

PROTECCIÓN SOLAR EN EDIFICACIONES MEDITERRÁNEAS, MADRID, ESPAÑA: DISEÑO CON ALGORITMOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Recibido 25/12/2024
 Aceptado 23/05/2025

SOLAR PROTECTION IN MEDITERRANEAN BUILDINGS, MADRID, SPAIN: DESIGNING WITH ALGORITHMS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

PROTEÇÃO SOLAR EM EDIFICAÇÕES MEDITERRÂNEAS, MADRI, ESPANHA: PROJETO COM ALGORITMOS E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Marcelo Alejandro Fraile-Narváez
 Doctor en Arquitectura
 Coordinador del Grado en Fundamentos de la Arquitectura
 Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España
<https://orcid.org/0000-0002-9321-4512>
marcelo.fraile@urjc.es



RESUMEN

Este artículo analiza la integración de tecnologías digitales y algoritmos paramétricos en el diseño de sistemas de protección solar para edificaciones en contextos mediterráneos, como Madrid, España. Se utilizó un modelo base representativo de un edificio de escala media, se evaluaron cuatro configuraciones de protección solar mediante simulaciones avanzadas que incorporaron datos climáticos locales y trayectorias solares anuales. Las estrategias exploradas incluyen parasoles horizontales, inclinados, un diseño biomimético Voronoi y un modelo compuesto que combina estos enfoques. Los hallazgos destacan cómo la inteligencia artificial y los algoritmos computacionales permiten optimizar el rendimiento energético y el confort térmico, al tiempo que redefinen las posibilidades estéticas y sostenibles en la arquitectura contemporánea. Este enfoque propone un marco innovador para enfrentar los desafíos climáticos, que evidencia el potencial de las herramientas digitales en la transformación del diseño arquitectónico hacia un paradigma más resiliente y adaptativo.

Palabras clave

diseño paramétrico, inteligencia artificial, sostenibilidad arquitectónica, protección solar

ABSTRACT

This article examines the integration of digital technologies and parametric algorithms when designing solar protection systems for buildings in Mediterranean contexts, such as Madrid. Four solar protection configurations were evaluated through advanced simulations using a base model representative of a medium-scale building, incorporating local climatic data and annual solar trajectories. The strategies examined include horizontal louvers, inclined shading devices, a biomimetic Voronoi design, and a composite model that combines these approaches. The findings highlight how artificial intelligence and computational algorithms optimize energy performance and thermal comfort while redefining aesthetic and sustainable possibilities in contemporary architecture. This approach proposes an innovative framework to address climate challenges, showcasing the potential of digital tools to transform architectural design into a more resilient and adaptive paradigm.

Keywords

parametric design, artificial intelligence, architectural sustainability, solar protection

RESUMO

Este artigo analisa a integração de tecnologias digitais e algoritmos paramétricos no projeto de sistemas de proteção solar para edificações em contextos mediterrâneos, como o de Madri, na Espanha. Utilizou-se um modelo básico representativo de um edifício de escala média e avaliaram-se quatro configurações de proteção solar por meio de simulações avançadas que incorporaram dados climáticos locais e trajetórias solares anuais. As estratégias exploradas incluem toldos horizontais, inclinados, um design biomimético Voronoi e um modelo composto que combina estas abordagens. As conclusões destacam como a inteligência artificial e os algoritmos computacionais permitem otimizar o desempenho energético e o conforto térmico, ao mesmo tempo que redefinem as possibilidades estéticas e sustentáveis na arquitetura contemporânea. Esta abordagem propõe um quadro inovador para enfrentar os desafios climáticos, evidenciando o potencial das ferramentas digitais na transformação do projeto arquitetônico rumo a um paradigma mais resiliente e adaptativo.

Palavras-chave:

design paramétrico, inteligência artificial, sustentabilidade arquitetônica, proteção solar

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de urbanización acelerada y desafíos ambientales, la arquitectura contemporánea emerge como una disciplina clave para enfrentar los efectos del cambio climático. En regiones mediterráneas como Madrid, la radiación solar representa un desafío crítico, especialmente durante los meses cálidos, al aumentar significativamente las temperaturas interiores de las edificaciones. Este fenómeno intensifica el uso de sistemas de climatización, lo que incrementa el consumo energético y las emisiones de carbono, lo que subraya la necesidad de soluciones arquitectónicas más sostenibles (García Molina et. al., 2024).

En este marco, las estrategias convencionales de protección solar, aunque efectivas en contextos pasados, resultan insuficientes frente a las demandas climáticas y energéticas actuales. Por ello, es fundamental explorar enfoques innovadores que integren tecnologías avanzadas, como algoritmos paramétricos, inteligencia artificial y geometrías adaptativas, para diseñar soluciones arquitectónicas más precisas y efectivas. Estas herramientas permiten desarrollar configuraciones optimizadas que responden dinámicamente a las condiciones climáticas variables, que reduce la ganancia térmica y mejorar el confort interior (De la Hoz-Torres et. al., 2024; Kolokotsa, et. al, 2022; Rodríguez-de-Ita y Sosa-Compeán, 2024).

Los avances en tecnologías digitales, algoritmos computacionales e inteligencia artificial han transformado profundamente la arquitectura contemporánea, que permiten optimizaciones energéticas y estéticas sin precedentes. La integración de estas herramientas no solo mejora la eficiencia energética, sino que también impulsa un diseño innovador que supera los límites de los enfoques tradicionales. Estudios como el de Tipán-Renjifo y Tipán-Suárez (2022) destacan cómo los patrones Voronoi, generados mediante algoritmos computacionales, permiten explorar morfologías complejas que responden directamente a las condiciones climáticas y funcionales, que optimizan el rendimiento energético y enriquecer el entorno construido (Chen, 2021). Además, este enfoque facilita la predicción y el ajuste dinámico de la incidencia solar, al lograr una reducción significativa de la radiación total en comparación con un modelo sin protección (Jalali et al., 2022). Por su parte, Wieser et al. (2024) subrayan que estas tecnologías posibilitan personalizaciones adaptativas que responden a variaciones climáticas estacionales y a necesidades de confort térmico. En particular, este enfoque optimiza la eficiencia energética y mejora el confort interior en climas como el de Madrid.

Los sistemas paramétricos no solo habilitan soluciones de gran complejidad formal, sino que también facilitan su producción mediante tecnologías como el corte láser o la impresión 3D. Betman et al. (2023) señalan que

estos métodos reducen desperdicios, costos y plazos de ejecución, al tiempo que aumentan la precisión en diseños basados en patrones Voronoi. Sin embargo, estas innovaciones enfrentan obstáculos: la elevada inversión inicial, la dependencia de software especializado y la necesidad de habilidades técnicas avanzadas pueden restringir su adopción en entornos con recursos limitados (Gamal et al., 2024).

Desde el punto de vista de sostenibilidad, estos sistemas no solo reducen significativamente el consumo energético asociado a la climatización, sino que también contribuyen a mitigar el impacto ambiental de los edificios, alineándose con objetivos globales de reducción de emisiones de carbono (Ramos-Sanz, 2019; Aghimien et al., 2022). Estéticamente, los algoritmos avanzados ofrecen una personalización que convierte cada proyecto en una obra única, mientras promueven una integración armónica con el entorno. Tipán-Renjifo y Tipán-Suárez (2022) destacan cómo estas soluciones reconfiguran el diálogo entre el edificio y su contexto, elevando la experiencia arquitectónica.

No obstante, Wieser et al. (2024) advierten que los sistemas dinámicos, como los parasoles individuales inclinados, requieren planificación de mantenimiento para garantizar su longevidad. Esto incluye redundancias y protocolos claros para prevenir fallos técnicos. A pesar de estas limitaciones, la integración de tecnologías digitales, inteligencia artificial y algoritmos avanzados en la arquitectura redefine el diseño contemporáneo, respondiendo a desafíos complejos que ofrecen soluciones adaptativas, sostenibles y creativas para el futuro (Atef et al., 2024). Como señala Betman et al. (2023), estas herramientas no solo optimizan el rendimiento energético, sino que también inspiran una nueva generación de propuestas arquitectónicas innovadoras.

