

Envolventes biosolares en los mercados municipales de Madrid

¹Hu, Tianran; ²García Herrero, Jesús; ³Fernández Nieto, María Antonia; ⁴Parada Rodríguez, José Luis; ⁵Gallego Sánchez-Torija, Jorge

¹ tianran.hu@alumnos.upm.es²jesus.garciah@upm.es

³ antonia.fernandez@urjc.es ⁴j.parada@ufv.es ⁵jorge.gallego@upm.es

[^{1-2;5}]Universidad Politécnica de Madrid. [³]Universidad Rey Juan Carlos. [⁴]Universidad Francisco de Vitoria.

Resumen— *El crecimiento urbano ha intensificado problemas medioambientales como el efecto isla de calor, la contaminación y el alto consumo energético, lo que hace necesario aplicar soluciones arquitectónicas sostenibles. Los edificios desempeñan un papel clave en la eficiencia energética y la calidad ambiental de las ciudades.*

Las envolventes biosolares, que combinan cubiertas vegetales y paneles fotovoltaicos, son una estrategia eficaz para optimizar el rendimiento energético, reducir la huella ecológica y mejorar la integración urbana. Sin embargo, su implementación requiere conocimiento técnico y un enfoque interdisciplinario para garantizar su viabilidad.

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Aprendizaje-Servicio (ApS) de la UPM, a través de cursos y talleres de la Fundación Juan XXIII en el CIEC (Centro de Innovación en Economía Circular). Esta experiencia ha permitido adquirir conocimientos prácticos sobre cubiertas verdes y paneles fotovoltaicos, colaborando con expertos de distintas disciplinas.

Como resultado, se ha aplicado la teoría a un caso real: el Mercado de San Cristóbal en Madrid, desarrollando un proceso proyectual adaptable a edificaciones existentes. Este enfoque demuestra la viabilidad de las envolventes biosolares y su potencial como modelo replicable para mejorar la sostenibilidad urbana y la eficiencia energética.

Palabras Clave— *envolvente biosolar, panel fotovoltaico, cubierta vegetal, jardín vertical, contaminación, sostenibilidad.*

Abstract— *Urban growth has intensified environmental issues such as the urban heat island effect, pollution, and high energy consumption, highlighting the need for sustainable architectural solutions. Buildings play a key role in energy efficiency and environmental quality in cities.*

Biosolar envelopes, which integrate green roofs and photovoltaic panels, are an effective strategy to optimize energy performance, reduce the carbon footprint, and enhance urban integration. However, their implementation requires technical expertise and an interdisciplinary approach to ensure feasibility.

This study is part of the Service-Learning Project (ApS) at UPM, developed through courses and workshops at the Juan XXIII Foundation at CIEC (Center for Innovation in Circular Economy). This experience provided practical knowledge on green roofs and photovoltaic panels, working alongside experts from different disciplines.

As a result, theory has been applied to a real case study: the San Cristóbal Market in Madrid, developing a project process adaptable to existing buildings. This approach demonstrates the feasibility of biosolar envelopes and their potential as a replicable model to improve urban sustainability and energy efficiency.

Keywords — *biosolar envelope, photovoltaic panel, green roof, vertical garden, pollution, sustainability.*

1. INTRODUCCIÓN.

El crecimiento urbano acelerado ha provocado un impacto ambiental significativo, con las ciudades siendo responsables del 78% del consumo energético y más del 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. La continua expansión de edificaciones sin criterios sostenibles ha intensificado problemas como el efecto isla de calor, la contaminación atmosférica y la pérdida de biodiversidad. En

este contexto, las envolventes biosolares, que integran vegetación y paneles fotovoltaicos en cubiertas y fachadas, se presentan como una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia energética de los edificios y reducir su huella ecológica.

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Aprendizaje-Servicio (ApS) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), cuyo objetivo es la aplicación de envolventes biosolares en mercados municipales de Madrid. A través de la participación en cursos y talleres organizados por la Fundación Juan XXIII en el CIEC (Centro de Innovación en Economía Circular), se han adquirido conocimientos prácticos sobre cubiertas verdes y su implementación en entornos urbanos, trabajando de manera colaborativa con estudiantes y profesionales de distintas disciplinas.

