversidad, mitigación y adaptación al cambio climático en diversas políticas, lo que impacta el desarrollo y adopción de cubiertas verdes.

Una de estas políticas es el Pacto Verde Europeo (European Green Deal), una hoja de ruta integral presentada por la Comisión Europea en 2019, que tiene como objetivo hacer que la economía de la UE sea sostenible y lograr la neutralidad de carbono para 2050. Este Pacto incluye iniciativas como la Estrategia de Biodiversidad de la UE para 2030, que busca restaurar ecosistemas degradados, frenar la pérdida de biodiversidad e integrar soluciones basadas en la naturaleza en la planificación urbana. Las cubiertas verdes son reconocidas como una de estas soluciones basadas en la naturaleza que contribuyen a la conservación de la biodiversidad, la resiliencia climática y el desarrollo urbano sostenible.

Además, el Plan de Acción de Economía Circular de la UE promueve la eficiencia de los recursos y la reducción de residuos, incentivando la reutilización de materiales y la adopción de prácticas constructivas sostenibles, lo que podría apoyar indirectamente el uso de cubiertas verdes. También, directivas relacionadas con la gestión del agua, calidad del aire y eficiencia energética, como la Directiva Marco del Agua, la Directiva de Calidad del Aire Ambiente y la Directiva de Rendimiento Energético de Edificios, pueden motivar a los estados miembros a adoptar cubiertas verdes para afrontar estos retos ambientales.

A pesar de la ausencia de una legislación específica, existen proyectos de investigación financiados por la UE, iniciativas y guías de buenas prácticas que apoyan la implementación de cubiertas verdes en Europa, ayudando a aumentar la conciencia, fortalecer capacidades y brindar asistencia técnica a responsables políticos, urbanistas, arquitectos y propietarios interesados en integrar cubiertas verdes en sus proyectos.

## 7.1 Legislación nacional sobre cubiertas verdes en varios países europeos

### **a. Italia:**

La promoción de cubiertas verdes cuenta con apoyo a nivel nacional y local mediante regulaciones, incentivos fiscales e iniciativas urbanas. El Decreto Legislativo 192/2005, modificado por el Decreto Legislativo 311/2006, establece medidas para mejorar la eficiencia energética de los edificios, impulsando indirectamente la adopción de cubiertas verdes. Ciudades como Milán, Bolonia, Turín, Florencia y Roma tienen regulaciones y planes de desarrollo sostenible que incentivan su instalación, ofreciendo beneficios fiscales y financiamiento público. Se practican tanto cubiertas extensivas como intensivas, integradas en planes urbanos para mitigar islas de calor y gestionar aguas pluviales, con colaboraciones público-privadas para desarrollar tecnologías innovadoras. Un ejemplo destacado es la Universidad de Milán Bicocca, que incorpora cubiertas verdes en sus campus como parte de su estrategia de sostenibilidad.

### **b. Grecia:**

La promoción se apoya en políticas nacionales de eficiencia energética y en iniciativas locales de sostenibilidad urbana. Grecia integra las cubiertas verdes en su Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética para mejorar el rendimiento y reducir el impacto ambiental. Ciudades como Atenas ofrecen incentivos para combatir islas de calor y mejorar la calidad de vida urbana. Se favorece el uso de plantas nativas y resistentes a la sequía, con bajo mantenimiento y consumo hídrico, y se impulsan asociaciones público-privadas. Universidades e institutos de investigación son clave para avanzar en tecnologías y estrategias urbanas.

### **c. España:**

La promoción se basa en regulaciones nacionales y regionales para mejorar la sostenibilidad y eficiencia energética. El Código Técnico de Edificación español incluye disposiciones que fomentan prácticas sostenibles, incluyendo cubiertas verdes. Regiones como Cataluña y Madrid ofrecen regulaciones e incentivos adicionales. Se prioriza la conservación del agua con sistemas de captación de lluvia y plantas resistentes a la sequía. Se fomentan colaboraciones público-privadas y la investigación universitaria para avanzar en tecnologías y educación, buscando aumentar biodiversidad urbana, gestionar aguas pluviales y reducir islas de calor.

### **d. Alemania:**

Ha sido pionera en la promoción de cubiertas verdes durante décadas. En 2016, se aprobó la Guía de Cubiertas Verdes, que establece requisitos técnicos y mejores prácticas. Muchas ciudades ofrecen incentivos económicos, siendo Berlín un ejemplo destacado. El Consejo Alemán de Construcción Sostenible (DGNB) ha desarrollado estándares de certificación que incluyen criterios para cubiertas verdes, reflejando un compromiso sólido con el desarrollo urbano sostenible y la resiliencia climática.

**e. Francia:**

En 2015, se aprobó una ley que obliga a que todos los edificios nuevos en zonas comerciales incluyan cubiertas verdes o paneles solares, con el fin de mejorar biodiversidad, reducir el efecto isla de calor y promover energías renovables. Ciudades como París implementan programas y estímulos para fomentar la instalación voluntaria de cubiertas verdes.

**f. Suiza:**

Con tradición desde los años 70, el gobierno ofrece incentivos financieros y exenciones fiscales. Cantones y municipios imponen regulaciones que obligan a nuevas construcciones a incluir cubiertas verdes o ofrecen subsidios para la rehabilitación. La tradición ambiental suiza favorece su aceptación y adopción generalizada.

**g. Países Bajos:**

Líder mundial en innovación y adopción de cubiertas verdes, motivado por problemas como inundaciones e islas de calor. El gobierno ofrece subvenciones, incentivos fiscales y programas de apoyo técnico. La Asociación Holandesa de Cubiertas Verdes (NGB) brinda recursos y asesoría a interesados.

**h. Suecia:**

Prioriza las cubiertas verdes como parte de la lucha contra el cambio climático y desarrollo sostenible urbano. Ofrece incentivos financieros y subvenciones, especialmente en áreas vulnerables a inundaciones o islas de calor. Muchos municipios incluyen requisitos o incentivos en planificación urbana y regulaciones de construcción.

**i. Reino Unido:**

Aunque no hay legislación nacional específica, ciudades como Londres y Manchester tienen políticas y estímulos para fomentar cubiertas verdes. El Consejo de Construcción Verde del Reino Unido (UKGBC) ofrece directrices y certificaciones para apoyar su adopción.

**j. Ucrania:**

La promoción está en crecimiento, aún en fases iniciales comparado con otros países europeos. Se están actualizando códigos de construcción para incluir infraestructura verde. Ciudades como Kyiv y

Lviv impulsan iniciativas locales para mitigar islas de calor, mejorar aire y gestionar aguas pluviales, con soluciones económicas y uso de materiales y plantas locales. Universidades e institutos de investigación promueven el conocimiento y tecnologías. Hay creciente reconocimiento de sus beneficios ambientales y sociales.

#### **k. Polonia:**

Apoyada por regulaciones nacionales, iniciativas regionales y subsidios locales. Gobernada principalmente por leyes de construcción y planes de zonificación. El Fondo Nacional para la Protección Ambiental y Gestión del Agua financia proyectos de infraestructura verde. Ciudades como Varsovia tienen directrices y subsidios. Se integran cubiertas verdes con energías renovables, y se promueve biodiversidad con plantas nativas resistentes. La colaboración público-privada y la investigación universitaria impulsan tecnologías innovadoras y educación.

En general, los países europeos adoptan diversas estrategias para promover cubiertas verdes según sus desafíos ambientales, prioridades políticas y contextos culturales. Algunos tienen legislación o incentivos específicos, otros usan políticas ambientales amplias. El objetivo común es crear ciudades sostenibles, resilientes y ecológicas mediante la adopción masiva de cubiertas verdes.

A nivel global, las cubiertas verdes se reconocen cada vez más como estrategia para el desarrollo urbano sostenible, con iniciativas en Europa y países como Ucrania. Directivas europeas como la de Rendimiento Energético de Edificios y la Agenda Urbana para la UE impulsan su integración para mejorar eficiencia y resiliencia. Programas de financiamiento de la UE como Horizon 2020 y LIFE apoyan investigación e innovación en tecnologías de cubiertas verdes, en línea con tendencias globales hacia prácticas constructivas sostenibles. En todo el mundo, ciudades adoptan cubiertas verdes para mitigar islas de calor, mejorar calidad del aire y gestionar aguas pluviales, con la colaboración de universidades e institutos de investigación que avanzan en la tecnología y alinean estos esfuerzos con objetivos globales de sostenibilidad y protección ambiental.

## 8. Vegetación para las cubiertas verdes

La selección de la vegetación es un elemento crucial en el diseño de cubiertas verdes, ya que influye directamente en el rendimiento del sistema, su atractivo visual y los beneficios ecológicos que ofrece. Las cubiertas verdes pueden albergar una amplia variedad de plantas, desde sedums resistentes y de bajo mantenimiento hasta gramíneas nativas, flores silvestres, hierbas aromáticas, arbustos e incluso pequeños árboles. La elección de la vegetación depende de factores como el clima, la exposición solar, la profundidad del sustrato, la disponibilidad de riego y las necesidades de mantenimiento. A continuación, se analizan las características clave, ventajas y consideraciones de los tipos de plantas más comunes utilizadas en cubiertas verdes.

### a. Sedums (*Sedum spp.*):

Las sedums son una de las plantas más populares y utilizadas en techos verdes debido a su gran adaptabilidad, tolerancia a la sequía y bajos requerimientos de mantenimiento. Estas plantas suculentas están bien adaptadas a las condiciones adversas de los techos, con sistemas radiculares poco profundos y hojas que almacenan agua, lo que les permite sobrevivir en ambientes secos y soleados. Las sedums presentan una variedad de colores, texturas y formas de crecimiento, lo que las hace versátiles para crear paisajes atractivos en techos verdes. Las especies comunes utilizadas incluyen *Sedum acre*, *Sedum album*, *Sedum spurium* y *Sedum reflexum*. Normalmente se plantan en techos verdes extensivos con capas de suelo poco profundas, donde pueden formar mantos densos que proporcionan hábitat para insectos y fauna, reducen la escorrentía de agua de lluvia y mejoran el aislamiento térmico.

### b. Gramíneas (*Festuca spp.*, *Carex spp.*, *Poa spp.*):

Las gramíneas son otra opción popular para techos verdes, ya que ofrecen una estética naturalista, estabilizan el suelo y proporcionan hábitat para la fauna. Especies de gramíneas nativas como *Festuca rubra* (festuca roja), *Carex flacca* (carrizo azul) y *Poa pratensis* (pasto azul de Kentucky) se usan comúnmente en instalaciones de techos verdes, pues están bien adaptadas a las condiciones climáticas locales y requieren un mantenimiento mínimo. Las gramíneas poseen sistemas radiculares fibrosos que ayudan a prevenir la erosión del suelo y promueven la infiltración del agua, lo que las hace ideales para techos verdes extensivos con capas de suelo poco profundas. Además, las gramíneas

proporcionan hábitat y alimento para aves, insectos y otras especies, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad en entornos urbanos.

**c. Flores silvestres (*Achillea* spp., *Centaurea* spp., *Geranium* spp.):**

Las flores silvestres son valoradas por su belleza, biodiversidad y beneficios ecológicos en los techos verdes. Estas plantas florecientes, nativas o adaptadas, proporcionan alimento y hábitat para polinizadores como abejas, mariposas y colibríes, mejorando la biodiversidad urbana y la resiliencia del ecosistema. Las especies comunes de flores silvestres usadas en techos verdes incluyen *Achillea millefolium* (milenrama), *Centaurea cyanus* (aciano) y *Geranium sanguineum* (geranio sanguíneo). Las flores silvestres suelen plantarse en techos verdes semi-intensivos o intensivos con perfiles de suelo más profundos, donde pueden establecer sistemas radiculares robustos y producir floraciones coloridas durante toda la temporada de crecimiento. Incorporar una mezcla diversa de flores silvestres en techos verdes promueve la salud de los polinizadores, realza el atractivo estético y contribuye a la función ecológica general.

**d. Hierbas (*Thymus* spp., *Rosmarinus officinalis*, *Lavandula* spp.):**

Las hierbas son valoradas por sus propiedades culinarias, medicinales y aromáticas, así como por su valor ornamental en los techos verdes. Especies como *Thymus serpyllum* (tomillo rastrero), *Rosmarinus officinalis* (romero) y *Lavandula angustifolia* (lavanda inglesa) están bien adaptadas a las condiciones secas y soleadas de los techos verdes, requiriendo poca agua y mantenimiento. Las hierbas tienen sistemas radiculares superficiales y hábitos de crecimiento compactos que les permiten prosperar en contenedores o en suelos poco profundos, haciéndolas adecuadas para techos verdes extensivos. Además de sus usos culinarios y aromáticos, las hierbas atraen insectos beneficiosos como abejas y mariposas, apoyan la biodiversidad local y proporcionan interés estacional con su follaje y flores fragantes.

**e. Arbustos (*Arctostaphylos uva-ursi*, *Juniperus* spp., *Cotoneaster* spp.):**

Los arbustos son plantas leñosas más grandes que añaden estructura, altura y diversidad de hábitat a los paisajes de los techos verdes. Especies como *Arctostaphylos uva-ursi* (uva de oso), *Juniperus communis* (enebro común) y *Cotoneaster horizontalis* (cotoneaster rastrero) se utilizan comúnmente en instalaciones de techos verdes debido a sus bajos requerimientos de mantenimiento, tolerancia a la sequía y atractivo durante todo el año. Los arbustos suelen plantarse en techos verdes semi-

intensivos o intensivos con perfiles de suelo más profundos, donde pueden desarrollar sistemas radicales extensos y proporcionar hábitat para aves y pequeños mamíferos. La incorporación de arbustos en los techos verdes mejora la biodiversidad, aumenta el atractivo estético y contribuye a servicios ecosistémicos como la purificación del aire, la gestión de aguas pluviales y la regulación climática.

