

INVESTIGACIÓN DE APLICACIONES DE MICROALGAS EN FACHADAS DE EDIFICIOS: UNA PERSPECTIVA BIBLIOMÉTRICA

Recibido 13/05/2025
 Aceptado 19/06/2025

EXPLORING MICROALGAE APPLICATIONS IN BUILDING FACADES: A BIBLIOMETRIC PERSPECTIVE

ESTUDO DE APLICAÇÕES DE MICROALGAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS: UMA PERSPECTIVA BIBLIOMÉTRICA

Aslı Taş

Doctor of Philosophy
 Assistant professor Faculty of Engineering and Architecture
 Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Nevşehir, Turkey
<https://orcid.org/0000-0003-0408-1533>
aslydz@gmail.com

Güneş Mutlu-Avinç

Doctor of Philosophy
 Assistant professor Faculty of Engineering and Architecture
 Muş Alparslan University, Muş, Turkey
<https://orcid.org/0000-0003-1049-2689>
gunesavinc@gmail.com



RESUMEN

Las microalgas son microorganismos con un gran potencial para su aplicación en tecnologías medioambientales sustentables por su capacidad de fotosintetizar, producir biomasa, absorber dióxido de carbono y tratar aguas residuales. Estas propiedades versátiles permiten integrar las microalgas en los sistemas arquitectónicos de fachadas. Los fotobiorreactores que pueden integrarse en la fachada cumplen funciones como la generación de energía, la mejora de la calidad del aire, el sombreado y el tratamiento de aguas residuales. En este contexto, aunque existen muchos estudios bibliométricos en la literatura sobre el uso de microalgas en los campos medioambiental e industrial, no hay ningún estudio bibliométrico exhaustivo que se centre en el uso de microalgas en diseños de fachadas arquitectónicas. Este estudio pretende revelar sistemáticamente las tendencias de la investigación en este campo examinando la bibliografía sobre el uso de microalgas en fachadas de edificios y sistemas de revestimiento mediante un análisis bibliométrico. Según los resultados de la investigación, la literatura científica sobre el uso de microalgas en fachadas de edificios ha aumentado rápidamente en los últimos años con colaboraciones interdisciplinarias y se centra en los temas de sustentabilidad, eficiencia energética e interacción biológica. Los estudios publicados entre 2012 y 2024, liderados por países como Alemania, Estados Unidos, China y Países Bajos, se configuran en torno a palabras clave como microalgas, biorreactor, fachada verde, y biointegración, centrados en la eficiencia energética, la sustentabilidad y la biotecnología de la construcción. Como resultado, esta investigación hace visible la posición actual de las tecnologías de microalgas y ofrece recomendaciones estratégicas para orientar futuros trabajos académicos.

Palabras clave

microalgas, fotobiorreactor, arquitectura sostenible, diseño de fachadas, análisis bibliométrico, biomasa, producción de energía

ABSTRACT

Microalgae are microorganisms that offer promising potential for application in sustainable environmental technologies due to their ability to photosynthesize, produce biomass, absorb carbon dioxide, and treat wastewater. These versatile properties allow microalgae to be integrated into architectural façade systems. Photobioreactors that can be integrated into architectural facades can be used for energy generation, air quality improvement, shading, and wastewater treatment. In this context, although there are many bibliometric studies in the literature on the use of microalgae in environmental and industrial applications, no comprehensive bibliometric study focuses on the use of microalgae in architectural facade designs. This study aims to systematically reveal the research trends in this field by examining the literature on the use of microalgae in building facades and cladding systems through bibliometric analysis. According to the research findings, the scientific literature on the use of microalgae in building facades has been increasing rapidly in recent years, with interdisciplinary collaborations focusing on the themes of sustainability, energy efficiency, and biological interaction. The studies published between 2012 and 2024, with leading contributions from countries such as Germany, the USA, China, and the Netherlands, are shaped around keywords such as microalgae, bioreactor, green facade, bio-integration, with a focus on energy efficiency, sustainability, and building biotechnology. As a result, this research makes the current position of microalgae technologies visible and provides strategic recommendations to guide future academic work.

Keywords

microalgae, photobioreactor, sustainable architecture, façade design, bibliometric analysis, biomass, energy production

RESUMO

As microalgas são microorganismos que apresentam um potencial promissor para aplicação em tecnologias ambientais sustentáveis devido à sua capacidade de fotossíntese, produção de biomassa, absorção de dióxido de carbono e tratamento de águas residuais. Essas propriedades versáteis permitem que as microalgas sejam integradas aos sistemas de fachadas arquitetônicas. Os fotobiorreatores que podem ser integrados às fachadas arquitetônicas podem ser usados para geração de energia, melhoria da qualidade do ar, sombreamento e tratamento de águas residuais. Neste contexto, embora existam muitos estudos bibliométricos na literatura sobre o uso de microalgas em aplicações ambientais e industriais, nenhum estudo bibliométrico abrangente enfoca o uso de microalgas em projetos de fachadas arquitetônicas. O objetivo deste estudo é identificar de forma sistemática as tendências de pesquisa nesse campo, por meio da análise bibliométrica da literatura sobre o uso de microalgas em fachadas de edifícios e sistemas de revestimento. De acordo com os resultados da pesquisa, a literatura científica sobre o uso de microalgas em fachadas de edifícios tem aumentado rapidamente nos últimos anos, com colaborações interdisciplinares focadas nos temas de sustentabilidade, eficiência energética e interação biológica. Os estudos publicados entre 2012 e 2024, com contribuições importantes de países como Alemanha, EUA, China e Países Baixos, concentram-se em palavras-chave como microalgas, biorreator, fachada verde, biointegração, com foco em eficiência energética, sustentabilidade e biotecnologia aplicada à construção. Assim, esta pesquisa torna visível o estágio atual das tecnologias de microalgas e oferece recomendações estratégicas para orientar futuros trabalhos acadêmicos.

Palavras-chave:

microalgas, Fotobiorreator, Arquitetura Sustentável, Design de Fachadas, Análise Bibliométrica, Biomassa, Produção de Energia

INTRODUCCIÓN

Las microalgas son algas unicelulares capaces de realizar fotosíntesis y que contienen diferentes pigmentos, especialmente clorofila-a. Producen oxígeno a partir de dióxido de carbono usando la luz solar. Debido a su rápida producción de biomasa, capacidad de absorción de CO₂, potencial de generación de biocombustibles y efectividad en el tratamiento de aguas residuales, las microalgas se consideran un recurso biológico sustentable con aplicaciones en diversos campos, como la energía, la medicina y la gestión ambiental (Umdy y Univ, 2020). Las microalgas pueden prosperar tanto en entornos naturales como artificiales. Naturalmente, se encuentran en hábitats de agua dulce (lagos, ríos, estanques), aguas salada (mares, océanos, lagunas), suelos húmedos y en la corteza de los árboles. Los sistemas de cultivo artificial incluyen estanques abiertos y fotobiorreactores cerrados. Los sistemas abiertos se instalan al aire libre y utilizan directamente la luz solar. Por el contrario, los sistemas cerrados implican el cultivo controlado de algas dentro de fotobiorreactores de vidrio, tubos o paneles, donde factores como la humedad, la temperatura y la presión se regulan con precisión. En particular, los sistemas de fotobiorreactores cerrados ofrecen un potencial significativo para la integración en aplicaciones arquitectónicas (Carvalho et al., 2014). Cuando se incorporan a las fachadas de los edificios, estos sistemas pueden contribuir a la generación de energía, la mejora de la calidad del aire y el tratamiento de aguas residuales (Öncel et al., 2016; Yaman et al., 2024).

Los fotobiorreactores utilizan la capacidad fotosintética de las microalgas para producir energía en las fachadas de los edificios. Estos reactores producen oxígeno y biomasa, capturando la luz solar y absorbiendo dióxido de carbono a través de paneles, tubos o sistemas de vidrio integrados en la envolvente del edificio. La biomasa creada se transforma luego de diferentes maneras en energía. La biomasa se puede convertir en biogás, que se puede utilizar como combustible, mientras que el biodiésel puede ayudar a satisfacer los requisitos de energía del edificio (Arora et al., 2024; Talaei y Prieto, 2024). Se han desarrollado diferentes tipos y formas de fotobiorreactores para el uso de primera línea de microalgas. Existen varias clasificaciones formales de fotobiorreactores en la literatura. Pueden ser tubulares planos, horizontales y verticales (Yoo et al., 2013); tubular, de losa plana y helicoidal (Yilmaz, 2006); tubular horizontal, tubular vertical, columna vertical y placas planas (Ugwu et al., 2008; Bitog et al., 2011; Wang et al., 2012) o tubular, paneles planos, columna de burbujas vertical y elevador aéreo vertical (Sedighi et al., 2023). Las características de la especie, junto con los requisitos técnicos y medioambientales de la fachada, son determinantes en el uso de fotobiorreactores en fachadas. Sin embargo, las condiciones de luz, temperatura, humedad y mantenimiento difieren dependiendo de las especies de microalgas. Los requisitos de luz, las tasas de crecimiento, las tolerancias de temperatura y las cantidades de producción de biomasa de diferentes especies de algas también varían (Singh y Singh, 2015). Por el contrario, el diseño de la fachada también puede reflejar diferentes necesidades, incluido el clima, la orientación, el control solar, el sombreado y el aislamiento térmico. Por ende, tanto las condiciones apropiadas para que prosperen las algas como las necesidades funcionales y arquitectónicas de la fachada deben considerarse conjuntamente al seleccionar el tipo de fotobiorreactor para la fachada. El rendimiento del

sistema depende mucho de este equilibrio (Huang et al., 2017).

