

Cecilia E Sandoval-Ruiz

Ingeniero Electricista en 2002 egresada de la Universidad de Carabobo, Magister en Ingeniería Eléctrica en 2007 y Doctora en Ingeniería en 2014. Ha sido Profesora Titular en Maestría de Ingeniería Eléctrica en 2017 del Postgrado de Ingeniería UC. Investigadora acreditada en el PEII - Nivel C. Ha publicado más de 50 artículos científicos en su área de investigación: Tecnologías Sostenibles, Optimización de Sistemas de Energías Renovables ERNC Redes Neuronales aplicadas a control avanzado, Diseño Colaborativo y Configuración de Hardware en VHDL.

Recepción: 04/10/2025 - Aprobación: 11/11/2025

$\Lambda g_{\mu\nu}$ UN ATRACTOR MATEMÁTICO PARA ARQUITECTURA GERMINAL: LA FAUNA COMO EJE DE DESARROLLO DEL ESPACIO TOPOLÓGICO

RESUMEN

Nuevos conceptos emergentes como RIS (superficies inteligentes reconfigurables, por sus siglas en inglés), modularidad, complejos habitacionales desmontables, estructuras desplegables y propiedades elastocalóricas de los materiales, permiten avanzar en el objetivo de diseños arquitectónicos más sostenibles, mediante atractores geométricos que interactúan con el medio para mejorar la eficiencia respecto a un parámetro objetivo y restablecer las condiciones de equilibrio ambiental. Dado el vacío epistemológico en arquitectura neuro-adaptativa, en el campo de la biomimética se plantea su definición mediante una investigación teórica. El método abordado consta de la descripción paramétrica de estructuras naturales, la geometrización mediante concatenación de curvas cíclicas para deducir las ecuaciones matemáticas con las propiedades requeridas para el diseño sostenible. Se considera como criterio la necesidad de disminuir el impacto del uso de materiales convencionales en el diseño arquitectónico y la reciclabilidad en un modelo circular. El aporte comprende la identificación de operadores matemáticos para inferir un atractor como elemento modelador del tejido estructural. Al definir las superficies de la obra arquitectónica como una composición de enlaces y cámaras reconfigurables, mediante una descripción de comportamiento de variables físicas e intercepción de curvas en el espacio proyectivo, se logran capas dinámicas de redes de difracción para definir una envolvente adaptativa, sobre los criterios de ahorro energético, minimización de recursos y sostenibilidad.

Palabras clave: arquitectura definida por software, atractores modeladores, inteligencia biomimética, geometría proyectiva, optimización, síntesis generativa.

$\Lambda g_{\mu\nu}$ A MATHEMATICAL ATTRACTOR FOR GERMINAL ARCHITECTURE: FAUNA AS AN AXIS OF DEVELOPMENT OF TOPOLOGICAL SPACE

ABSTRACT

Emerging concepts such as RIS (reconfigurable smart surfaces), modularity, demountable housing complexes, deployable structures, and the elastocaloric properties of materials allow progress toward more sustainable architectural designs. This is achieved through geometric attractors that interact with the environment to improve efficiency relative to a target parameter and restore environmental equilibrium. Given the epistemological gap in neuroadaptive architecture within the field of biomimicry, this study proposes its definition through theoretical research. The method employed consists of the parametric description of natural structures, geometrization through the concatenation of cyclic curves to deduce the mathematical equations with the properties required for sustainable design. Criteria for this approach include the need to reduce the impact of conventional materials in architectural design and to promote recyclability within a circular model. The contribution involves identifying mathematical operators to infer an attractor as a modeling element of the structural fabric. By defining the surfaces of architectural work as a composition of reconfigurable links and chambers, through a description of the behavior of physical variables and the intersection of curves in projective space, dynamic layers of diffraction gratings are achieved to define an adaptive envelope, based on the criteria of energy saving, resource minimization, and sustainability.

Keywords: software-defined architecture, modeling attractors, biomimetic intelligence, projective geometry, optimization, generative synthesis.

