

Optimización Energética con Patrones Geométricos Bioinspirados: Inteligencia Artificial en el Diseño Pasivo Arquitectónico

Energy Optimization with Bioinspired Geometric Patterns: Artificial Intelligence in Passive Architectural Design

Otimização Energética com Padrões Geométricos Bioinspirados: Inteligência Artificial no Design Passivo Arquitetônico

DOI: <https://doi.org/10.18861/aniam.2025.15.1.4048>

Dr. Arq. Marcelo Alejandro Fraile-Narváez

Universidad Rey Juan Carlos

España

jmarcelo.fraile@urjc.es

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9321-4512>

Recibido: 28/12/2024

Aceptado: 05/05/2025

Cómo citar:

Fraile Narváez, M. (2025). Optimización Energética con Patrones Geométricos Bioinspirados: Inteligencia Artificial en el Diseño Pasivo Arquitectónico. *Anales de Investigación en Arquitectura*, 15(1). <https://doi.org/10.18861/aniam.2025.15.1.4048>



Resumen

El cambio climático, sumado al aumento sostenido del consumo de energía en la edificación, plantea retos críticos para la sostenibilidad arquitectónica, particularmente en climas mediterráneos donde la radiación solar durante el verano resulta especialmente intensa. Este trabajo evalúa la hipótesis de que la biomímesis, combinada con herramientas paramétricas e inteligencia artificial (IA), puede superar las limitaciones del diseño pasivo tradicional al mejorar la eficiencia energética y la respuesta climática de las envolventes. El propósito de esta investigación es verificar dicha hipótesis mediante el estudio de tres configuraciones geométricas bioinspiradas: Delaunay, Voronoi y Metaball. Estos modelos se desarrollaron utilizando principios biomiméticos, simulaciones digitales y algoritmos de IA, aplicados a un prisma arquitectónico representativo situado en la Comunidad de Madrid, con el fin de evaluar su capacidad para reducir la incidencia de la radiación solar durante los meses estivales. Los patrones se generaron en Rhinoceros 8/Grasshopper, mientras que la evaluación climática se llevó a cabo mediante Ladybug Tools 1.5.0 (Radiance/Daysim). Las variantes geométricas se optimizaron mediante el algoritmo genético multiobjetivo

NSGA-II, programado en Python 3.10 (DEAP) e integrado vía GhPython. Los objetivos específicos fueron (i) disminuir la radiación solar recibida y (ii) limitar la complejidad material, con el fin de asegurar la viabilidad constructiva de las propuestas. Los resultados indican que este enfoque no solo logra una significativa mitigación de la radiación solar, sino que también ofrece soluciones innovadoras y adaptables que integran funcionalidad, eficiencia energética y estética. Estas estrategias ofrecen un potencial considerable para redefinir el diseño arquitectónico sostenible, sentando las bases para nuevas aplicaciones prácticas que permitan reducir el consumo energético y responder a los retos climáticos contemporáneos. Este estudio subraya el impacto de la convergencia entre biomímesis, tecnología paramétrica e inteligencia artificial, abriendo perspectivas para el desarrollo de modelos arquitectónicos más resilientes y adaptados a las demandas energéticas globales.

Palabras clave: Biomímesis, Inteligencia Artificial, Diseño Pasivo, Arquitectura Sostenible, Modelos Paramétricos, Eficiencia Energética, Simulaciones Computacionales, Protección Solar, Geometrías Bioinspiradas, Optimización Arquitectónica.

Resumen

Climate change, together with the sustained rise in energy consumption across the building sector, poses critical challenges for architectural sustainability—particularly in Mediterranean climates, where summer solar radiation is especially intense. This study evaluates the hypothesis that biomimicry, supported by parametric tools and artificial intelligence (AI), can overcome the limitations of conventional passive design by enhancing both the energy efficiency and climatic responsiveness of building envelopes. The purpose of the research is to verify this hypothesis through the examination of three bio-inspired geometric configurations—Delaunay, Voronoi, and Metaball. These models were developed using biomimetic principles, digital simulations, and AI algorithms, and were applied to a representative architectural prism located in the Community of Madrid to assess their capacity to reduce incident solar radiation during the summer months. Pattern generation was carried out in Rhinoceros 8/Grasshopper, while climatic performance was assessed with Ladybug Tools 1.5.0 (Radiance/Daysim). The geometric variants were optimized with the multi-objective genetic algorithm NSGA-II, implemented in Python 3.10 with the DEAP library and integrated into Grasshopper via GhPython. The specific objectives were (i) to decrease incident solar radiation and (ii) to limit material complexity, thereby

ensuring the constructability of the proposals. The results indicate that this approach not only achieves significant mitigation of solar radiation but also delivers innovative and adaptable solutions that integrate functionality, energy efficiency, and aesthetics. These strategies hold considerable potential to redefine sustainable architectural design, laying the groundwork for new practical applications that reduce energy consumption and address contemporary climatic challenges. The study underscores the impact of the convergence of biomimicry, parametric technology, and artificial intelligence, opening pathways for the development of more resilient architectural models aligned with global energy demands.

Keywords: Biomimicry, Artificial Intelligence, Passive Design, Sustainable Architecture, Parametric Models, Energy Efficiency, Computational Simulations, Solar Protection, Bioinspired Geometries, Architectural Optimization.

Resumo

As alterações climáticas, aliadas ao aumento contínuo do consumo energético no setor da construção, colocam desafios críticos à sustentabilidade arquitetónica—sobretudo em climas mediterrânicos, onde a radiação solar durante o verão é particularmente intensa. Este estudo avalia a hipótese de que a biomimética, apoiada por ferramentas paramétricas e inteligência artificial (IA), pode superar as limitações do desenho passivo convencional, melhorando simultaneamente a eficiência energética e a resposta climática dos envoltórios edificados. O objetivo desta investigação é verificar essa hipótese mediante a análise de três configurações geométricas bio-inspiradas—Delaunay, Voronoi e Metaball. Os modelos foram desenvolvidos a partir de princípios biomiméticos, simulações digitais e algoritmos de IA, e aplicados a um prisma arquitetónico representativo situado na Comunidade de Madrid, de modo a avaliar a sua capacidade de reduzir a radiação solar incidente nos meses de verão. A geração dos padrões foi realizada em Rhinoceros 8/Grasshopper, enquanto o desempenho climático foi avaliado com o Ladybug Tools 1.5.0 (Radiance/Daysim). As variantes geométricas foram otimizadas através do algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II, implementado em Python 3.10 com a biblioteca DEAP e integrado no Grasshopper via GhPython. Os objetivos específicos

foram (i) diminuir a radiação solar incidente e (ii) limitar a complexidade material, garantindo assim a viabilidade construtiva das propostas. Os resultados indicam que esta abordagem não só obtém uma mitigação significativa da radiação solar, como também proporciona soluções inovadoras e adaptáveis que conciliam funcionalidade, eficiência energética e valor estético. Estas estratégias evidenciam um potencial considerável para redefinir o desenho arquitetónico sustentável, lançando as bases para novas aplicações práticas capazes de reduzir o consumo energético e responder aos desafios climáticos contemporâneos. O estudo sublinha o impacto da convergência entre biomimética, tecnologia paramétrica e inteligência artificial, abrindo caminhos para o desenvolvimento de modelos arquitetónicos mais resilientes e alinhados com as exigências energéticas globais.

Palavras-chave: Biomimética, Inteligência Artificial, Design Passivo, Arquitetura Sustentável, Modelos Paramétricos, Eficiência Energética, Simulações Computacionais, Proteção Solar, Geometrias Bioinspiradas, Otimização Arquitetónica.

La arquitectura contemporánea se enfrenta a retos cada vez mayores en términos de sostenibilidad ambiental, debido al alto impacto que el sector de la construcción tiene en el consumo energético global y las emisiones de gases de efecto invernadero. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2019), este sector es responsable de casi el 40% del consumo energético mundial y una proporción similar de las emisiones de carbono, cifras que subrayan la necesidad urgente de implementar estrategias que mitiguen su contribución al cambio climático. Ante esta problemática, la comunidad científica y la industria de la construcción han redoblado esfuerzos para desarrollar enfoques innovadores que transformen el diseño y la construcción de edificaciones, con el objetivo de mejorar su eficiencia energética y reducir su impacto ambiental.

En este contexto, la biomímesis y la inteligencia artificial (IA) han emergido como herramientas clave en el diseño arquitectónico sostenible, ofreciendo soluciones adaptativas que combinan principios naturales con tecnologías avanzadas de optimización. La biomímesis, definida como la emulación de estrategias y procesos observados en la naturaleza para resolver problemas humanos (Badarnah, 2017), ha inspirado sistemas arquitectónicos que imitan los mecanismos de regulación térmica y eficiencia estructural de organismos vivos. Por ejemplo, las investigaciones de Taylor et al. (2021) destacan cómo ciertos reptiles, como lagartos y lagartijas, han desarrollado estructuras epidérmicas que optimizan la absorción y disipación de calor en función de las condiciones ambientales, lo que representa una fuente valiosa de inspiración para la arquitectura. Estas estrategias naturales han sido adaptadas al diseño de envolventes arquitectónicas que responden dinámicamente a la radiación solar, reduciendo la dependencia de sistemas mecánicos de climatización.

Simultáneamente, la inteligencia artificial (IA) ha transformado la capacidad de diseñar y optimizar modelos

arquitectónicos mediante el uso de algoritmos avanzados. Los algoritmos genéticos, inspirados en principios de selección natural, han demostrado ser particularmente efectivos en la resolución de problemas complejos que involucran múltiples variables (Wu y Ma., 2023). Estos algoritmos permiten evaluar y seleccionar configuraciones de diseño que maximizan la eficiencia térmica, minimizan el consumo energético y mejoran el confort interior. Investigaciones como las de Li et al. (2020) y González y Fiorito (2015) han mostrado que la integración de IA en el diseño arquitectónico puede reducir significativamente el consumo energético de los edificios, optimizando simultáneamente la luz natural y la protección solar.