Debido a que las algas pueden producir energía, limpiar aguas residuales y mejorar la calidad del aire, es un tema de investigación crucial para los enfoques arquitectónicos sustentables. Teniendo en cuenta las muchas ventajas de las microalgas, es imperativo realizar más investigaciones sobre su aplicación en fachadas de edificios. En consecuencia, una nueva investigación sobre sistemas de fachadas que utilizan microalgas es crucial para lograr una urbanización sostenible y mitigar el cambio climático. Numerosos estudios de análisis bibliométricos sobre microalgas se han llevado a cabo en la literatura en diversos momentos. El estudio de Rumin et al. (2020) examinó el desarrollo de la investigación sobre microalgas en todo el mundo, en Europa y en la región Euroatlántica de 1960 a 2019. Este estudio analizó 79.020 publicaciones para evaluar la evolución de los temas de investigación, las colaboraciones entre países e instituciones, los conceptos de investigación destacados y en declive, las especies más estudiadas y las revistas relevantes. Purba et al. (2024) analizaron 1.339 artículos de investigación sobre el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales para la sostenibilidad ambiental desde 1990 hasta noviembre de 2023. Kinawy et al. (2024) realizaron un análisis bibliométrico que abarcó el uso de microalgas en la industria cosmética en las últimas dos décadas. Gao et al. (2022) analizaron 10.201 artículos sobre el uso de algas como biocombustibles entre 1980 y 2019 y evaluaron su desempeño en publicaciones, redes sociales y tendencias de investigación. Silva et al. (2020) analizaron las tendencias de investigación, patentes, industria y mercado sobre pigmentos de microalgas durante la última década. El estudio de Li y Zhu (2021) analizó 2.621 estudios sobre el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales en los últimos 20 años en cuanto a características de publicación, colaboraciones y tendencias de investigación. Melo et al. (2022) analizaron la investigación bibliométrica sobre el cultivo de microalgas en aguas residuales de industrias agrícolas. Como resultado, los estudios existentes se han centrado en aplicaciones ambientales e industriales de las microalgas, como la producción de energía, la sustentabilidad ambiental o el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, no existe una investigación en la literatura que aborde el uso de microalgas en diseños de fachadas arquitectónicas con un análisis bibliométrico exhaustivo. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo revelar sistemáticamente las tendencias de investigación en el campo, mediante el análisis de la literatura centrada en el uso de microalgas en fachadas de edificios y sistemas de revestimiento con el método de mapeo científico. A este respecto, el estudio tiene como objetivo hacer una contribución única a la literatura destacando el papel de la tecnología de microalgas en aplicaciones arquitectónicas, mapeando áreas de investigación interdisciplinarias y proporcionando direcciones estratégicas para futuras investigaciones.

METODOLOGÍA

Dentro del alcance de este estudio se realizó una búsqueda bibliográfica sistemática y exhaustiva en la base de datos Web of Science (WoS) el 8 de mayo de 2025, con el objetivo de

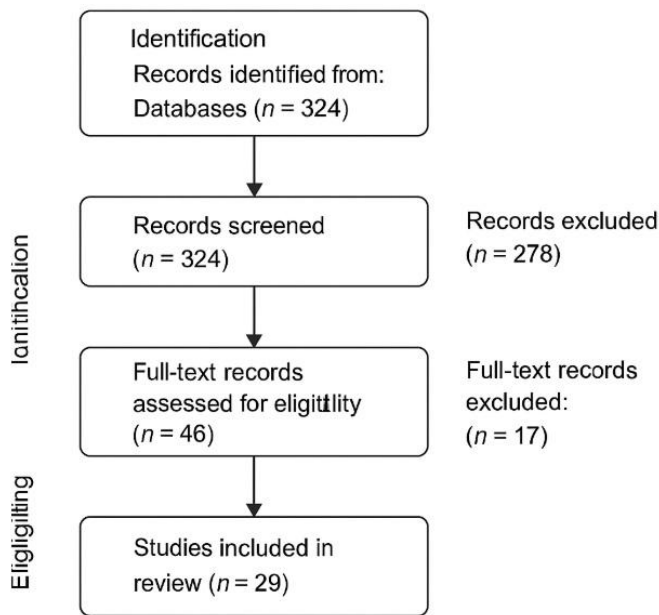


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA del estudio. Fuente: Preparado por los autores.

identificar publicaciones académicas relacionadas con la aplicación de algas en fachadas de edificios. La estrategia de búsqueda empleó una combinación de palabras clave basadas en el tema, para capturar estudios relevantes de diversos orígenes disciplinarios. Los datos bibliográficos recuperados fueron exportados y posteriormente analizados utilizando el paquete Bibliometrix R para realizar un análisis bibliométrico. Esto incluyó la evaluación de años de publicación, revistas, áreas temáticas, países, instituciones, patrones de autoría, colaboraciones internacionales y distribuciones de palabras clave.

En línea con los estándares internacionales actuales para revisiones sistemáticas, el estudio se realizó siguiendo las pautas PRISMA 2020 (Elementos de Reporte Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis). Todo el proceso de revisión, incluida la identificación, selección, evaluación de elegibilidad e inclusión final de los estudios, se documentó utilizando el diagrama de flujo y la pauta de cotejo PRISMA. El diagrama de flujo que resume el proceso de selección del estudio se presenta en la Figura 1, mientras que la pauta de cotejo PRISMA correspondiente se proporciona en los materiales complementarios.

La búsqueda en la base de datos de Web of Science se realizó utilizando palabras clave basada en el tema. El primer grupo de palabras clave incluyó: "microalgas" O "algas" O "fotobiorreactor" O "algas", lo que permitió filtrar la literatura relacionada con microalgas y sistemas fotobiorreactores. El segundo grupo se centró en fachadas de edificios e incluyó los términos: "fachada" O "Cerramientos de Edificios" O "envolvente de edificios" O "alzado de edificios" O "fachada" O "acristalamiento", identificando estudios relacionados con envoltorios de edificios. Combinando estos dos grupos de palabras clave, se recuperaron 232 fuentes académicas. Estas

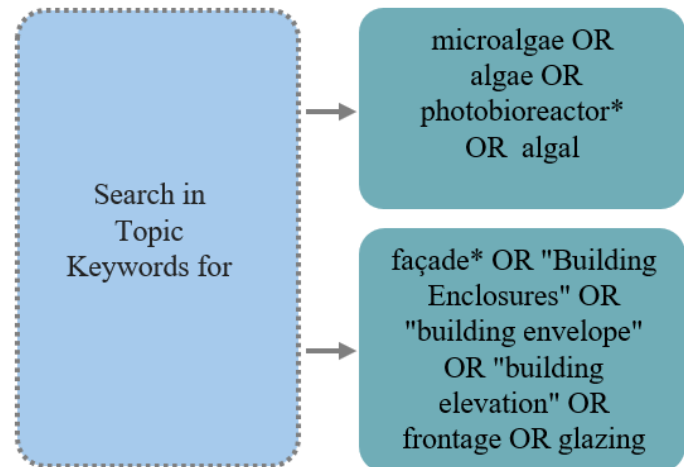


Figura 2. Búsqueda en la base de datos de Web of Science. Fuente: Preparado por los autores.

fuentes formaron el conjunto de datos para el análisis y se utilizaron en la evaluación bibliométrica de este estudio (Figura 2). Los estudios se incluyeron en función de criterios de elegibilidad predefinidos: (1) enfoque en aplicaciones de microalgas en fachadas de edificios, (2) artículos revisados por pares en inglés, (3) publicaciones entre 1986-2025. Los criterios de exclusión incluyeron revisiones que no se enfocaron en la integración arquitectónica o estudios que carecían de diseño experimental.

RESULTADOS

La búsqueda realizada en la base de datos de Web of Science el 8 de mayo de 2025 identificó 232 estudios. Solo los artículos escritos en inglés fueron incluidos en el proceso de análisis bibliométrico.

En este contexto, este análisis bibliométrico, basado en 217 artículos en inglés publicados entre 1986 y 2025, revela que el área ha mostrado un crecimiento constante con una tasa de crecimiento anual del 5,48%, y se ha erigido como un campo académico altamente colaborativo. Con contribuciones de 743 autores, los documentos demuestran un promedio de 4,53 coautores por publicación y solo 11 artículos de un solo autor, lo que indica que la investigación en este campo se lleva a cabo predominantemente a través del trabajo en equipo. La tasa de coautoría internacional es del 23,5%, destacando la fuerte colaboración global dentro del campo. Los documentos tienen una antigüedad promedio de 7,88 años y han recibido cada uno un promedio de 17,35 citas, lo que refleja un impacto académico significativo. Un total de 795 palabras clave y 7.585 referencias indica la diversidad de contenido de la investigación y el amplio alcance de la literatura revisada (Figura 3).



Figura 3. Información principal de los estudios. Fuente: Preparado por los autores.