$\Lambda_{g_{\mu\nu}}$ UN ATTRATTORE MATEMATICO PER L'ARCHITETTURA GERMINALE: LA FAUNA COME ASSE DI SVILUPPO DELLO SPAZIO TOPOLOGICO

RIASSUNTO

Nuovi concetti emergenti come RIS (reconfigurable smart surfaces), modularità, complessi abitativi smontabili, strutture dispiegabili e proprietà elastocaloriche dei materiali consentono di avanzare verso l'obiettivo di progetti architettonici più sostenibili. Questo obiettivo va raggiunto attraverso attrattori geometrici che interagiscono con l'ambiente per migliorare l'efficienza rispetto a un parametro obiettivo e ripristinare le condizioni di equilibrio ambientale. Dato il vuoto epistemologico nell'architettura neuro-adattiva, nel campo della biomimetica viene proposta la definizione attraverso una ricerca teorica. Il metodo adottato consiste nella descrizione parametrica delle strutture naturali, nella geometrizzazione tramite concatenazione di curve cicliche per dedurre le equazioni matematiche con le proprietà richieste per la progettazione sostenibile. Come criterio si considera la necessità di ridurre l'impatto dell'uso di materiali convenzionali nella progettazione architettonica e la riciclabilità in un modello circolare. Il contributo comprende l'identificazione di operatori matematici per dedurre un attrattore come elemento modellante del tessuto strutturale. Definendo le superfici dell'opera architettonica come una composizione di collegamenti e camere riconfigurabili, attraverso una descrizione del comportamento delle variabili fisiche e l'intersezione delle curve nello spazio proiettivo, si ottengono strati dinamici di reti di diffrazione per definire un involucro adattivo.

Parole chiave: architettura definita dal software, attrattori modellatori, intelligenza biomimetica, geometria proiettiva, ottimizzazione, sintesi generativa

INTRODUCCION

En el año 2025, se conmemoran cien años desde el inicio de la teoría cuántica, siendo uno de sus principios fundamentales la dualidad onda-partícula, un fenómeno físico que necesariamente se debe contemplar en el estudio, ya que si hubiera una manera inteligente de remediar el impacto nuestras obras –en el contexto de la arquitec-

tura–, sería diseñando de forma armónica con la geometría las obras de la naturaleza. Y es sobre esta consigna que se plantea una investigación teórica de la inteligencia biomimética, para la optimización fractal mediante algoritmos adaptativos iterativos.

Ante la disyuntiva estudiada respecto a la aplicabilidad de tecnologías emergentes al diseño arquitectónico, Del Blanco & Martín (2025) afirman que “las nuevas tecnologías son útiles para mejorar la representación de ideas arquitectónicas al facilitar un proceso creativo dinámico y colaborativo entre humanos y máquinas, promoviendo flujos de trabajo innovadores en la arquitectura”. Finalmente, se trata de un trabajo colaborativo donde la definición de objetivos y directrices demarcan el desarrollo del proyecto, por medio de la exploración de un conjunto de alternativas, midiendo el efecto de cambios mínimos en las condiciones iniciales sobre la evolución de la obra y su interacción.

A partir de paradojas como la cuadratura del círculo, ahora orientada al dominio discreto se logra interpretar la composición del patrón de difracción, como la superposición dimensional de espacios geométricos abstractos, patrones de interferencia ondulatorios, geometría proyectiva y la coexistencia de estados cuánticos, estos conceptos soportados sobre operadores algebraicos en campos finitos de Galois, definiendo los nodos como los elementos del campo resultante. En física cuántica, la proyección de un espacio geométrico permite reconocer estructuras topológicas equivalentes entre elementos geométricos distintos. Los estados cuánticos serían las posibles estructuras que coexisten en un patrón proyectivo, sobre el que se reflejan ondas estructuradas por luz.

Acá se plantea un concepto innovador: un atractor del campo geométrico $\Lambda_{g_{\mu\nu}}$, éste es un patrón de interacción hacia el cual el sistema dinámico tiende a evolucionar, atrayendo un conjunto de trayectorias hacia un punto de convergencia o estado de equilibrio. Este modelador se puede aplicar para formular una configuración espacial en el diseño arquitectónico, mediante algoritmos inteligentes, estableciendo como patrón de referencia el comportamiento de los mecanismos de eficiencia energética de las plantas y fauna de un ecosistema específico. El objetivo es mimetizar la obra con el paisaje, respetando esencialmente el desarrollo de los espacios en armonía con la naturaleza y los ecosistemas de especies nativas.