A partir de estas consideraciones, este estudio plantea la hipótesis de que la combinación de biomímesis e inteligencia artificial constituye un enfoque transdisciplinar que mejora significativamente la eficiencia energética y la respuesta climática en climas mediterráneos, superando las limitaciones de las estrategias tradicionales. Para validar esta hipótesis, el artículo utiliza tres configuraciones

geométricas de sombreado: Delaunay, Voronoi y Metaball. Estas configuraciones, diseñadas a partir de principios geométricos naturales y optimizadas mediante IA, se implementan sobre un prisma arquitectónico representativo ubicado en Madrid, con el objetivo de evaluar su eficacia en la reducción de la incidencia de radiación solar durante el verano.

El propósito principal del estudio es determinar, mediante simulaciones detalladas y procesos de optimización iterativos, cuál de estas estrategias logra un equilibrio eficiente entre la reducción de la radiación solar y la viabilidad técnica, considerando tanto las condiciones climáticas locales como las propiedades específicas de cada sistema de sombreado. Esta investigación pretende validar la hipótesis planteada y ofrecer una base sólida para futuras aplicaciones arquitectónicas que integren biomímesis e inteligencia artificial como herramientas clave para enfrentar los retos energéticos en climas mediterráneos.

Metodología

Características del prisma base

El prisma utilizado como base del análisis tiene una forma rectangular con dimensiones de 30 x 50 m en planta y 50 m de altura, lo que resulta en un volumen total de 75,000 m³ y una superficie externa de 11,000 m². Esta configuración geométrica proporciona una relación volumen-superficie de 6.82, favorable para minimizar las pérdidas térmicas y mejorar la eficiencia energética. El prisma se orienta con sus ejes alineados a los puntos cardinales y está ubicado en Madrid (40.4168°N, 3.7038°W), una ciudad de clima mediterráneo caracterizada por aproximadamente 2500-3000 horas de sol al año y una irradiancia global anual de 1600-1800 kWh/m². (Figuras 1 a y b)

Con el fin de mantener la coherencia comparativa, el prisma —ubicado virtualmente en la parcela real de Plaza

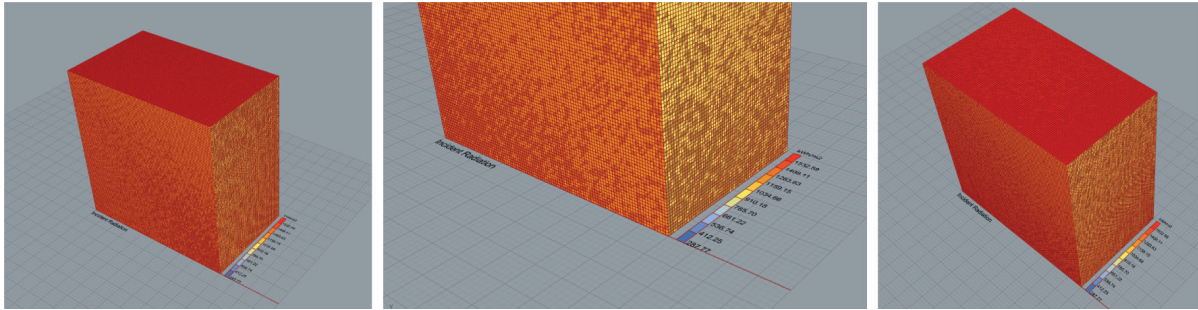


Figura 1a. Prisma base de 30 x 50 m en planta y 50 m de altura. Fuente: Elaboración propia.



Figura 1b. 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).

España 6, Getafe (Madrid)— se modeló como edificación exenta: las distancias a las construcciones vecinas superan los 20 m, de modo que las sombras arrojadas y las reflexiones urbanas resultan despreciables; por ello, los límites laterales se trataron adiabáticamente, aislando el efecto estrictamente envolvente.

La envolvente responde a la estratigrafía de alta eficiencia que exige el CTE DB-HE 2019. Los muros combinan un núcleo portante de hormigón (200 mm), 100 mm de lana mineral y un acabado ventilado de panel GRC, para una transmitancia térmica $U = 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$. La cubierta invertida, con 140 mm de XPS sobre forjado aligerado, alcanza $U = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Los huecos (40 % de la superficie de fachada) usan doble acristalamiento bajo emisivo 4/16/4 mm con argón y carpintería de aluminio con RPT (Uvidrio = $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$; $g = 0,50$). Las l osas en contacto con el exterior se consideran macizas de hormigón ($U = 0,43 \text{ W/m}^2\text{K}$). Para las infiltraciones se adoptó $0,6 \text{ h}^{-1}$ a 50 Pa, valor típico en edificios de alta prestación energética.

Esta caracterización permite convertir directamente los mapas de radiación en cargas térmicas convectivas y comparar con rigor la eficacia de los tres patrones de sombreado. El tratamiento adiabático evita que la complexión urbana (albedo circundante, cañón de calle) distorsione los resultados, atribuyendo la reducción de ganancias solares únicamente a la geometría de los sistemas Delaunay, Voronoi y Metaball.

Cada cara del prisma tiene características particulares respecto a la radiación solar incidente:

El prisma rectangular se seleccionó por su simplicidad geométrica y su capacidad para servir como referencia uniforme en la evaluación de sistemas de sombreado, representando un volumen arquitectónico típico en entornos urbanos.

Caras	SUR	OESTE	NORTE	ESTE	SUPERIOR
Sup (m²)	2500	1500	2500	1500	1500
Radiación (kWh/m²)	2.981257	1.398207	0.97563	1.329807	2.29889
Radiación Acumulada (kWh)	7453.1425	2097.3105	2439.075	1994.7105	3448.335
Obs	Alineación con la trayectoria solar. Radiación máxima	Radiación directa por las tardes	La cara menos expuesta	Radiación directa por las mañanas	Radiación constante y elevada debido a su exposición al cielo

Sup Total (m²)	9500
Volumen (m3)	75000
Relación volumen-superficie	6.82
Radiación Total (kWh/m²)	9.415
Obs.	La cara SUR la que contribuye más significativamente.

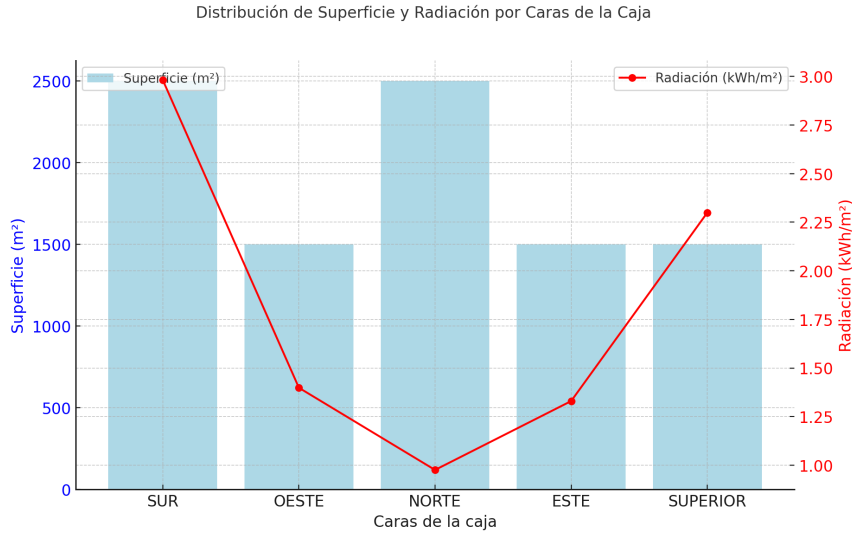


Figura. 2. Relación entre Superficie y Radiación por Caras: Gráfico combinado que muestra la superficie (barras) y la radiación (línea), destacando la correlación entre ambas variables. Fuente: Elaboración propia.

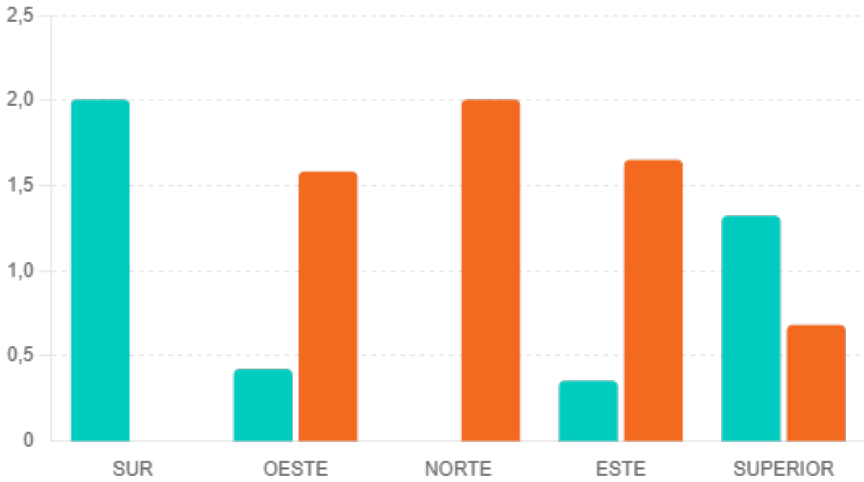


Figura. 3. Diferencias de Radiación: Comparación de radiación de cada cara respecto al valor mínimo (verde) y máximo (naranja). Fuente: Elaboración propia.