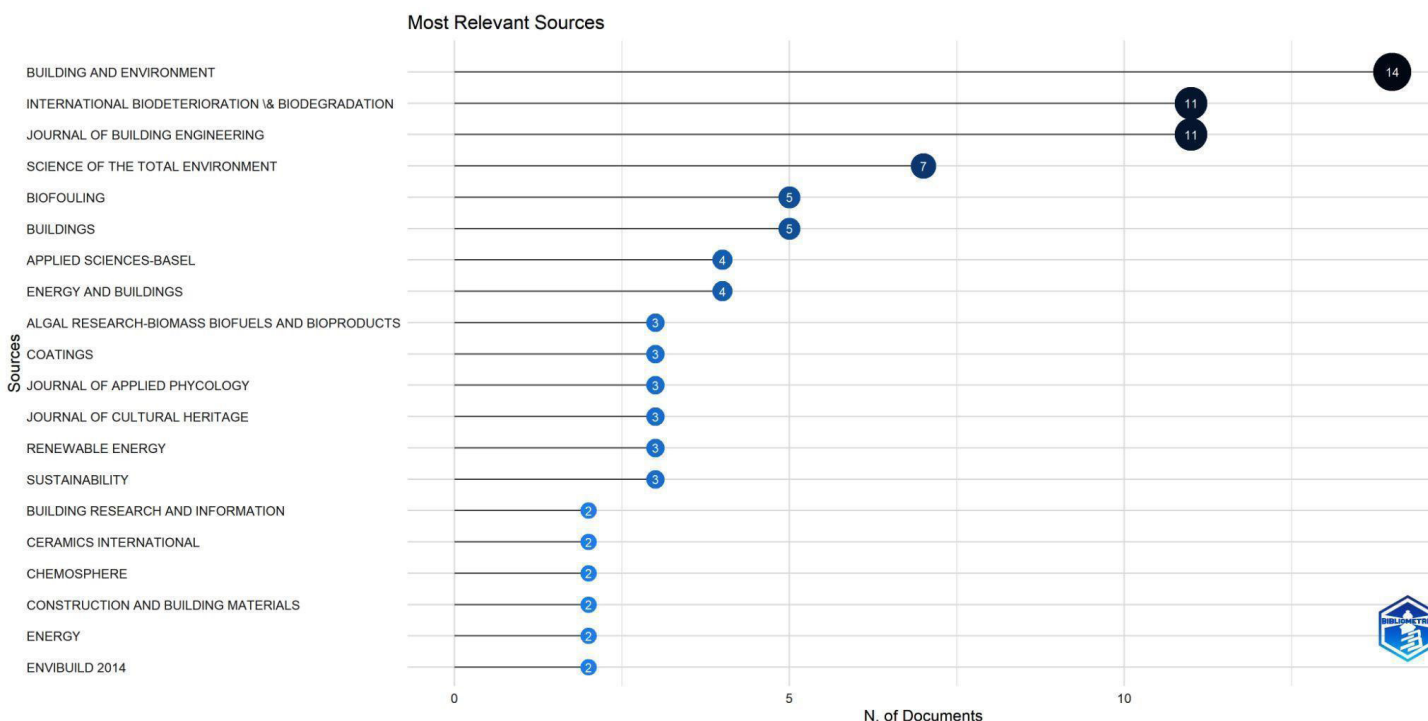


Figura 4. Fuentes más relevantes. Fuente: Preparado por los autores.

Los datos presentados en el gráfico de “Fuentes más relevantes” (Figura 4) demuestran claramente el carácter interdisciplinario de la investigación sobre la aplicación de algas en fachadas de edificios. Una de las revistas con mayor número de publicaciones, Building and Environment (14 documentos), presenta ocasionalmente estudios que evalúan el desempeño ambiental, la eficiencia energética y la sostenibilidad de los sistemas de fachadas integrados con algas. Aunque algunos estudios han explorado los sistemas de fachadas integrados por algas, estos siguen siendo relativamente limitados dentro del alcance más amplio de los trabajos publicados. Fuentes como International Biodeterioration & Biodegradation (11 documentos) y Biofouling (5 documentos) destacan el enfoque

significativo en los aspectos microbiológicos de las algas, incluidos sus efectos biológicos, procesos de degradación e interacciones con las superficies de los materiales. De forma similar, las publicaciones en revistas como Journal of Building Engineering, Energy and Buildings y Applied Sciences-Basel enfatizan las soluciones de ingeniería y las contribuciones de producción de energía de los sistemas de fachadas basados en algas. Además, la presencia de revistas especializadas como Algal Research, Journal of Applied Ficology y Renewable Energy indica que las algas también se están explorando debido a su potencial en la producción de energía renovable y aplicaciones biotecnológicas en el contexto de la integración de fachadas arquitectónicas. Esta distribución muestra

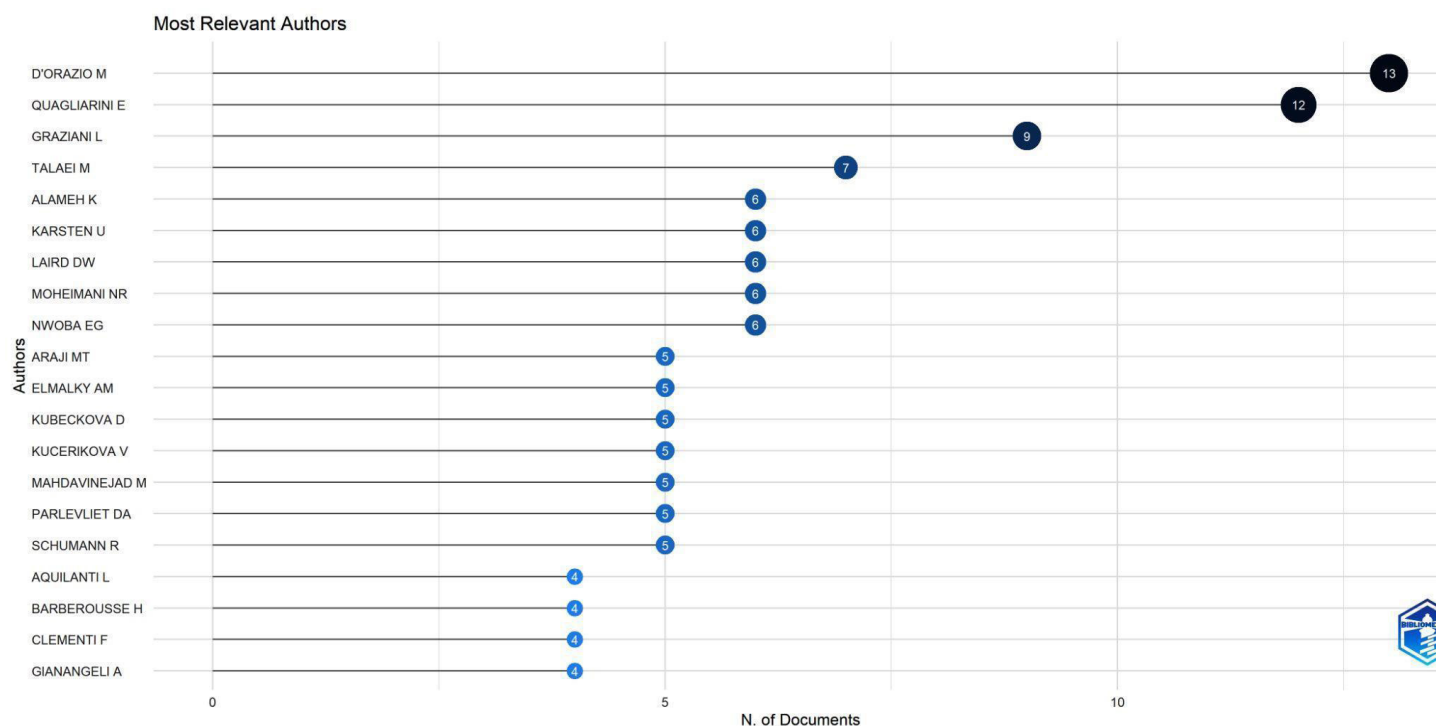


Figura 5. Autores más relevantes. Fuente: Preparado por los autores.

claramente que el tema se aborda no solo en el campo de la arquitectura, sino también en las ciencias ambientales, la biotecnología y la ingeniería energética, lo que refleja su panorama de investigación multidisciplinario.

Los datos del gráfico de los autores más relevantes (Figura 5) muestran a los autores más influyentes en el trabajo académico sobre el uso de algas en fachadas y revelan los perfiles de los investigadores en los que se centra la producción científica en este campo. D'Orazio, M. (13 documentos) y Quagliarini, E. (12 documentos) se encuentran entre los investigadores más destacados en el campo de los efectos biológicos de las algas en las superficies de los edificios, sus consecuencias sobre la resistencia de los materiales y la integración de estos organismos en los sistemas de fachadas. Graziani L. (9 documentos) y Talaei M. (7 documentos) también han producido estudios que exploran las posibilidades de los diseños de fachadas basados en algas en términos de desempeño ambiental y energético. Otros autores destacados, como Alameh K., Karsten U., Moheimani N. R. y Nwoba E. G., han contribuido en el contexto de la biología de las algas, la eficiencia fotosintética y los sistemas de fachadas biotecnológicas, aportando perspectivas de ciencias ambientales, ingeniería y biotecnología al tema.

El gráfico de afiliaciones más relevante (Figura 6) muestra la distribución de publicaciones académicas sobre el uso de microalgas en fachadas, por universidad. La Università Politecnica delle Marche (Italia) (32 artículos) y la Universidad de Murdoch (Australia) (31 artículos) destacan entre las instituciones con mayor número de publicaciones. Esto demuestra que estas universidades son centros de investigación punteros en enfoques biotecnológicos y arquitectónicos

sustentables, como el uso de microalgas en fachadas de edificios. Cabe destacar que la Universidade Nova de Lisboa (Portugal), la Universidad Tecnológica de Sydney (Australia) y la Universidad de Waterloo (Canadá) también contribuyen con 12-17 artículos. Los datos proporcionan una dirección importante para la colaboración académica y el intercambio de conocimientos para los investigadores interesados en integrar microalgas en las fachadas de los edificios.