Este proceso de aprendizaje, complementado con una revisión bibliográfica sobre estrategias sostenibles en la arquitectura, ha permitido analizar el caso del Mercado de San Cristóbal, un edificio en proceso de transformación hacia un modelo más sostenible. A partir de este análisis, se ha desarrollado un proceso proyectual que no solo facilita la implementación de envolventes biosolares en este mercado, sino que también sirve como modelo replicable para otras arquitecturas con condiciones similares, promoviendo así un enfoque más eficiente y sostenible en el diseño urbano.

2. OBJETIVOS.

Los objetivos principales se centran en comprender el funcionamiento de la envolvente biosolar, analizando cómo esta solución arquitectónica puede contribuir a mitigar los efectos negativos del impacto ambiental generado por el crecimiento urbano y el elevado consumo energético.

Además, se pretende desarrollar e implementar un proceso proyectual que sirva como guía para el diseño adecuado de una envolvente biosolar. Este proceso permitirá establecer criterios claros y metodologías de aplicación, asegurando que la combinación de cubiertas vegetales y paneles fotovoltaicos sea efectiva y viable desde el punto de vista técnico y ambiental.

Por último, se busca aplicar este conocimiento en un caso práctico, seleccionando como objeto de estudio el Mercado de San Cristóbal en Madrid.

Este proceso ha culminado con la elaboración del Trabajo de Fin de Grado (TFG), integrando tanto la experiencia práctica adquirida en el ApS como el análisis técnico y teórico desarrollado, contribuyendo así a la finalización del Grado en Arquitectura en la Universidad Politécnica de Madrid.

3. METODOLOGÍA.

El proceso de aprendizaje se ha desarrollado principalmente a través de la colaboración con la Fundación Juan XXIII en el CIEC, donde se han impartido cursos y talleres sobre la implementación de cubiertas verdes en entornos urbanos. Junto con la recopilación de información bibliográfica, esta formación ha sido clave para comprender el funcionamiento de estos sistemas y su integración con paneles fotovoltaicos, explorando su sinergia y los beneficios que pueden aportar a la eficiencia energética y a la sostenibilidad arquitectónica. Además, se ha llevado a cabo una recopilación bibliográfica adicional para profundizar en el diseño de fachadas verdes y en el funcionamiento técnico de los paneles fotovoltaicos, complementando así la información obtenida en los talleres.

Los talleres se han estructurado en dos partes. En primer lugar, un curso teórico, en el que se han abordado los principios fundamentales de las cubiertas verdes, incluyendo su estructura, materiales y beneficios ambientales. En segundo lugar, un taller práctico de Comunidades de Aprendizaje Orientadas a la Práctica, donde se ha trabajado en un caso real. En nuestro caso, este ejercicio se ha desarrollado en el Mercado de San Cristóbal en Madrid, donde se ha diseñado una cubierta verde con todos sus componentes, incluyendo también los paneles fotovoltaicos requeridos.

Durante la realización de ambos talleres, los cursos se han llevado a cabo en colaboración con profesionales de diversas disciplinas. En concreto, se ha trabajado junto a expertos en jardinería, paisajismo y arquitectura, lo que ha permitido un enfoque interdisciplinar en el desarrollo de las cubiertas verdes.

3.1 Taller teórico.

En los talleres teóricos, desarrollados a lo largo de seis días con una duración de cuatro horas diarias, se han combinado clases impartidas tanto por profesoras del centro como por profesionales invitados para abordar temas específicos. Además, se han llevado a cabo clases prácticas, que han incluido simulaciones de diseños y visitas a ejemplos de cubiertas verdes en Madrid, permitiendo una aplicación directa de los conocimientos adquiridos.



Figura 1. Visitas y taller en CIEC.

3.2 Taller práctico.

En los talleres prácticos, denominados Comunidad de Aprendizaje Orientada a la Práctica, se brinda la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos en un caso real. Se le denomina "comunidad" porque no se trata de un trabajo individual, sino de un proceso colaborativo en equipo, en el que participan profesionales de distintos campos científicos, aportando enfoques interdisciplinarios al desarrollo del proyecto.

En nuestro caso, se ha trabajado sobre la cubierta del Mercado de San Cristóbal, ubicado en el distrito de Chamartín, Madrid. El requisito del proyecto era transformar la cubierta del mercado en un espacio transitable, con la condición de instalar un mínimo de 300 m² de paneles fotovoltaicos para la producción de energía, con el fin de abastecer parte del consumo del mercado.