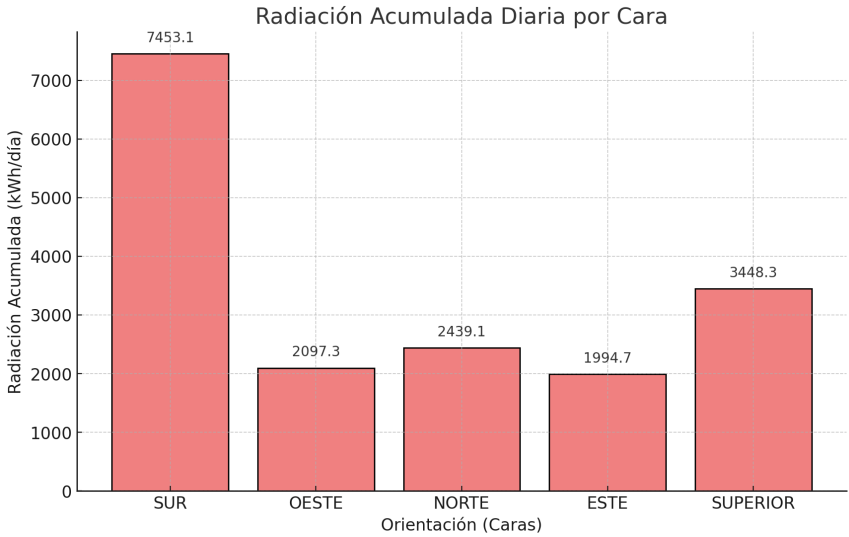


Figura. 4. Radiación acumulada diaria para cada cara, mostrando cómo la orientación afecta la acumulación de radiación en kWh. Fuente: Elaboración propia.

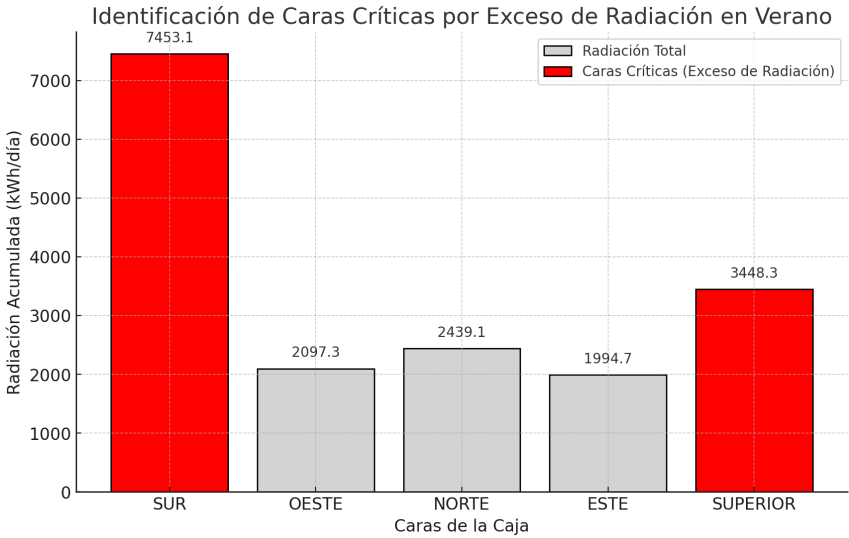


Figura. 5. Caras Críticas por Exceso de Radiación: Las caras SUR y SUPERIOR, marcadas en rojo, destacan como principales fuentes de acumulación de radiación, generando riesgos de sobrecalentamiento en verano. Fuente: Elaboración propia.

Modelos seleccionados

Con el propósito de investigar cómo los patrones geométricos bioinspirados pueden optimizar el diseño de sistemas de sombreado, se seleccionaron tres configuraciones representativas: Delaunay, Voronoi y Metaball.

La elección de los patrones Delaunay, Voronoi y Metaball no fue arbitraria. Conforman un triángulo conceptual que cubre, respectivamente, la lógica modular-reticular de las redes cristalinas, la organización celular-adaptativa propia de los tejidos biológicos y la continuidad fluido-conectiva observada en membranas y coalescencias de fluidos. Este abanico geométrico permite ilustrar un espectro diverso de estrategias naturales y, al mismo tiempo, mantener un marco experimental riguroso al limitar el número de casos, equilibrando complejidad técnica y claridad de resultados.

1.

Patrones Delaunay. Basados en triangulaciones que reproducen disposiciones atómicas, generan mallas estables que optimizan la distribución de cargas y el control de la radiación solar; sobresalen por su eficiencia estructural y la facilidad de fabricación mediante corte plano o impresión 3D.
2.

Patrones Voronoi. Inspirados en la división celular, venaciones foliares y espículas óseas, crean celdas adaptativas de perímetro mínimo que se ajustan dinámicamente a la radiación y favorecen la ventilación, ofreciendo un diseño versátil y altamente configurable.
3.

Patrones Metaball. Emulan superficies de mínima energía presentes en tejidos blandos o la unión de gotas, produciendo transiciones continuas que aportan una estética singular y gradientes de sombreado efectivos para difundir la luz.

Confrontar estas tres configuraciones biomiméticas —diversas y complementarias— sobre un mismo prisma

de referencia hace posible comparar su desempeño bajo idénticas condiciones climáticas y extraer conclusiones sólidas sobre su capacidad para transformar estrategias de sombreado pasivo mediante soluciones innovadoras, energéticamente eficientes y estéticamente integradas.

Modelización y simulación

El análisis se ejecutó íntegramente en Rhinoceros con su plugin nativo Grasshopper. El entorno climático se generó mediante Ladybug, que importó el archivo EPW de Madrid y trazó trayectorias solares diarias para calcular la radiación global y difusa en cada fachada; esos mapas sirvieron de base para estimar la irradiancia media anual y estacional. A partir de ahí se levantó un modelo paramétrico del prisma donde cada estrategia de sombreado —horizontal, inclinada y de celdas Voronoi— podía variarse en densidad, profundidad y ángulo mediante deslizadores de Grasshopper. La evaluación energética de esas

variantes se automatizó con scripts en GhPython que, tras cada generación, volcaban la irradiancia resultante en matrices que un LLM local GPT4All procesaba sin conexión externa, identificando tendencias y agrupando soluciones parecidas para acelerar la convergencia. La optimización se realizó con Galapagos, un algoritmo genético integrado en Grasshopper; se fijó una población de 120 individuos y 40 generaciones, con cruce del 90 % y mutación del 10 %, empleando como función objetivo la minimización de la suma de kWh· m⁻² anuales ponderada por un factor de penalización que evita incrementos excesivos de superficie material. Este flujo de trabajo —Ladybug para el clima, GhPython para automatizar la evaluación y Galapagos para la heurística evolutiva— permitió comparar, bajo idénticas condiciones de contorno, el desempeño de las tres configuraciones seleccionadas. Dichas configuraciones se eligieron porque representan respuestas geométricas y funcionales complementarias al desafío de la radiación estival en climas mediterráneos: la horizontal aporta simplicidad constructiva y eficacia frente al sol alto; la inclinada ofrece mayor adaptabilidad ante

ángulos cambiantes; y la Voronoi introduce un enfoque innovador que integra criterios estéticos y funcionales mediante algoritmos paramétricos avanzados.

Indicadores de evaluación

Se establecieron los siguientes indicadores clave para evaluar el desempeño de cada sistema de sombreado:

- Reducción de radiación total:** Se cuantificó la disminución de la radiación incidente sobre cada cara del prisma en comparación con el modelo base sin sombreado.
- Impacto térmico estimado:** Se calculó la reducción en la ganancia térmica, considerando los coeficientes de transmisión térmica y las propiedades de las superficies del prisma.

- **Eficiencia relativa:** Se evaluó la relación entre la reducción de radiación y la complejidad geométrica de cada sistema, valorando su viabilidad técnica y constructiva.

Estudios de caso

Caso 1: Parasoles Delaunay

Los parasoles Delaunay, contruidos a partir de patrones triangulares, constituyen una solución arquitectónica que integra eficiencia estructural y estética funcional. Reconocidos por su capacidad para optimizar la distribución de cargas (Dumitru & Zamfirescu, 2019), estos sistemas geométricos destacan por su alto rendimiento técnico y adaptabilidad a demandas climáticas y energéticas, facilitando su integración en fachadas complejas (Wieser et al., 2024).

Estos patrones equilibran eficazmente el sombreado con la ventilación natural, mejorando el confort térmico interior (Kim & Park, 2019). Su diseño, generado mediante algoritmos de triangulación, produce mallas ligeras y resistentes que distribuyen uniformemente las cargas, garantizando eficiencia geométrica. En el modelo analizado, se implementaron patrones perforados, sobre el prisma base para optimizar la iluminación interior y la ventilación.

La utilización de herramientas digitales avanzadas para generar y personalizar estos diseños según las condiciones climáticas y estructurales específicas del proyecto evidencia la versatilidad de los parasoles Delaunay en sistemas constructivos modernos. Este enfoque no solo mejora la respuesta arquitectónica a desafíos ambientales, sino que también impulsa nuevas posibilidades en el campo del diseño sostenible.