Este artículo se centra en la evaluación de estrategias avanzadas de protección solar aplicadas a un modelo representativo de edificación en clima mediterráneo. A través de simulaciones detalladas, se comparan cuatro configuraciones: un modelo base sin protección, un sistema con parasoles horizontales, otro con parasoles individuales ajustados angularmente y una solución basada en patrones geométricos Voronoi. Estas configuraciones son analizadas en términos de su capacidad para mitigar la radiación solar y optimizar el rendimiento energético de las edificaciones (Amraoui et al., 2021). El trabajo busca demostrar cómo el uso de tecnologías digitales y enfoques inspirados en sistemas naturales puede superar las limitaciones de los modelos tradicionales, al promover una arquitectura más sostenible y adaptativa (Bertagna et. al., 2023). Este enfoque no solo aborda los desafíos asociados al cambio climático, sino que también establece un nuevo paradigma en el diseño arquitectónico, al integrar funcionalidad, innovación tecnológica y sostenibilidad en climas mediterráneos e iberoamericanos.



Figura 1. Vista del edificio residencial situado en Plaza España, 6, Getafe (Madrid), acompañado por su ubicación en el entorno urbano y esquema volumétrico del emplazamiento. Fuente: Google Maps (2025).

METODOLOGÍA

Este estudio emplea un enfoque paramétrico y computacional para evaluar estrategias de protección solar en un contexto climático mediterráneo, al tomar como caso de referencia un edificio real en Getafe (Madrid, España). La metodología se estructura en cuatro etapas: caracterización del clima y del edificio, modelado y simulación de radiación solar, diseño de estrategias de protección, y análisis comparativo del rendimiento energético.

El primer paso consistió en caracterizar el clima mediterráneo de Getafe mediante datos de irradiancia global, temperatura y clasificación climática de Köppen (Csa: mediterráneo con verano caluroso). Con más de 2.800 horas de sol anuales y temperaturas estivales promedio superiores a 30 °C, la necesidad de protección solar es prioritaria. El edificio seleccionado es una edificación residencial multifamiliar de escala media, situada en Plaza España 6, Getafe (coordenadas 40.309300, -3.724501). Se trata de un prisma rectangular de 30 m x 50 m y 50 m de altura, con una superficie envolvente de 9.500 m² y un volumen total de 75.000 m³. Su forma compacta permite minimizar la superficie expuesta al intercambio térmico, facilitándose el análisis (Figura 1).

En una segunda etapa, se modeló digitalmente el edificio base sin protección solar, estableciéndose un escenario de referencia. A partir de simulaciones solares realizadas con Ladybug en Grasshopper, se obtuvo la distribución de radiación anual sobre cada una de las cinco caras expuestas: norte, sur, este, oeste y cubierta. Los valores se calcularon con precisión según las trayectorias solares específicas de Madrid, se consideró la radiación directa como difusa. Este análisis permitió identificar que las caras sur y superior concentran más del 60 % de la radiación recibida anualmente, lo que justificó su priorización en

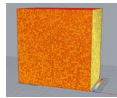
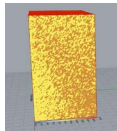
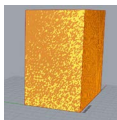
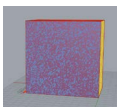
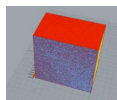
el diseño de estrategias. La información se sintetiza en la Tabla 1, que recoge la radiación media por superficie, en la Figura 2, Figura 3 y Figura 4, donde se visualizan las diferencias de exposición.

A continuación, se diseñaron tres estrategias de protección solar: (1) parasoles horizontales con láminas de 1,50 m de profundidad y separación vertical constante; (2) parasoles inclinados individuales, dispuestos según ángulos solares predominantes y adaptados mediante módulos; y (3) una envolvente Voronoi biomimética, generada con algoritmos paramétricos que varían el tamaño de las perforaciones en función de la orientación y exposición solar. Cada estrategia se aplicó al mismo modelo base, y se generaron tres variantes que fueron sometidas a simulación bajo idénticas condiciones climáticas.

Las simulaciones evaluaron la radiación incidente por m² en cada cara del edificio. Los datos se procesaron con GPT4All, un modelo de IA local sin conexión externa, para garantizar reproducibilidad y trazabilidad. Para optimizar los parámetros geométricos de cada estrategia, se utilizaron algoritmos genéticos mediante Galapagos, y scripts personalizados en GhPython para ajustar las configuraciones a las condiciones específicas de Getafe.

Finalmente, se diseñó una cuarta variante: un modelo compuesto que combina las mejores soluciones detectadas en cada orientación. Este incluye parasoles inclinados en las fachadas este, oeste y sur, y una celosía Voronoi en la cara norte y en la cubierta, lográndose así una cobertura optimizada. El rendimiento de cada estrategia se comparó en términos de radiación total acumulada, reducción porcentual respecto al modelo base y distribución térmica por orientación. Toda la información se sistematizó en tablas comparativas e ilustrada mediante gráficos y simulaciones visuales que permiten comprender el desempeño de cada configuración desde un enfoque técnico y proyectual.

Tabla 1. Análisis del prisma base por caras. Fuente: Elaboración de los Autores..

Cara	Superficie (m ²)	Radiación (kWh/m ²)	Reducción (%)	Esquema
Sur	2500	2.981	00.0	
Este	1500	1.360	00.0	
Oeste	1500	1.398	00.0	
Norte	2500	0.976	00.0	
Superior	1500	2.299	00.0	

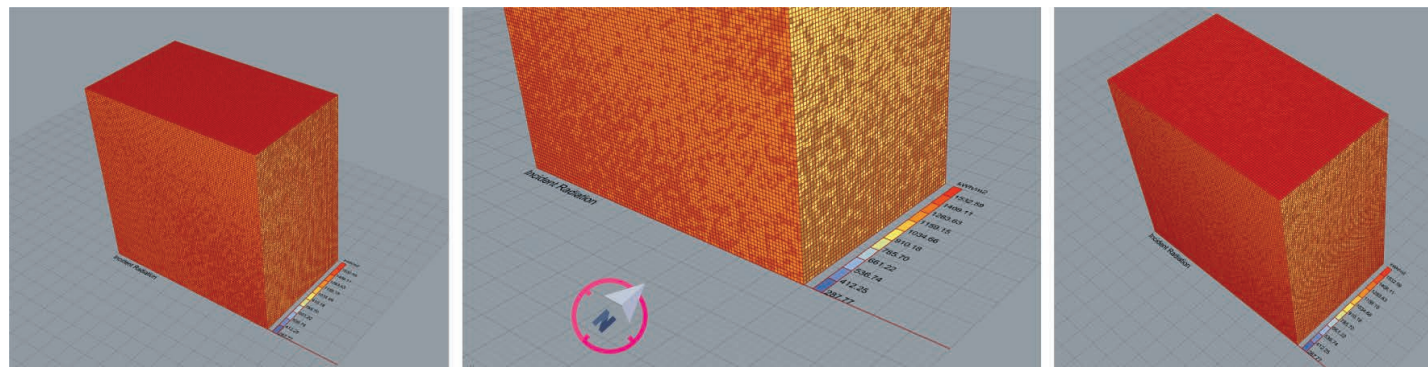


Figura 2. Simulación digital del prisma base con visualización de los valores de radiación solar en las superficies. Fuente: Elaboración de los Autores.

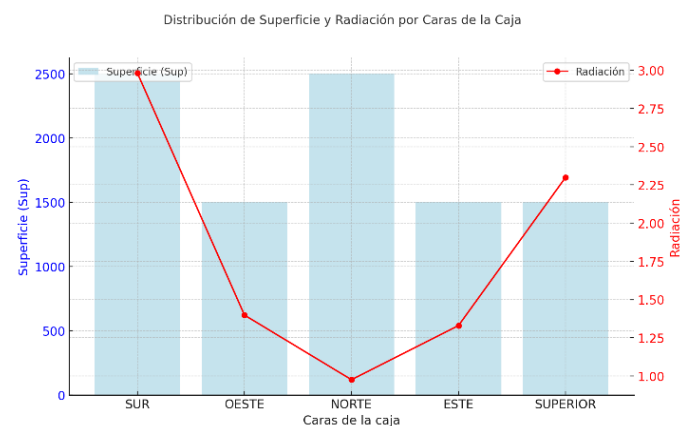


Figura 3. Distribución de superficie y radiación en las caras del prisma base, mostrándose la relación entre área y radiación recibida. Fuente: Elaboración de los Autores.