El mapa de producción científica de los países (Figura 7) muestra la distribución geográfica de la producción científica sobre el uso de microalgas en aplicaciones frontales de edificios. Los países resaltados en azul oscuro en el mapa tienen la mayor producción académica en este campo. Alemania (90 publicaciones) es el claro líder en este campo, seguido de Francia (68), Australia (58) e Italia (53). Esto indica que los países europeos están asumiendo un papel de liderazgo en la integración de tecnologías de microalgas en sistemas fronterizos sostenibles y que la infraestructura de investigación en estos países es sólida. En particular, países como Alemania y Francia son pioneros en términos de investigación aplicada y colaboraciones entre la industria y la academia. En el mapa, la intensa producción académica de Australia muestra que destacan los estudios sobre sistemas de fachadas biotecnológicas que aprovechan las ventajas climáticas del continente. El hecho de que países como Irán, China y EE.UU. también tengan una capacidad de producción creciente en este campo muestra que las innovaciones basadas en microalgas se están generalizando a nivel mundial y que esta tecnología se integrará en geografías más amplias en el futuro.

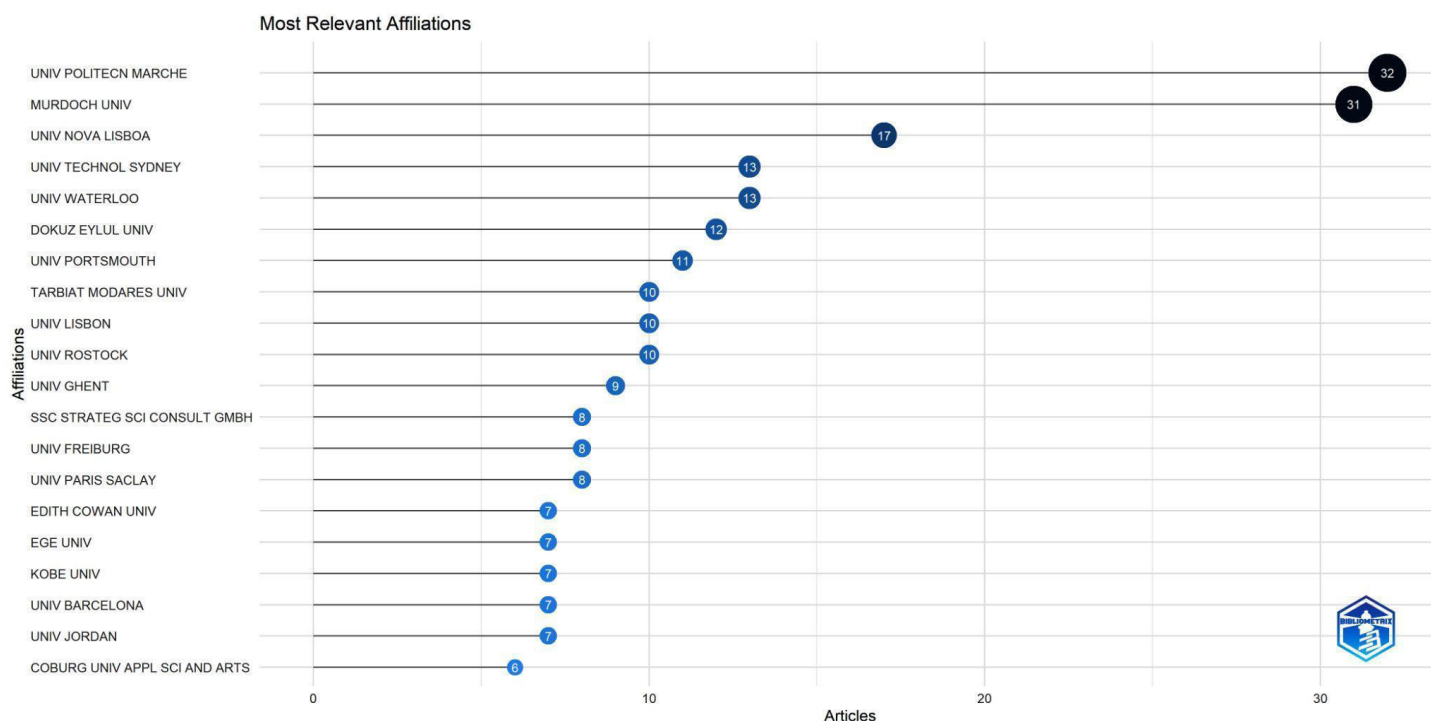


Figura 6. Afiliaciones más relevantes. Fuente: Preparado por los autores.

Country Scientific Production

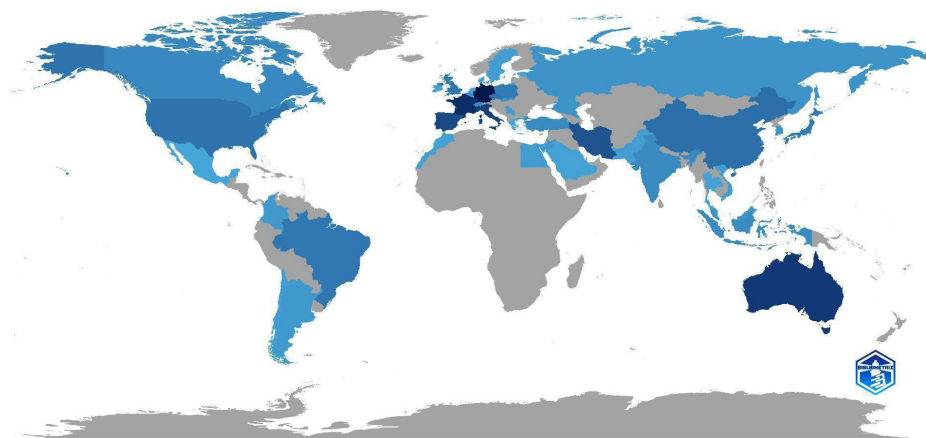


Figura 7. Producción científica de los países. Fuente: Preparado por los autores.

Las palabras clave en el gráfico (Figura 8) muestran los temas en torno a los cuales se ha examinado el uso de algas en las superficies de las fachadas en la literatura académica. Los términos más utilizados, "microalgas" (n = 32) y "algas" (n = 31), indican que el foco de estas investigaciones está en las especies de microalgas. Si bien términos como "biodeterioro" (n=10), "bioincrustación" (n=7) y "biorreceptividad" (n=6) reflejan una extensa investigación sobre la interacción de las algas con las superficies, los efectos biológicos en los materiales de la fachada y la idoneidad de las superficies para el crecimiento de algas, los términos "fotobiorreactor" (n=16) y "cianobacterias" (n=14) indican que el foco se ha puesto en la producción de estos organismos en sistemas controlados

y en la diversidad de especies. El interés académico en la durabilidad de las fachadas, sus características superficiales y su impacto en la colonización de algas se destaca aún más mediante palabras clave orientadas a los materiales de construcción, como "fachada" (n=7), "durabilidad" y "porosidad" (n=6). Estos resultados sugieren que las algas están siendo consideradas en los sistemas de fachadas desde perspectivas disciplinarias que incorporan consideraciones ambientales y materiales.

Los temas en tendencia en el gráfico (Figura 9) ilustran la evolución del uso de algas en fachadas a lo largo del tiempo. En el período posterior a 2013, la creciente frecuencia de

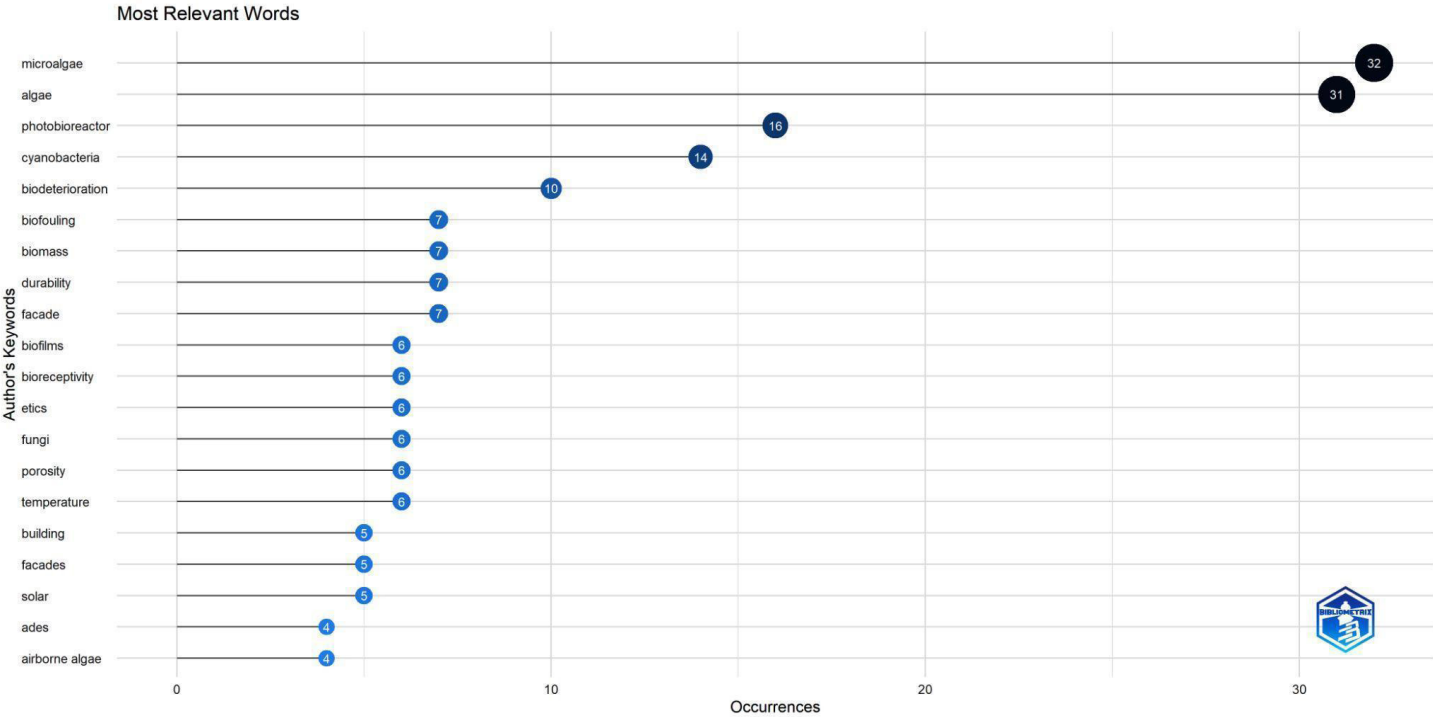


Figura 8. Palabras más frecuentes. Fuente: Preparado por los autores.