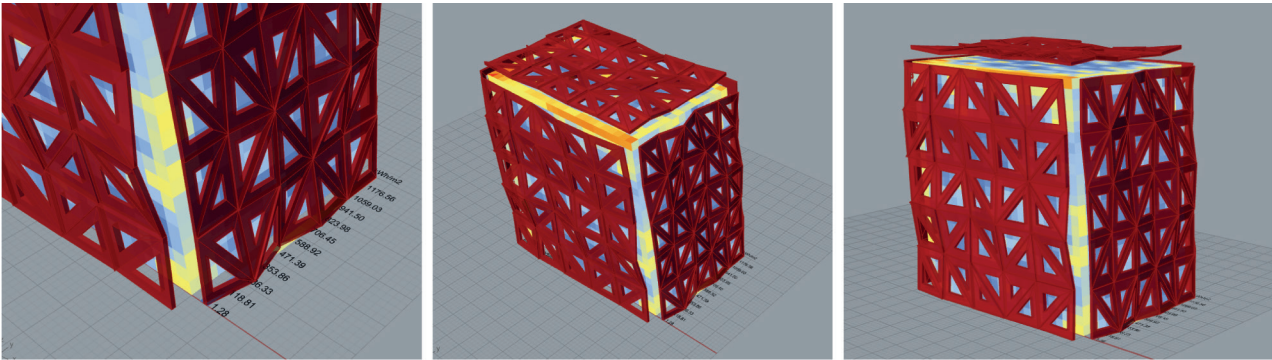


Figura. 6. Modelo de sombreado mediante Delaunay. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Radiación promedio por cara:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Radiación total}}{\text{Número de caras}} = \frac{2.304504}{5} = 0.460901 \text{ kWh/m}^2$$

Caras	SUR	OESTE	NORTE	ESTE	SUPERIOR	TOTAL
Radiación (kWh/m²)	0.627941	0.301558	0.191364	0.276478	0.475874	2.304504
Proporción respecto al total %	27.23%	13.08%	8.31%	11.99%	20.65%	100%
Reducción porcentual (%)	78.9	78.4	80.4	79.2	79.3	80 % en promedio

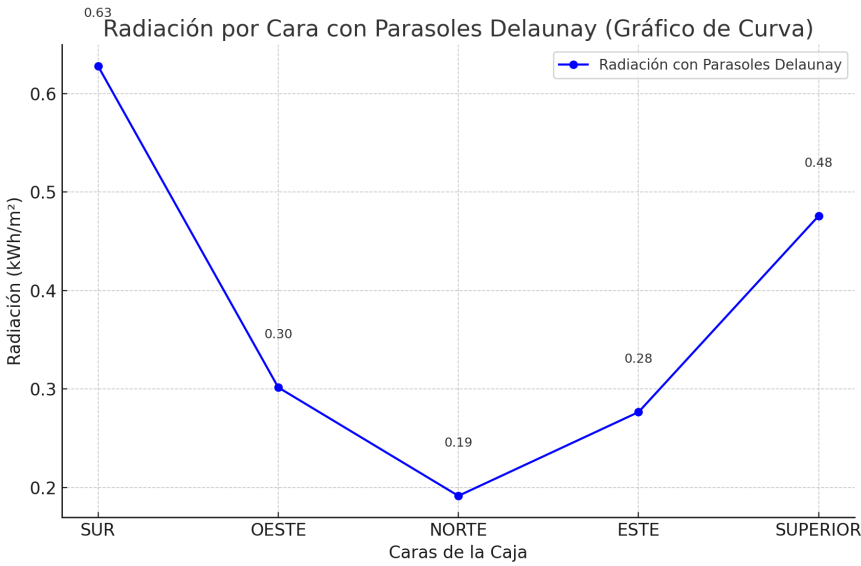


Figura. 7. Radiación por Cara: Distribución de la radiación en cada cara de la caja utilizando los Parasoles Delaunay. Fuente: Elaboración propia.

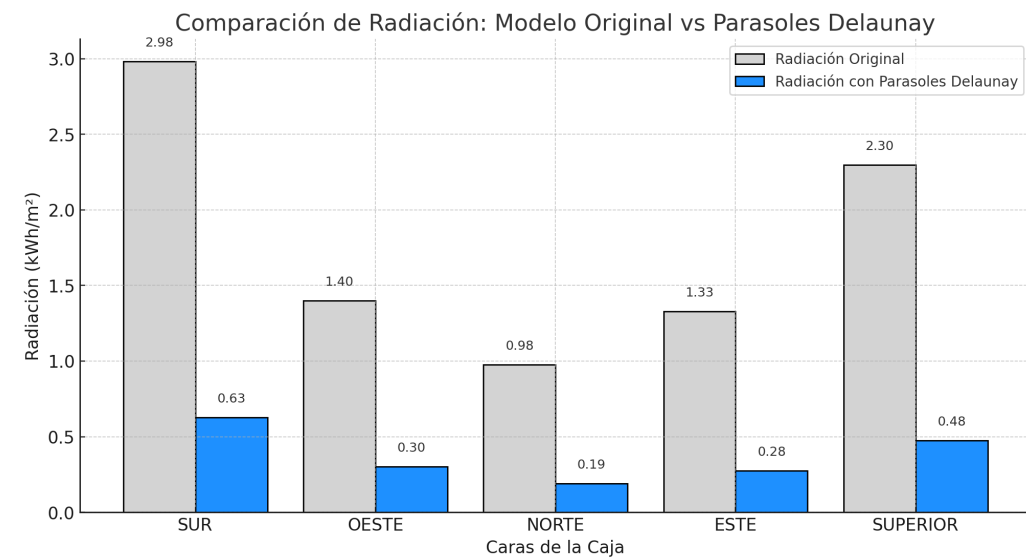


Figura. 8. Comparación de Radiación: Gráfico que muestra la reducción de radiación tras aplicar los Parasoles Delaunay. Fuente: Elaboración propia.

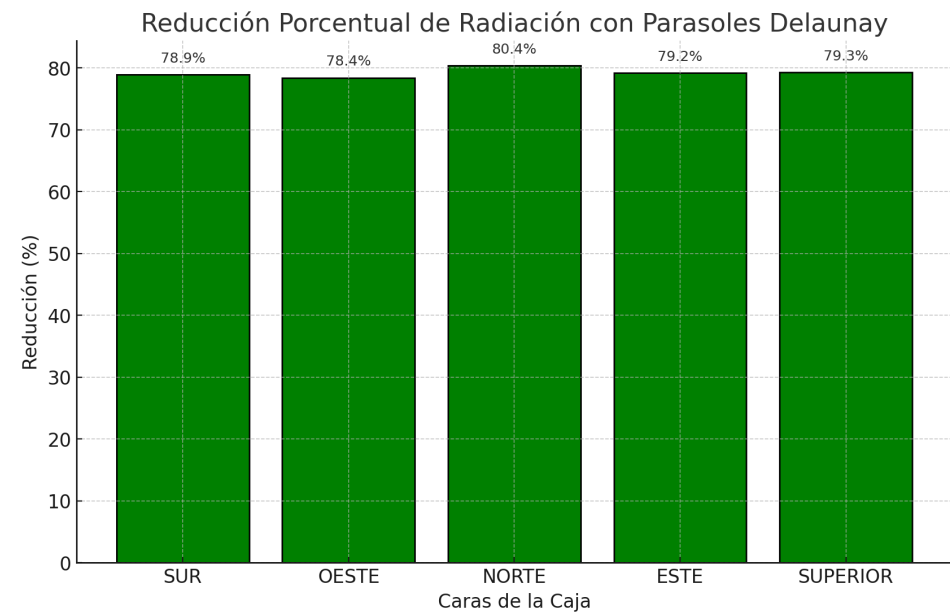


Figura. 9. Reducción Porcentual de Radiación: Reducción de radiación en cada cara con los Parasoles Delaunay. Fuente: Elaboración propia.

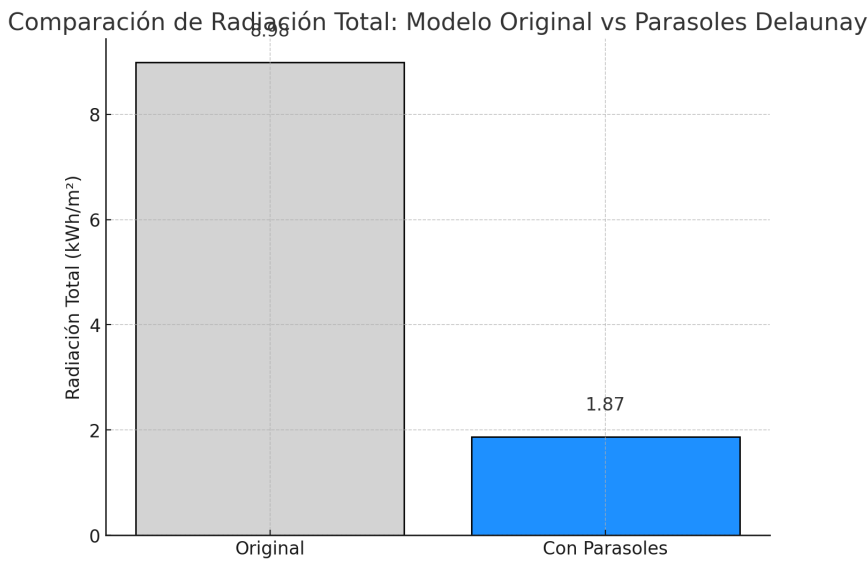


Figura. 10. Radiación Total: Modelo Original vs. Parasoles Delaunay. Reducción Absoluta: 7.68 kWh/m² - Reducción Porcentual: 77.0%. Los parasoles Delaunay son altamente efectivos en todas las caras, logrando reducciones de aproximadamente un 80% en promedio, con ligeras variaciones según la orientación. Fuente: Elaboración propia.

Caso 2: Parasoles Voronoi

Los patrones Voronoi, inspirados en sistemas naturales como células biológicas o formaciones cristalinas, representan una estrategia arquitectónica que combina versatilidad, funcionalidad y estética. Estas estructuras geométricas emulan distribuciones orgánicas, adaptándose eficazmente a superficies irregulares y respondiendo a variaciones de radiación solar, lo que las hace ideales para climas desafiantes (Wieser et al., 2024; Ramos-Sanz, 2019).