El resultado obtenido fue el diseño de una cubierta transitable que, además de integrar la cantidad de paneles fotovoltaicos requerida, generó nuevas zonas de interacción social, incluyendo espacios de huerto y compostaje, un aula al aire libre y la posibilidad de habilitar un área de showroom. Esta experiencia ha servido como base para continuar desarrollando la envolvente biosolar, permitiendo una proyección más completa y fundamentada del sistema.



Figura 2. Taller Comunidad de Aprendizaje Orientada a la Práctica, proceso de diseño y resultados.

3.3 Informaciones bibliográficas.

Para complementar los conocimientos adquiridos en los talleres de aprendizaje, se ha llevado a cabo una recopilación de información bibliográfica, con el propósito de profundizar en el funcionamiento individual de los envolventes vegetales, tanto en fachadas como en cubiertas, así como en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos. Este análisis teórico ha permitido comprender en detalle las particularidades de cada sistema por separado y, a su vez, justificar por qué su combinación en una envolvente biosolar potencia sus beneficios, optimizando la eficiencia energética y la sostenibilidad del edificio.

4. RESULTADO

Como resultado, se ha logrado una comprensión integral de cada uno de los elementos que componen una envolvente biosolar de manera individual, así como de las ventajas derivadas de su combinación simultánea. Este análisis ha permitido identificar cómo la interacción entre paneles fotovoltaicos y envolventes vegetales optimiza el rendimiento energético, mejora el confort térmico del edificio y aporta beneficios ambientales, consolidando así su potencial como una estrategia sostenible en el diseño arquitectónico.

Además, se ha desarrollado un proceso proyectual que establece una metodología aplicable a la mayoría de los proyectos arquitectónicos que busquen la implantación de una envolvente biosolar. Este proceso ofrece criterios y directrices claras para su diseño e integración, facilitando su adaptación a distintos tipos de edificaciones y contextos urbanos

4.1 Marco teórico.

La envolvente biosolar es un sistema que integra paneles fotovoltaicos y vegetación en cubiertas y fachadas, optimizando la eficiencia energética y aportando beneficios ambientales. Su funcionamiento se basa en la interacción entre estos elementos, ya que la vegetación reduce la temperatura de la superficie, mejorando el rendimiento de los paneles fotovoltaicos y aumentando su producción energética.

Las envolventes vegetales pueden clasificarse en cubiertas verdes y jardines verticales. Las cubiertas verdes se instalan sobre la estructura del edificio y se dividen en extensivas, semiextensivas, intensivas y biodiversas, según la profundidad del sustrato y el tipo de vegetación utilizada. Sus beneficios incluyen aislamiento térmico y acústico, reducción del efecto isla de calor, mejora de la calidad del aire y gestión eficiente del agua pluvial. Los jardines verticales, por otro lado, se instalan en fachadas y pueden ser directos o indirectos, dependiendo de si la vegetación crece adherida al muro o sobre una estructura auxiliar. Además de su valor estético, mejoran la biodiversidad y la regulación térmica de los edificios.

Los paneles fotovoltaicos, principal componente energético de la envolvente biosolar, convierten la radiación solar en electricidad. Su eficiencia puede verse afectada por la temperatura, por lo que la presencia de vegetación en su entorno ayuda a disipar el calor y mantener un rendimiento óptimo. Existen distintos tipos de instalaciones de paneles, que varían según su ubicación y su integración con el edificio, incluyendo estructuras coplanares, triangulares, marquesinas y sistemas anclados.

Es importante la correcta selección de especies vegetales para la buena funcionalidad de la envolvente biosolar. Se deben emplear plantas adaptadas al clima y a la radiación solar disponible, evitando especies invasivas o con sistemas radiculares agresivos.

La combinación adecuada de paneles fotovoltaicos y vegetación contribuye a la sostenibilidad urbana, reduciendo la demanda energética de los edificios y generando entornos más saludables y resilientes al cambio climático.

4.2 Proceso proyectual.

El diseño de una envolvente biosolar sigue un proceso proyectual estructurado en tres fases: antecedentes, análisis y planteamiento del sistema. Este enfoque permite desarrollar soluciones adaptadas a las condiciones específicas de cada edificio, garantizando su viabilidad técnica y eficiencia.