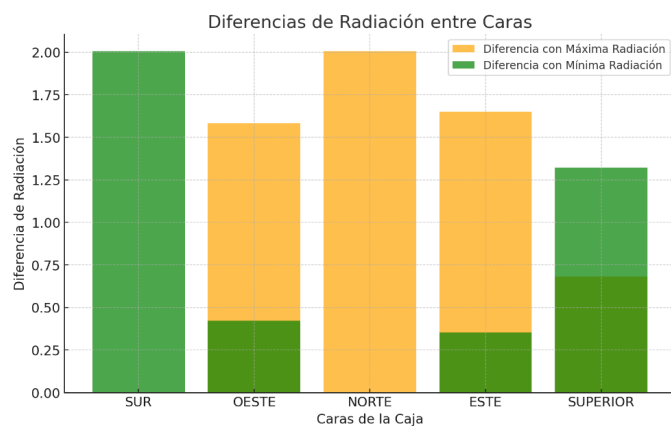


Figura 4. Variaciones de radiación por cara del prisma base, comparación de valores máximos y mínimos observados para destacar las diferencias de exposición en el modelo analizado. Fuente: Elaboración de los Autores.

DISTRIBUCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR POR CARA

Previo a evaluar las estrategias de protección solar, se analizó la distribución de la radiación incidente sobre cada una de las superficies del modelo base, sin elementos de sombreado. Esta etapa permitió identificar qué fachadas concentraban mayor exposición, estableciéndose los criterios de intervención geométrica. El modelo acumula un total anual de 9.415 kWh/m², con las caras sur y superior que recibieron más del 60% de esa energía (Figura 2, Figura 3 y Figura 4). La tabla 1 resume los valores de radiación por cara y su superficie, lo que evidencia las diferencias según orientación:

Esta información sirvió como base comparativa para evaluar el desempeño de cada estrategia en la reducción de radiación solar incidente.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN SOLAR

De acuerdo con Urias-Barrera (2024), se analizaron tres estrategias de protección solar aplicadas al modelo base, diseñadas para minimizar la radiación solar incidente y optimizar la eficiencia energética junto con el confort térmico. Cada una de estas estrategias se fundamentó en principios de optimización geométrica y comportamiento solar, evaluándose mediante herramientas computacionales avanzadas.

1. Caja con parasoles horizontales. Se utilizaron láminas horizontales de sección rectangular, de 1.50 metros de profundidad y 0.25 metros de espesor, distribuidas uniformemente en las fachadas con una separación vertical constante de 0.75 metros. Estas dimensiones fueron determinadas para asegurar sombra efectiva en las horas de mayor incidencia solar, especialmente en verano. La elección del modelo horizontal responde a su capacidad demostrada para bloquear eficazmente la radiación directa proveniente de ángulos solares elevados, típica en latitudes mediterráneas, que conservan simultáneamente una adecuada entrada de luz natural en los meses menos cálidos.
2. Caja con parasoles individuales inclinados. Esta estrategia integra elementos individuales en forma de lamas cuadradas inclinadas en un ángulo variable entre 0° y -90°, diseñados según los ángulos solares predominantes a lo largo del año en Madrid. Cada parasol tiene dimensiones específicas de 1.50 metros de longitud, por 1.50 metros de ancho horizontal y 0.05 metros de espesor. Si bien, para efectos prácticos del cálculo inicial, se estableció una superficie modular amplia de 5 metros por 5 metros, es importante aclarar que, en la realidad constructiva, cada módulo visible está compuesto internamente por agrupaciones de parasoles individuales de dimensiones menores. Esto permite manejar eficientemente las dimensiones visualmente grandes que se observan en la imagen proporcionada, haciendo que la propuesta sea técnicamente viable,

lógica y factible desde una perspectiva constructiva, funcional y arquitectónica. La configuración inclinada responde así a la necesidad de proporcionar una protección más dinámica y efectiva frente a variaciones solares diarias y estacionales, mejorando notablemente la capacidad de adaptación térmica sin afectar negativamente la iluminación natural interna o la coherencia estética del edificio.

3. Caja con patrón Voronoi. Este modelo incorpora una estructura biomimética con celosías generadas mediante algoritmos paramétricos Voronoi. Las perforaciones poseen dimensiones variables entre 0.50 y 4.50 metros de diámetro, dispuestas según un gradiente paramétrico ajustado para maximizar la protección frente a la radiación solar directa y difusa, manteniéndose un equilibrio entre la transparencia visual y la sombra generada. La elección del diseño Voronoi se justifica por su capacidad comprobada para dispersar eficazmente la radiación solar incidente, reducir la acumulación térmica, y ofrecer una solución arquitectónica visualmente distintiva y funcional, alineada con principios sostenibles y adaptativos (Asghar et al., 2020; Trujillo Díaz, 2016).

SIMULACIONES Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Para evaluar cada estrategia, se utilizaron herramientas avanzadas de simulación computacional que combinaron modelos geométricos y climáticos con algoritmos de optimización e inteligencia artificial (Al-Shukri y Al-Majidi, 2020). En este proceso, se empleó Rhinoceros y su plugin nativo Grasshopper, que integran diferentes algoritmos de optimización como Ladybug, Galapagos y algoritmos desarrollados en GhPython Script. Las simulaciones se realizaron bajo las mismas condiciones climáticas, al tomar como referencia datos específicos del contexto de Madrid.

1. Modelado climático y trayectorias solares: Se incluyeron datos detallados sobre la radiación solar global y difusa, con valores promedio anuales y estacionales. Además, se modelaron las trayectorias solares diarias a lo largo de todo el año, se incorporó la inclinación característica de las latitudes mediterráneas. Para ello, se utilizó Ladybug, herramienta integrada en Grasshopper, que permitió un análisis detallado de los parámetros solares y su impacto en la edificación.
2. Evaluación energética: Se calcularon los niveles de radiación incidente por metro cuadrado en cada superficie del prisma. Estos cálculos se visualizaron, a través de mapas de densidad energética, que permitió una comparación detallada entre las estrategias. Los datos se procesaron con GPT4All, un modelo de inteligencia artificial de código abierto ejecutado localmente en un ordenador personal, sin conexión a internet ni dependencia de servicios externos como

Tabla 2. Análisis del modelo con parasoles horizontales por caras. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cara	Superficie (m ²)	Radiación (kWh/m ²)	Reducción (%)
Sur	2500	1.608	46.0
Este	1500	0.682	48.7
Oeste	1500	0.717	48.7
Norte	2500	0.499	48.8
Superior	1500	2.298	0.0

ChatGPT o plataformas comerciales similares, lo que garantizó un análisis autónomo y reproducible.

- Optimización mediante algoritmos avanzados: Se implementaron algoritmos genéticos con Galapagos para optimizar la configuración de las protecciones solares, al seleccionar iterativamente las disposiciones más eficaces para reducir la radiación solar (Díaz Valdés, 2021). Métodos de aprendizaje automático, apoyados en GPT4All, complementaron el análisis, al predecir patrones de incidencia solar y sombras para simular con mayor precisión el comportamiento térmico de las fachadas. Asimismo, se desarrollaron scripts en GhPython para personalizar y ajustar los parámetros de optimización en función de los datos climáticos específicos de Madrid.

La selección de estas tres configuraciones surge de la necesidad de explorar distintas respuestas geométricas y funcionales al desafío climático planteado por la radiación solar en climas mediterráneos. El modelo horizontal se eligió por su simplicidad constructiva y eficacia frente al sol en posición alta; el inclinado por su flexibilidad adaptativa y mejor desempeño frente a ángulos solares variables; y el Voronoi por su carácter innovador y su capacidad para integrar criterios estéticos y funcionales mediante el uso de algoritmos paramétricos avanzados.

PARÁMETROS DE ANÁLISIS

Se evaluaron los modelos considerándose los siguientes aspectos:

- Radiación solar total y difusa: Se calcularon valores anuales promedio, segmentados estacionalmente.
- Reducción porcentual de radiación: Comparación de efectividad respecto al modelo base.
- Distribución energética: Identificación de áreas críticas con mayor ganancia térmica.
- Impacto en confort térmico y eficiencia energética: Estimación de la reducción en el consumo energético asociado a la climatización.

Este enfoque integral permitió evaluar la efectividad de cada estrategia, que considere tanto su rendimiento energético como sus implicaciones arquitectónicas.