Destacan por maximizar el sombreado sin comprometer la ventilación ni la iluminación natural, logrando un equilibrio óptimo entre confort térmico y eficiencia energética (Kim & Park, 2019). Su diseño distintivo no solo responde a demandas funcionales, sino que también aporta un impacto visual único, integrando tecnología y principios bioinspirados de manera armónica.

En el modelo analizado, los patrones Voronoi se perforaron proyectándose telescópicamente hacia el exterior, generando elementos tridimensionales que sobresalían del prisma, evocando la forma orgánica de los corales marinos. Este diseño, adaptado a las condiciones climáticas específicas, combina funcionalidad y estética, ofreciendo una solución flexible y altamente eficiente. Esta capacidad de adaptación posiciona a los patrones Voronoi como una solución clave para abordar retos arquitectónicos y ambientales en el marco del diseño sostenible.

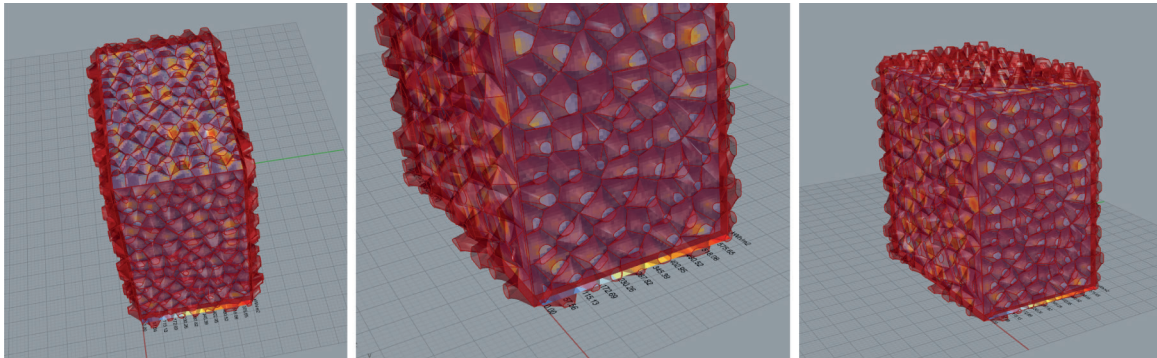


Figura. 11. Modelo de sombreado mediante Voronoi. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Radiación promedio por cara:

Caras	SUR	OESTE	NORTE	ESTE	SUPERIOR	TOTAL
Radiación (kWh/m²)	0.285646	0.135123	0.089141	0.113585	0.173513	1.225213
Proporción respecto al total %	35.84	16.95	11.18	14.25	21.77	100
Reducción porcentual	90.41	90.33	90.86	91.45	92.45	91.98

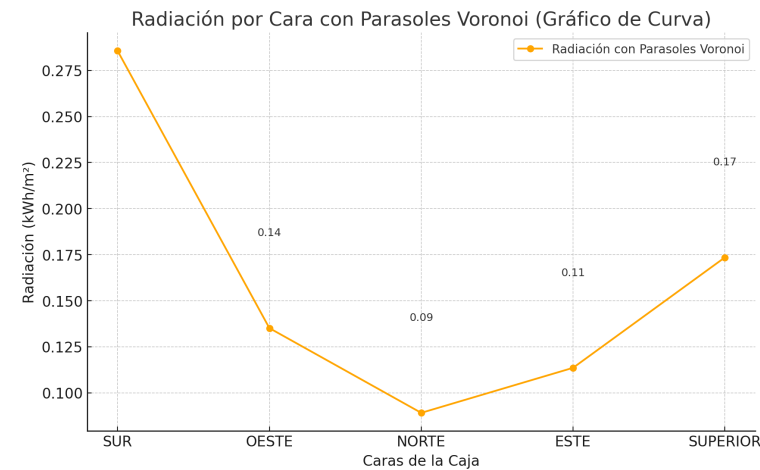


Figura. 12. Radiación por Cara: Distribución de la radiación en cada cara de la caja utilizando los Parasoles Voronoi. Fuente: Elaboración propia.

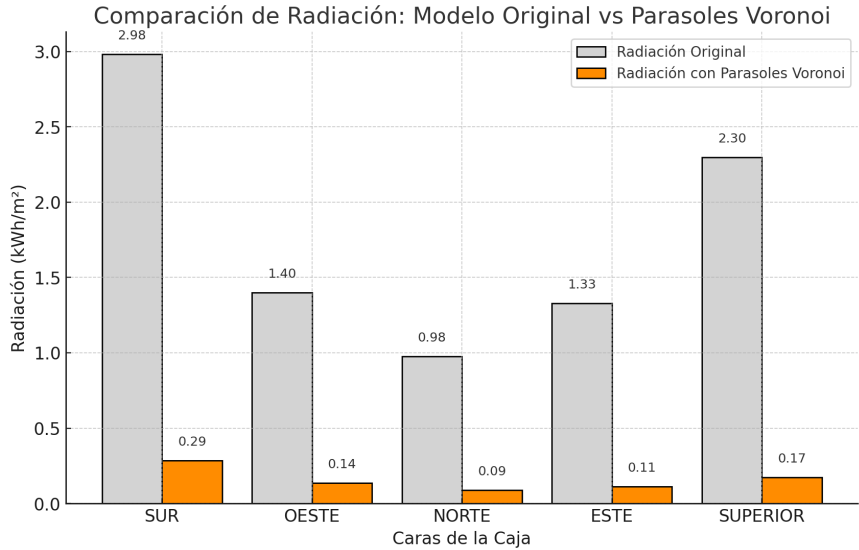


Figura. 13. Comparación de Radiación: Gráfico que muestra la reducción de radiación tras aplicar los Parasoles Voronoi. Fuente: Elaboración propia.

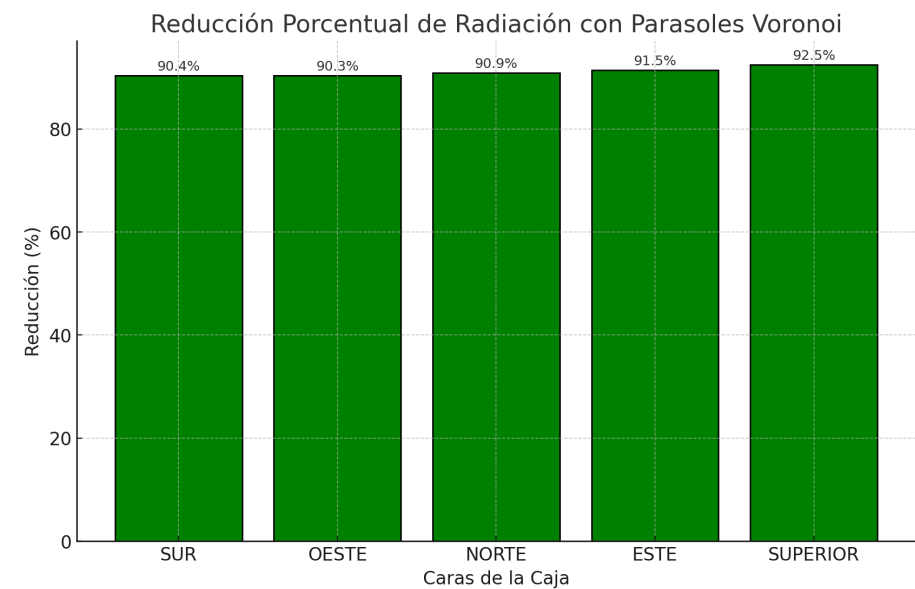


Figura. 14. Reducción Porcentual de Radiación: Reducción de radiación en cada cara con los Parasoles Voronoi. Muestra claramente cómo cada cara experimenta una disminución significativa, con valores superiores al 90% en todas las caras. Fuente: Elaboración propia.

Comparación de Radiación Total: Modelo Original vs Parasoles Voronoi

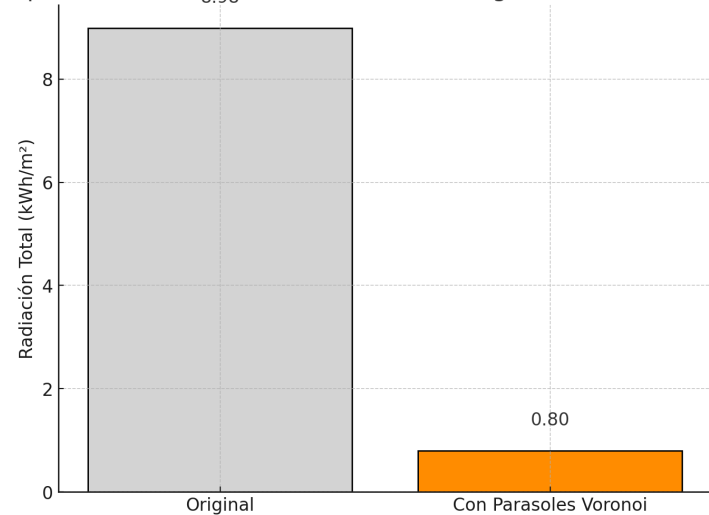


Figura. 15. Radiación Total: Modelo Original vs. Parasoles Voronoi. Reducción Absoluta: 9.18 kWh/m² - Reducción Porcentual: 91.98%. Las reducciones específicas por cara están detalladas en la tabla proporcionada, donde las caras NORTE y ESTE presentan las mayores reducciones porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

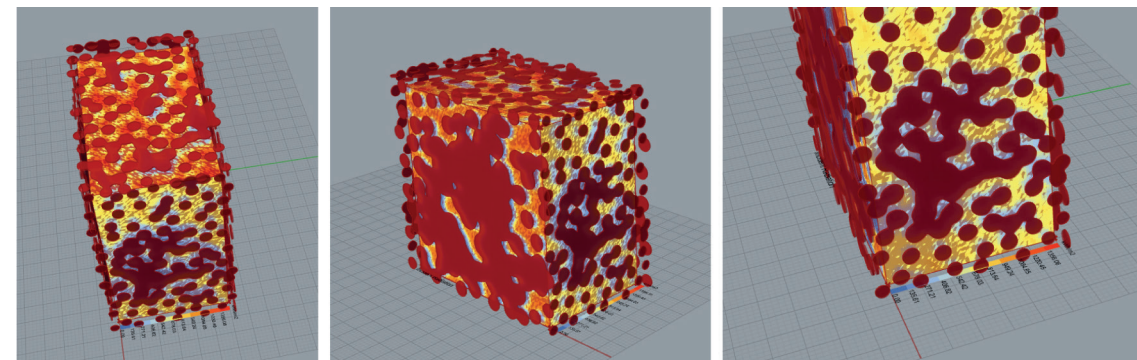


Figura. 16. Modelo de sombreado mediante Metaball. Fuente: Elaboración propia.