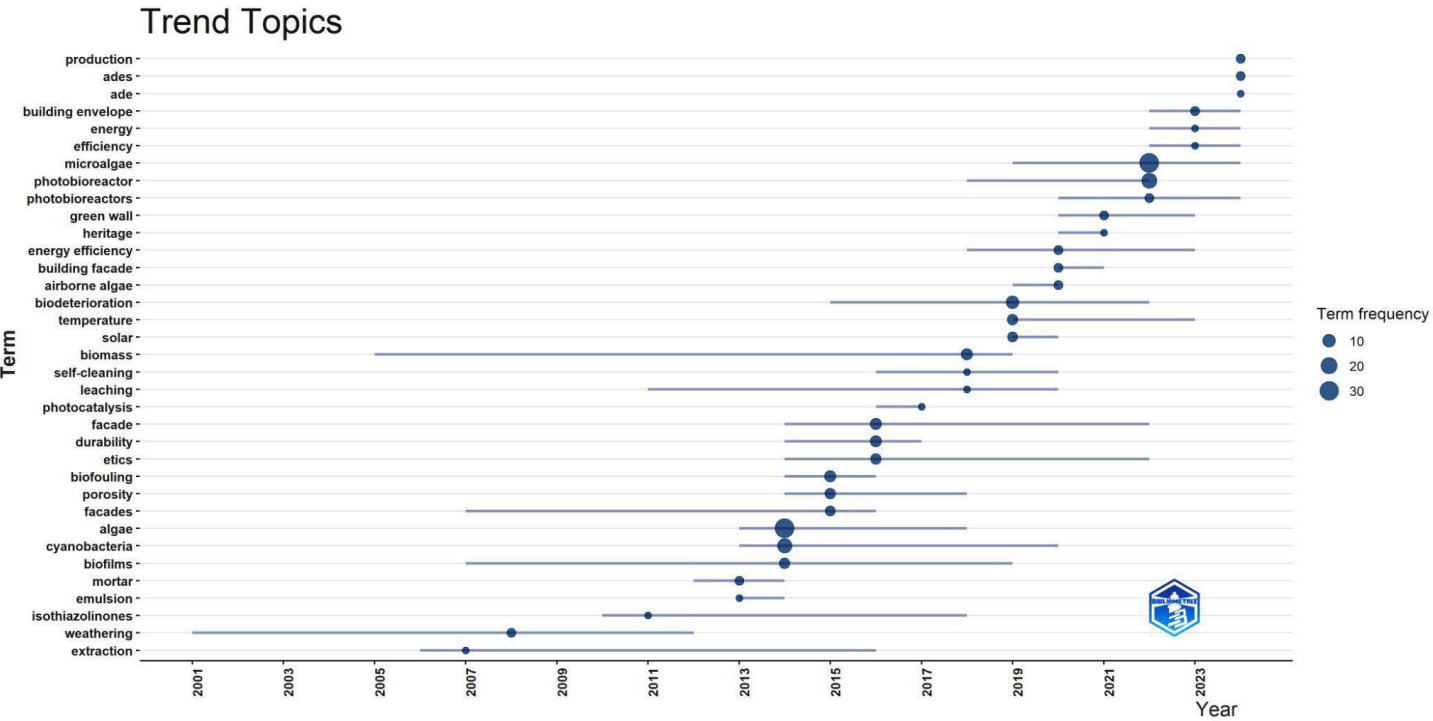


Figura 9. Temas en tendencia. Fuente: Preparado por los autores.

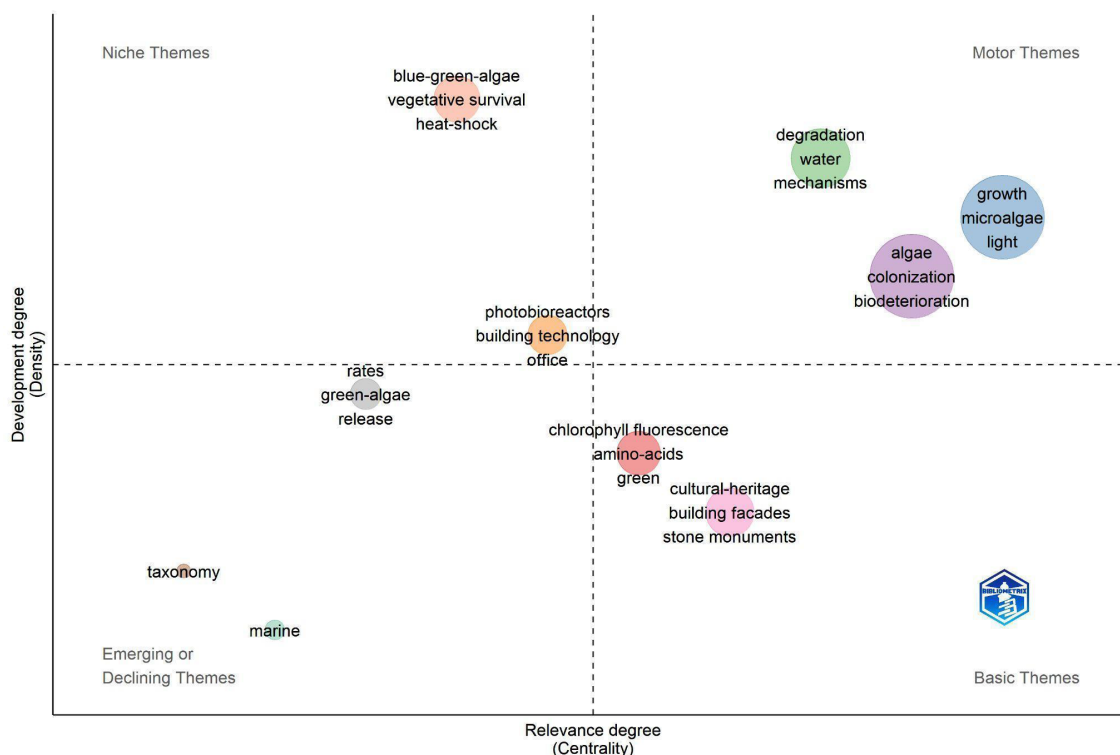


Figura 10. Mapa temático. Fuente: Preparado por los autores.

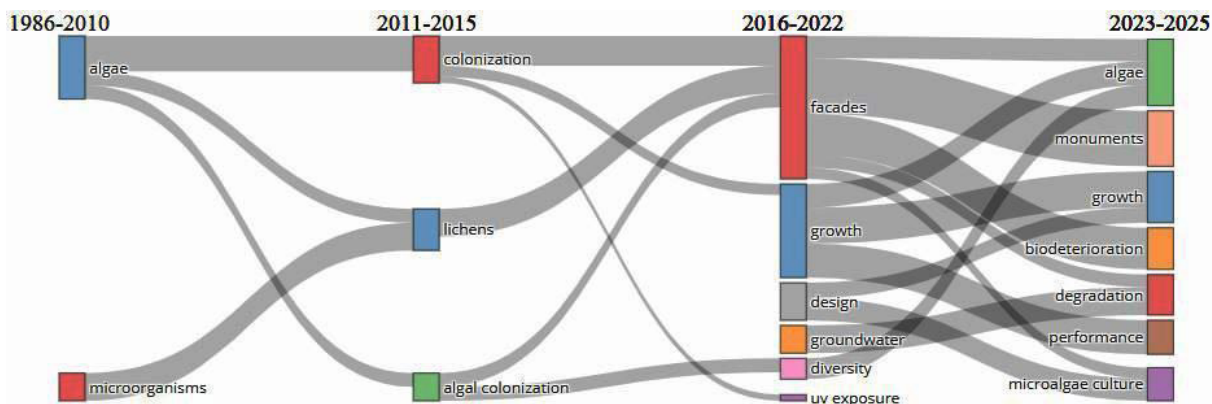


Figura 11. Evolución temática. Fuente: Preparado por los autores.

términos como "microalgas", "fotobiorreactor" y "eficiencia energética" revela que este campo ha comenzado a atraer más atención en el contexto de la sustentabilidad y la producción de energía. En particular, el término "microalgas" se usó muy frecuentemente entre 2018 y 2023, lo que indica que estos organismos vivos se destacan por sus funciones, como la producción de biocombustibles y la absorción de carbono, en aplicaciones de fachadas. Además, términos como "envolvente del edificio", "muro verde", "durabilidad" y "autolimpieza" enfatizan que las algas pueden ofrecer contribuciones no solo biológicas, sino también estructurales y estéticas en los sistemas de fachadas. La distribución de términos a lo largo del eje temporal indica que este tema ha adquirido una dimensión interdisciplinaria y ahora se está

abordando de manera integrada, abarcando la eficiencia energética, la durabilidad de los materiales y las soluciones ambientales.