Además, sentó las bases para desarrollar soluciones sostenibles y adaptativas, alineadas con las condiciones climáticas mediterráneas.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN SOLAR

El análisis comparativo de estrategias de protección solar se llevó a cabo sobre el modelo base representativo, con orientación paralela a los puntos cardinales. El edificio presenta una fachada sur completamente expuesta a la radiación directa, mientras que la fachada norte permanece en sombra la mayor parte del año. Las fachadas este y oeste reciben incidencia solar principalmente durante las mañanas y tardes, respectivamente, y la cubierta horizontal está expuesta a lo largo del día. Esta orientación se mantuvo constante en todas las simulaciones para garantizar la coherencia de los resultados.

Se evaluaron tres configuraciones: parasoles horizontales, parasoles inclinados individuales y celosías Voronoi, además de una estrategia híbrida que combinó las soluciones más eficientes de cada modelo. A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada propuesta.

La primera estrategia, basada en parasoles horizontales, logró una reducción del 68% de la radiación acumulada respecto al modelo sin protección, con un total de 3.04 kWh/m². La cara sur experimentó una reducción significativa (46%), aunque la cubierta permaneció sin protección, al mantener sus niveles de exposición. La eficacia fue moderada en las fachadas este y oeste, con valores cercanos al 48%, gracias al sombreado constante de las lamas. Sin embargo, la falta de cobertura superior limitó la eficacia global del sistema, especialmente en entornos como Madrid donde la radiación cenital es elevada durante el verano.

Los parasoles horizontales (Figura 5) son efectivos en las caras verticales (sur, este, oeste y norte), ya que reduce la radiación de forma uniforme (Tabla 2). Sin embargo, la cara superior sigue expuesta a la radiación máxima, lo que limita la eficiencia global del modelo. La uniformidad en las reducciones de las caras este y oeste sugiere un diseño con separación constante, mejorable mediante ajustes en

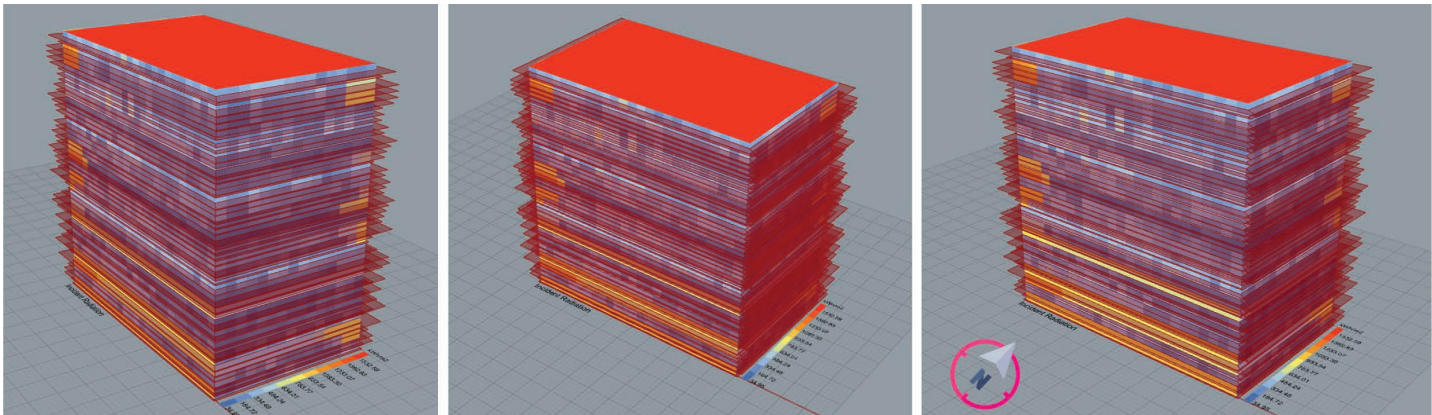


Figura 5. Diferencias de radiación por cara del prisma base con parasoles, destacándose las variaciones de exposición respecto a los valores extremos. Fuente: Elaboración de los Autores.

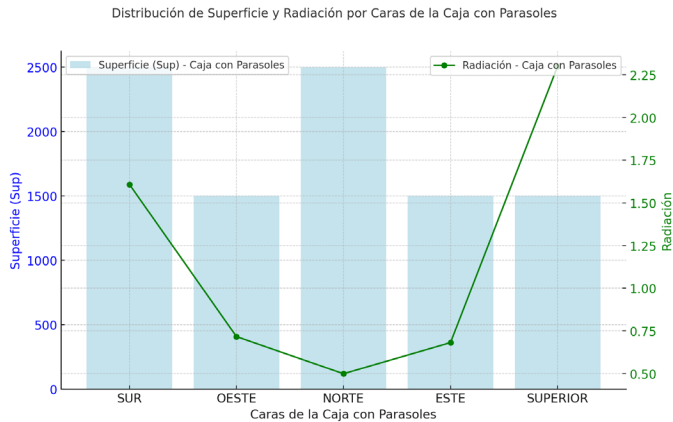


Figura 6. Distribución de superficie y radiación por cara de la caja con parasoles, que resalta la relación entre área expuesta y radiación recibida. Fuente: Elaboración de los Autores.

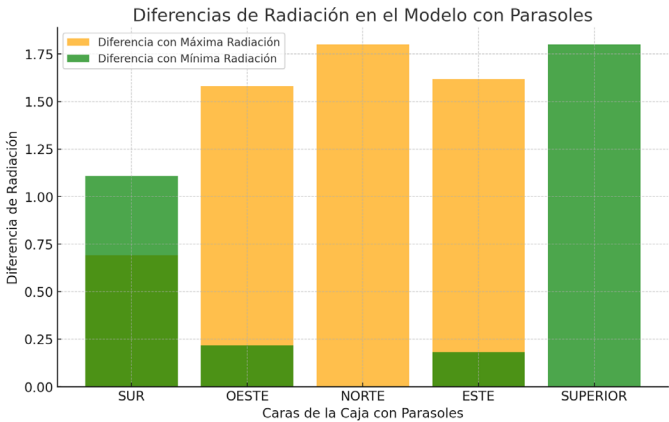


Figura 7. Diferencias de radiación en el modelo con parasoles, al comparar cada cara con los valores máximos y mínimos del conjunto. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 3. Análisis del modelo parasoles inclinados individuales por caras. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cara	Superficie (m²)	Radiación (kWh/m²)	Reducción (%)
Sur	2500	0.471	84.2
Este	1500	0.293	77.9
Oeste	1500	0.301	78.5
Norte	2500	0.328	66.4
Superior	1500	0.830	63.9

densidad o longitud según las variaciones solares. Estos resultados destacan la necesidad de una protección integral que abarque todas las caras expuestas para optimizar el desempeño térmico y energético en climas mediterráneos (Figura 6 y Figura 7).

En la segunda estrategia, parasoles inclinados individuales, se observaron mejoras sustanciales. La radiación se redujo un 71.8% en comparación con el modelo base, acumulándose

solo 2.65 kWh/m². Esta estrategia fue especialmente eficaz en la fachada sur, donde logró una reducción del 84.2%, y en la cubierta, con una disminución del 63.9%. El diseño inclinado permitió una mejor adaptación a la trayectoria solar diaria y estacional, al generar zonas de sombra dinámicas sin comprometer la iluminación natural interior. Las reducciones fueron uniformes en todas las caras, confirmandose el rendimiento superior de esta estrategia frente a soluciones tradicionales (Tabla 3).