#### **f. Árboles (Acer spp., Betula spp., Malus spp.):**

Los árboles son el tipo de vegetación más grande e impactante en los techos verdes, proporcionando sombra, hábitat y servicios ecosistémicos a una escala mayor. Especies como *Acer palmatum* (arce japonés), *Betula pendula* (abedul plateado) y *Malus domestica* (manzano) se utilizan a veces en techos verdes intensivos o jardines en azoteas, donde la profundidad del suelo y el soporte estructural permiten el crecimiento de árboles. Los árboles ofrecen numerosos beneficios en los techos verdes, incluyendo la captura de carbono, la purificación del aire, la regulación de la temperatura y la mejora estética. Sin embargo, su gran tamaño, sistemas radicales profundos y requerimientos de mantenimiento hacen que su incorporación en diseños de techos verdes sea un desafío, requiriendo una cuidadosa consideración de la integridad estructural, la carga de peso y la gestión a largo plazo. En conclusión, los techos verdes pueden soportar una amplia variedad de tipos de vegetación, cada uno con sus características, beneficios y consideraciones únicas. Desde los sedums de bajo mantenimiento hasta los imponentes árboles, la selección de vegetación en los techos verdes depende de factores como el clima, las condiciones del sitio, los requisitos de mantenimiento y los objetivos del proyecto. Al elegir e integrar cuidadosamente una mezcla diversa de especies vegetales, los techos verdes pueden maximizar su potencial ecológico, estético y funcional, contribuyendo a la biodiversidad urbana, la resiliencia climática y la sostenibilidad.

## **9. Cubiertas verdes y aislamiento térmico de los edificios**

Los techos verdes desempeñan un papel significativo en la insulación térmica, ofreciendo numerosos beneficios que contribuyen a la eficiencia energética, el confort y la sostenibilidad en los edificios. Las propiedades de aislamiento térmico de los techos verdes se atribuyen a varios factores, incluidos las capas de vegetación, suelo y materiales de drenaje que forman el conjunto del techo, así como la capacidad de la vegetación para regular la transferencia de calor mediante evapotranspiración, sombreado y masa térmica. A continuación, se enumeran los mecanismos por los

cuales los techos verdes proporcionan aislamiento térmico y su impacto en el desempeño energético de los edificios.

### **Capas del techo verde:**

Los techos verdes típicamente constan de varias capas, incluyendo una membrana impermeabilizante, capa de drenaje, medio de cultivo (suelo o sustrato) y vegetación. Cada capa contribuye al rendimiento térmico del conjunto del techo al añadir aislamiento, regular los niveles de humedad y reducir la transferencia de calor. La membrana impermeabilizante evita la infiltración de agua en el edificio, protegiendo la estructura del daño por humedad y la pérdida de calor. La capa de drenaje facilita la evacuación del agua y previene el encharcamiento, asegurando un drenaje adecuado y evitando pérdidas térmicas por acumulación de agua. El medio de cultivo actúa como barrera térmica, proporcionando aislamiento adicional y masa térmica para regular las fluctuaciones de temperatura. Finalmente, la capa de vegetación sombrea la superficie del techo, absorbe la radiación solar y libera humedad mediante evapotranspiración, reduciendo aún más la ganancia de calor y mejorando el confort térmico interior.

### **Propiedades aislantes del medio de cultivo:**

El medio de cultivo o sustrato utilizado en techos verdes juega un papel crucial en el aislamiento térmico. Los sustratos suelen ser ligeros y porosos, con alto contenido de aire y baja conductividad térmica, lo que ayuda a atrapar el calor y minimizar la transferencia térmica a través del techo. Las propiedades aislantes del sustrato dependen de factores como el tamaño de las partículas, el contenido de humedad y la materia orgánica. Se utilizan comúnmente agregados ligeros como arcilla expandida, perlita o pumita para mejorar el aislamiento y reducir la carga sobre la estructura del edificio. Además, la composición y profundidad del medio de cultivo influyen en su resistencia térmica y capacidad para retener calor, siendo los sustratos más profundos los que proporcionan mayor aislamiento y masa térmica.

### **Evapotranspiración y efecto de enfriamiento:**

Uno de los principales mecanismos por los que los techos verdes proporcionan aislamiento térmico es mediante la evapotranspiración, proceso combinado de evaporación del agua del suelo y transpiración de las hojas de las plantas. La evapotranspiración enfría la superficie del techo al absorber energía térmica del entorno y convertirla en calor latente, reduciendo así la temperatura del techo y mitigando la transferencia de calor al interior del edificio. Este efecto de enfriamiento es especialmente notable en días calurosos y soleados, cuando los techos verdes pueden disminuir

significativamente las temperaturas superficiales en comparación con materiales convencionales. Este enfriamiento reduce la necesidad de aire acondicionado y sistemas mecánicos, mejorando el confort térmico interior y creando un ambiente más agradable para los ocupantes.

### **Sombreado y reflectancia solar:**

La capa de vegetación de los techos verdes proporciona sombra y reduce la absorción de radiación solar, minimizando la ganancia de calor a través de la superficie del techo. La vegetación absorbe y refleja parte de la radiación solar entrante, especialmente en el espectro visible y del infrarrojo cercano, lo que ayuda a bajar la temperatura del techo y reduce el estrés térmico en la envolvente del edificio. El efecto de sombreado es particularmente beneficioso en áreas urbanas con alta exposición solar y efecto isla de calor, donde los materiales convencionales pueden absorber y retener calor, aumentando el consumo energético y las temperaturas interiores. Al sombrear la superficie, los techos verdes mejoran la eficiencia energética y prolongan la vida útil del material del techo al minimizar la expansión y contracción térmica.

### **Masa térmica y almacenamiento de calor:**

Los techos verdes actúan como masas térmicas, absorbiendo y almacenando calor durante el día para liberarlo lentamente durante la noche, moderando las fluctuaciones de temperatura y reduciendo el desfase térmico en los edificios. El sustrato y la vegetación tienen una alta capacidad calorífica, permitiendo absorber el exceso de calor en picos solares y liberarlo gradualmente, ayudando a estabilizar las temperaturas interiores y reducir las cargas de calefacción y refrigeración. Este efecto amortiguador es especialmente valioso en climas con grandes variaciones diurnas, contribuyendo a mantener un ambiente interior confortable y estable durante todo el año. Además, la masa térmica puede reducir los extremos térmicos urbanos, mitigando el efecto isla de calor y mejorando las condiciones microclimáticas.

### **Ahorro energético y desempeño del edificio:**

Las propiedades de aislamiento térmico de los techos verdes resultan en ahorros energéticos significativos al reducir las cargas de calefacción y refrigeración, mejorar el confort interior y optimizar el desempeño general del edificio. Estudios han mostrado que los techos verdes pueden reducir el consumo energético de calefacción y refrigeración hasta en un 30%, dependiendo del clima, diseño del edificio y densidad de vegetación. Al aislar la estructura del techo, ayudan a regular las temperaturas interiores, minimizar pérdidas de calor en invierno y evitar ganancias térmicas en verano, resultando en facturas energéticas más bajas, reducción de emisiones de carbono y mejor calidad del aire interior. Además, los techos verdes contribuyen a programas de certificación como

LEED, mejorando la eficiencia energética y métricas de sostenibilidad, siendo una inversión valiosa tanto en construcciones nuevas como en proyectos de rehabilitación.

En conclusión, los techos verdes ofrecen un aislamiento térmico eficaz mediante la incorporación de capas de vegetación, sustrato y materiales de drenaje que regulan la transferencia de calor, reducen la ganancia solar y mejoran el confort térmico interior. A través de mecanismos como la evapotranspiración, el sombreado y la masa térmica, los techos verdes generan ahorros energéticos significativos, mejoran el desempeño de los edificios y contribuyen al desarrollo urbano sostenible. En un contexto donde las ciudades enfrentan el cambio climático, el efecto isla de calor y la creciente demanda energética, los techos verdes representan una solución sostenible para mitigar el estrés térmico, reducir el consumo energético y crear entornos construidos más saludables y resilientes para las generaciones presentes y futuras.

## 9.1. Evaluación del impacto de las cubiertas verdes en el consumo energético de los edificios y el confort térmico interior.

### 1. EnergyPlus

Se ha desarrollado un modelo basado físicamente en el balance energético de un techo verde, que ha sido integrado en el programa de simulación energética de edificios EnergyPlus. Este módulo de techo verde permite al modelador energético explorar opciones de diseño del techo verde, incluyendo el medio de cultivo (suelo), propiedades térmicas y profundidad, y características de la vegetación como tipo de planta, altura e índice de área foliar (densidad de la vegetación). El modelo ha sido probado con éxito usando observaciones de un techo verde monitoreado en Florida. Por lo tanto, es evidente que este modelo puede ser muy útil para informar decisiones de diseño de techos verdes.

El modelo considera el intercambio radiativo de ondas largas y cortas dentro del dosel vegetal; efectos del dosel en la transferencia convectiva de calor; evapotranspiración del suelo y plantas; conducción y almacenamiento de calor en la capa de suelo; y propiedades térmicas dependientes de la humedad. Resuelve simultáneamente la temperatura de la superficie del suelo y del follaje en cada intervalo de tiempo.

El usuario puede aceptar valores predeterminados o especificar varios parámetros de la construcción del techo verde, incluyendo profundidad del medio de cultivo, propiedades térmicas, densidad del dosel vegetal, altura de la planta, conductancia estomática (capacidad para transpirar humedad) y

condiciones de humedad del suelo (incluyendo riego y precipitación). Actualmente, los efectos de la capa de drenaje y las membranas de protección no están considerados explícitamente en el módulo y deben modelarse por separado.

Las características más importantes del medio de cultivo son su conductividad térmica, capacidad calorífica específica y densidad. Las características de la vegetación más relevantes para el impacto en la transferencia de calor a través del techo son la altura, el índice de área foliar (LAI), la cobertura fraccional, el albedo y la resistencia estomática. El LAI representa la cobertura de área de las hojas en planta: por ejemplo, si en promedio una parcela del techo está bajo dos hojas, el LAI es 2. La cobertura fraccional indica la fracción del techo cubierta directamente por una o más hojas. El albedo es la reflectividad de la superficie a la energía solar incidente. La resistencia estomática es un parámetro biofísico que regula la tasa a la cual la planta puede transpirar humedad a través de sus estomas bajo ciertas condiciones ambientales.

El análisis del balance energético sigue el modelo FASST (fast all season soil strength) desarrollado por Frankenstein y Koenig para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. FASST fue creado parcialmente para determinar la capacidad del suelo para soportar vehículos y movimiento de personal. Para esto, FASST rastrea el balance de energía y humedad (incluyendo hielo y nieve) dentro del suelo vegetal. Es un modelo unidimensional que se basa en otros modelos de dosel vegetal como BATS y SiB. El modelo EnergyPlus está basado en FASST con algunas modificaciones para adaptarlo a una capa de suelo relativamente delgada.

## **2. TRNSYS**

Recientemente, TESS ha incluido en su biblioteca para el programa TRNSYS un modelo de techo verde (Tipo número 785), disponible bajo pedido. Este componente modela un techo verde que puede ser implementado con el Tipo56 (TRNBuild). Los balances energéticos para las partes vegetadas y no vegetadas del techo se calculan simultáneamente, permitiendo que el nivel de vegetación varíe durante el año.

## 10. Cubiertas verdes 5.0: contra el cambio climático

Frente al cambio climático, los avances modernos y recientes en la tecnología de cubiertas verdes han surgido como herramientas fundamentales para mitigar sus efectos. Las cubiertas verdes han evolucionado de simples recubrimientos vegetales a sistemas sofisticados diseñados para enfrentar los desafíos ambientales que plantea el calentamiento global. Con sus múltiples beneficios, que van desde la captura de carbono hasta la reducción del efecto isla de calor urbano, las cubiertas verdes contemporáneas, conocidas como Cubiertas Verdes 5.0, están a la vanguardia de las estrategias de desarrollo urbano sostenible. A continuación, se exploran las características innovadoras, los principios científicos y las aplicaciones reales de las Cubiertas Verdes 5.0, demostrando cómo pueden contrarrestar eficazmente el cambio climático y fomentar ciudades resilientes y habitables.

### 1. Técnicas Avanzadas de Aislamiento Térmico:

Las Cubiertas Verdes 5.0 integran tecnologías de aislamiento de última generación para mejorar su rendimiento térmico y eficiencia energética. Se incorporan materiales innovadores como los aerogeles, los materiales de cambio de fase (PCMs) y los paneles de aislamiento al vacío (VIPs) en las estructuras de las cubiertas verdes para minimizar la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio. Los aerogeles, conocidos por su ultra baja conductividad térmica, ofrecen propiedades de aislamiento superiores mientras mantienen un peso ligero y gran flexibilidad, lo que los hace ideales para aplicaciones en cubiertas verdes. Los PCMs, que absorben y liberan energía térmica durante las transiciones de fase, estabilizan las temperaturas interiores al regular el flujo de calor a través de la estructura del techo. Los VIPs, compuestos por paneles evacuados con una presión de gas extremadamente baja, proporcionan altos niveles de aislamiento con un grosor mínimo, maximizando el aprovechamiento del espacio y reduciendo los costos de construcción. Al integrar estas técnicas avanzadas de aislamiento, las Cubiertas Verdes 5.0 reducen eficazmente las cargas térmicas de calefacción y refrigeración, lo que se traduce en ahorro energético y reducción de emisiones de carbono.

### 2. Sistemas de Riego Sensibles al Clima:

Las Cubiertas Verdes 5.0 emplean sistemas de riego sofisticados equipados con sensores y controladores sensibles al clima para optimizar el uso del agua y mejorar la resiliencia de la vegetación ante condiciones ambientales cambiantes. Estas tecnologías de riego inteligente utilizan

pronósticos meteorológicos, sensores de humedad del suelo y modelos de evapotranspiración para ajustar dinámicamente los horarios de riego y los volúmenes de agua aplicados. Al sincronizar el riego con los patrones climáticos predominantes y las necesidades hídricas de las plantas, las Cubiertas Verdes 5.0 minimizan el desperdicio de agua, evitan tanto el exceso como la escasez de riego y fomentan un crecimiento vegetal saludable. Además, sistemas como el riego por goteo, las alfombrillas capilares y el riego subterráneo suministran agua directamente a la zona radicular, reduciendo al mínimo la escorrentía superficial y las pérdidas por evaporación. Los sistemas de recolección de agua de lluvia y reutilización de aguas grises complementan aún más el suministro de agua para riego, disminuyendo la dependencia de fuentes de agua potable y mejorando la eficiencia hídrica general. Mediante una gestión inteligente del riego, las Cubiertas Verdes 5.0 garantizan la viabilidad a largo plazo y la funcionalidad ecológica de los ecosistemas de techos verdes, incluso frente a la variabilidad climática y la escasez de agua.