El enfoque contextual y el grado de desarrollo de la investigación académica sobre el uso de algas en fachadas se representan en el mapa temático de la Figura 10. En la esquina superior derecha, términos como "crecimiento", "microalgas" y "luz" se destacan como "temas motores" con alta centralidad y densidad, lo que sugiere que estos temas están bien desarrollados y son esenciales para el área. De forma similar, los temas altamente centrales de "algas", "colonización" y "biodeterioro" indican que el biodeterioro y la acumulación de algas en las superficies de

las fachadas se encuentran entre los temas de investigación principales. Mientras tanto, "taxonomía" y "marino", en la parte inferior izquierda, representan temas decrecientes o poco desarrollados con baja centralidad e intensidad y términos como "algas verdeazuladas" y "choque térmico", en la parte superior izquierda, representan temas de nicho de particular interés definidos más específicamente. Términos como "fachadas de edificios", "patrimonio cultural" y "monumentos de piedra" se encuentran en el área central inferior y exhiben una alta centralidad pero baja densidad, lo que indica que son temas fundamentales con un margen sustancial de expansión. A pesar de que la investigación sobre el uso de algas en fachadas ha avanzado en el contexto del crecimiento y la degradación biológicos, esta distribución sugiere que se requiere más investigación para las tecnologías de construcción y las aplicaciones en el patrimonio cultural.

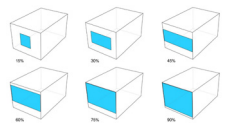
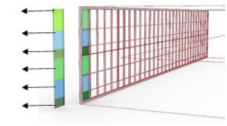
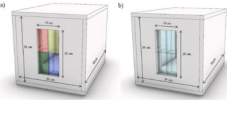
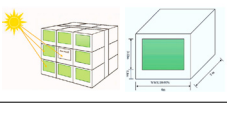
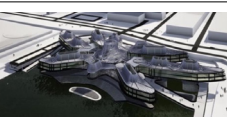
El diagrama de Sankey en la Figura 11 ilustra la evolución de las tendencias académicas en el uso de algas en fachadas a lo largo de los años. La investigación sobre términos biológicos generales, como "algas" y "microorganismos", fue más frecuente entre 1986 y 2010. Sin embargo, entre 2011 y 2015, el enfoque cambió al estudio de asentamientos biológicos en superficies de edificios, utilizando términos como "colonización", "líquenes" y "colonización de algas". La investigación ha experimentado cambios significativos entre 2016 y 2022, centrándose en temas más especializados como "fachadas", "crecimiento", "diseño", "diversidad" y "aguas subterráneas". Esto sugiere que la relación entre las algas y las envolventes de los edificios se está estudiando tanto en términos de crecimiento biológico como de

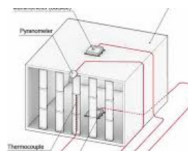
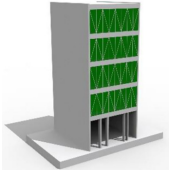
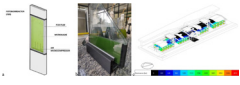
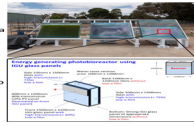
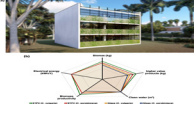
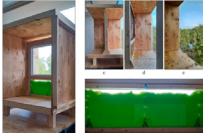
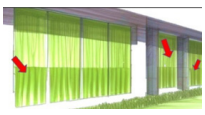
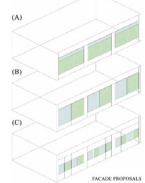
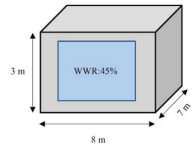
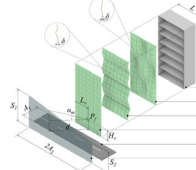

diseño. Con términos como "biodeterioro", "degradación", "rendimiento" y "cultivo de microalgas", que destacan la robustez y funcionalidad de los materiales de la fachada, así como los procesos de producción de microalgas, estos temas se han vuelto aún más complejos en el período más reciente, entre 2023 y 2025. Esta evolución demuestra cómo la aplicación de algas en fachadas se ha convertido en un campo de estudio multidisciplinario que ahora abarca el diseño sustentable, la ingeniería de materiales y la biología de superficies.

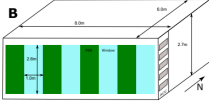
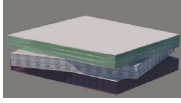

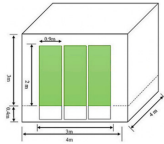
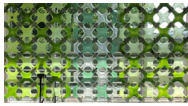




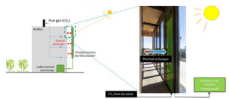
REVISIÓN SISTEMÁTICA

Como parte del estudio, se utilizó una matriz comparativa para el diseño de fachadas de algas, ubicación, clima, tipo de fotobiorreactor, tipo de algas y uso previsto en la fachada para analizar el contenido de los artículos escaneados en WOS (Tabla 1). Se encontraron 26 publicaciones que crearon sugerencias de fachada para el uso de algas entre 217 estudios. Tras examinar estos artículos se reveló que las propuestas de fachada se crearon principalmente para los Estados Unidos, Europa (incluidos Alemania, España y Francia) e Irán. Se representaron diferentes zonas climáticas, donde se usaron algas *Chlorella vulgaris* como especies de algas, y los tipos de paneles planos se emplearon típicamente como tipos de fotobiorreactores. Según los estudios, los objetivos principales del uso de algas en fachadas son la eficiencia energética, el control de la luz natural, el confort estético y la producción de biomasa.

Tabla 1. Diseños con algas en fachadas. Fuente: Preparado por los autores.

Fuente	Imagen	Lugar	Clima	Tipo de fotobiorreactor	Especies de microalgas	Función de la fachada
Negev et al, 2019		Universidad de Tel Aviv, Israel	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> versus <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia energética, control de sombra y luz natural, confort térmico, producción de biomasa
Sarmadi y Mahdavinejad, 2023		Teherán, Irán	Clima semiárido frío	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlorella vulgaris</i>	Confort visual, eficiencia energética, confort térmico, generación de energía
Ahmadi et al., 2023		Isfahán, Irán	Clima cálido y seco	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chaetoceros</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Haematococcus pluvialis</i> , <i>Spirulina platris</i>	Eficiencia energética, confort térmico, control de la luz natural, absorción de CO ₂
Talaei et al., 2021b		Meshed, Irán	Clima semiárido frío	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> versus <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia energética, control de la luz natural, confort térmico, sombreado
Hasnan y Zaharin, 2020		Malasia	Clima tropical	Fotobiorreactor de panel plano	-	Eficiencia energética, confort térmico, control de la luz natural y sustentabilidad

Fuente	Imagen	Lugar	Clima	Tipo de fotobiorreactor	Especies de microalgas	Función de la fachada
Woo et al., 2022		-	-	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella sp.	Eficiencia energética, confort térmico, control de la luz natural, absorción de CO ₂
Rezazadeh et al., 2021		Teherán, Irán	Clima semiárido	Un fotobiorreactor de circuito cerrado	-	Mejora de la calidad del aire, eficiencia energética y diseño de edificios sustentables
Talaei et al., 2021		Passo Fundo, Brasil	Clima templado	Fotobiorreactor de panel plano	-	Eficiencia energética, confort térmico, control de la luz natural, absorción de CO ₂
Nwoba et al., 2021		Australia Occidental	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor de panel plano	Nannochloropsis sp. (deniz mikroalg türü)	Producción de biomasa, generación de electricidad, eliminación de la necesidad de agua para refrigeración, eficiencia energética
Gol et al., 2025		-	-	Fotobiorreactor de sistema cerrado	Chlorella sorokiniana y Chlorella vulgaris	Generación de energía eléctrica, tratamiento de aguas residuales, producción de biodiesel, producción de bioproductos de alto valor (lípidos, luteína, clorofila a y b)
Elmalky y Araj, 2024a		España	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor tubular	Chlorella vulgaris	Eficiencia energética, producción de biomasa, control solar, regulación de ganancias de calor, absorción de dióxido de carbono
Metwally e Ibrahim, 2024		Hamburgo, Alemania	Clima oceánico templado	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella vulgaris	Producción de energía, filtrado de luz solar, aislamiento térmico, aporte estético
Yaman et al., 2025		Europa Central	Clima continental	Fotobiorreactor de panel plano	Scenedesmus obliquus	Eficiencia energética, confort interior, minimización del impacto ambiental
Talaei y Sangin, 2024a		-	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor tubular	Chlorella vulgaris	Regulación de la temperatura interior, la luz natural y reducción del consumo de energía.
Elmalky y Araj, 2024b		Estados Unidos	Clima templado	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella vulgaris	Producción de energía, control solar pasivo, reducción de la huella de carbono
Villalba et al., 2023		Sur de Europa	Clima templado	Fotobiorreactor de panel plano y sistemas cilíndricos	Chlorella vulgaris y Spirulina platensis	Mejora de la calidad del aire, absorción de dióxido de carbono, producción de biocombustibles, contribución estética y reducción del efecto isla de calor urbano.