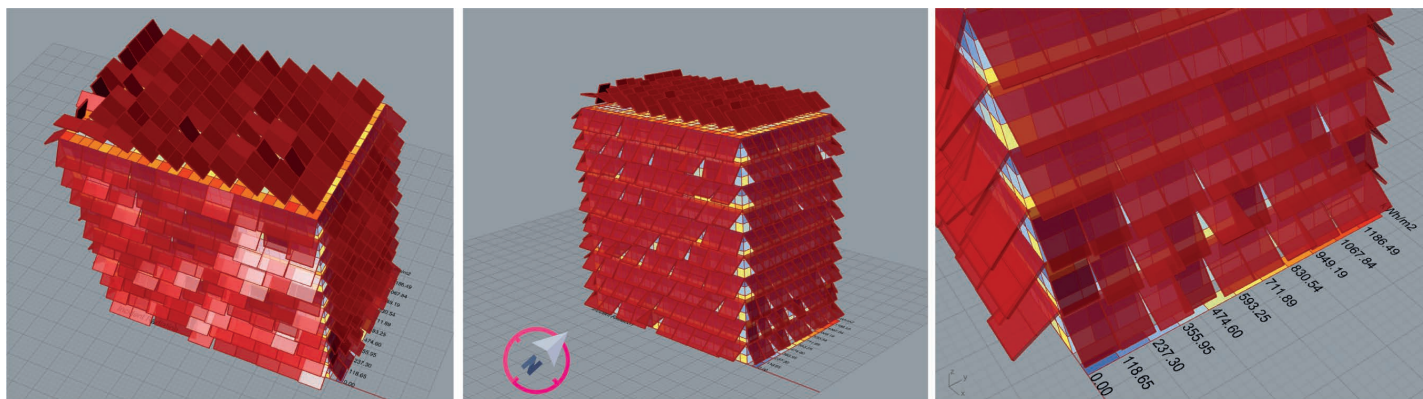


Figura 8. Diferencias de radiación por cara del prisma base con parasoles inclinados, comparándose cada una con los valores extremos y destaca las variaciones de exposición. Fuente: Elaboración de los Autores.

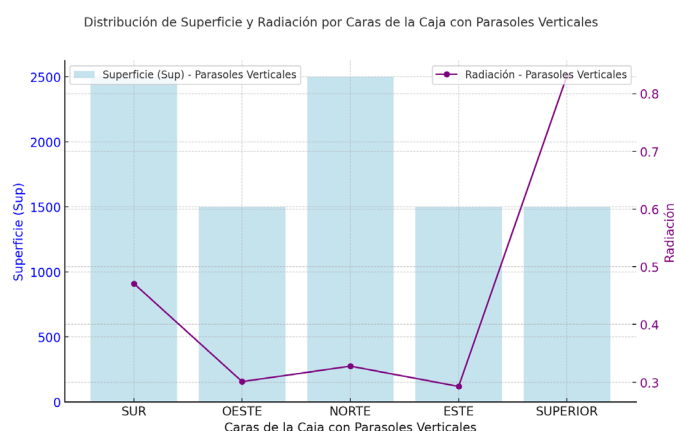


Figura 9. Distribución de superficie y radiación por cara del prisma con parasoles inclinados, destaca la interacción entre diseño y exposición solar. Fuente: Elaboración de los Autores.

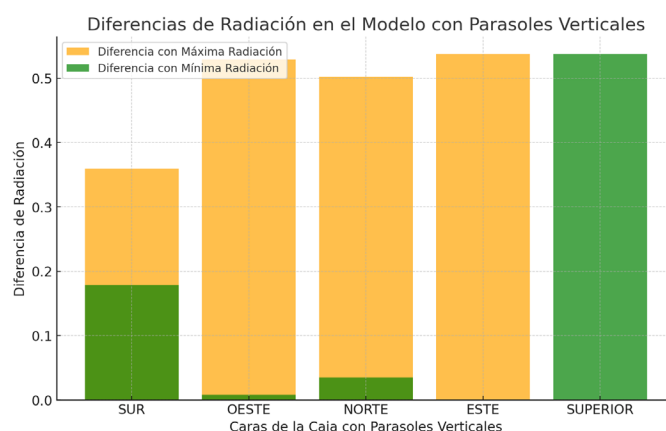


Figura 10. Diferencias de radiación en el modelo con parasoles inclinados, al comparar cada cara con los valores máximos y mínimos. Fuente: Elaboración de los Autores

Tabla 4. Análisis del modelo con parasoles voronoi por caras. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cara	Superficie (m²)	Radiación (kWh/m²)	Reducción (%)
Sur	2500	0.706	76.3
Este	1500	0.324	75.6
Oeste	1500	0.329	76.4
Norte	2500	0.249	74.4
Superior	1500	0.249	89.1

En la cara sur, la reducción es especialmente notable, que refleja su eficacia para la orientación predominante en Madrid durante el verano (Figura 8). Además, la disminución en la radiación de la cara superior es significativa, un resultado que no se observa con los parasoles horizontales. Esto se debe al sombreado generado por los elementos verticales que proyectan sombra desde las caras laterales, lo que demuestra un diseño más estratégico y adaptado al contexto climático local (Figura 9 y Figura 10).

La tercera configuración evaluada fue una envolvente basada en patrones geométricos Voronoi, diseñada mediante algoritmos paramétricos con perforaciones de tamaño variable. Esta solución registró la mayor eficiencia individual, con una reducción total del 76.7% de la radiación (2.20 kWh/m²). La cara superior fue la más beneficiada, con una reducción del 89.1%, mientras que las caras verticales alcanzaron valores entre 74% y 76%. La geometría irregular y tridimensional permitió dispersar eficazmente la radiación, al combinar el control solar,

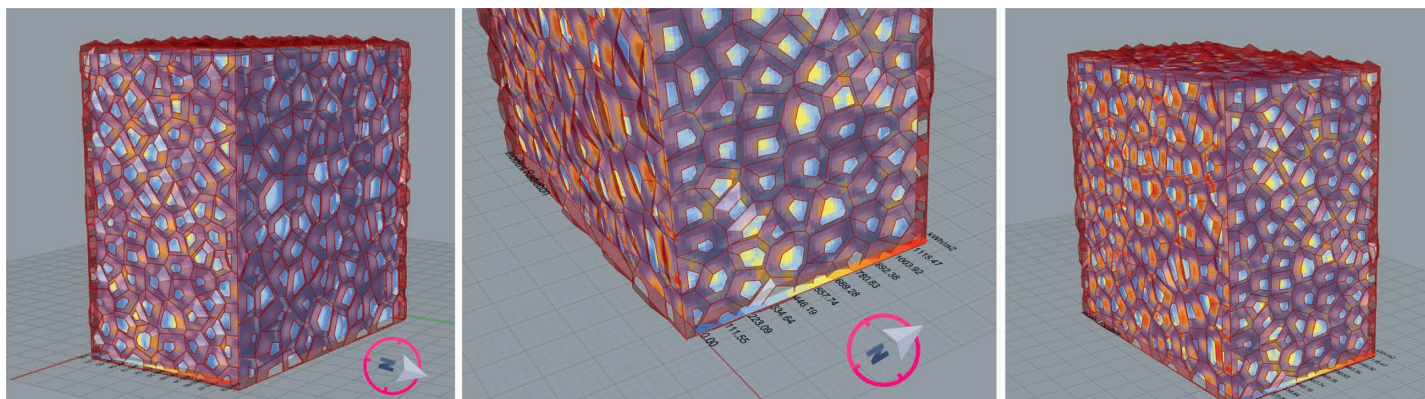


Figura 11. Diferencias de radiación por cara del prisma base con parasoles Voronoi, al comparar cada una con los valores máximos y mínimos observados. Fuente: Elaboración de los Autores.

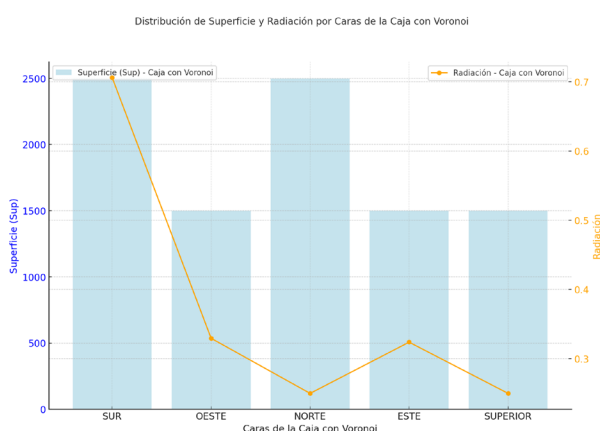


Figura 12. Distribución de superficie y radiación por cara del prisma con protección Voronoi, que destaca la relación entre exposición y diseño geométrico. Fuente: Elaboración de los Autores.