### **3. Selección Dinámica de Vegetación:**

Las Cubiertas Verdes 5.0 incorporan estrategias dinámicas de selección de vegetación para optimizar la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y la resiliencia climática. Utilizando principios ecológicos como la composición de comunidades vegetales, la diversidad funcional y la capacidad adaptativa, estos techos verdes están diseñados para albergar ensamblajes diversos de especies nativas y adaptadas, capaces de prosperar en un clima cambiante. La selección de especies considera factores como la tolerancia a la sequía, resistencia al calor, tolerancia a contaminantes y variabilidad estacional, asegurando una cobertura vegetal funcional durante todo el año. Además, las Cubiertas Verdes 5.0 emplean sistemas de plantación modulares y alfombrillas pre-vegetadas para facilitar una instalación rápida, minimizar el choque por trasplante y favorecer el establecimiento de la vegetación. Al fomentar comunidades vegetales diversas y resilientes, estas cubiertas mejoran la captura de carbono, la calidad del aire, la gestión de aguas pluviales y la provisión de hábitat, contribuyendo así a los esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático en entornos urbanos.

### **4. Integración de Energía Solar Fotovoltaica:**

Las Cubiertas Verdes 5.0 adoptan la integración de paneles solares fotovoltaicos (PV) para mejorar la generación de energía, avanzar hacia la neutralidad de carbono y reforzar la resiliencia climática. La combinación de techos verdes con arreglos solares fotovoltaicos maximiza el uso productivo del espacio en las azoteas, aprovechando tanto la energía solar como la cobertura vegetal para compensar el consumo energético de los edificios y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios (BIPV) se incorporan de forma fluida en las cubiertas

verdes, ofreciendo beneficios duales: generación de energía renovable y aislamiento térmico. Además, los sistemas agrivoltaicos, que combinan agricultura con producción solar, aprovechan el sombreado y el efecto de enfriamiento de las cubiertas verdes para mejorar los rendimientos de cultivos y reducir el estrés térmico en las plantas. Mediante una integración innovadora de la energía fotovoltaica, las Cubiertas Verdes 5.0 representan la sinergia entre tecnologías de energía renovable e infraestructura verde, promoviendo la transición hacia ciudades resilientes al clima y libres de carbono.

### **5. Monitoreo y Optimización Basados en Datos:**

Las Cubiertas Verdes 5.0 aprovechan técnicas de monitoreo y optimización basadas en datos para evaluar continuamente su desempeño, identificar oportunidades de mejora y adaptarse a las condiciones climáticas cambiantes. Utilizando redes de sensores, tecnologías de teledetección y sistemas de gestión de edificios, estas cubiertas recolectan datos en tiempo real sobre parámetros ambientales como la temperatura, humedad, radiación solar y el estado de salud de las plantas. Algoritmos de aprendizaje automático y análisis predictivos procesan esta información para optimizar el funcionamiento, mantenimiento y rendimiento de la cubierta verde. Sistemas automatizados ajustan parámetros de riego, ventilación, sombreado e aislamiento térmico en respuesta a pronósticos meteorológicos, demanda energética y dinámica de la vegetación, garantizando un funcionamiento óptimo bajo escenarios climáticos diversos. Además, simulaciones digitales tipo “gemelo digital” y modelos de escenarios permiten a planificadores, diseñadores y gestores de edificios explorar los posibles impactos del cambio climático y evaluar estrategias de adaptación de forma proactiva. Al aprovechar el poder de los datos y la analítica, las Cubiertas Verdes 5.0 empoderan a los actores clave para tomar decisiones informadas, optimizar el uso de recursos y mejorar la resiliencia climática del entorno construido.

En conclusión, las Cubiertas Verdes 5.0 representan un cambio de paradigma en el diseño de edificaciones sostenibles y en la resiliencia urbana, al integrar innovación, tecnología y principios ecológicos para enfrentar el cambio climático. Mediante técnicas avanzadas de aislamiento térmico, sistemas de riego climáticamente adaptativos, selección dinámica de vegetación, integración de energía fotovoltaica y monitoreo inteligente basado en datos, estas cubiertas verdes constituyen la nueva frontera de la infraestructura verde. Al incorporar estas características innovadoras, las Cubiertas Verdes 5.0 tienen el potencial de mitigar el efecto de isla de calor urbana, reducir el consumo energético, mejorar la biodiversidad y fomentar la adaptación climática en ciudades de todo el mundo. A medida que el cambio climático continúa planteando desafíos significativos a los

entornos urbanos, las Cubiertas Verdes 5.0 ofrecen una solución integral que combina funcionalidad ecológica con innovación tecnológica, allanando el camino hacia un futuro más sostenible y resiliente.

## 10.1. Evaluación del impacto de las cubiertas verdes en el microclima urbano

### 1. ENVI-met:

Disponible en [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com). Desarrollado por el Prof. Dr. Michael Bruse y su equipo, Environmental Modeling Group, Instituto de Geografía, Universidad de Mainz (Alemania).

Este es un modelo tridimensional de microclima diseñado para simular las interacciones entre la superficie, las plantas y el aire en entornos urbanos, con una resolución típica de entre 0,5 a 10 metros en distancia y 10 segundos en el tiempo. Las áreas típicas de aplicación, por nombrar algunas, son la Climatología Urbana, la Arquitectura, el Diseño de Edificios y la Planificación Ambiental.

Permite analizar las interacciones a pequeña escala entre el diseño urbano y el microclima. El modelo combina el cálculo de parámetros de dinámica de fluidos, como el flujo de viento o la turbulencia, con los procesos termodinámicos que tienen lugar en la superficie del suelo, en las paredes, en los techos o en las plantas. El modelo puede simular geometrías complejas como terrazas, balcones o barrios complejos.

El modelo incluye la simulación de: flujo alrededor y entre edificios, procesos de intercambio de calor y vapor con la superficie del suelo (tierra) y con las paredes, turbulencia, intercambio con la vegetación y parámetros vegetales, bioclimatología y dispersión de contaminantes.

El modelo de cálculo incluye: flujos de radiación de onda corta y larga con respecto a sombras, reflexión y re-radiación de los sistemas constructivos y la vegetación, transpiración, evaporación y flujos de calor sensible desde la vegetación hacia el aire, incluyendo la simulación completa de todos los parámetros físicos de las plantas (por ejemplo, tasa de fotosíntesis, temperatura superficial y de paredes para cada punto de malla y pared), intercambio de calor y masa (agua) dentro del suelo, cálculo de parámetros biometeorológicos como la Temperatura Radiante Media o el valor PMV (Predicted Mean Vote) de Fanger, dispersión de gases inertes y partículas incluyendo la sedimentación de partículas sobre hojas y superficies, edificios, vegetación, suelo/superficies y fuentes de contaminantes. Además de fuentes naturales y artificiales, el modelo también es capaz de tratar cuerpos de agua.

ENVI-met es un software de modelado de microclima urbano de alta resolución que permite simular entornos urbanos y analizar el impacto que un determinado diseño urbano y arquitectónico tiene sobre

el microclima urbano o el entorno exterior, permitiendo diseñar edificaciones y áreas urbanas eficientes.

Para simular el comportamiento dinámico del complejo sistema microclimático, esta herramienta utiliza un enfoque holístico en el cual todos los fenómenos o procesos interactuantes se integran, interconectan y simulan juntos en un único modelo 3D detallado. Este modelo microclimático tridimensional nos permite simular interacciones a pequeña escala entre la superficie, la vegetación y el aire que ocurren en un entorno urbano a microescala con una resolución horizontal típica de entre 0,5 a 10 metros, un periodo de simulación típico de 24 a 48 horas y un paso de tiempo de entre 1 a 5 segundos.

El modelo de simulación incluye: dinámica atmosférica, flujo alrededor y entre edificios mediante el uso de CFD, procesos de intercambio en la superficie del suelo y en las paredes de los edificios (incluyendo hidrología del suelo), física de edificaciones (simulación energética del edificio, clima interior del edificio), impacto de la vegetación en el microclima local, bioclimatología y dispersión de contaminantes.

El modelo está en desarrollo continuo, y el usuario puede encontrar una descripción resumida de las diferentes versiones y las últimas actualizaciones en su sitio web. Además de la versión gratuita (ENVI-met Standard), existe una Versión Profesional con módulos de análisis adicionales y una Versión Expert con funciones avanzadas de modelado, aunque esta última solo está disponible dentro del trabajo de consultoría del equipo de ENVI-met. Además, los desarrolladores pueden ofrecer una amplia gama de módulos de simulación personalizados y especializados según los requisitos particulares de diseño, ofreciendo incluso soporte sobre las mejores estrategias para optimizar un diseño determinado. En el sitio web, el usuario puede encontrar una amplia colección de tutoriales, preguntas frecuentes e información útil sobre el programa y su uso, así como artículos y publicaciones de investigación relacionadas con el programa. El programa NO es de código abierto.

## **2. SOLENE-microclimate:**

SOLENE es una herramienta de simulación numérica 3D que fue desarrollada inicialmente por el laboratorio CERMA para evaluar los procesos de radiación que tienen lugar en entornos urbanos. Posteriormente, se añadieron modelos adicionales que ampliaron el alcance de la herramienta, de modo que actualmente la herramienta SOLENE-microclimate tiene como objetivo permitir la evaluación y cuantificación del impacto directo e indirecto que el microclima generado en un entorno urbano tiene sobre:

- El confort térmico en espacios exteriores.
- Las cargas térmicas de un edificio determinado dentro del entorno.

Gracias a esta herramienta, es posible evaluar y cuantificar el impacto que diversas soluciones de mitigación del clima urbano tienen sobre el confort y las cargas térmicas del edificio.

Los modelos desarrollados e implementados en SOLENE-microclimate que permiten esta evaluación son los siguientes:

- Modelos para determinar las condiciones microclimáticas del entorno:
  - Radiación solar
  - Intercambios de radiación de onda larga con el entorno
  - Transferencia de calor a través de la envolvente del edificio
  - Transmisión térmica a través del terreno
  - Convección entre superficies y aire
  - Evapotranspiración en superficies naturales (vegetación)
  - Evaporación en masas o láminas de agua
  - Calor antropogénico (solo fuentes debidas a sistemas de climatización)
  - Movimiento del aire (campo de velocidades del aire)
- Modelo de confort térmico
- Modelo de comportamiento térmico del edificio (cálculo de cargas térmicas y temperatura en oscilación libre para un edificio en el dominio de estudio)

Se han implementado varios modelos de vegetación, como modelos para vegetación de gran altura (árboles) y de baja o media altura (fachadas verdes o cubiertas vegetadas). La integración de estos modelos en la herramienta permite evaluar la interacción de la vegetación con el entorno, y estudiar, por ejemplo, la influencia de ciertos parámetros específicos en el consumo energético de los edificios. Una comparación de los resultados obtenidos para fachadas verdes con datos experimentales fue realizada por [15].

El impacto de la vegetación en el entorno se tiene en cuenta mediante:

- Sombras proyectadas (en el caso de vegetación alta)
- Intercambio de radiación de onda larga con el resto de superficies circundantes

- Convección con el aire circundante
- Evapotranspiración
- Pérdida de presión en el movimiento del aire (la vegetación alta se considera un medio poroso)

La vegetación de gran altura se modela como una celda volumétrica, por lo tanto, se considera no solo en el modelo térmico de SOLENE-microclimate, sino también en el modelo CFD, con el fin de evaluar su efecto sobre el movimiento del aire. Por el contrario, la vegetación de baja y media altura se modela como una celda superficial y, en consecuencia, solo se tiene en cuenta en el modelo térmico (balance térmico superficial). En ambos casos, existe un acoplamiento entre el modelo térmico de SOLENE-microclimate y el modelo CFD.

SOLENE is a 3D numerical simulation tool that was initially developed by the CERMA laboratory to evaluate the radiation processes that take place in urban environments. Subsequently, additional models were added that expanded the scope of the tool, so that currently the SOLENE-microclimate tool [15] has the purpose of allowing the evaluation and quantification of the direct and indirect impact that the microclimate originating in an urban environment has on:

- Thermal comfort in outdoor environments.
- The thermal loads of a certain building in the environment.

By using this tool, it is then possible to evaluate and quantify the impact that different urban climate mitigation solutions have on the comfort and thermal loads of the building.

The models developed and implemented in SOLENE-microclimate that allow this evaluation are the following:

- Models for determining microclimatic conditions in the environment:
  - Solar radiation
  - Exchanges of long wave radiation with the environment
  - Heat transfer through the building envelope
  - Transmission through the terrain
  - Convection between surfaces and air
  - Evapotranspiration on natural surfaces (vegetation)
  - Evaporation in masses or sheets of water
  - Anthropogenic heat (only sources due to conditioning systems)
  - Air movement (air velocity field)
  - Thermal comfort model

- Building thermal behaviour model (calculation of thermal loads and temperature in free oscillation for a building in the domain under study)

Several vegetation models have been implemented, such as models for high-rise vegetation, such as trees, and low- and medium-rise vegetation, such as facades or green roofs [6]. The integration of these models in the tool allows evaluating the interaction of vegetation with the environment, and studying, for example, the influence of some specific parameters on the energy consumption of buildings. A comparison of the results obtained for green facades with experimental data was carried out by [15].

The impact of vegetation on the environment is taken into account through:

- Projected shadows (in the case of tall vegetation)
- Long wave radiant exchange with the rest of the surrounding surfaces
- Convection with the surrounding air
- Evapotranspiration
- Pressure loss in air movement (high altitude vegetation is considered a porous medium)

High-altitude vegetation is considered in the model as a volumetric cell. Therefore, it is not only taken into account in the SOLENE-microclimate thermal model, but also in the CFD model, in order to evaluate its effect on air movement. On the contrary, low and medium height vegetation is considered a surface cell and, consequently, is only taken into account in the thermal model (surface thermal balance). Obviously, in both cases, there is a coupling between the SOLENE-microclimate thermal model and the CFD model.