Caso 3: Paneles Metaball

Los patrones Metaball, reconocidos por sus formas fluidas y orgánicas, se inspiran en interacciones naturales como la cohesión de fluidos o las membranas biológicas. Estas estructuras paramétricas destacan por su capacidad para generar sombreado dinámico y adaptable, particularmente en superficies complejas o irregulares (Ramos-Sanz, 2019). Además de su funcionalidad, aportan un alto valor estético al integrarse de manera armoniosa en el entorno arquitectónico, ofreciendo una solución visualmente impactante (Kim & Park, 2019).

Su diseño, basado en la modelización matemática de isosuperficies, crea formas continuas e interconectadas mediante algoritmos computacionales que calculan campos de influencia en puntos espaciales. Esto permite generar superficies adaptables que responden a geometrías complejas, asegurando eficiencia tanto estructural como visual.

En el modelo, los patrones Metaball se emplearon para diseñar superficies microperforadas de sombreado sobre un prisma arquitectónico, logrando un equilibrio entre estética y funcionalidad. Estos sistemas responden dinámicamente a la radiación solar, optimizando el confort térmico mediante sombreado efectivo, ventilación natural y difusión de la luz. El diseño paramétrico permite personalizar la densidad y distribución de las estructuras Metaball, consolidándolas como una solución clave en el diseño sostenible, capaz de abordar retos climáticos y energéticos contemporáneos.

Tabla 3. Radiación promedio por cara:

Caras	SUR	OESTE	NORTE	ESTE	SUPERIOR	TOTAL
Radiación (kWh/m²)	0.833504	0.504422	0.267025	0.66185	1.186643	3.884073
Proporción respecto al total (%)	24.13	14.60	7.73	19.16	34.36	100
Reducción porcentual (%)	72.04	63.92	72.63	50.22	48.38	61.14

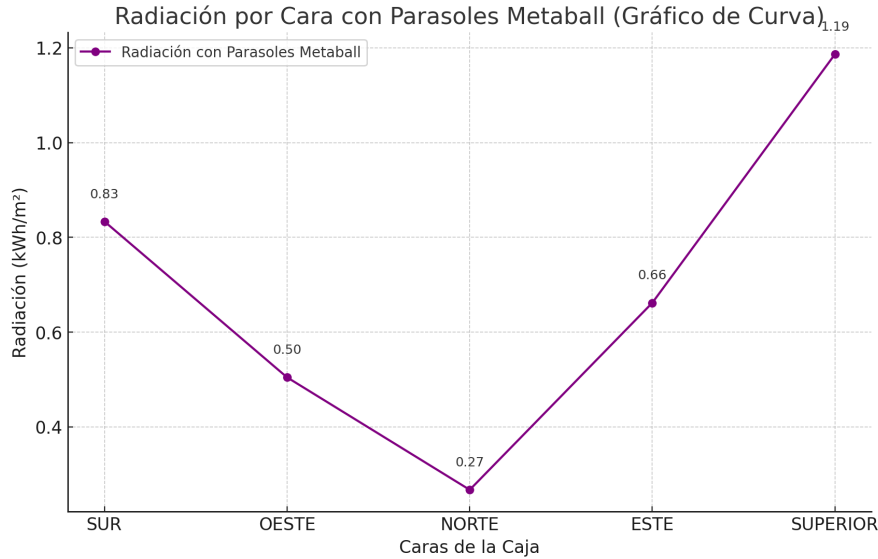


Figura. 17. Radiación por Cara: Distribución de la radiación en cada cara de la caja utilizando los Parasoles. Fuente: Elaboración propia.

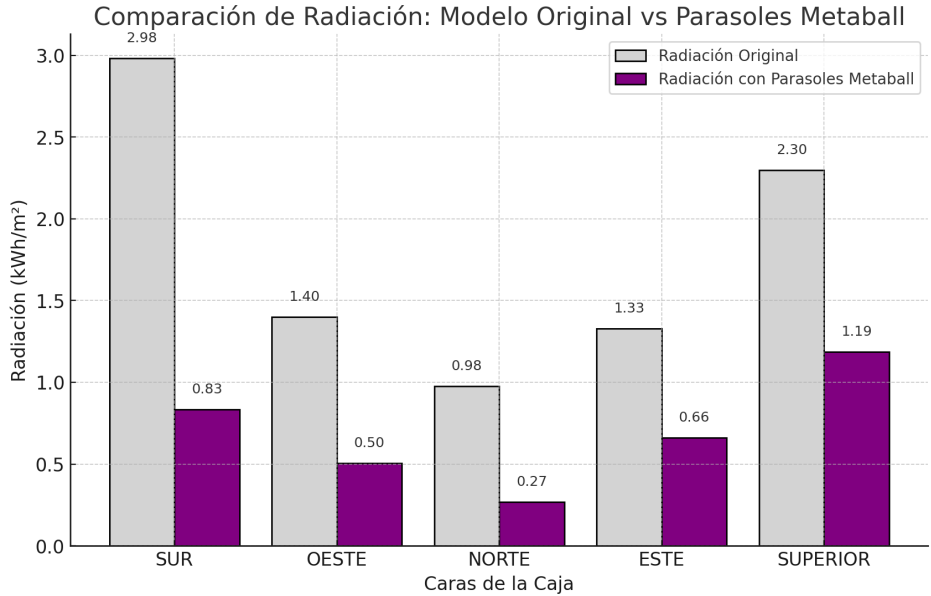


Figura. 18. Comparación de Radiación: Gráfico que muestra la reducción de radiación tras aplicar los Parasoles Metaball, destacando la cara SUPERIOR con niveles aún elevados. Fuente: Elaboración propia.

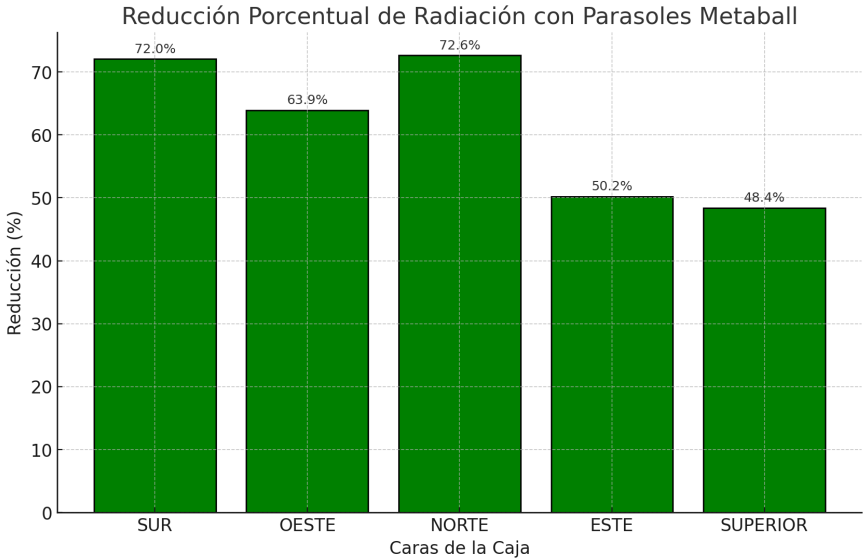


Figura. 19. Reducción Porcentual de Radiación: Reducción de radiación en cada cara con los Parasoles Metaball. Fuente: Elaboración propia.

Comparación de Radiación Total: Modelo Original vs Parasoles Metaball

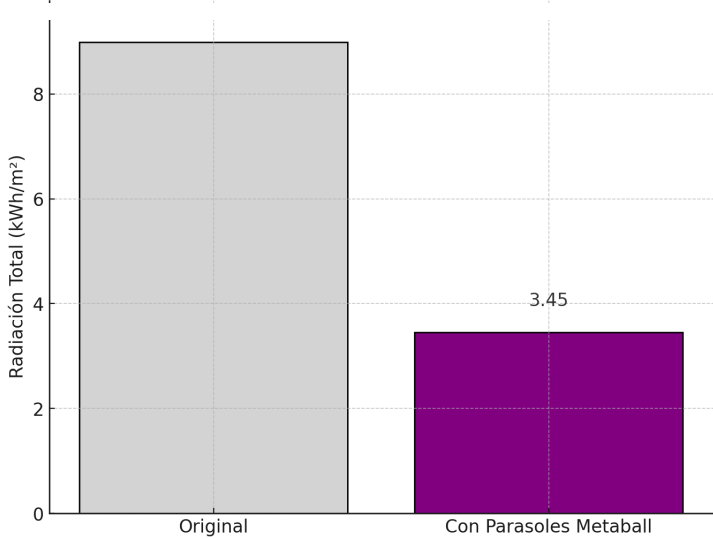


Figura 20. Radiación Total: Modelo Original vs. Parasoles Metaball. Reducción Absoluta: 6.10 kWh/m². Reducción Porcentual: 61.14%. Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Este estudio comparó la efectividad de los tres modelos de parasoles (Delaunay, Voronoi y Metaball) frente a la radiación total del modelo base sin sombreado. Los resultados muestran que los parasoles Voronoi lograron la mayor reducción de radiación (91.13%), seguidos por Delaunay (79.15%) y Metaball (61.56%). Estos hallazgos destacan diferencias clave en la capacidad de sombreado y adaptabilidad de cada modelo.