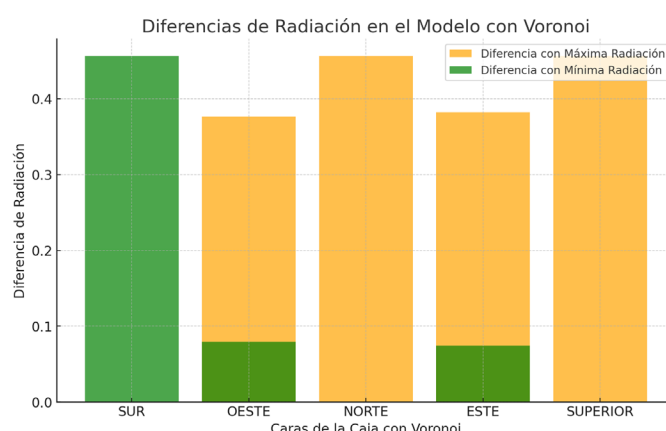


Figura 13. Diferencias de radiación en el modelo Voronoi, al comparar cada cara con los valores máximos y mínimos. Fuente: Elaboración de los Autores.

identidad formal y criterios estructurales bioinspirados (Tabla 4). No obstante, su complejidad constructiva podría suponer una barrera en contextos residenciales estándar, aspecto discutido más adelante (Figura 11).

El diseño Voronoi no solo reduce significativamente la radiación en todas las caras, sino que optimiza el confort térmico y la eficiencia energética del volumen interno. Su desempeño uniforme y la destacada reducción en la cara superior lo posicionan como la solución más innovadora y efectiva, adaptada a las condiciones climáticas del contexto mediterráneo (Figura 12 y Figura 13).

Finalmente, se desarrolló un modelo compuesto, al integrar los sistemas más eficaces por orientación: parasoles inclinados en las fachadas sur, este y oeste, y sistema Voronoi en la cara norte y en la cubierta (Figura 14). Este modelo híbrido logró una reducción total de 81.9% (1.62 kWh/m²), la más baja de todas las configuraciones analizadas. La cara sur, tradicionalmente la más crítica, se redujo a 0.35 kWh/m², mientras que la cubierta descendió a 0.18 kWh/m². Las caras este y oeste

se mantuvieron en valores alrededor de 0.23, lográndose una distribución equilibrada y una protección uniforme en todas las orientaciones (Figura 15 y Figura 16). Esta solución demostró una alta eficacia térmica y formal, con un nivel de optimización adaptable a distintos contextos climáticos del arco mediterráneo. La siguiente tabla resume los valores de radiación media anual por cara y la reducción porcentual respecto al modelo sin protección:

Los resultados confirman que el modelo compuesto supera las soluciones individuales al combinar lo mejor de cada una, adaptándose su respuesta a la geometría del edificio y la incidencia solar según orientación. Esta flexibilidad lo convierte en una alternativa óptima para edificaciones con múltiples fachadas expuestas en climas cálidos (Tabla 6).

La Figura 17 y Figura 18 correspondientes ilustran los patrones de radiación por cara y la morfología de cada estrategia, al facilitar la interpretación visual de los resultados y evidencia el impacto formal de cada propuesta. Se recomienda al lector observar en

Tabla 5. Comparación de resultados de los diferentes modelos de parasoles. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cara	Sin Parasoles kWh/m ²	Horizontales kWh/m ²	Verticales kWh/m ²	Voronoi kWh/m ²	Compuesto kWh/m ²	Mejor Solución
Sur	2.98	1.61	0.47	0.71	0.35	Compuesto
Este	1.33	0.68	0.29	0.32	0.23	Compuesto
Oeste	1.40	0.72	0.30	0.33	0.23	Compuesto
Norte	0.98	0.50	0.33	0.25	0.23	Compuesto
Superior	2.30	2.30	0.83	0.25	0.18	Compuesto

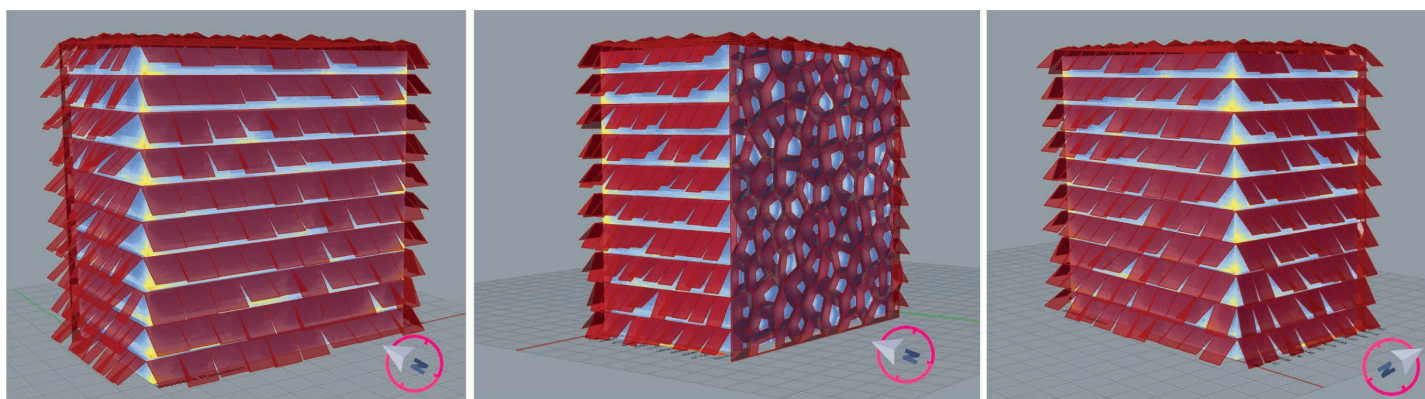


Figura 14. Modelo compuesto que integra parasoles inclinados en las fachadas Sur, Este y Oeste, debido a su alta exposición a la radiación solar directa, y un sistema geométrico basado en diagramas Voronoi en las superficies Norte y Superior, al optimizar tanto el control solar como la eficiencia energética global del edificio. Fuente: Elaboración de los Autores.

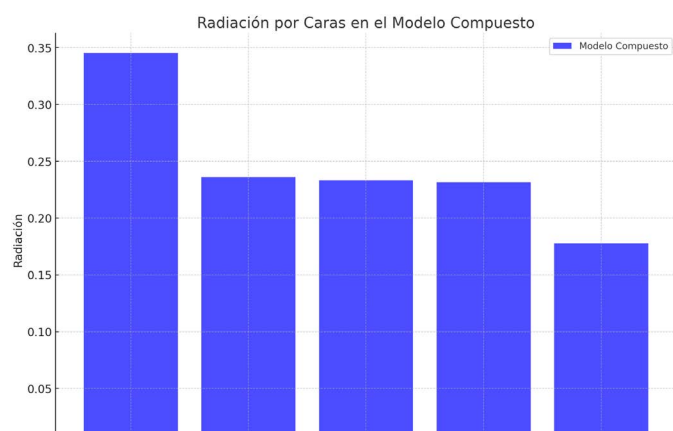


Figura 15. Radiación por cara en el Modelo Compuesto, que destaca una reducción significativa en todas las orientaciones. La cara SUR, aunque es la más expuesta, reduce su radiación a 0.345 unidades. Las caras ESTE y OESTE mantienen un nivel equilibrado alrededor de 0.23 unidades, mientras que la cara NORTE muestra una baja exposición con 0.233 unidades. La cara SUPERIOR registra la menor radiación, con solo 0.178 unidades, evidenciándose la eficacia del diseño combinado. Fuente: Elaboración de los Autores.

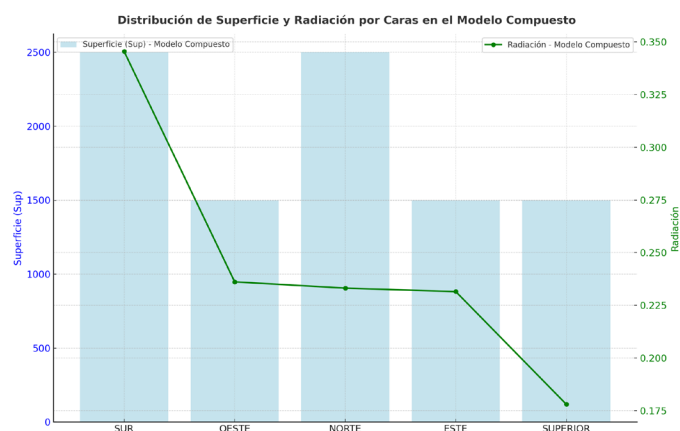


Figura 16. Distribución de la superficie por cara y los valores de radiación en el modelo compuesto, al destacar las variaciones de radiación según la orientación y exposición de cada cara. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 6. Comparación de resultados de los diferentes modelos de parasoles. Fuente: Elaboración de los Autores.