## 11. GREENO2 CASO DE ESTUDIO

### 11.1. Caso de estudio en Italia

El estudio de caso ilustrativo presentado aquí se centra en el Polder Roof, un techo azul-verde (Blue-Green Roof, BGR) desarrollado por la empresa MetroPolder, con sede en los Países Bajos. Este piloto experimental de BGR está ubicado en el sitio de investigación hidrológica de la Universidad de Tuscia, en el centro de Italia, accesible a través de [www.mechydrolab.org](http://www.mechydrolab.org) y representado en la Figura 4.

Elevado 90 cm sobre el suelo mediante una estructura de madera, el techo cubre un área total de 16 m<sup>2</sup> (4 m × 4 m). Consta de una capa de almacenamiento de 8 cm y 10 cm de suelo. La válvula inteligente, ubicada a una altura fija de 7 cm, representa la capacidad máxima de retención para el BGR específico en observación.

Esta capacidad de retención predeterminada permite evaluar el rendimiento del BGR en un clima mediterráneo, caracterizado por una alta demanda hídrica durante los períodos secos. La vegetación presente en el techo incluye *Sedum album* y *Sedum acre*. El conjunto de datos utilizado en este estudio abarca el período comprendido entre el 30 de octubre de 2020 y el 31 de diciembre de 2022.

Los objetivos principales de esta sección son los siguientes:

- Presentar el rendimiento hidrológico del BGR analizado, considerando toda la serie temporal de precipitaciones y a escala de eventos individuales de lluvia.
- Presentar el rendimiento térmico del BGR, considerando datos con una resolución de 5 minutos para el año 2021, en comparación con un techo de referencia.



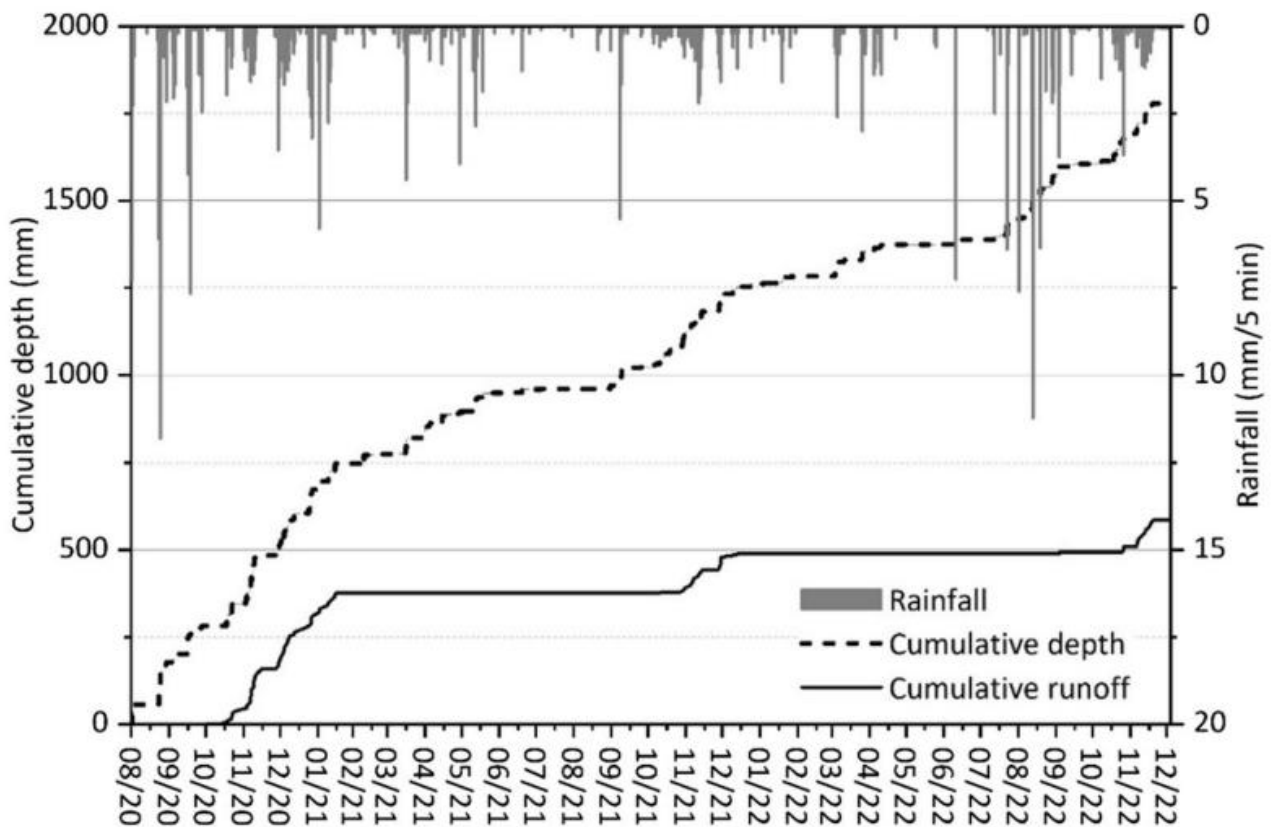
**Figura 4. El estudio de caso del BGR en Viterbo (Italia Central)**

El rendimiento hidrológico del BGR está intrínsecamente ligado a la gestión operativa de la válvula inteligente, que se ha mantenido constantemente a una altura de 7 cm durante todo el período de observación. Esta altura corresponde a la capacidad máxima de almacenamiento de agua para el BGR especificado. Durante el período del 30 de agosto de 2020 al 31 de diciembre de 2022, la precipitación acumulada registrada fue de 1779 mm, con un escurrimiento acumulado de 585 mm. No se observaron casos de nevadas durante este período de investigación.

Desglosando las cantidades de precipitación acumulada, del 30 de agosto de 2020 al 31 de diciembre de 2020, la precipitación acumulada observada fue de 527,3 mm. La precipitación acumulada anual aumentó a 706 mm en 2021 pero disminuyó a 546 mm en 2022. Estos valores están notablemente por debajo de la precipitación acumulada promedio registrada en Viterbo desde 1916, que asciende a 810 mm. El año 2022, en particular, fue testigo de condiciones severas de sequía.

Dirigiendo la atención al escurrimiento del BGR, los valores acumulados fueron de 198 mm del 30 de agosto de 2020 al 31 de diciembre de 2020, seguidos de 283 mm en 2021 y 103,5 mm en 2022. La Tasa de Retención de Aguas Pluviales (SRR, por sus siglas en inglés) calculada para todo el período fue del 67,1 %, con tasas específicas del 62,3 % del 30 de agosto de 2020 al 31 de diciembre de 2020, 59,8 % en 2021 y un notable aumento al 81 % en 2022. La considerable variación en la SRR entre 2021 y 2022 puede atribuirse a la reducción en la profundidad anual de precipitación en 2022 (-22 %), lo que condujo a condiciones más secas en el BGR. En consecuencia, hay un mayor volumen de

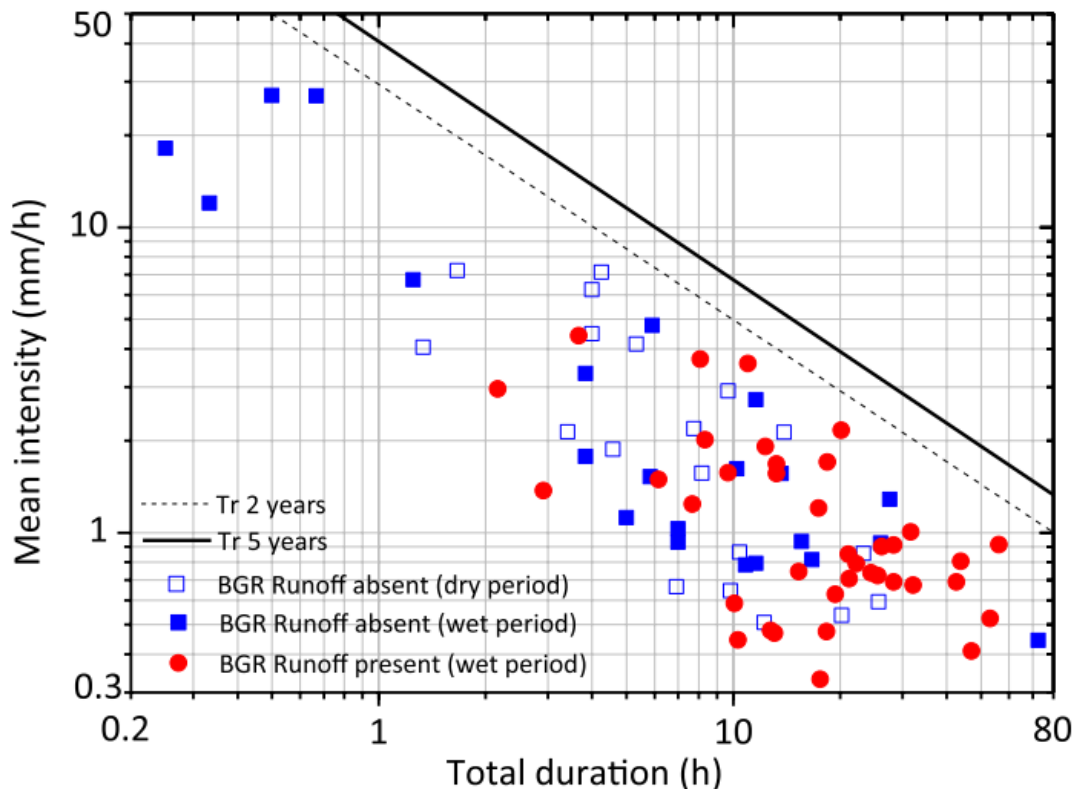
vacío capaz de retener aguas pluviales. Consulte la Figura 5 para una representación visual de la serie temporal observada de precipitaciones y escurrimiento del BGR.



**Figura 5. Serie temporal de precipitaciones, profundidad acumulada de precipitación y serie temporal de profundidad acumulada de escurrimiento del BGR con una resolución temporal de 5 minutos para todo el período de observación.**

La Figura 6 presenta una visión general de los 79 eventos registrados en el período de tiempo investigado, diferenciando aquellos con y sin escurrimiento del BGR, así como los eventos ocurridos durante períodos secos y húmedos. Como se mencionó anteriormente, no se observaron eventos de escurrimiento durante el período seco. Además, la figura proporciona una referencia al ilustrar las curvas de intensidad–duración–frecuencia (IDF) para períodos de retorno ( $T_r$ ) de 2 y 5 años. Estas curvas fueron estimadas aplicando la distribución de valores extremos generalizada a la serie temporal de máximos anuales de la estación pluviométrica de Viterbo, disponible desde 1916, para duraciones de 1, 3, 6, 12 y 24 horas. Resulta evidente que la mayoría de los eventos fueron ordinarios, con solo tres que tuvieron un período de retorno de aproximadamente 2 años. Al enfocarse en los eventos

durante el período húmedo, no hay una distinción clara entre los eventos con y sin escurrimiento, representados por cuadrados azules y círculos rojos, respectivamente. Esta falta de diferenciación podría atribuirse a la profundidad de la precipitación antecedente, la cual evidentemente desempeña un papel significativo en la determinación de la respuesta del BGR.



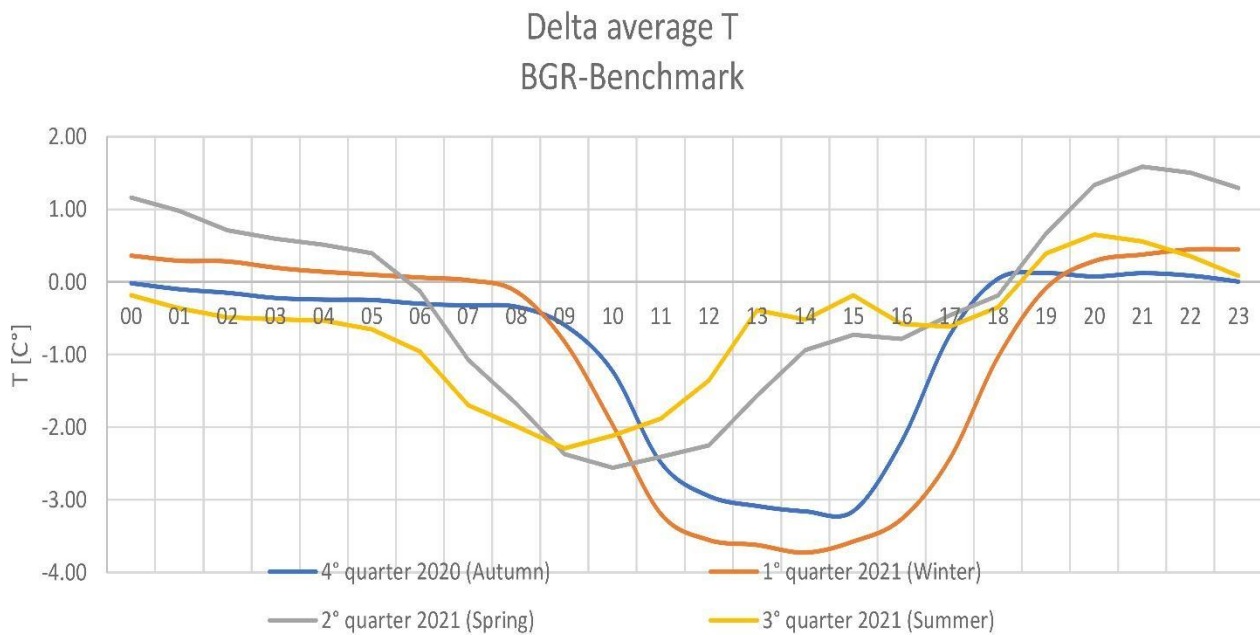
**Figura 6. Los 79 eventos de precipitación observados. La representación visual incluye cuadrados vacíos azules, que denotan eventos sin escurrimiento del BGR durante el período seco (primavera y verano), y cuadrados azules, que representan eventos sin escurrimiento del BGR durante el período húmedo (otoño e invierno). Además, los círculos rojos indican eventos con escurrimiento del BGR durante el período húmedo (otoño e invierno). Cabe destacar que no se observaron eventos con escurrimiento del BGR en el período seco. La figura también incorpora curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) para varios períodos de retorno. La línea punteada corresponde a un período de retorno de 2 años (Tr 2 años), mientras que la línea gruesa representa un período de retorno de 5 años (Tr 5 años).**

Para el análisis de la eficiencia térmica del BGR, se ha examinado la temperatura del aire justo por encima del techo verde y se ha comparado con la registrada en un techo de acero (Benchmark) ubicado a pocos metros del BGR (Figura 7).