Fuente	Imagen	Lugar	Clima	Tipo de fotobiorreactor	Especies de microalgas	Función de la fachada
Girard et al., 2023		Toulouse, Francia	Clima oceánico templado	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlorella vulgaris</i>	Equilibrio de las ganancias de calor, regulación de la temperatura interior, absorción de CO ₂ y control de la luz natural
Vajdi y Aslani, 2023		Arizona, Estados Unidos	Clima semiárido cálido	Panel plano horizontal	<i>Nannochloropsis oculata</i>	Producción de energía, control de la temperatura interior y gestión de la luz natural
Todisco et al., 2022		Milán, Italia	Clima subtropical húmedo	Panel plano vertical	<i>Chlorella vulgaris</i>	Filtración de la radiación solar, absorción de CO ₂ y mejora del rendimiento energético del edificio.
Talaei et al., 2022		Seúl, Corea del Sur	Clima continental húmedo	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlorella vulgaris</i>	Reducción del consumo de energía, optimización las temperaturas interiores, control de la luz natural y contribución a la sustentabilidad ambiental.
Wu et al., 2022		-	Clima mediterráneo	Panel modular	<i>Chlorella vulgaris</i>	Producción de energía, integridad estética, absorción exterior de CO ₂ y aislamiento térmico
Scherer et al., 2020		Ilmenau, Alemania	Clima continental templado	Fotobiorreactor multicapa	Cianobacterias o clorofitas	Generación de energía, iluminación de la envolvente del edificio, luz natural, absorción de CO ₂ y apariencia estética
Biloria y Thakkar, 2020		Hamburgo, Alemania	Clima oceánico templado	Fotobiorreactor de doble capa	<i>Chlorella vulgaris</i>	Filtración de la luz natural, aumento del confort térmico interior, aporte de energía a través de la producción de biomasa y reducción de las emisiones de CO ₂
Arbye et al., 2020		Indonesia	Clima tropical	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlorella</i> sp.	Mejora de la calidad del aire, sombreado, generación de energía, confort térmico, estética visual y producción sostenible de biocombustibles.
Elrayies, 2018		-	-	Fotobiorreactor de panel plano y tubular	<i>Chlorella vulgaris</i> y <i>Spirulina platensis</i>	Generación de energía, reducción de emisiones de carbono, mejora del confort térmico interior, control de la luz natural y contribución estética
Pruvost et al., 2016		Barcelona, España	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlorella vulgaris</i>	Contribución al equilibrio energético del edificio, creación de una fuente de energía renovable con producción de biomasa, aumento del confort térmico interior y control solar

La matriz comparativa revela patrones comunes en los diseños revisados. El uso predominante de *Chlorella vulgaris* y fotobiorreactores de panel plano en diferentes climas sugiere un modelo funcional y adaptable para la integración en fachadas. La mayoría de los estudios de casos enfatizan la eficiencia energética, el control de la luz natural y el confort térmico, lo que indica una tendencia hacia los sistemas de fachadas multifuncionales. A pesar de la diversidad en las ubicaciones geográficas, la recurrencia de tipos de microalgas y configuraciones de fotobiorreactores similares señala un consenso sobre la viabilidad técnica. Estos hallazgos destacan las oportunidades para estandarizar las tecnologías de algas integradas en fachadas y sugieren la necesidad de realizar más estudios sobre el rendimiento a largo plazo, la rentabilidad y la aceptación del usuario (Tabla 1).

CONCLUSIÓN

Este estudio examinó la literatura sobre la aplicación de microalgas en fachadas de edificios utilizando técnicas bibliométricas basadas en artículos en inglés publicados en la base de datos Web of Science, entre 1986 y 2025, . Según los resultados de 217 documentos, el tema ha atraído más atención recientemente y ha demostrado un avance académico constante, con una tasa de crecimiento anual del 5,48%. En particular, la tasa de crecimiento anual observada del 5,48% en publicaciones se alinea con tendencias más amplias en la publicación académica. Por ende, esta cifra debería interpretarse con cautela y no como un indicador directo de la prominencia relativa del tema. Además, la inclusión exclusiva de artículos en inglés puede haber limitado el alcance de la revisión, potencialmente pasando por alto investigaciones significativas publicadas en otros idiomas. Estas limitaciones introducen un grado de sesgo que debe reconocerse al interpretar los hallazgos.

Las contribuciones de los 743 autores en estos documentos demuestran cómo la investigación interdisciplinaria ha dado forma al área y cuán altamente colaborativa es. Los sistemas de fachadas basados en microalgas se han convertido en un campo de investigación integral que abarca no solo la arquitectura y las ciencias de la construcción, sino también muchas otras disciplinas, incluida la ingeniería ambiental, la biotecnología y los sistemas energéticos, como lo demuestra el hecho de que la mayoría de las publicaciones examinadas es de varios autores y que la tasa de colaboración internacional es del 23,5%. La media de 17,35 citas recibidas por los documentos indica que el tema tiene un alto nivel de impacto académico y que la investigación ha tenido una influencia importante en la comunidad científica.

Se confirma que los estudios sobre el uso de algas en fachadas se abordan tanto en términos de sustentabilidad como de interacción biológica mediante la inclusión de revistas de diversos campos, entre ellas "Building and Environment" , "International Biodeterioration & Biodegradation" y "Biofouling", entre las revistas con mayor

número de publicaciones dentro del alcance del análisis. La contribución de las microalgas a la eficiencia energética a través de sistemas de fotobiorreactores también se destaca en publicaciones en revistas especializadas en energía, como "Algal Research" y "Renewable Energy".

El estudio también encontró que universidades como la Universidad de Murdoch en Australia y la Università Politecnica delle Marche en Italia son líderes en el área. Estos centros son clave para las colaboraciones internacionales tanto en términos de producción científica como de infraestructura de investigación, como lo demuestran sus altos números de publicaciones. Las sólidas redes de investigación que respaldan el potencial de las microalgas en aplicaciones de primera línea también se ven confirmadas por la gran cantidad de publicaciones y colaboraciones nacionales e internacionales en países como Alemania, Francia y Australia.

El mapa conceptual de la red y el análisis de palabras clave demuestran que hay dos ejes principales a lo largo de los cuales se aborda la aplicación de microalgas en las superficies de las fachadas: el primero es la investigación de prevención de daños, incluida la degradación basada en materiales, bioincrustaciones, biodeterioro y biorreceptividad; siendo el segundo las aplicaciones orientadas al beneficio, incluida la producción de energía, la sustentabilidad y los sistemas de fotobiorreactores. De acuerdo con esta estrategia integral, los sistemas de fachadas basados en microalgas serán cruciales para la eficiencia energética futura, el desempeño ambiental y las políticas de urbanización. En consecuencia, el uso de microalgas en fachadas de edificios se ha convertido en un área de estudio vibrante donde se están desarrollando nuevas soluciones que se adhieren a los principios de sustentabilidad, aumentan las colaboraciones interdisciplinarias y se expande la interacción global. Tanto la producción académica como las prácticas arquitectónicas aplicadas se beneficiarán significativamente del crecimiento futuro de este campo y su integración con otras disciplinas.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, A. T & G. M.-A.; Curación De datos, A. T & G. M.-A.; Análisis formal, A. T & G. M.-A.; Adquisición de financiación; Investigación, A. T & G. M.-A.; Metodología, A. T & G. M.-A.; Administración de proyecto, A. T & G. M.-A.; Recursos, A. T & G. M.-A.; Software, A. T & G. M.-A.; Supervisión, A. T & G. M.-A.; Validación, A. T & G. M.-A.; Visualización, A. T & G. M.-A.; Escritura - revisión y edición, A. T & G. M.-A.