Modelo	Radiación Total (kWh/m²)	Reducción (%)
Sin Parasoles	8.98	—
Con Parasoles Horizontales	5.81	35.4%
Con Parasoles Verticales	2.65	70.5%
Con Voronoi	2.20	75.5%
Modelo Compuesto	1.62	81.9%

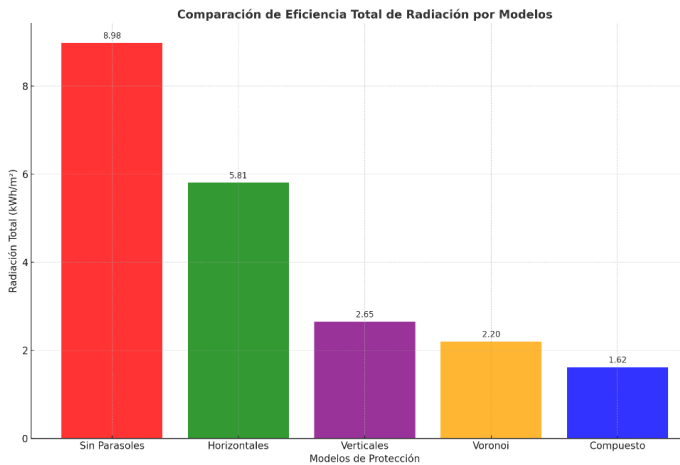


Figura 17. Comparación gráfica de la radiación total en los diferentes modelos evaluados. El gráfico destaca al modelo Sin Parasoles como el de mayor exposición, mientras que el modelo Compuesto se posiciona como la solución más eficiente, con la menor radiación acumulada. Fuente: Elaboración de los Autores.

particular la progresión entre la estrategia Voronoi y el modelo compuesto, donde se logra una síntesis eficaz entre rendimiento térmico, estética arquitectónica y viabilidad técnica.

VIABILIDAD CONSTRUCTIVA Y MATERIALIDAD DE LAS ESTRATEGIAS PROPUESTAS

Más allá del análisis computacional, resulta fundamental considerar la viabilidad constructiva de las estrategias propuestas. En particular, el modelo compuesto puede desarrollarse mediante tecnologías de fabricación digital actualmente disponibles, sin requerir sistemas complejos o exclusivos. Los parasoles inclinados son compatibles con soluciones modulares fabricadas en aluminio anodizado o acero galvanizado de bajo espesor, con anclajes estándar a fachada ventilada o estructura auxiliar. También podrían utilizarse paneles plásticos reciclables termoformados, adecuados para entornos de alta exposición solar. En cuanto a la envolvente Voronoi, su materialización es viable mediante corte CNC sobre chapa metálica, impresión 3D en polímeros técnicos o paneles compuestos

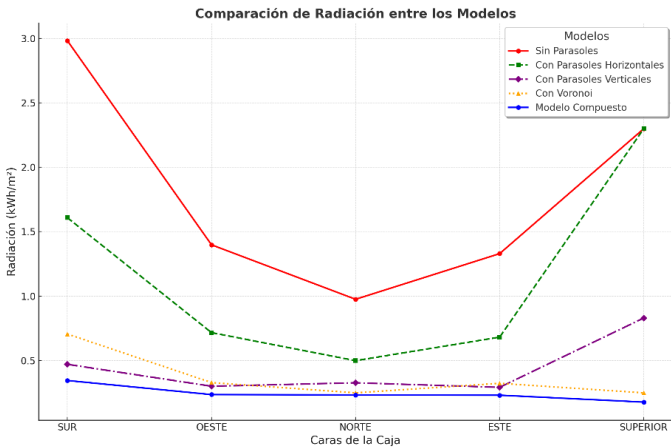


Figura 18. Gráfico comparativo que representa la radiación en las distintas caras de la caja para los cinco modelos. Fuente: Elaboración de los Autores.

tipo GFRP, según el grado de rigidez, curvatura y translucidez deseado. Estas técnicas permiten controlar el espesor, el patrón y el montaje de cada módulo, que facilitan la prefabricación y el ensamblaje en obra.

En proyectos institucionales o culturales, estas estrategias pueden implementarse con fidelidad geométrica total, mientras que en programas residenciales resulta viable adoptar versiones simplificadas que mantengan el principio de control solar adaptativo sin implicar sobrecostos. La clave reside en ajustar el grado de complejidad al programa y al presupuesto, manteniéndose la lógica morfológica optimizada que fundamenta cada solución.

Estudios recientes ya han documentado aplicaciones estructurales y morfológicas del patrón Voronoi en arquitectura, quedando demostrada su adaptabilidad y eficiencia tanto mecánica como formal. En particular, Agudelo Londoño et al. (2015) destacaron sus propiedades en la distribución de cargas y amortiguación de impactos, mientras que Sora Yanquén (2007) y Flores Jurado et

al. (2020) analizaron su potencial en la generación de superficies tridimensionales optimizadas, a través del diseño paramétrico. Más recientemente, Habib et al. (2024) y Bormashenko et al. (2021) han explorado nuevas clasificaciones y medidas de entropía en sistemas Voronoi, aplicadas al diseño de envolventes adaptativas y a la codificación de patrones naturales. Estas investigaciones confirman que la morfología Voronoi no solo tiene un valor estético o teórico, sino que ofrece un marco viable para el desarrollo de soluciones arquitectónicas materializables, sostenibles y estructuralmente coherentes.

CONCLUSIONES

El estudio desarrollado demuestra que la integración de estrategias geométricas avanzadas con herramientas de simulación computacional permite optimizar de forma significativa la protección solar en edificaciones de clima mediterráneo. A través de un análisis riguroso y cuantitativo, se compararon distintas configuraciones que respondieron a condiciones reales del entorno urbano y climático de Getafe, dentro de la Comunidad de Madrid.

Los resultados evidencian que el modelo compuesto, que combina parasoles inclinados en las fachadas más expuestas y una celosía Voronoi en las superficies con radiación difusa o cenital, logra la mayor reducción de radiación acumulada, con una mejora del 81.9 % respecto al modelo sin protección. Esta solución se presenta como una propuesta equilibrada y replicable, capaz de adaptarse a diferentes orientaciones y condiciones de asoleamiento sin comprometer la estética ni el rendimiento energético del conjunto.

A diferencia de los sistemas horizontales, que si bien son fáciles de implementar no protegen eficazmente la cubierta, y de las envolventes Voronoi puras, cuya complejidad puede limitar su uso en proyectos residenciales convencionales, el modelo híbrido ofrece una alternativa pragmática y adaptable. Los elementos inclinados, al estar dispuestos según ángulos solares específicos, maximizan la sombra proyectada en las fachadas durante las horas críticas sin impedir la iluminación natural. Por su parte, el patrón Voronoi, aplicado exclusivamente en la cubierta y fachada norte, permite una optimización geométrica localizada con un fuerte potencial expresivo y técnico.

Tal como se ha expuesto previamente, estas estrategias pueden desarrollarse mediante sistemas constructivos modulares y tecnologías digitales accesibles, al ajustar su grado de complejidad en función del programa arquitectónico. Esta flexibilidad técnica abre nuevas posibilidades para su implementación tanto en contextos institucionales como en programas residenciales de media escala, lo

que permite soluciones de alto rendimiento con costes y mantenimiento controlados.

En términos proyectuales, el estudio confirma la necesidad de abandonar enfoques genéricos o estandarizados en protección solar, y avanzar hacia soluciones que integren diseño y simulación desde las etapas iniciales. El uso de algoritmos y análisis climático permite no solo mejorar la eficiencia energética, sino también enriquecer la expresividad arquitectónica sin sacrificar funcionalidad. La forma deja de ser un resultado estético arbitrario y pasa a ser consecuencia directa de la interacción entre geometría, clima y programa.

Aunque no se aborda en este artículo la fase de monitoreo post-ocupacional, se reconoce que el siguiente paso será evaluar la implementación real de estos sistemas en obras piloto, que identifiquen el comportamiento térmico en condiciones de uso cotidiano. Asimismo, se considera pertinente estudiar su aplicación en edificaciones de uso no residencial, como escuelas, bibliotecas o centros culturales, donde la flexibilidad funcional y la expresividad formal permiten una integración más libre de tecnologías avanzadas de control solar.