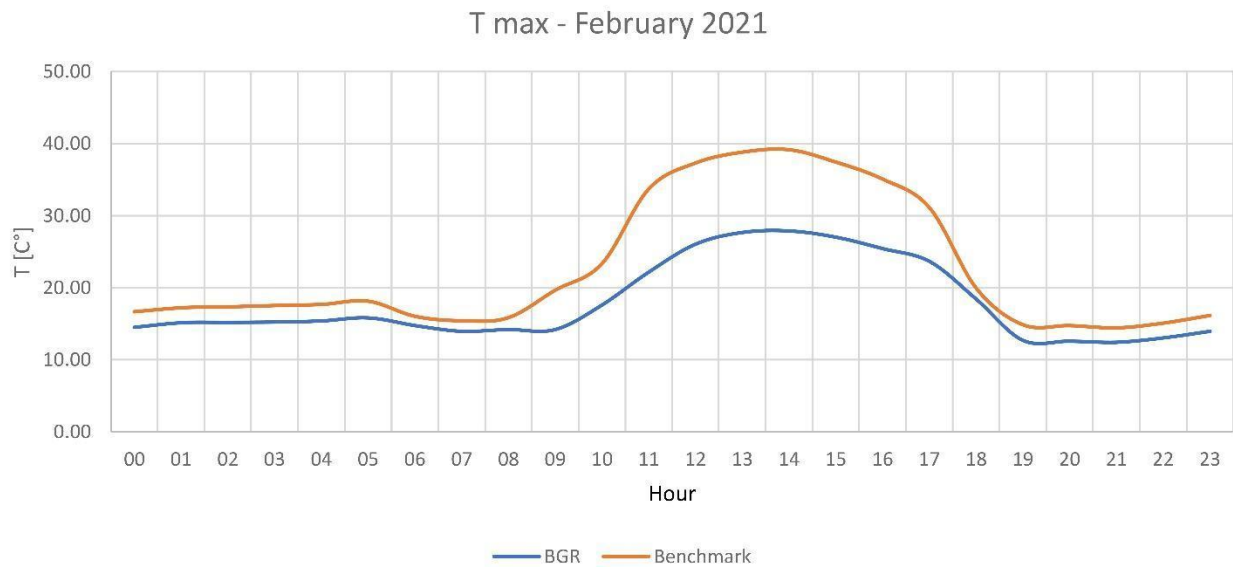
**Figura 7. El techo de acero (benchmark).**

La Figura 8 muestra la tendencia de la diferencia promedio de temperatura entre el BGR y el Benchmark por trimestre. Es evidente que las temperaturas en el techo de referencia son más altas en comparación con las registradas en el BGR, especialmente durante las horas más calurosas del día.

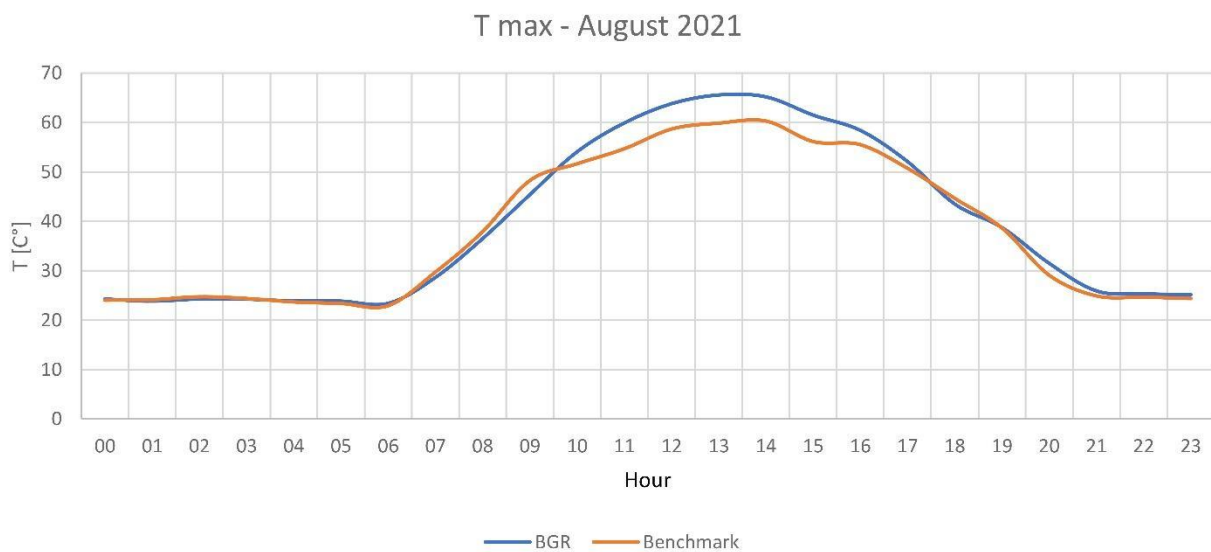


**Figura. 8. Diferencia media de temperatura (T) BGR (Polder) - Benchmark por trimestre (año 2021).**

Sin embargo, el análisis de meses y horas individuales revela dinámicas divergentes. Por ejemplo, en el mes de febrero (Figura 9), cuando el BGR presenta una vegetación exuberante y el suelo está saturado de lluvia, el efecto térmico es significativo, con temperaturas máximas del aire hasta 11 grados inferiores a las del benchmark. Sin embargo, durante el periodo de verano, especialmente en tiempos de aridez intensa con vegetación seca o ausente, el escenario cambia. En agosto de 2021 (Figura 10), las temperaturas máximas por hora registradas en el techo Polder son iguales o ligeramente superiores (hasta un máximo de 5.5°), particularmente durante las horas más calurosas del día (después de las 11 a.m.).



**Figura 9. Tendencia de las temperaturas máximas por hora para el techo Polder (BGR) y el benchmark, febrero de 2021.**



**Figura 10. Tendencia de las temperaturas máximas por hora para el techo Polder (BGR) y el benchmark, agosto de 2021.**

En conclusión, desde una perspectiva hidrológica, una parte significativa de los eventos meteorológicos es retenida por el BGR, aunque no se hayan medido eventos extremos en el período de dos años considerado. La eficiencia del BGR disminuye durante los períodos húmedos cuando el techo verde se satura, y las condiciones antecedente son cruciales para determinar su desempeño. En

este caso, es esencial evaluar el rendimiento hidrológico de los techos verdes teniendo en cuenta la variabilidad climática anual e interanual específica del lugar investigado, especialmente la profundidad de lluvia antecedente.

Desde el punto de vista térmico, la variabilidad estacional es un factor fundamental que influye en el rendimiento térmico del techo verde, aunque de manera inversa. Mientras que se registran temperaturas de aire más bajas en el BGR, incluso hasta 11 grados menos, durante los períodos húmedos en comparación con los techos de chapa metálica, el rendimiento se reduce en verano, llegando en algunos casos a ser peor debido a la reflectancia y capacidad térmica del suelo en ausencia de vegetación y humedad. Por tanto, se hace evidente la necesidad de un riego suplementario durante los períodos de verano para mantener la eficiencia térmica y la vegetación.

Por otro lado, en verano, el techo verde muestra su máxima capacidad para retener agua de lluvia, limitando así la escorrentía urbana debido a los espacios vacíos en la estructura del BGR. Sin embargo, es durante el invierno cuando esta capacidad reguladora del agua de lluvia se vuelve más crucial, requiriendo el vaciado del BGR antes de eventos meteorológicos críticos. Como todas las soluciones basadas en la naturaleza, mantener la multifuncionalidad de los servicios ecosistémicos proporcionados por el BGR a lo largo del año requiere considerar la especificidad del sitio, la variabilidad climática local y el mantenimiento y gestión de los sistemas de riego y drenaje.

## 11.2. Caso de estudio en Grecia

Otro caso interesante de un techo verde proviene de Grecia, que también forma parte del consorcio del proyecto. El techo verde de biodiversidad extensiva está ubicado en las instalaciones de l'Oréal en Atenas, Grecia. Se encuentra en una zona urbana rodeada de jardines públicos y privados, sitios arqueológicos, estadios deportivos y pequeñas colinas. Los objetivos principales del plan de acción fueron reconocer la naturaleza como una parte integral del desarrollo urbano innovador y explorar su potencial en términos de mitigación del cambio climático. El diseño del paisaje propuso un techo verde dividido en dos zonas distintas, que estimularían los pequeños hábitats en el área circundante y proporcionarían un centro de biodiversidad para la educación y la concienciación del personal y los visitantes. La zona de información y concienciación se centró en demostrar el valor de la biodiversidad mediante intervenciones demostrativas. La zona de vida silvestre se enfocó en albergar especies de flora y fauna con mínima intervención humana.





**Figura 12: La cubierta verde extensa de biodiversidad**

### 11.3. Caso de estudio en Polonia

Otro ejemplo de cubierta verde de un país del consorcio, Polonia, es la cubierta verde de la Universidad de Varsovia. La cubierta verde de la Biblioteca de la Universidad de Varsovia (BUW) es uno de los jardines en azotea más hermosos y extensos de Europa. La cubierta verde abarca más de 1 hectárea (10,000 metros cuadrados) y está dividida en dos secciones principales: los jardines superiores y los jardines inferiores. El jardín superior incluye terrazas mirador con vistas panorámicas al río Vístula y al horizonte de Varsovia. La cubierta está cubierta con una gran variedad de plantas, incluyendo plantas perennes, arbustos y árboles, cuidadosamente seleccionados para prosperar en

condiciones de azotea. Hay fuentes de agua y pequeños estanques que atraen aves e insectos, contribuyendo a la biodiversidad.



**Figura 13: Cubierta verde en Varsovia, Polonia**

#### 11.4. Caso de estudio en Ucrania

El techo verde del complejo residencial Tetris-Hall es un espacio innovador para la recreación y el ocio en la capital de Ucrania, Kyiv. La cubierta de este edificio, ubicado en el corazón de la ciudad, se ha convertido en un espacio único para sus residentes y visitantes. Gracias a la experiencia de profesionales del estudio de arquitectura paisajista “KOTSIUBA”, se creó un parque que cuenta con árboles maduros, áreas boscosas, zonas abiertas de relajación, un cine de verano, una zona de barbacoa y un puente de vidrio que conecta las torres del complejo.

##### *La importancia de los techos verdes*

Los techos verdes son un elemento crucial de la planificación urbana moderna, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental, mejorando la eficiencia energética de los edificios y creando un ambiente

de vida confortable. Tetris-Hall es un excelente ejemplo de cómo un concepto bien implementado de techo verde puede combinar de manera armoniosa elementos naturales y urbanos, ofreciendo a los residentes un espacio de vida de alta calidad.

#### *Desafío y solución*

El objetivo principal fue crear zonas funcionales que satisfagan las necesidades de todos los grupos de residentes en la azotea del edificio. Esto requirió una reevaluación de la escala y funcionalidad del espacio, dando lugar al desarrollo de un área multifuncional adecuada para diversas actividades durante todo el año.

#### *Ubicación y vistas panorámicas*

Tetris-Hall está situado en el centro mismo de Kyiv, proporcionando fácil acceso a los principales lugares culturales y de entretenimiento de la ciudad. Antes de iniciar el proceso de diseño, se llevó a cabo un estudio para identificar los puntos clave de observación, asegurando la máxima utilización de las vistas panorámicas de la ciudad desde la azotea.

#### *Plan maestro y zonificación*

La azotea sirve como un centro social para los residentes y sus invitados, incluyendo:

- Piscina – para relajación durante la temporada cálida.
- Cine de verano – para proyecciones al aire libre.
- Café y zona de barbacoa – con vistas impresionantes de la ciudad.
- Parque verde – un espacio para paseos y esparcimiento.

La zonificación inicial incluía principalmente grandes espacios para grupos reunidos en la piscina, el bar o la zona de barbacoa. El nuevo concepto introdujo elementos funcionales adicionales, permitiendo el uso de la azotea durante todo el año. La variedad de espacios, que difieren en escala y propósito, satisface las diversas necesidades de todos los residentes.

#### *Zonas funcionales clave*

- Plaza abierta – La disposición de los bancos permite un uso flexible del espacio.
- Zona de barbacoa – Diseñada con secciones separadas para cuatro grupos y una zona común compartida.
- Áreas de juegos infantiles – Una zona Lego y una estructura de red crean un ambiente de juego atractivo.

- Café – Un espacio cerrado que permite un uso cómodo de la azotea sin importar las condiciones climáticas.
- Parque – Área verde con formas fluidas y curvas que enriquecen la experiencia de ocio de los residentes.

Así, la cubierta de Tetris-Hall se ha convertido en algo más que una estructura técnica: es un espacio confortable para la relajación, el trabajo y la socialización, integrado armoniosamente en el ritmo dinámico de la ciudad. Su implementación demuestra la efectividad de los conceptos de techos verdes en el desarrollo urbano moderno, creando un entorno de vida sostenible y atractivo desde el punto de vista ambiental.



**Figura 14: Cubierta verde en Kiev, Ucrania**

### 11.5. Caso de estudio en España

Esta sección presenta una lista seleccionada de ejemplos reales de edificios con techos verdes de distintas partes del mundo. Cada ejemplo resalta el diseño único, la implementación y los beneficios logrados, demostrando cómo los techos verdes contribuyen a la eficiencia energética, la refrigeración urbana, la mejora ambiental y el aumento de la biodiversidad. A través de estos estudios de caso, se

busca ilustrar el potencial transformador de los techos verdes para crear ciudades más sostenibles, resilientes y habitables.