AGRADECIMIENTOS

Los autores declaran que este estudio se realizó sin ningún apoyo financiero de organismos públicos, comerciales o sin fines de lucro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi, F., Wilkinson, S., Rezazadeh, H., Keawsawasvong, S., Najafi, Q., & Masoumi, A. (2023). Energy efficient glazing: A comparison of microalgae photobioreactor and Iranian Orosi window designs. *Building and Environment*, 233, 109942. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109942>
- Arbye, S., Arianti, R. F., Pradana, Y. S., Suyono, E. A., Koerniawan, M. D., Suwanti, L. T., Siregar, U. J., & Budiman, A. (2020). The design of microalgae (*Chlorella* sp.) photobioreactor as a façade bus shelter building in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2296(1), 020007. <https://doi.org/10.1063/5.0030408>
- Arora, R., Sudhakar, K., & Rana, R. S. (2024). Photobioreactors for building integration: A overview of designs and architectural potential. *Heliyon*, 10(15), e35168. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35168>
- Bloria, N., & Thakkar, Y. (2020). Integrating algae building technology in the built environment: A cost and benefit perspective. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.004>
- Bitog, J. P., Lee, I. B., Lee, C. G., Kim, K. S., Hwang, H. S., Hong, S. W., Seo, I.-H., Kwon, K.-S. & Mostafa, E. (2011). Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: a review. *Computers and electronics in agriculture*, 76(2), 131-147. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.015>
- Carvalho, J. C. M., Matsudo, M. C., Bezerra, R. P., Ferreira-Camargo, L. S., & Sato, S. (2014). Microalgae Bioreactors. In R. Bajpai, A. Prokop & M. Zappi (Eds.). *Algal Biorefineries: Volume 1: Cultivation of Cells and Products* (pp. 83–126). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7494-0>
- Elmalky, A. M., & Araj, M. T. (2024a). Kinetics model with experimental validation for optimal microalgae generation in double-skin façades. *Energy*, 311, 133335. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133335>
- Elmalky, A. M., & Araj, M. T. (2024b). Optimization models for photosynthetic bioenergy generation in building façades. *Renewable Energy*, 228, 120607. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120607>
- Elrayies, G. M. (2018). Microalgae: Prospects for greener future buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 1175-1191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032>
- Gao, C., Xin, H., Yang, S., Li, Z., Liu, S., Xu, B., Zhang, T., Dutta, S., & Tang, Y. (2022). Trends and performances of the algal biofuel: a bibliometric approach. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30(2), 284-300. <https://doi.org/10.3846/jeelem.2022.16746>
- Girard, F., Toublanc, C., Andres, Y., Dechandol, E., & Pruvost, J. (2023). System modeling of the thermal behavior of a building equipped with facade-integrated photobioreactors: Validation and comparative analysis. *Energy and Buildings*, 292, 113147. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113147>
- Gol, N., Taghavijeloudar, M., Jalilian, N., & Rezanian, S. (2025). Microalgae cultivation in semi-transparent photovoltaic bioreactor for sustainable power generation, wastewater treatment and biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 325, 119417. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119417>
- Hasnan, M. T. I. M. T., & Zaharin, P. M. B. (2020). Exploration of microalgae photobioreactor (PBR) in tropical climate building envelope. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 5(14), 263-278. <https://doi.org/10.21834/ebpj.v5i14.2166>
- Huang, Q., Jiang, F., Wang, L., & Yang, C. (2017). Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering*, 3(3), 318-329. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020>
- Kinawy, R. N., Fathy, W., Hammouda, O., Abdelhameed, M. S., Sayed, A. F., & Shaban, A. M. (2024). Revealing the utilization of microalgae in cosmetics: insights from a comprehensive scientometric analysis over the last two decades. *International Aquatic Research*, 16(4), 375-397. <http://doi.org/10.22034/iar.2024.2008952.1753>
- Li, Z., & Zhu, L. (2021). The scientometric analysis of the research on microalgae-based wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 25339-25348. <http://doi.org/10.1007/s11356-021-12348-4>
- Melo, J. M., Ribeiro, M. R., Telles, T. S., Amaral, H. F., & Andrade, D. S. (2022). Microalgae cultivation in wastewater from agricultural industries to benefit next generation of bioremediation: a bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(15), 22708-22720. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17427-0>
- Metwally, W. M., & Ibrahim, V. A. R. (2024). The Integration of Bio-Active Elements into Building Façades as a Sustainable Concept. *Buildings*, 14(10), 3086. <https://doi.org/10.3390/buildings14103086>
- Negev, E., Yezioro, A., Polikovskiy, M., Kribus, A., Cory, J., Shashua-Bar, L., & Golberg, A. (2019). Algae Window for reducing energy consumption of building structures in the Mediterranean city of Tel-Aviv, Israel. *Energy and Buildings*, 204, 109460. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109460>
- Nwoba, E. G., Parlevliet, D. A., Laird, D. W., Alameh, K., & Moheimani, N. R. (2020). Pilot-scale self-cooling microalgal closed photobioreactor for biomass production and electricity generation. *Algal Research*, 45, 101731. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101731>
- Öncel, S. Ş., Köse, A., & Öncel, D. Ş. (2016). 11 - Façade integrated photobioreactors for building energy efficiency. *Start-Up Creation, The Smart Eco-Efficient Built Environment*, 237-299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100546-0.00011-X>
- PRISMA. (2020). PRISMA 2020. <https://www.prisma-statement.org/>

- Pruvost, J., Le Gouic, B., Lepine, O., Legrand, J., & Le Borgne, F. (2016). Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: Biomass production modelling and energetic analysis. *Chemical Engineering Journal*, 284, 850-861. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.118>
- Purba, L. D. A., Susanti, H., Admirasari, R., Praharyawan, S., & Iwamoto, K. (2024). Bibliometric insights into microalgae cultivation in wastewater: Trends and future prospects for biolipid production and environmental sustainability. *Journal of Environmental Management*, 352, 120104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120104>
- Rezazadeh, H., Kordjamshidi, M., Ahmadi, F., & Eskandarinejad, A. (2021). Use of double-glazed window as a photobioreactor for CO₂ removal from air. *Environmental Engineering Research*, 26(2), 200122. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.122>
- Rumin, J., Nicolau, E., Gonçalves de Oliveira Junior, R., Fuentes-Grünwald, C., Flynn, K. J., & Picot, L. (2020). A bibliometric analysis of microalgae research in the world, Europe, and the European Atlantic area. *Marine Drugs*, 18(2), 79. <https://doi.org/10.3390/md18020079>
- Sarmadi, H., & Mahdavinejad, M. (2023). A designerly approach to Algae-based large open office curtain wall Façades to integrated visual comfort and daylight efficiency. *Solar Energy*, 251, 350-365. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.021>
- Scherer, K., Stiefelmaier, J., Strieth, D., Wahl, M., & Ulber, R. (2020). Development of a lightweight multi-skin sheet photobioreactor for future cultivation of phototrophic biofilms on facades. *Journal of Biotechnology*, 320, 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.06.004>
- Sedighi, M., Pourmoghaddam Qhazvini, P., & Amidpour, M. (2023). Algae-powered buildings: A review of an innovative, sustainable approach in the built environment. *Sustainability*, 15(4), 3729. <https://doi.org/10.3390/su15043729>
- Silva, S. C., Ferreira, I. C., Dias, M. M., & Barreiro, M. F. (2020). Microalgae-derived pigments: A 10-year bibliometric review and industry and market trend analysis. *Molecules*, 25(15), 3406. <http://doi.org/10.3390/molecules25153406>
- Singh, S. P., & Singh, P. (2015). Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 50, 431-444. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.024>
- Talaei, M., & Prieto, A. (2024a). A review on performance of sustainable microalgae photobioreactor façades technology: exploring challenges and advantages. *Architectural Science Review*, 67(5), 387-414. <https://doi.org/10.1080/00038628.2024.2305889>
- Talaei, M., Mahdavinejad, M., Azari, R., Prieto, A., & Sangin, H. (2021). Multi-objective optimization of building-integrated microalgae photobioreactors for energy and daylighting performance. *Journal of Building Engineering*, 42, 102832. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102832>
- Talaei, M., & Sangin, H. (2024b). Thermal comfort, daylight, and energy performance of envelope-integrated algae-based bioshading and static shading systems through multi-objective optimization. *Journal of Building Engineering*, 90, 109435. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109435>
- Talaei, M., Mahdavinejad, M., Azari, R., Haghighi, H. M., & Atashdast, A. (2022). Thermal and energy performance of a user-responsive microalgae bioreactive façade for climate adaptability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 101894. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101894>
- Todisco, E., Louveau, J., Thobie, C., Dechandol, E., Hervé, L., Durécu, S., Titica, M., & Pruvost, J. (2022). A dynamic model for temperature prediction in a façade-integrated photobioreactor. *Chemical Engineering Research and Design*, 181, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.03.017>
- Ugwu, C. U., Aoyagi, H., & Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource technology*, 99(10), 4021-4028. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.046>
- Umdu, E. S. & Univ, Y. (2020). 12- Building Integrated Photobioreactor. *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819481-2.00012-x>
- Vajdi, S., & Aslani, A. (2023). Design and techno-economic analysis of direct CO₂ capturing with integrated photobioreactors as a building façade. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103068. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103068>
- Villalba, M. R., Cervera, R., & Sánchez, J. (2023). Green solutions for urban sustainability: photobioreactors for algae cultivation on façades and artificial trees. *Buildings*, 13(6), 1541. <https://doi.org/10.3390/buildings13061541>
- Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology advances*, 30(4), 904-912. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.019>
- Woo, D.-O., Lee, D., & Lee, S. (2022). Parametric design study of a proposed photobioreactor-integrated vertical louver system for energy-efficient buildings. *Journal of Green Building*, 17(3), 33-61. <https://doi.org/10.3992/jgb.17.3.33>
- Wu, C., Herbst, G., Lujan, A., & Kim, K. H. (2022, July). A Stochastic Approach To Simulate And Optimize The Coating Uniformity Of Rotational Molding For Microalgae Facades. In 2022 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM) (pp. 569-580). IEEE. <http://doi.org/10.23919/ANNSIM55834.2022.9859444>
- Yaman, Y., Tokuç, A., Deniz, İ., Ezan, M. A., Köktürk, G., Dalay, M. C., & Demirel, Z. (2024). Photobioreactor facade panels: enhancing comfort, reducing energy use, and capturing carbon in temperate continental climates. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 5, 357-370. <https://doi.org/10.1007/s43393-024-00300-9>

Yılmaz, H. K. (2006). Mikroalg Üretimi İçin Fotobiyoreaktör Tasarımları. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 23(2), 327-332. <http://www.egejfas.org/tr/download/article-file/57730>

Yoo, J. J., Choi, S. P., Kim, J. Y., Chang, W. S., & Sim, S. J. (2013). Development of thin-film photo-bioreactor and its application to outdoor culture of microalgae. *Bioprocess and biosystems engineering*, 36(6), 729-736. <http://doi.org/10.1007/s00449-013-0898-2>