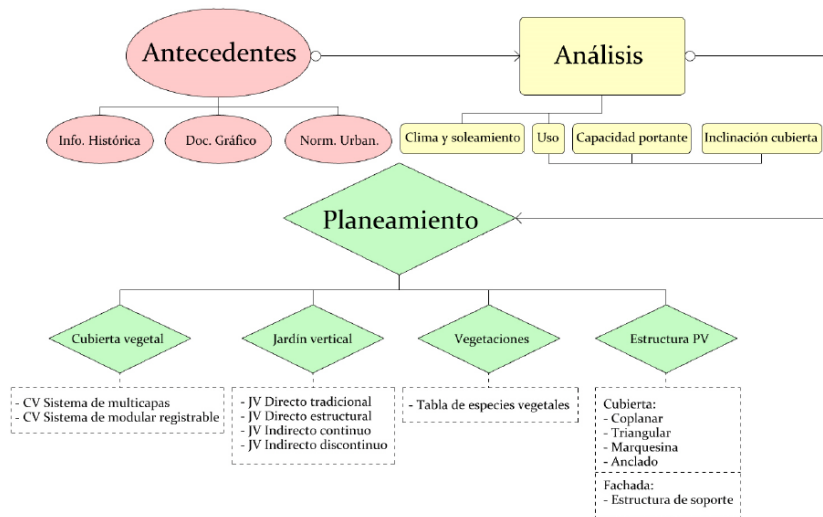


Figura 3. Diagrama síntesis del proceso proyectual.

En la fase de antecedentes, se recopila información histórica, normativa y gráfica del edificio para comprender su evolución y posibles limitaciones. Se analizan los planos arquitectónicos, estructurales y urbanísticos, además de considerar restricciones legales que puedan influir en la modificación de fachadas y cubiertas.

La fase de análisis permite evaluar las condiciones climáticas, estructurales y funcionales del edificio. Se estudia el soleamiento, la capacidad portante y la inclinación de la cubierta, aspectos determinantes en la elección de los componentes de la envolvente biosolar. Asimismo, se define el uso de la cubierta y las fachadas, estableciendo si serán transitables, productivas o destinadas únicamente a la eficiencia energética. Se puede utilizar la siguiente tabla como apoyo para sintetizar la información.

Datos		Cubierta	Fachadas
Antecedente	Elementos a mantener		
	Superficie verde máx.		
	Superficie PV máx.		
	Dimensión máx.		
Análisis	Temp. Máx.		
	Temp. Min.		
	Meses necesasrio riego		
	Necesidad prot. Viento		
	Sombras		
	Orientación PV		
	Inclinación PV		
	Uso		
	Capacidad portante		
	Inclinación		

Figura 4. Tabla síntesis.

Por último, en la fase de planteamiento, se seleccionan los elementos de la envolvente biosolar, considerando distintos tipos de estructuras fotovoltaicas, sistemas de cubiertas verdes y jardines verticales. Se analizan las opciones disponibles en el mercado y se determinan las especies vegetales más adecuadas en función de su adaptación climática y su compatibilidad con los paneles solares.

4.3 Caso práctico: Mercado de San Cristóbal.

Como resultado del proceso proyectual, se ha diseñado una envolvente biosolar, que combina cubierta verde transitable con integración de paneles fotovoltaicos para el Mercado de San Cristóbal en Madrid.

Para la definición de la propuesta, se han llevado a cabo diversos análisis técnicos y ambientales, incluyendo el estudio de soleamiento, la capacidad estructural del edificio, la viabilidad normativa y las posibilidades de integración funcional de la envolvente. Se evaluó la orientación e inclinación de la cubierta, permitiendo determinar la mejor disposición de los paneles fotovoltaicos para maximizar la captación de radiación solar. Asimismo, se analizó la capacidad de carga del edificio, concluyendo que era viable la instalación de una cubierta verde con refuerzos estructurales adecuados.

En cuanto a la distribución de los elementos en la envolvente, dado que la cubierta se ha diseñado como una envolvente biosolar, integrando tanto paneles fotovoltaicos como vegetación, en las fachadas se ha optado exclusivamente por la instalación de jardines verticales. Esta decisión se debe a que la incidencia solar en las fachadas no es suficiente para justificar la instalación de paneles fotovoltaicos, por lo que su aprovechamiento óptimo se centra en la implementación de vegetación. La incorporación de vegetación en las fachadas contribuye a la regulación térmica del mercado, favorece la absorción de CO₂ y mejora la biodiversidad urbana, además de ofrecer beneficios estéticos y funcionales.