### **Ayuntamiento de Isla Cristina**



Imagen tomada del sitio web (se debe verificar el copyright) (Edificio público - Sempergreen, s.f.)

Ubicación: Isla Cristina, España

Área: aprox. 200 m<sup>2</sup>

Año de construcción: 2020

Arquitecto/Planificación: impermeabilizaciones Sinhume.

Sistema aplicado: manta de mezcla de Sedum

Para mejorar el confort térmico interior y reducir el consumo energético, se instaló una cubierta vegetal de 200 m<sup>2</sup> en el nuevo edificio del ayuntamiento de Isla Cristina.

Isla Cristina está situada en la provincia de Huelva, en el sur de España. Cuenta con un clima caracterizado por un alto número de horas soleadas al año y es una de las zonas más cálidas de España. Esto hace muy importante reducir las ganancias solares a través del techo. Las cubiertas vegetales

son altamente efectivas para reducir estas ganancias solares. En particular, las plantas de Sedum absorben hasta un 50% de la radiación solar y reflejan un 30%, manteniendo su temperatura cercana a la del aire circundante. Muchas especies de Sedum provienen de la región mediterránea, lo que las hace bien adaptadas a las condiciones locales. Gracias a sus propiedades naturales, requieren poco mantenimiento, agua y nutrientes, lo que las hace ideales para zonas secas y/o frías donde el agua puede ser escasa.

Esta solución ecológica contribuye a crear un clima interior más fresco y agradable, gracias a su alta capacidad de aislamiento térmico. En consecuencia, el sistema de aire acondicionado puede funcionar con menor intensidad, lo que resulta en ahorro de energía.

## 11.6. Otros casos de estudio

Ubicación: Roscoff, Francia

Área: aproximadamente 1300 m<sup>2</sup>

Año de construcción: 2014

Arquitecto/Planificación: diseñado por Archus y construido por Serneke.

Sistema aplicado: manta de mezcla de Sedum

Se construyó un edificio multifuncional en el puerto de Roscoff, Francia, que alberga un restaurante y un club de pesca, entre otros. En 2014 se instaló una cubierta vegetal con vegetación tipo Sedum, conocida por su capacidad de adaptarse a las condiciones variables del clima oceánico. Esta cubierta verde es de fácil mantenimiento y protege el material del techo contra las inclemencias del tiempo, prolongando la vida útil del techo durante muchos años.

El edificio también cuenta con un puente de madera que atraviesa la cubierta verde, ofreciendo hermosas vistas del puerto, el mar y la propia cubierta.

### **Sede Central LIDL, Suecia**

Ubicación: Estocolmo, Suecia

Área: aprox. 4000 m<sup>2</sup>

Año de construcción: 2021

Arquitecto/Planificación: diseñado por Archus y construido por Serneke.

Sistema aplicado: manta de Sedum mix

En los últimos años, Lidl ha renovado varias de sus tiendas con techos verdes como parte de su estrategia continua de sostenibilidad y protección ambiental. El nuevo edificio de oficinas centrales en la región de Estocolmo, que inicialmente albergará a más de 400 empleados, junto con la tienda adyacente, ha sido diseñado para satisfacer los deseos y necesidades de la cadena alemana de supermercados. El techo está cubierto de vegetación que mejora las condiciones de confort y reduce el consumo energético del edificio, al mismo tiempo que sirve como hábitat para insectos y pequeños pájaros. Esta nueva sede ha recibido la certificación ambiental BREEAM Excellent.

### **Sede Central AMPO, España**

Ubicación: Idiazabal, España

Superficie: aproximadamente 6000 m<sup>2</sup>

Año de construcción: 2018

Arquitecto/Planificación: LKS KREAN.

Sistema aplicado: Sistema de Techo Verde Urbanscape

El Grupo AMPO, líder internacional en fundiciones de acero inoxidable y aleaciones especiales, inauguró sus nuevas instalaciones en Idiazabal el 17 de octubre de 2018. El proyecto, que se completó en 24 meses, fue diseñado y construido por LKS KREAN.

El edificio fusiona los conceptos de industria y naturaleza, imaginándolo como un bosque capaz de albergar diferentes habitantes, usos y escenarios, todos contribuyendo a un ecosistema vivo y sostenible. La envolvente del edificio incorpora conceptos naturales, materializándose en un techo verde que mejora la eficiencia energética y el confort térmico interior.

El techo verde cubre un área de más de 6,000 m<sup>2</sup> con mantas de Sedum-mix de Sempergreen. Está equipado con un sistema de techo verde Urbanscape, un sistema ligero con alta capacidad de retención de agua. Este sistema pesa solo 65 kg/m<sup>2</sup> cuando está completamente saturado, lo que lo convierte en

una solución ligera ideal para cualquier tipo de techo. Es capaz de reducir la presión del agua pluvial en el sistema de alcantarillado local en casi un 60%, dependiendo de la precipitación anual.

### **Centro Comercial Lagoh, España**

Ubicación: Sevilla, España

Superficie: aproximadamente 10,000 m<sup>2</sup>

Año de construcción: 2019

Arquitecto/Planificación: L35 Arquitectos, S.A.P., Madrid

Cliente: Grupo Lar, Madrid

Realización: Viveros Olimpia S.L, Sevilla y Ancoma S.L., Sevilla

Sistema aplicado: Techo inclinado ZinCo® con Floraset® FS 75

El techo verde de aproximadamente 10,000 m<sup>2</sup> del centro comercial Lagoh proporciona beneficios climáticos, visuales y ambientales, aumentando la biodiversidad y reduciendo la huella de carbono, además de incrementar la sensación de confort y bienestar.

Debido a que el techo es inclinado, se utilizaron elementos comerciales apropiados para este tipo de cubierta, como el elemento de drenaje Floraset® FS 75, que se aplicó en toda la superficie y es ideal para estabilizar el sustrato en las áreas de techos inclinados, previniendo su erosión. Se utilizó el perfil TRP 140 para crear barreras de retención distribuyendo las fuerzas de empuje.

### **Parque Al Shaheed, Kuwait**

Ubicación: Kuwait, Kuwait

Superficie: aproximadamente 19,500 m<sup>2</sup>

Año de construcción: 2014

Arquitecto/Planificación: TAEP, The Associated Engineering Partnership, Kuwait

Sistema aplicado: Stabilodrain® SD 30

El "Parque Al Shaheed" está ubicado en la carretera de circunvalación más antigua del país, en la periferia de la ciudad de Kuwait. Es el parque urbano más grande del país. Fue construido principalmente para proteger la ciudad de las tormentas de arena y para reducir la contaminación del aire. Además, el parque tiene como objetivo conmemorar a las víctimas de la primera Guerra del Golfo, ya que "Al Shaheed" significa "Parque de los Mártires".

Como parte del rediseño, se situó un lago artificial en el centro del parque. Esta característica no solo es un elemento paisajístico, sino que también sirve como reservorio de agua durante la temporada calurosa. El parque alberga dos museos, un centro de visitantes, un estacionamiento subterráneo con 800 plazas, restaurantes y tiendas. Para mantener el carácter continuo del parque, la mayoría de los edificios fueron equipados con techos verdes accesibles. A pesar de la vegetación cuidadosamente seleccionada, estos techos aún necesitan ser regados.

## 12. Dimensiones comunicativas del concepto de cubierta verde en el discurso social: una perspectiva desde Ucrania

La aceptación de cualquier idea en la sociedad comienza con un diálogo social. Los actores clave en este diálogo son aquellos que tienen un nivel suficiente de importancia social para la audiencia, y su éxito depende del grado en que los argumentos a favor de una nueva idea o proceso respondan a las necesidades sociales y reflejen las tendencias humanísticas generales. El concepto de techos verdes se ha convertido en la ocasión para un amplio debate social, cuyos participantes (actores) fueron representantes de la comunidad científica (desde ecólogos, biólogos y químicos hasta especialistas en administración y dimensiones sociales de las actividades comunitarias), representantes del sector empresarial, ONG, activistas sociales, etc. El nivel de discusión sobre la conveniencia de introducir la idea de techos verdes se ha vuelto tan fuerte que han surgido programas y proyectos separados para promover e implementar varios componentes del concepto, desde la aparición de nuevos objetos específicos hasta la formación de un campo de comunicación en el discurso social sobre la necesidad de desarrollar y apoyar la ecologización urbana basada en este concepto.

El estudio de las áreas clave del debate social sobre la implementación del concepto de techos verdes tiene dos objetivos principales: el primero es identificar con qué frecuencia aparecen nuevas ideas, teorías, soluciones conceptuales y procesos para implementar el concepto y articular estos procesos; el segundo es identificar qué categorías de información o tecnología están menos articuladas en el discurso social y requieren una reconsideración y mayor actividad comunicativa para implementar la idea de techos verdes en Europa y en el mundo en general.

Para resolver estos problemas, ofreceremos una breve visión general de los enfoques para cubrir el tema de techos verdes en los ámbitos de la ciencia, los negocios y las ONG. Nuestro estudio se basa en material de fuentes ucranianas, pero el análisis de estas fuentes sugiere que el modelo de comunicación para popularizar el concepto es más o menos universal y puede reflejar el estado de articulación comunicativa del problema de los techos verdes en general.

La comprensión científica del problema está mayormente representada en los trabajos de científicos naturales, que se centran en la tipología de los techos verdes y en la formación de enfoques para crear proyectos reales, tomando en cuenta los logros científicos modernos y los enfoques puramente tecnológicos. Cabe señalar que los científicos naturales también se enfocan en categorías

empresariales y económicas, proyectando las posibilidades de cambio social y transformación si se implementa el concepto, por lo que mencionaremos algunos estudios en la parte del texto que trata estos aspectos.

El enfoque para la selección de trabajos científicos utilizados en este material no pretende absolutizar ni reflejar toda la investigación ucraniana sobre techos verdes, sino más bien reflejar las direcciones y aspectos del debate social, para revelar ciertas áreas indicativas de la implementación del concepto de techos verdes en la sociedad. Por lo tanto, los materiales mencionados aquí reflejarán en mayor medida la diversidad científica de enfoques y puntos de vista, lo que permitirá cumplir el segundo objetivo de este trabajo: reflejar el nicho informativo y formar tendencias prometedoras en el desarrollo comunicativo del concepto de techos verdes en el discurso social.

El primer estudio que vale la pena mencionar fue publicado en Ucrania hace más de 10 años (Bogun K., 2013) y tiene como objetivo calificar científicamente los beneficios de la vegetación en techos. La investigadora enumera de forma sistemática y completa los beneficios técnicos, sociales, económicos y ambientales con referencias a fuentes y estudios previos donde estos aspectos se presentan con mayor profundidad. Desde el punto de vista del valor comunicativo de este material, definiremos dos aspectos: la formación de una imagen generalizada sobre la viabilidad de implementar el concepto de techos verdes y la estructuración de los beneficios de implementar el concepto en proyectos reales, en el orden indicado anteriormente. Es importante destacar que los beneficios técnicos, que incluyen la solución al problema de enfriamiento (aire acondicionado) de los espacios, reducción del ruido, efecto de isla de calor y protección contra los rayos ultravioletas, expresan de manera sucinta el discurso científico del problema dentro de una declaración breve que refleja y resume la investigación científica de años anteriores. La investigadora coloca los beneficios sociales en segundo lugar, aunque solo aborda el problema de la creación de “espacios adicionales que pueden ser usados como lugares de recreación” y la creación de “un efecto positivo del contacto de las personas con la naturaleza”. Este nivel de comprensión del problema indica que en 2013 y años anteriores, al menos en Ucrania, la cuestión de los techos verdes como plataforma para la actividad social y la unidad comunitaria en temas ambientales y la creación de un espacio de vida confortable no estaba debidamente actualizada ni presentada. Sin embargo, más adelante este problema se articuló con mayor claridad. Los beneficios económicos y ambientales de los techos verdes en realidad repiten los enfoques de estudios previos en ciencias naturales y reflejan una tendencia global.

Una conclusión interesante del estudio es que, a pesar de su enfoque generalmente naturalista, apela a procesos sociales: “Debido a que los techos verdes en Ucrania aún no han ganado la popularidad que merecen entre los desarrolladores e individuos, su promoción, así como las tecnologías verdes en general, debe realizarse con la participación de las autoridades locales y organizaciones públicas. La regulación de este tema debería comenzar con la consolidación de las tareas relevantes en la Estrategia de Desarrollo Urbano, y detallarse en los programas de desarrollo socioeconómico o en documentos programáticos individuales pertinentes” (Bogun K., 2013). Esta declaración, así como la lista generalizada de ventajas de los techos verdes, permiten destacar la posición básica del modelo comunicativo para reflejar el concepto de techos verdes en el discurso científico: ya en 2013 se formó y fundamentó la conveniencia de crear techos verdes, se esbozó su tipología, se determinaron los requisitos y características para su implementación, y se advirtió sobre la complejidad del problema, que requiere no solo soluciones técnicas (o tecnológicas), sino también su correlación con iniciativas legales y sociales que puedan ser implementadas a nivel de autoridades locales o, a un nivel superior, nacional.

A continuación, revisaremos una serie de estudios de los últimos tres años para probar la tesis anterior: los académicos son más detallados en el concepto científico clave de techos verdes, estudiando las características de elementos o estructuras individuales del sistema, formando la base para la implementación de proyectos específicos, etc.

Un ejemplo de tales estudios es el trabajo de A. Hrechko (Hrechko A., 2022) y de O. Rybak, I. Patseva (Rybak O., Patseva I., 2023, Rybak O., Patseva I., 2024). Estos estudios abordan el problema de la implementación de proyectos individuales de techos verdes desde el punto de vista de la selección del material de siembra, aunque los autores plantean el problema de manera más amplia y enfatizan las ventajas y la viabilidad de introducir techos verdes en las ciudades ucranianas.