Donde la geometría proyectiva centrándose más

en desarrollos analíticos de tipo matemático (González & Martín, 2023) resultando una herramienta de descripción de la arquitectura. Un atractor como objeto matemático, pero a la vez como directriz del flujo entre la obra arquitectónica y su entorno, diseñado para atraer a polinizadores hacia jardines conceptualizado de forma compatible con la biosfera local. Un ejemplo lo encontramos en el nopal como andamiaje estructural, elemento constructivo y dinamizador del tejido urbano. Así se establece una capa de biomateriales, tejidos vivos que se regeneran de forma estacional, coberturas estructurales que integran semillas para crear espacios germinales.

La inteligencia biomimética parte del principio de que la memoria está tejida en el espacio matemático y la red neuronal se encarga de decodificar patrones de optimización de eficiencia del entorno natural para aplicarlos en la formación, síntesis y evolución del diseño arquitectónico. Desde el enfoque tecnológico, un notable ejemplo se observa en materiales inspirados en, como el desarrollado por Maigne (2020), aplicando el principio de las auroras boreales donde “las partículas luminiscentes de la atmósfera degradan la alta energía (gamma, UV) a un estado de baja energía (luz visible), la tecnología se basa en este concepto y utiliza partículas con un funcionamiento similar”. Desde la conceptualización del espacio arquitectónico como agente de bienestar se plantea el estudio de interacciones e impacto del diseño, la estructuración del espacio y los elementos mediante la luz natural, hasta la reprogramación de la biología celular para la salud de los habitantes del espacio arquitectónico, aplicando principios de resincronización cíclica con el ritmo establecido por la posición solar.

Y así se forma una obra mediante capas concatenadas, la capa flujo dinámica que permite la captación de energía y tratamiento eficiente del agua mineralizada a través de elementos del entorno, la capa biosintética y capas de la red cristalina Lattice, donde se propone el uso de materiales inteligentes, como cristales inteligentes para optimización bioclimática, por reflexión selectiva del longitudes de ondas de luz solar incidente, para la protección de aves, mediante un mecanismo óptico anticolidión. El urbanismo sustentable contempla terrazas de cultivos, fuentes de agua naturales para la fauna, en el marco de espacios de conservación y calidad de vida para todas las especies.

Un aspecto relevante es el análisis del patrón de radiación de la obra sobre el entorno próximo y su impac-

to, tal como se revela un patrón de *Chladni* –sobre una superficie por el efecto de las ondas incidentes– se construye un espacio geométrico por la superposición de ondas, un patrón de interferencia que describe la topología del objeto matemático proyectado. Estas líneas de flujo convergen en un atractor que recorre todos los puntos de la simetría radial para las k capas que definen el espacio matemático. Y es a partir de este objeto matemático con propiedades definidas por el campo físico, que se desarrolla la estructura del tejido arquitectónico.

En este sentido, un sistema arquitectónico comprende la caracterización topológica del campo de interacción ∇G , las variables bioclimáticas $\Psi(r,t)$, y las ecuaciones del atractor de la capa envolvente –en términos de energía, frecuencia y vibración, que permite el paso selectivo de ciertas longitudes de onda en resonancia con el diseño, mediante elementos activos como concentradores, moduladores y filtros regenerativos–.

En la optimización de los coeficientes se aplican algoritmos inteligentes para el diseño de materiales funcionalizados, superficies inteligentes reconfigurables, arreglos ópticos y lentes fluidodinámicos –un sumidero de flujo que proyecta la superficie hacia una singularidad activa y se realimenta, en forma cíclica, sobre las curvas directrices–. De esta manera, el diseño converge hacia las órbitas que se escriben en los atractores, el sistema se restaura y el orden gravita en una geometría que se respalda en el álgebra.