Los resultados obtenidos reflejan una solución eficiente y adaptable. Se ha diseñado una cubierta que no solo incorpora los 300 m² de paneles fotovoltaicos requeridos, sino que también permite un uso polivalente del espacio, integrando zonas de interacción social, huertos urbanos, compostaje y un aula al aire libre. La inclusión de fachadas verdes en las áreas sin paneles fotovoltaicos refuerza la sostenibilidad del proyecto, contribuyendo a la reducción del efecto isla de calor, la mejora de la calidad del aire y la disminución de la demanda energética del mercado.

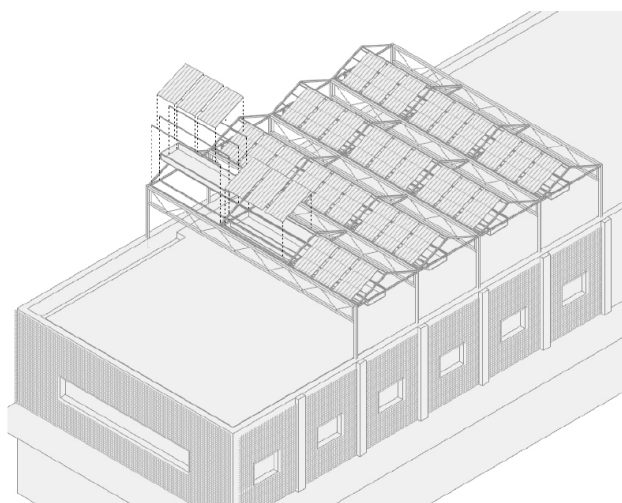


Figura 5. Axonometría de la envolvente biosolar del mercado.

5. CONCLUSIONES

Los problemas medioambientales actuales, como el cambio climático, la contaminación y el alto consumo de energía, hacen necesario que la arquitectura adopte soluciones más sostenibles. En este sentido, las envolventes biosolares ofrecen una alternativa eficiente para mejorar el rendimiento energético de los edificios, reducir su impacto ambiental y hacer las ciudades más resilientes.

Este trabajo ha sido posible gracias a la participación en el Proyecto de Aprendizaje-Servicio, que ha permitido combinar teoría y práctica para comprender mejor el funcionamiento de las cubiertas verdes y los paneles fotovoltaicos. La colaboración con la Fundación Juan XXIII en el CIEC ha sido fundamental para aplicar estos conocimientos en un caso real, facilitando un aprendizaje basado en la experiencia directa.

Además, se ha demostrado la importancia de trabajar con profesionales de diferentes áreas, ya que la integración de envolventes biosolares requiere conocimientos en arquitectura, paisajismo, agrónomos y sostenibilidad. La interacción con expertos en estos campos ha permitido desarrollar un proyecto más completo y realista.

Por último, la aplicación de este estudio en el Mercado de San Cristóbal ha permitido trasladar la teoría a un caso práctico, desarrollando un proceso proyectual que facilita la implementación de envolventes biosolares en edificaciones existentes. Este enfoque ha servido para estructurar una metodología que puede adaptarse a otras arquitecturas, asegurando su viabilidad según las condiciones estructurales y climáticas de cada edificio. Así, se demuestra que estas soluciones pueden integrarse en distintos entornos urbanos, contribuyendo a la mejora de la eficiencia energética y la sostenibilidad en la ciudad.

6. REFERENCIAS

BERNAL MORENO, C. C., RODRÍGUEZ CARDONA, V., & MORA CIFUENTES, D. (2023). *Diagnóstico de las condiciones de conectividad vial de los barrios Aguas Claras y Las Margaritas, ubicados dentro del distrito de protección del suelo Kirpas, Pinilla, La Cuerera Villavicencio (Meta)*.

NACIONES UNIDAS. (2024, 30 de marzo). *Las ciudades y la contaminación contribuyen al cambio climático*. <https://www.un.org/es/climate-change/climate-solutions/cities-pollution>

SÁNCHEZ MORENO CÁRDENAS, T. M. (2021). *El jardín vertical como herramienta de mejora del confort urbano*.

ZINCO. (2024, 3 de abril). *Verdes | ZinCo Green Roof*. <https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sistemas/energia-solar-y-cubiertas-verdes>

ZINCO. (2024, 12 de mayo). *Soluciones cubiertas verde*. <https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/>

GONZÁLEZ CALLE, G. (s.f.). *Integración eólica y solar fotovoltaica en edificios residenciales*.

VEGA GUIRACOCHA, G. (s.f.). *Optimización energética y ambiental de sistemas fotovoltaicos para su integración en la edificación*.