Al mismo tiempo, cabe señalar que las opiniones de los investigadores coinciden en cuanto a la implementación de este problema. A. Hrechko escribe: “La implementación de la tecnología de techos verdes en diferentes países tiene características distintas, pero lo común es que, al elegir las plantas, es necesario usar plantas locales que estén adaptadas a las condiciones climáticas de una determinada área, y se requiere un marco legislativo para desarrollar esta idea. Dados todos los beneficios del uso de esta tecnología, su implementación es una necesidad para la adaptación al cambio climático” (Hrechko, 2022, p. 32). La misma tesis es continuada por O. Rybak e I. Patseva: “... desde un punto de vista ambiental, incluso para la jardinería en techos, tiene sentido usar semillas de plantas silvestres y material de plantación de origen local” (Rybak O., 2024, p. 170). Desde el

punto de vista del análisis del modelo de comunicación, debemos afirmar que las ideas y enfoques para la implementación del concepto de techos verdes se repiten en el discurso científico, lo que, por un lado, indica una conciencia suficiente del problema y, por otro lado, que el concepto se ha “arraigado” bastante firmemente en el entorno científico. Como ilustración, podemos citar otra tesis de A. Hrechko, que se correlaciona con el estudio mencionado anteriormente de K. Bogun y con estudios previos presentados en el discurso académico europeo: “Los techos verdes, como elementos de la infraestructura verde, proporcionan ciertos servicios ecosistémicos — el principal es la reducción de la isla de calor urbana” (Hrechko, 2022, p. 39).

Otra área de la investigación científica moderna sobre el concepto de techos verdes es la formación de condiciones específicas para la implementación del proyecto o la formación de enfoques técnicos en un lugar particular. Por ejemplo, consideremos el artículo de I. Patseva y sus colegas, que analiza el ajardinamiento de techos como una forma de adaptarse al cambio climático para una ciudad específica en Ucrania, Zhytomyr (Patseva I. et al., 2023). El estudio analiza la composición química y las características de los sustratos para techos verdes, teniendo en cuenta las características climáticas de la ciudad de Zhytomyr, los investigadores señalan que al momento de escribir no existen techos verdes en la ciudad, pero sí hay necesidad de implementar este concepto, dadas las condiciones ambientales y económicas. Los investigadores fundamentaron experimentalmente la necesidad y viabilidad del uso de sustratos para la plantación de plantas en techos (incluida la composición química de los sustratos) basada en las condiciones climáticas de la ciudad. Estos estudios son interesantes porque, por un lado, ofrecen herramientas reales para implementar el concepto y, por otro lado, muestran que hay expertos en diferentes localidades del país que pueden brindar un enfoque científicamente fundamentado para la implementación de proyectos y, por ende, hacer que estos proyectos tengan éxito.

Desde el punto de vista del modelo de comunicación, debemos afirmar que tales estudios forman una imagen del futuro, crean la base para la implementación de proyectos de techos verdes y, por lo tanto, definen un esquema claro de posibles proyectos futuros. Otra conclusión comunicativa de este texto es que la teoría científica de los techos verdes se ha desarrollado y aceptado suficientemente tanto en la comunidad científica como en la sociedad, hasta el punto que la investigación posterior se centra en problemas específicos o aspectos tecnológicos estrechos para la implementación de este concepto. Otro ejemplo y confirmación es el proyecto de Eliza Repetatska (Repetatska, 2023), un proyecto de graduación de una estudiante de una universidad especializada en ciencias naturales que aborda el tema de techos verdes para otra ciudad ucraniana, Vinnytsia. Debemos extraer una conclusión

importante para la formación de un modelo de comunicación de techos verdes en el discurso social: la relevancia del concepto de techos verdes está determinada por el interés de los jóvenes académicos en el problema, lo cual, por cierto, fue señalado en el estudio de la ya mencionada K. Bogun en 2013, cuando identificó concursos y proyectos de jóvenes arquitectos, investigadores y activistas sociales como una de las vías para promover el concepto. Estos estudios no son infrecuentes y prueban de manera convincente que el concepto de techos verdes es comprendido y apoyado por una juventud socialmente activa.

Este breve capítulo no puede analizar la estructura del discurso científico con un enfoque detallado en las direcciones de investigación y resultados, pero es posible señalar los componentes individuales del modelo de comunicación y las características clave de su formación. Varias conclusiones importantes para el modelo de comunicación son las siguientes: la comprensión científica y la investigación de las condiciones para la creación, mantenimiento y funcionamiento de los techos verdes como ecosistema y objeto tecnológico están completamente y exhaustivamente representadas en el discurso científico; las repeticiones y referencias a las investigaciones de predecesores muestran la exhaustividad de este tema, al menos en la etapa actual de su estudio científico.

La atención de los investigadores se centra mayormente en las peculiaridades parciales de la implementación del concepto de techos verdes y la creación de condiciones para espacios locales específicos. Estas conclusiones pueden aplicarse no solo a la investigación en ciencias naturales, sino que ahora nos centraremos en trabajos que actualizan el problema en las dimensiones económica y social, y consideraremos publicaciones mediáticas junto con la investigación científica. Podemos afirmar preliminarmente que la argumentación científica, los enfoques teóricos para justificar decisiones empresariales y conceptualizar enfoques no van más allá de las ventajas ambientales, económicas y tecnológicas especificadas, lo cual es un ejemplo del entendimiento de la teoría actual existente en ciertas condiciones económicas o sociales.

Comprendiendo el discurso científico sobre los techos verdes como la base y el fundamento para futuras iniciativas económicas y sociales, debemos afirmar que la argumentación científica sobre la necesidad de techos verdes no solo está claramente formulada, sino que también se articula activamente en conceptos y proyectos con prioridades empresariales o sociales claras.

Un ejemplo de una profunda combinación de enfoques científicos y argumentos económicos es el artículo de L. Herasimchuk y sus colegas sobre la eficiencia real del uso del concepto de techos verdes para generar beneficios sociales, ambientales y de lucro. Los autores, basándose en análisis matemáticos y cálculos de ahorro de calor y energía, reducción de emisiones de dióxido de carbono,

secuestro de carbono, absorción de dióxido de nitrógeno y absorción de ruido, así como en el análisis del aumento en el precio promedio anual de alquiler de viviendas bajo un techo verde, concluyeron: “Un techo verde proporciona una serie de beneficios ambientales. El costo de instalar un techo verde variará dependiendo del tipo de techo, clima y regulaciones de construcción. Sin embargo, los ahorros a largo plazo y los beneficios ambientales pueden justificar la inversión inicial. Los techos verdes ofrecen una variedad de beneficios financieros para la industria de la construcción: mayor eficiencia energética, mayor vida útil del techo, gestión efectiva de aguas pluviales, mejora de la calidad del aire, aumento del valor de la propiedad e incentivos financieros. Estos beneficios, combinados con el impacto ambiental positivo, hacen que los techos verdes sean una opción atractiva para proyectos de construcción ambientalmente sostenibles” (Herasimchuk L. et al., 2024, p. 48).

Ideas y conclusiones similares se han expresado antes, sin embargo, sin un cálculo detallado de la efectividad del techo verde. Por ejemplo, en el artículo de D. Nikolchenko y S. Ryndiuk se analizan los beneficios ambientales y económicos de los techos verdes y la eficiencia comercial de su uso, en particular para “...crear diversos tipos de paisajes en el techo; espacio adicional para que las personas se relajen (cancha deportiva, café, oficina); aumento del costo de los pisos superiores, así como de toda la estructura, hasta en un 30%” (Nikolchenko D., Ryndiuk S., 2019). Los mismos conceptos y comprensión de la atracción económica de la tecnología de la vegetación se pueden observar en los trabajos de K. Bogun y A. Hrechko: “Los jardines verdes pueden ser tanto instalaciones de infraestructura no comerciales como comerciales, cuyo territorio puede ser alquilado para cafeterías, restaurantes, etc., lo que es un incentivo adicional para que los propietarios implementen tales proyectos” (Bogun, 2013); el uso de techos verdes como palanca de naturaleza económica también es considerado por A. Hrechko, señalando el ejemplo de Polonia, donde el uso de la tecnología de techos verdes da “...motivos para permitir al desarrollador realizar proyectos más grandes, porque la tecnología de techos verdes compensa el daño ambiental” (Hrechko, 2022, p. 38).

Los conceptos expuestos anteriormente muestran que, con el tiempo, los investigadores están pasando de simples declaraciones en dirección económica a cálculos específicos, formando así herramientas efectivas para diseñar soluciones empresariales y estrategias. El discurso científico sobre los conceptos empresariales de los techos verdes, en términos de comunicación, ya forma enfoques prácticos, modelos listos para la implementación y puede ofrecer herramientas reales y argumentos que fomenten la adopción generalizada del concepto de techo verde en la construcción industrial y residencial. Vale la pena añadir aquí el aspecto de la optimización de los códigos y normas de

construcción, que se menciona de vez en cuando en las ilustraciones del entendimiento científico del concepto de techos verdes que hemos proporcionado y en otros trabajos.

La categoría de argumentos empresariales para la conveniencia de los techos verdes también incluye publicaciones en los medios de comunicación. Objetivamente, podemos distinguir dos tipos de publicaciones: aquellas iniciadas por empresas (o con un enfoque en el negocio interesado en hacer atractivo el concepto de techos verdes) y aquellas destinadas a satisfacer la necesidad social de informar sobre el tema.

El primer tipo de publicaciones incluye aquellas que señalan problemas de atractividad económica y nuevas formas de implementar el concepto de techo verde; por ejemplo, el artículo “Jardín en la azotea: Cómo se verdean los techos en Ucrania y en el mundo” plantea el uso de los techos de edificios industriales, y los argumentos de los representantes empresariales involucrados (altos empleados de la empresa privada “ZinCo”, directamente involucrada en la creación de techos verdes) se enfocan principalmente en beneficios tecnológicos y, por lo tanto, económicos, por ejemplo: “El principal problema por el cual los techos industriales no se verdean en Ucrania es la falta de entendimiento de que al disponer un techo verde con la tecnología correcta, se puede olvidar completamente la reparación de la impermeabilización” (Jardín en la azotea, 2016). Al mismo tiempo, los autores también actualizan la solución de problemas ambientales y la creación de nuevas perspectivas sociales utilizando el concepto de techos verdes.

Otro tipo de artículos es informativo y dirigido a un público general, aunque también contiene argumentos que pueden interesar a pequeñas empresas. Por ejemplo, el artículo “Techo Verde – ¡Eficiencia + Ecología!” (Techo Verde, 2019) señala la posibilidad de usar techos verdes para actividades agrícolas, que claramente es solo un área estrecha cuya efectividad está en cuestión, pero si añadimos a esta idea el problema de la reforestación de áreas industriales, donde se pueden usar grandes superficies, esta área también podría tener efectividad local.

La conclusión general sobre los artículos mediáticos es que están orientados a crear un caso empresarial para los techos verdes — ofreciendo conceptos y herramientas que indican la atractividad económica de los proyectos, resaltando la necesidad de inversión y ahorro de costos mediante techos verdes en la construcción residencial e industrial. También hay un énfasis en el desarrollo de normas y enfoques constructivos apropiados, teniendo en cuenta la posibilidad de crear un techo verde.

En los textos mediáticos, vale la pena destacar otro aspecto dirigido a intensificar las actividades de ONGs e iniciativas cívicas en general. Para ilustrar esto, citamos algunas palabras del mencionado artículo “Jardín en la azotea: Cómo se verdean los techos en Ucrania y en el mundo”, que es bastante

completo y ha absorbido un número significativo de componentes de la argumentación comunicativa del concepto de techo verde: “A diferencia de nuestros vecinos occidentales más exitosos, la tecnología de techos verdes aún no ha alcanzado gran escala en Ucrania. Aunque cada vez hay más clientes que quieren tener un jardín en el techo de una casa privada, ese tipo de reforestación de áreas industriales o centros comerciales no es popular. Sin embargo, están surgiendo clusters artísticos en Kiev (PLATFORM art factory, G13), así como centros comerciales enteros que podrían revitalizar espacios públicos con jardines en la azotea”; “...sin embargo, el deseo del cliente a menudo no es suficiente, a diferencia de EE. UU. o la UE, donde los municipios fomentan o incluso ayudan financieramente a crear techos verdes, las autoridades de Kiev son actualmente pasivas en este asunto”; “...hay muchas áreas en Kiev, incluso entre instalaciones industriales, donde se pueden crear espacios públicos, hacerlos cómodos y convenientes de usar. Una de las maneras es disponer un ‘techo verde’” (Jardín en la azotea, 2016).

Estas tesis demuestran la necesidad de una articulación social del problema, la creación de movimientos e iniciativas que contribuyan al desarrollo del proceso de creación de techos verdes, formen nuevos aspectos en la comprensión del concepto de “vida urbana confortable” y se conviertan en fuente de procesos que influyan la reforestación no solo de los techos de edificios residenciales, sino también de otras ubicaciones que configuran el paisaje urbano. El material citado fue escrito y publicado en 2016. Nuestra búsqueda de cobertura mediática sobre iniciativas sociales o actividades cívicas en esta área no arrojó resultados alentadores. Esto puede indicar pasividad de las comunidades (en el nivel de participación en la creación de techos verdes) o insuficiente actividad mediática reflejando tales acciones. La guerra rusa contra Ucrania también se convirtió en un obstáculo significativo para el desarrollo de la cultura de techos verdes en Ucrania.

A nivel del modelo de comunicación, podemos afirmar que la demanda de techos verdes aún no se ha vuelto tangible, no solo en la evaluación de proyectos reales, sino también en la medición de la posibilidad de crear tales proyectos. Todo esto indica la necesidad de una comunicación social más completa y expresiva sobre el concepto de techos verdes, la formación de enfoques en los que las comunidades, activistas comunitarios se reconozcan como sujetos de iniciativas para crear techos verdes, mejorar la calidad y comodidad de vida, y crear nuevas ubicaciones atractivas en las ciudades ucranianas.

**Conclusiones y Observaciones.** Un análisis superficial de las publicaciones y artículos que presentan el concepto de techos verdes en Ucrania muestra una imagen bastante completa de cómo se refleja este concepto en el discurso social. Académicos universitarios, periodistas, empresarios y activistas

públicos califican cuidadosa y consistentemente los beneficios ambientales, económicos y sociales, identifican la necesidad de proyectos específicos de techos verdes y destacan el papel de estos procesos en el contexto general de la atraktividad de los lugares donde vive la gente.