Así se plantea la inteligencia biomimética como una herramienta potencial para procesar altos volúmenes de datos de sistemas urbanos complejos. Donde la selección de las variables de optimización es crucial para simplificar los modelos de forma eficiente y la parametrización sistemática del atractor de moldeado e interacción de las estructuras arquitectónicas. Desde la composición sustentable de materiales, la mitigación de efectos erosivos por viento y lluvia en las fachadas de edificios, hasta mecanismos avanzados de compensación para amortiguación de vibraciones, efectos sísmicos y variaciones en el nivel freático, que permitan avanzar hacia una configuración dinámica de los espacios arquitectónicos y urbanos, de forma adaptativa a las condiciones del entorno.

Las condiciones de borde pasan a ser los espacios naturales, la figura de contexto de la obra, la banda de reflexión de la luz que incide en la obra y el *target* –el objetivo de entrenamiento que evalúa el ajuste de parámetros–,

permitiendo estimar la convergencia del diseño urbano hacia la compatibilidad con los elementos del paisaje. La inteligencia bioclimática se entrena y aprende de los paisajes muestrales, el hábitat original del espacio diseñado, las características propias de la biosfera teniendo como criterio la mínima intervención y el mínimo impacto. La red identifica la función objetivo y sobre los datos del entorno optimiza los diseños, con la finalidad de evolucionar hacia un estado de equilibrio.

Algunos estudios (*Dai et al., 2025*) aplican múltiples capas de optimización para sinergizar las diversas fuentes de energías renovables en un modelo de gestión energética de los edificios inteligentes. Y es que los mecanismos inteligentes pueden aportar velocidad en el tratamiento de datos y soluciones más simples de forma colaborativa, por lo que es una propuesta emergente para el diseño arquitectónico resiliente. Por lo que un neuro-modelador de gestión de recursos e interacción con el entorno resulta un soporte para la toma de decisiones en tiempo real (*Lezama, 2024*) dando seguridad al complejo urbanístico sin menos cabo de la regeneración de los espacios naturales.

Problemática y estado del arte

El sector de la construcción es responsable de aproximadamente el 40% de las emisiones de carbono a nivel mundial (*Li et al., 2024*), lo que lo convierte en un área crítica para la implementación de estrategias de arquitectura sostenible –considerando la composición de los materiales, la reconfiguración estructural óptima, la composición geométrica armónica y por la capacidad de restauración cíclica del entorno–, sobre esta premisa se estudian propuestas técnicas de arquitectura definida por software, materiales configurables, mecanismos inteligentes y diseño biomimético.

Esto hace evidente la necesidad de necesidad de replantear la ingeniería estructural convencional y sistema de cimientos, dando lugar al concepto híbrido de cimentación flexible, estructuras reconfigurables e inteligencia biomimética. Además, que esta estrategia permite adaptar la configuración de forma dinámica, a través de estructuras móviles y plegables, así el diseño de una arquitectura flotante, autosoportadas y pasarelas suspendidas, lo que se perfila como una técnica de diseño más sostenible en el concepto desarrollado en la presente investigación.

La arquitectura sustentable tiene como objetivo optimizar la interacción con el entorno, pero la definición del objeto matemático es un factor clave, es allí donde la forma de aplicar los algoritmos inteligentes representa un reto para el diseñador. En esta investigación se plantea optimizar sobre las ecuaciones geométricas, así el sólido en revolución que describe el atractor del mecanismo de seguimiento solar de una flor puede ser definido como la función objetivo del patrón de comportamiento de la obra arquitectónica.

De esta forma, la optimización se desarrolla por la configuración del urbanismo considerando como criterio la orientación del complejo arquitectónico respecto a la radiación solar incidente en (KWh/m²). En configuraciones de alta eficiencia energética se pueden aplicar la herramienta de estimación, como explorador solar, que permite entre otras funciones calcular de radiación solar incidente, optimizar el ángulo de inclinación y azimuth, sobre modelos matemáticos (*Universidad de Chile, 2025*). Es allí donde se combinan herramientas de estimación de datos, mediciones en sitio y técnicas inteligentes para recalcular la posición óptima de los elementos arquitectónicos funcionales (ver Figura 1), siendo las estructuras replegables un mecanismo de adaptación para lograr este objetivo de manera armónica.