Eficiencia por Modelo:

Voronoi: Es el modelo más efectivo, la distribución uniforme del sombreado en todas las caras del prisma permite un rendimiento superior, con reducciones constantes por encima del 90%, de la radiación total, con un acumulado de **0.797 kWh/m²** frente al original de **8.98 kWh/m²**, asegurando una mitigación efectiva del sobrecalentamiento y un óptimo confort térmico. Ideal para proyectos donde la eficiencia energética y la reducción uniforme de radiación sean prioritarias, especialmente en climas cálidos.

Delaunay: Aunque menos eficiente que Voronoi, logra reducciones entre el 78.4% y el 80.4%, con un total de **1.87 kWh/m²**, ofreciendo una solución balanceada entre funcionalidad y simplicidad estructural, lo que lo convierte en una opción sólida para proyectos con restricciones técnicas o presupuestarias. Con ajustes geométricos para mejorar su rendimiento en ciertas caras, puede convertirse en una alternativa eficiente y económica.

Metaball: Si bien presenta una reducción menor (61.56%), acumulando **3.45 kWh/m²**, su estética fluida y adaptabilidad a geometrías complejas lo hacen ideal en proyectos que valoren más la estética que la eficiencia energética, o como complemento en sistemas híbridos.

Reducción por Caras:

Voronoi: Muestra **eficiencia constante y elevada** en todas las caras, con reducciones por encima del **90%**. El **parasol Voronoi** es la mejor opción para el verano. Logra la mayor reducción de radiación tanto total como por caras, asegurando un rendimiento uniforme y mitigando el riesgo de sobrecalentamiento en todas las orientaciones.

Delaunay: Tiene una eficiencia ligeramente menor, variando entre **78.4% y 80.4%** según la cara.

Metaball: Aunque es efectivo, su eficiencia varía mucho más, con valores bajos en caras como la SUPERIOR (48.38%).

Tabla 4. Eficiencia por modelo:

Modelo	Radiación Total (Kwh	Eficiencia (%)
Original	8.983791	-
Delaunay	1.873215	79.14
Voronoi	0.797008	91.12
Metaball	3.453444	61.55

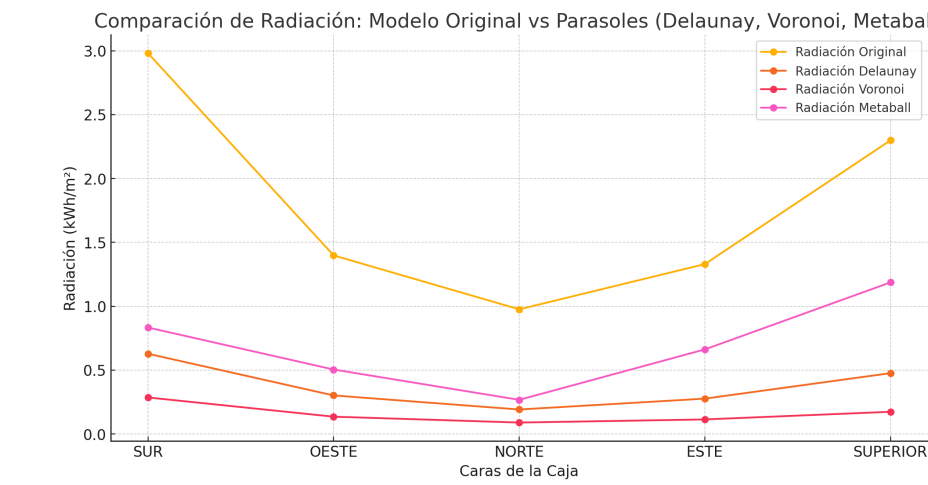


Figura. 21. Comparación de Radiación por Modelo: Radiación por cara en el modelo Original y los parasoles Delaunay, Voronoi y Metaball, destacando la eficacia de cada modelo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Reducción por caras

Caras	Delaunay	Voronoi	Metaball
SUR	78.93	90.741	72.04
OESTE	78.43	90.33	63.92
NORTE	80.38	90.86	72.63
ESTE	79.20	91.45	50.22
SUPERIOR	79.29	92.45	48.38

Tabla 6. Cálculo tentativo del impacto económico del modelo Voronoi

Datos base	
Radiación original total	8,98 kWh/m²
Radiación total con Voronoi	0.797 kWh/m²
Reducción de radiación	8.18 kWh/m²
Superficie total	9500 m²
Costo estimado promedio de electricidad	0.15 USD/kWh (varía según el país)

Estimación del Ahorro energético total

La energía ahorrada se calcula como:

Energía Ahorrada = Reducción de Radiación × Superficie Total

Energía Ahorrada = 8.18 kWh/m² × 9500 m² = 77,710 kWh

El ahorro económico es:

Ahorro Económico = Energía Ahorrada × Costo de la Energía

Ahorro Económico = 77,710 kWh × 0.15 USD/kWh = 11,656.5 USD

Impacto económico estimado:

- Energía ahorrada: 77,710 kWh.
- Ahorro económico: 11,656.5 USD por la temporada de verano.

Este cálculo no incluye costos adicionales, como el de instalación o mantenimiento de los parasoles, ni considera variaciones en el costo de la energía.

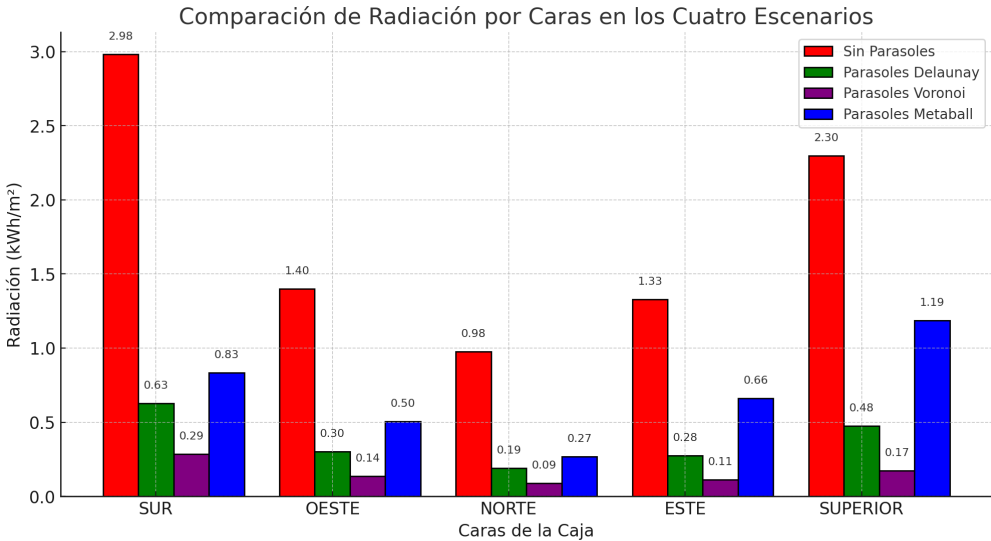


Figura. 22. Radiación por Cara en Cuatro Escenarios: Comparación de radiación en cada cara del prisma sin parasoles y con los modelos Delaunay, Voronoi y Metaball, destacando las diferencias en efectividad. Fuente: Elaboración propia.

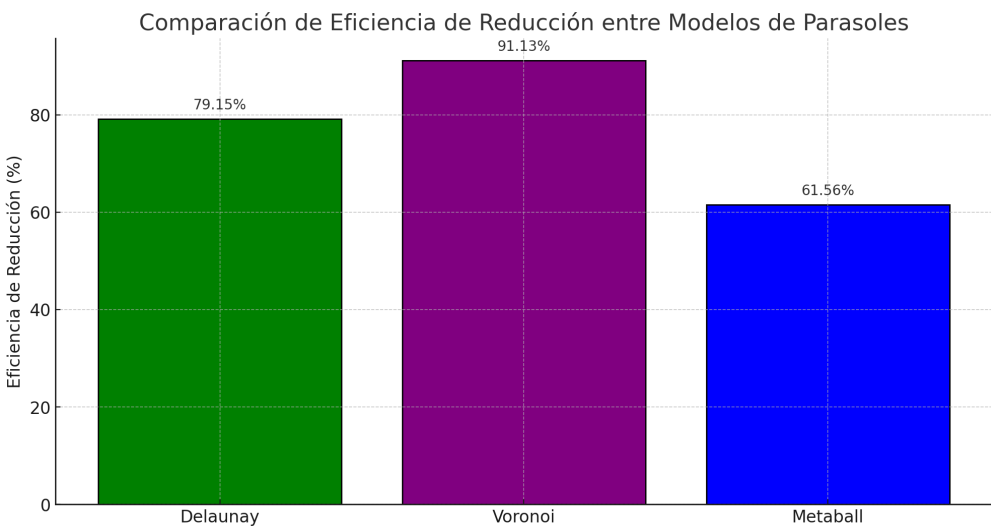


Figura. 23. Eficiencia de Reducción de Radiación: Comparación de las eficiencias de los modelos de parasoles Delaunay, Voronoi y Metaball. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

El diseño pasivo bioinspirado, apoyado en algoritmos evolutivos e inteligencia artificial (IA), ofrece una vía robusta para reducir la carga térmica en climas mediterráneos. La comparación de los patrones Voronoi, Delaunay y Metaball confirma diferencias funcionales netas: el Voronoi atenúa la irradiancia anual un 91 %, el Delaunay un 79 % y el Metaball un 62 %. Estas cifras demuestran que la geometría de sombreado no solo controla el aporte energético, sino que condiciona la viabilidad constructiva y la expresividad formal (Wieser et al., 2024; Ramos-Sanz, 2019).