Finalmente, esta investigación no solo explora el impacto de los métodos paramétricos y bioinspirados en la arquitectura, sino que también resalta su papel en la transformación de la cultura proyectual contemporánea, al impulsar una visión más integrada y sistémica del diseño. Lejos de limitarse a una respuesta reactiva, la arquitectura debe asumir un rol proactivo, donde los modelos desarrollados no sean soluciones definitivas, sino catalizadores de una especulación crítica que entrelace estética, técnica y ética, que redefine la relación con el espacio, el tiempo y el entorno.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, M.A.F.N.; Curación de datos, M.A.F.N.; Análisis formal, M.A.F.N.; Adquisición de financiación, M.A.F.N.; Investigación, M.A.F.N.; Metodología, M.A.F.N.; Administración de proyecto, M.A.F.N.; Recursos, M.A.F.N.; Software, M.A.F.N.; Supervisión, M.A.F.N.; Validación, M.A.F.N.; Visualización, M.A.F.N.; Escritura – borrador original, M.A.F.N.; Escritura – revisión y edición, M.A.F.N..

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de las actividades de docencia e investigación desarrolladas en la Universidad Rey Juan Carlos (URJC), sin financiación específica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agghimien, E. I., Li, D. H. W., y Tsang, E. K.-W. (2022). Arquitectura bioclimática y su potencial de ahorro energético: Una revisión y direcciones futuras. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(2), 961–988. <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2020-0928>
- Agudelo Londoño, T., Mejía Jiménez, I. C., y Rojas Acevedo, S. M. (2015). *Aplicaciones estructurales del diagrama Voronoi para la amortiguación de impactos partiendo del estudio del pericarpio y mesocarpio de los frutos cítricos* [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Pontificia Bolivariana. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/3588>
- Al-Shukri, N. A. H., y Al-Majidi, B. H. (2020). Algorithmic synergy and architectural form generation mechanisms. *Journal of Engineering*, 26(9), 114–136. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2020.09.08>
- Amraoui, K., Sriti, L., Di Turi, S., Ruggiero, F., y Kaihou, A. (2021). Exploring building's envelope thermal behavior of the neo-vernacular residential architecture in a hot and dry climate region of Algeria. *Building Simulation*, 14(5), 1567–1584. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0764-0>
- Asghar, Q., Jalil, A., y Zaman, M. (2020). Self-organization analysed in architecture using Voronoi tessellation and particle systems. *Technical Journal*, 25(3), 1–10. <https://tj.uettaxila.edu.pk/index.php/technical-journal/article/view/1248>
- Atef, E., Megahed, N., Elghezawy, D., y Nashaat, B. (2024). 'Adaptive office buildings: improving functional flexibility in response to shifting needs using kinetic technology'. *Architectural Engineering and Design Management*, 20(4), 946–971. <https://doi.org/10.1080/17452007.2024.2328119>
- Betman, A., Balter, J., Hongn, M., y Ganem, C. (2023). Estudio paramétrico de sistemas de parasoles para reducción del consumo energético en climas con alta heliofania. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 27, 45-55. <https://portaldervistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/4592>
- Bertagna, F., Piccioni, V., y D'Acunto, P. (2023). Geometry-based graphical methods for solar control in architecture: A digital framework. *Frontiers of Architectural Research*, 12(4), 754-774. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2023.02.006>
- Bormashenko, E., Legchenkova, I., Frenkel, M., Shvalb, N., y Shoval, S. (2021). Voronoi Entropy vs. Continuous Measure of Symmetry of the Penrose Tiling: Part I. Analysis of the Voronoi Diagrams. *Symmetry*, 13(9), 1659. <https://doi.org/10.3390/sym13091659>
- Chen, Z. (2021). Application of environmental ecological strategy in smart city space architecture planning. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101684. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101684>
- De la Hoz-Torres, M. L., Aguilar, A. J., Martínez-Aires, M. D., y Ruiz, D. P. (2024). Seasonal field study on thermal comfort in university classrooms in Mediterranean climate. *Indoor and Built Environment*, 33(8), 1380-1396. <https://doi.org/10.1177/1420326X241241530>
- Díaz Valdés, M. (2021). Application of parametric design and digital fabrication: the solution for the current crises and emergencies. *Nexo Revista Científica*, 34(5), 45–55. <https://doi.org/10.5377/nexo.v34i05.13107>
- Flores Jurado, M. V., Caiza Simbaña, M. J., Jácome Monar, E. P., Moya Jiménez, R., y Rivera Valenzuela, M. A. (2020). Diseño paramétrico: aplicación conceptual de la autopoiesis y diagramas de Voronoi a partir de la implementación del método adaptado de función de calidad. *Tecnología & Diseño*, (14), 21-37. <https://revistatd.azc.uam.mx/index.php/rtd/article/view/86>
- Gamal, A., Nashaat, B., Shahda, M. M., y Nosier, S. R. (2024). Ten questions concerning the integration of digital fabrication techniques into the architectural design process. *Architectural Engineering and Design Management*, 20(1), 120–149. <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2269559>
- García Molina, A., de la Hoz Torres, M. L., Aguilar, A. J., Nestares Nieto, B., y Bienvenido Huertas, D. (2024). The influence of global warming and tourism over the sleeping thermal comfort of dwellings in Granada. In M. Torres González y C. Rubio Bellido (Eds.), *Towards low and positive energy buildings* (pp. 225-238). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70851-0_12
- Google Maps. (2025). *Plaza España 6, Getafe, Madrid* [Mapa]. Google Maps. <https://www.google.com/maps>
- Habib, F., Megahed, N. A., Badawy, N., y Shahda, M. M. (2024). D⁴G framework: a novel Voronoi diagram classification for decoding natural geometrics to enhance the built environment. *Architectural Science Review*, 67(5), 437–464. <https://doi.org/10.1080/00038628.2024.2321584>
- Jalali, S. M. J., Ahmadian, S., Kavousi-Fard, A., Khosravi, A., y Nahavandi, S. (2022). Automated deep CNN-LSTM architecture design for solar irradiance forecasting. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(1), 54–65. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2021.3093519>
- Kolokotsa, D., Santamouris, M., y Yun, G. Y. (2022). Passive solar architecture. In T. M. Letcher (Ed.), *Comprehensive renewable energy* (2nd ed., pp. 725-741). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00094-7>
- Ramos-Sanz, A. I. (2019). Transformación de la construcción y la arquitectura en los últimos veinte años: prospectivas y perspectivas. *Arquitecturas del Sur*, 37(55), 106-125. <https://doi.org/10.22320/071907196466.2019.37.055.07>
- Rodríguez-de-Ita, D., y Sosa-Compeán, L. B. (2024). Análisis de morfologías evolutivas con CFD: mejorar la ventilación natural en vivienda de patio central, en zonas semi cálidas de Latinoamérica. *Hábitat Sustentable*, 14(2), 48–59. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.02.04>
- Sora Yanquén, G. E. (2007). Visualización de superficies en 3D por medio de diagramas de Voronoi [Licenciatura en Matemáticas, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander (UIS). <https://noesis.uis.edu.co/items/f8be51d5-06d8-4896-8f40-d2115cd31e76>
- Tipán-Renjifo, D. M., y Tipán-Suárez, H. G. (2022). Hacia un diseño arquitectónico repensado desde los diagramas de Voronoi. *Educación y sociedad*, 20(1), 120-140. <https://revistas.unica.edu/index.php/edusoc/article/view/120-140>
- Trujillo Díaz, A. (2016). Componente para el análisis de proximidad utilizando el diagrama de Voronoi para la plataforma GeneSIG [Tesis de Pregrado, Universidad de las Ciencias Informáticas]. Repositorio Digital Universidad de las Ciencias Informáticas. <https://repositorio.uci.edu/jspui/handle/123456789/8006>
- Urias-Barrera, H. E. (2024). Comparativa y calibración de índices de confort para la temporada cálida en una ciudad semi-árida del noroeste de México. *Hábitat Sustentable*, 14(2), 20–31. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.02.02>
- Wieser, M., López-Alonso, G., Flores, M.-F., Aquino, M., Guerra, F., y Moreno, P. (2024). Dimensionamiento de parasoles según zonas bioclimáticas en Perú. *Revista AUS*, (35), 90-98. <https://doi.org/10.4206/aus.2024.n35-10>