Al mismo tiempo, como ha mostrado nuestra breve revisión, actualmente falta una estrategia de comunicación que reúna a los diferentes actores involucrados para aumentar la cantidad de techos verdes en los países miembros de la Unión Europea hoy y en los estados europeos que se incorporarán a la UE mañana. Dicha estrategia debería combinar diferentes niveles de provisión de oportunidades para techos verdes: consideramos prometedor que existan actividades y su reflejo en el discurso mediático en áreas de actividad comunitaria y de ONG, apoyo a proyectos de techos verdes por parte de las autoridades municipales, hasta su inclusión en programas (estrategias) de desarrollo urbano, y la formación de apoyos y beneficios a nivel estatal que hagan atractivos los techos verdes ya desde la etapa de diseño de nuevos edificios industriales o residenciales. Una vez más, estas actividades solo tendrán sentido si se reflejan de forma sistemática y constante en el discurso mediático, dado que la viabilidad científica y económica del concepto de techos verdes está ampliamente fundamentada y probada, aunque, en nuestra opinión, no se ha convertido en una necesidad consciente de implementación debido a la falta de articulación comunicativa del concepto.

El modelo general de esta estrategia podría verse así: reunir a los actores involucrados — autoridades municipales, empresas, comunidades y ONG — a través de la comunicación dentro de proyectos específicos. Cabe destacar que, junto con los beneficios ambientales y económicos, esto creará un fondo social efectivo en la ciudad, elevará su clasificación turística, promoverá nuevas perspectivas y oportunidades, y, por ejemplo, hará que la infraestructura universitaria sea un entorno más cómodo para estudiantes, profesores y personal administrativo, para el estudio y el trabajo.

En nuestra opinión, el papel de las comunidades y activistas cívicos en los procesos de comunicación del concepto de techos verdes en cada ciudad particular está subestimado; vemos la necesidad de actualizar su subjetividad mediática y sociopolítica en el tema de crear condiciones de vida cómodas y ecológicas, de las cuales los techos verdes son una parte.

El estudio de los efectos sociales de la implementación del concepto de techos verdes también es insuficiente hoy. No negamos que se estén realizando tales investigaciones, pero no han ganado popularidad ni suficiente articulación social como modelo de soluciones sociales y ambientales efectivas, cuya base podría ser perfectamente el concepto de techos verdes, al menos estos temas no son claramente visibles en los medios.

Una fuente potencial para estos estudios podrían ser los enfoques de un campo científico relativamente nuevo — el urbanismo social —, y vemos la ventaja de este enfoque en la oposición de contextos: desde la “Teoría de la Ventana Rota” de James Q. Wilson y George L. Kelling hasta la “Teoría del Empujón” (Nudge Theory) de Richard H. Thaler y Cass R. Sunstein, especialmente porque la conciencia sobre el papel de los grupos sociales locales en la creación de condiciones de vida cómodas y atractivas en Ucrania, así como en Europa en general, es un componente significativo de la actividad social. Estamos convencidos de que, con la articulación comunicativa correcta de estos procesos, cada vez más techos verdes aparecerán en la ciudad tras la aparición del primero.

## 13. Referencias

1. Alim M.A., Jahan S, Rahman A, Rahman MA, Liebman M, Garner B, Griffith R, Griffith M and Tao Z. 2023. “Experimental Investigation of a Multilayer Detention Roof for Stormwater Management.” *Journal of Cleaner Production* 395(February):136413.
2. Bogun K. (2013). Socio-Economic and Environmental Consequences of Greening the Roofs of Buildings. *Effective Economy*. #2. (in Ukrainian) Соціально-економічні та екологічні наслідки озеленення дахів будівель. URL:<http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1804>. (accessed July 29, 2024).
3. Calheiros C. S. C. and Stefanakis A.I. 2021. “Green Roofs Towards Circular and Resilient
4. Centro Comercial Lagoh, Sevilla | Sistemas para cubiertas verdes | ZinCo Green Roof, (n.d.). <https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/referencias/centro-comercial-lagoh-sevilla> (accessed June 12, 2024).
5. Cities.” *Circular Economy and Sustainability* 1(1):395–411.
6. Cook LM, Larsen TA (2021) Towards a Performance-Based Approach for Multifunctional Green Roofs: An Interdisciplinary Review. *Building and Environment* 188(November 2020):107489.
7. Cuthbert MO, Rau GC, Ekström M, O’Carroll DM, Bates AJ (2022) Global Climate-Driven Trade-Offs between the Water Retention and Cooling Benefits of Urban Greening. *Nature Communications* 13(1).
8. European Commission. (2020). Nature-based solutions: State of the art in EU-funded projects. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/236007>
9. Green roof AMPO headquarters Spain - Sempergreen, (n.d.). <https://www.sempergreen.com/en/references/ampo-headquarters> (accessed June 12, 2024).
10. Green roof by the sea in Roscoff, France | Sempergreen - Sempergreen, (n.d.). <https://www.sempergreen.com/en/references/harbour-building> (accessed June 12, 2024).
11. Green Roof – Efficiency + Ecology! (2017). *SpetsIzol Ltd.* (in Ukrainian) Зелений дах – ефективність + екологія! URL:<https://spetsizol.com.ua/ua/a290698-zelenaya-krysha-effektivnost.html> (accessed July 29, 2024).
12. Herasimchuk L., Valerko R., Veselskyi O. (2024). Advantages of Green Roofs and their Calculation. *Agrarian Innovations*. Issue #23. P. 48-57. (in Ukrainian) Переваги зелених дахів та їх розрахунок. URL: <http://agrarian-innovations.izpr.ks.ua/index.php/agrarian/issue/view/23/23>. DOI <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.23.7> (accessed July 29, 2024).
13. He Y, Yu H, Ozaki A, Dong N (2020) Thermal and energy performance of green roof and

- cool roof: A comparison study in Shanghai area. *J. Clean. Prod.* 267, 122205. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122205
14. Hrechko A. (2022). Experience and benefits of using green roofs as an element of green infrastructure. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Ecology*, (26), 32-42. (in Ukrainian) Досвід та переваги застосування зелених дахів як елементу зеленої інфраструктури. URL: <https://periodicals.karazin.ua/ecology/article/view/18562> DOI <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-03> (accessed July 29, 2024).
  15. Jeffers S, Garner B, Hidalgo D, Daoularis D, Warmerdam O (2022). Insights into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs. *J. Water Manag. Model.* 30, 1–13. doi:10.14796/JWMM.C484
  16. Krauze K, Wagner I (2018) From Classical Water-Ecosystem Theories to Nature-Based Solutions — Contextualizing Nature-Based Solutions for Sustainable City. *Science of The Total Environment* 655:697–706.
  17. Li Y, Liu J (2023) Green Roofs in the Humid Subtropics: The Role of Environmental and Design Factors on Stormwater Retention and Peak Reduction. *Science of the Total Environment* 858(October 2022):159710.
  18. Liu W, Engel BA, Feng Q (2021) Modelling the hydrological responses of green roofs under different substrate designs and rainfall characteristics using a simple water balance model. *J. Hydrol.* 602, 126786. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126786
  19. Losken G, Ansel W, Backhaus T, Bartel YC, Bornholdt H, Bott P, Henze M, Hokema J, Kohler M, Krupka B, Mann G, Munster M, Neisser H, Roth-Kleyer S, Ruttensperger S, Schenk D, Sprenger D, Upmeier M, Westerholt D (2018) Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs. FLL – Landscape Development and Landscaping Research Society e.V. Bonn, Germany.
  20. Mihalakakou G, Souliotis M, Papadaki M, Menounou P, Dimopoulos P, Kolokotsa D, Paravantis J.A., Tsangrassoulis A, Panaras G, Giannakopoulos E, and Papaefthimiou S. 2023. “Green Roofs as a Nature-Based Solution for Improving Urban Sustainability: Progress and Perspectives.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 180(April):113306.
  21. Nikolchenko D., Ryndiuk S. (2019). Green Roofs and their Role in Improving Energy Efficiency. Conference Paper, Vinnitsia National Technical University (in Ukrainian) Озеленення дахів та їх роль в підвищенні енергоефективності. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egcu/egcu2019/paper/viewFile/8327/6937>.(access ed July 29, 2024).
  22. Nophadrain. 2010. Extensive Green Roofs. Design and Installation Guide. Vol. 5.
  23. Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Karen K. Y. Liu, Rowe, B. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services, *BioScience*, Volume 57, Issue 10, November 2007, Pages 823–833, <https://doi.org/10.1641/B571005>

24. Parque Al Shaheed, Kuwait | Sistemas para cubiertas verdes | ZinCo Green Roof, (n.d.). <https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/referencias/parque-al-shaheed-kuwait> (accessed June 12, 2024).
25. Patseva, I., Alpatova O., Rybak, O., Tsyganenko-Dziubenko, I., Medvid, O. (2022). Rooftop Gardening as an Adaptation Measure of the Climate Changes a Casw Study of Zhytomyr. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*. Issue 3. P. 67-74. (in Ukrainian) Озеленення даху як захід по адаптації зміни клімату на прикладі м. Житомир. URL: <https://journals.vnu.volyn.ua/index.php/chemistry/issue/view/46/48>.
  - a. DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-3-9> (accessed July 29, 2024).
26. Pelorosso R, Petroselli A, Cappelli F, Noto S, Tauro F, Apollonio C, and Grimaldi S. 2024. “Blue-green Roofs as Nature-based Solutions for Urban Areas: Hydrological Performance and Climatic Index Analyses.” *Environmental Science and Pollution Research* (31):5973–5988.
27. Pelorosso R (2020) Modeling and Urban Planning: A Systematic Review of Performance-Based Approaches. *Sustainable Cities and Society* (52):101867.
28. Pelorosso R, Gobattoni F, Leone A (2017) The Low-Entropy City: A Thermodynamic Approach to Reconnect Urban Systems with Nature. *Landscape and Urban Planning* 168:22–30.
29. Pelorosso R, Petroselli A, Apollonio C, Grimaldi S (2021) Blue-Green Roofs: Hydrological Evaluation of a Case Study in Viterbo, Central Italy. Pp. 3–13 in *Innovation in Urban and Regional Planning*. INPUT 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 146.
30. Pons V, Muthanna TM, Sivertsen E, Bertrand-Krajewski JL (2022) Revising Green Roof Design Methods with Downscaling Model of Rainfall Time Series. *Water Science and Technology* 85(5):1363–71.
31. Public building - Sempergreen, (n.d.). <https://www.sempergreen.com/en/references/public-building-isla-cristina> (accessed June 12, 2024).
32. Pumo D, Francipane A, Alongi F, Noto LV (2023a) The Potential of Multilayer Green Roofs for Stormwater Management in Urban Area under Semi-Arid Mediterranean Climate Conditions. *Journal of Environmental Management* 326(PA):116643.
33. Pumo, D., Alongi, F., Cannarozzo, M., Noto, L. V., (2023b). Climate adaptive urban measures in Mediterranean areas: Thermal effectiveness of an advanced multilayer green roof installed in Palermo (Italy). *Build. Environ.* 243. doi:10.1016/j.buildenv.2023.110731
34. Repetatska, E. (2023). Selection of Plants Assortment for Roof Landscaping in Vinnytsia: A Graduation Project. (in Ukrainian) Підбір асортименту рослин для озеленення дахів у м. Вінниця: Дипломний проєкт. URL: <http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/33519.pdf> . (accessed July 29, 2024).
35. Rocha B, Paço TA, Luz AC, Palha P, Milliken S, Kotzen B, Branquinho C, Pinho P, de

- Carvalho RC (2021) Are biocrusts and xerophytic vegetation a viable green roof typology in a mediterranean climate? A comparison between differently vegetated green roofs in water runoff and water quality. *Water (Switzerland)* 13. doi:10.3390/w13010094
36. Rooftop Garden: How Roofs are Greened in Ukraine and Around the World. (2016). NGO “Hmarochos”. (in Ukrainian) Сад на даху: як озеленюють покрівлі в Україні та світі. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2016/03/16/sad-na-dahu-yak-ozelenyuyut-pokrivli-v-ukrayini-ta-sviti/> (accessed July 29, 2024).
37. Rybak O., Patseva I. (2023). Ecological Basics of Analysis of the Influence of “Green” Roofs on Urban Climate in Urbocenos. *Khmelnytskyi National University Bulletin*. Issue 5, Vol. 2. P. 103-107. (in Ukrainian) Екологічні основи аналізу впливу “зелених” дахів на міський клімат в урбоценозах. URL: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?p=20398> DOI <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-103-107> (accessed July 29, 2024).
38. Rybak, O., Patseva, I. (2024). Study of Wild Plants for Extensive Greening of Roofs in the Polissya Area. *Ecological Sciences*. Issue 1 (52), Vol. 2. С. 168-171. (in Ukrainian) Дослідження дикорослих рослин для експенсивного озеленення дахів в зоні Полісся. URL: [https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2024/1/part\\_2/33.pdf](https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2024/1/part_2/33.pdf) DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.2.31> (accessed July 29, 2024).
39. Stovin V, Vesuviano G, De-Ville S (2017) Defining Green Roof Detention Performance. *Urban Water Journal* 14(6):574–88.
40. Wong GKL, Jim CY (2015) Identifying Keystone Meteorological Factors of Green-Roof Stormwater Retention to Inform Design and Planning. *Landscape and Urban Planning* 143:173–82.
41. Xiao Z, Ge H, Lacasse MA, Wang L, and Zmeureanu R. 2023. “Nature-Based Solutions for Carbon Neutral Climate Resilient Buildings and Communities: A Review of Technical Evidence, Design Guidelines, and Policies.” *Buildings* 13(6).
42. Yan J, Zhang S, Zhang J, Zhang S, Zhang C, Yang H, Wang R, Wei L (2022) Stormwater Retention Performance of Green Roofs with Various Configurations in Different Climatic Zones. *Journal of Environmental Management* 319:115447
43. Zhang G and He B J. 2021. “Towards Green Roof Implementation: Drivers, Motivations, Barriers and Recommendations.” *Urban Forestry and Urban Greening* 58(September 2019):126992.