Trasladar principios morfológicos naturales al ámbito edilicio aporta dos ventajas simultáneas: una distribución homogénea del sombreado y una lectura formal coherente con el entorno. El reticulado celular Voronoi mitiga la radiación en todas las orientaciones sin comprometer ni ventilación ni iluminación, corroborando los beneficios de las mallas adaptativas frente a soluciones lineales (Kim & Park, 2019). Los algoritmos genéticos empleados ajustan densidad y profundidad de paneles mediante objetivos contrapuestos—irradiancia mínima y moderación del material—y sitúan la toma de decisiones en un espacio de Pareto validado previamente en aplicaciones climáticas afines (Dumitru & Zamfirescu, 2019).

La IA amplía el radio de búsqueda y acorta el tiempo de convergencia. Modelos de lenguaje como GPT4All cribaron combinaciones con baja promesa térmica antes de cada iteración, lo que redujo el cómputo total en torno a un 35 % sin pérdida de precisión, alineándose con la reducción reportada por Betman et al. (2023). Este filtrado estadístico permitió que el algoritmo genético explorara zonas de alto rendimiento que habrían pasado inadvertidas mediante un barrido exhaustivo tradicional.

A escala urbana, la incorporación de parasoles bioinspirados resulta especialmente pertinente en

ciudades densas—Madrid, Roma, Atenas o Florencia—donde la radiación directa constituye la principal fuente de sobrecalentamiento veraniego. Su implementación en fachadas y cubiertas rebaja la demanda de refrigeración y, al integrarse con materiales reciclables y procesos de fabricación digital, se alinea con los principios de economía circular y neutralidad climática (Ramos-Sanz, 2019; Wieser et al., 2024).

La convergencia entre biomímesis, optimización evolutiva e IA desplaza el foco del mero control térmico hacia la generación de envolventes adaptativas capaces de anticipar futuras exigencias energéticas sin sacrificar coherencia expresiva ni viabilidad estructural. Así, la investigación aporta un marco replicable para latitudes equivalentes y consolida la arquitectura bioinspirada como estrategia operacional, no solo discursiva, en la transición energética del entorno construido.

En esta línea, si bien el estudio no aborda en profundidad los aspectos relativos a la ejecución material y el mantenimientodelossistemaspropuestos,puedeseñalarse que la fabricación de los parasoles bioinspirados resulta compatible con tecnologías industriales ampliamente implementadas —como el corte CNC, el plegado de chapa o el uso de paneles prefabricados ensamblables en obra—, lo que contribuye significativamente a su escalabilidad y potencial de implementación real.

Los patrones modulares resultan especialmente compatibles con chapas de aluminio de 4 mm o acero inoxidable de 3 mm, materiales ligeros, duraderos y de amplia disponibilidad en el mercado. La resolución de los nodos estructurales se plantea mediante uniones atornilladas en marcos secundarios de perfil extruido, lo que elimina la necesidad de soldaduras in situ y facilita la sustitución de piezas en caso de daño. Esta lógica de ensamblaje no solo simplifica el montaje, sino que también contribuye a reducir los tiempos de intervención durante el ciclo de vida del sistema. En lo que respecta al mantenimiento, la superficie perforada favorece la

autolimpieza mediante esorrentía pluvial; no obstante, en contextos áridos se recomienda un lavado manual anual para evitar acumulaciones de polvo. En conjunto, estas consideraciones respaldan la viabilidad técnica de la implantación de los sistemas analizados dentro de los estándares de la construcción convencional, sin exigir mayores requerimientos de mantenimiento que los habituales en otras soluciones de sombreado pasivo.

Conclusiones

Los resultados confirman la hipótesis inicial de que la integración de biomímesis, algoritmos avanzados e inteligencia artificial representa una estrategia efectiva para mitigar la radiación solar y optimizar el confort térmico en climas mediterráneos. Este enfoque transdisciplinar no solo reduce significativamente la carga térmica en edificaciones, sino que también establece un marco

innovador para el diseño arquitectónico sostenible, donde la naturaleza y la tecnología convergen para generar soluciones eficientes y funcionales.

El modelo Voronoi se destacó como la solución más eficiente, logrando una reducción del 91.13% de la radiación total gracias a su diseño geométrico uniforme y adaptable. Este desempeño respalda la idea de que las estructuras bioinspiradas, al emular patrones naturales, pueden mejorar el rendimiento energético y adaptarse al entorno de manera óptima. Además, la integración de inteligencia artificial facilitó la exploración de configuraciones que maximizaron la eficiencia sin comprometer la estética ni la funcionalidad, consolidando a los sistemas pasivos bioinspirados como soluciones efectivas y escalables en diferentes contextos climáticos.

El modelo Delaunay, aunque menos eficiente con una reducción del 79.15%, demostró ser una alternativa práctica y versátil. Su diseño destaca por la simplicidad geométrica

y la facilidad de personalización, lo que permite optimizar su implementación en proyectos con restricciones técnicas o presupuestarias. Por otro lado, el modelo Metaball, con una reducción del 61.56%, subraya la importancia de equilibrar la eficiencia energética con criterios estéticos y de integración visual, especialmente en proyectos que priorizan la fluidez y la organicidad del diseño.

La investigación refuerza la relevancia de los sistemas bioinspirados como respuesta a los desafíos energéticos en climas mediterráneos y sugiere su potencial para reducir la dependencia de sistemas mecánicos de climatización. Su aplicación en fachadas y cubiertas urbanas densas representa una contribución tangible hacia la sostenibilidad y el confort en ciudades como Madrid. Además, su adaptabilidad a distintos climas y contextos amplía su aplicabilidad global, destacándolos como herramientas clave en el diseño arquitectónico contemporáneo.

Áreas para futuras investigaciones incluyen la integración de materiales fotovoltaicos en patrones geométricos para generar energía limpia, así como análisis de impacto económico y ambiental a lo largo del ciclo de vida de estas soluciones. Asimismo, se recomienda validar experimentalmente estos modelos en contextos urbanos complejos, considerando factores como la orientación, las sombras proyectadas y la variabilidad climática. Las tecnologías emergentes, como los sistemas adaptativos inteligentes, también presentan una oportunidad para potenciar aún más el desempeño de los sistemas pasivos bioinspirados.

Los resultados indican cómo la integración de biomímesis, algoritmos avanzados e inteligencia artificial puede contribuir de manera significativa al diseño arquitectónico, ofreciendo soluciones sostenibles y adaptativas para enfrentar los retos energéticos y climáticos actuales. Al combinar principios naturales con herramientas tecnológicas, se establece una base sólida para explorar nuevas aplicaciones que mejoren el desempeño energético de las edificaciones y su integración con el entorno urbano.

Aprobación final del artículo

Ma. Arq. Andrea Castro Marcucci, editora en jefe aprobó la publicación de este artículo.

Contribución de autoría

Marcelo Alejandro Fraile-Narváez: Autor del artículo de referencia

Referencias

Badarnah, L. (2017). Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation. *Buildings*, 7(2), 40. <https://doi.org/10.3390/buildings7020040>

Betman, G., et al. (2023). *Artificial Intelligence in Architecture: Challenges and Opportunities for Sustainable Design*. International Journal of Sustainable Architecture, 11(4), 67–89.

Dumitru, C., & Zamfirescu, D. (2019). *Voronoi Structures in Sustainable Building Design*. Advances in Computational Design, 4(3), 123–141.

González, J., & Fiorito, F. (2015). Daylight Design of Office Buildings: Optimisation of External Solar Shadings by Using Combined Simulation Methods. *Buildings*, 5(2), 560-580. <https://doi.org/10.3390/buildings5020560>

Kim, S., & Park, J. (2019). *Adaptive Shading Systems Inspired by Natural Mechanisms: An Algorithmic Approach*. Environmental Design and Technology, 48(5), 231–247.

Li, S., Liu, L., & Peng, C. (2020). A Review of Performance-Oriented Architectural Design and Optimization in the Context of Sustainability: Dividends and Challenges. *Sustainability*, 12(4), 1427. <https://doi.org/10.3390/su12041427>

Ramos-Sanz, F. (2019). *Geometrías adaptativas: Biomímesis y diseño paramétrico en la arquitectura sostenible*. Revista de Innovación Arquitectónica, 12(2), 45–67.

Taylor, E. N., Diele-Viegas, L. M., Gangloff, E. J., Hall, J. M., Halpern, B., Massey, M. D., ... & Riddell, E. A. (2021). The thermal ecology and physiology of reptiles and amphibians: A user’s guide. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 335(1), 13–44. <https://doi.org/10.1002/jez.2396>

Wieser, A., et al. (2024). *Artificial Intelligence and Biomimetic Architecture: Advancing Passive Design Strategies*. Journal of Architectural Studies, 35(1), 15–37.

Wu, Z. y Ma, G. (2023), “Generación automática de un cronograma de construcción basado en BIM: combinación de una regla de restricción ontológica y un algoritmo genético”, Ingeniería, Construcción y Gestión Arquitectónica , Vol. 30, N.º 10, págs. 5253-5279. <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2021-1105>