Para todos estos sistemas se plantean condiciones de seguridad en los complejos inteligentes, a través de

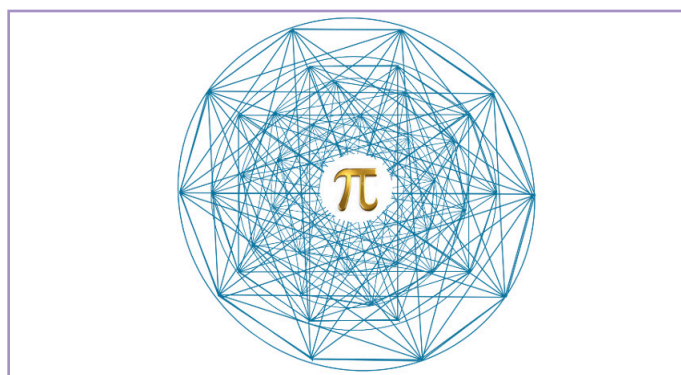


Figura 1: Adaptación de coeficientes del atractor de seguimiento solar. **Fuente:** Elaboración propia

sistemas de aislamiento acústico y electromagnético – para disminuir el ruido e interferencia de ondas residuales en el ambiente–, sistemas antisísmicos –se consideran mecanismos de amortiguación basados en cilindros hidráulicos y pilotes basculantes para la captación de ener-

gía de las ondas sísmicas–, resistente al fuego –compuestos con materiales ignífugos– y sistema de aislamiento térmico –capa aislante mediante tecnología reflectante y cámaras de ventilación–.

Las nuevas técnicas inteligentes permiten predecir riesgos potenciales y respuestas oportunas en tiempo real, con el objetivo de garantizar la seguridad frente a condiciones climáticas extremas que pueden afectar una región geográfica. Donde se combinan tecnologías náuticas, como giroscopios y mecanismos basculantes, pueden desarrollar sistemas estabilizadores inspirados en el complejo mecanismo de reflejo óptico-vestibular (RVO) de las aves, que pueden mitigar el efecto de vibraciones.

La biomimética es un enfoque interdisciplinario revolucionario que se inspira en la inteligencia evolutiva de la naturaleza para desarrollar soluciones sostenibles y eficientes en arquitectura, ingeniería y ciencia de los materiales (Díaz-Parra *et al.*, 2025). Por su parte, Sandoval-Ruiz (2025a) describe la arquitectura biomimética como la síntesis estructural de patrones desarrollados sobre modelos matemáticos, una arquitectura inmaterial donde las ondas tienen un rol preponderante en el patrón de interacción. El nuevo paradigma de arquitectura neuro inteligente consta de incorporar estos modeladores matemáticos de atractores y espirales simétricas al diseño, composición, patrones de interferencia constructivos, desarrollos, restauraciones con inteligencia biomimética.

Entre las estrategias de sistemas de adaptación inteligente (Kurucan *et al.*, 2025) se pueden combinar redes neuronales de propagación hacia adelante (FFNN) –para control predictivo– y una capa de supervisión dinámica adaptativa –red neuronal convolucional (1D-CNN), para extraer características temporales y espaciales completas de los datos climáticos–. El diseñador de la obra puede emplear herramientas avanzadas para supervisión por aprendizaje por refuerzo de una red de profundidad dinámica, que aprende continuamente de la retroalimentación, ante escenarios desafiantes de alta varianza.

En investigaciones previas (Bölek *et al.*, 2023) se detallan las subcategorías de las técnicas inteligentes en el marco del diseño arquitectónico, donde se analizan sistemas expertos, aprendizaje de máquina, algoritmos evolutivos, optimización multiobjetivo, algoritmos generativos –clasificación de datos para desarrollo de ideas– y aprendizaje profundo, cada uno enfocado a tareas específicas de diseño y restauración. Por otra parte, aspectos

como las etapas del proyecto arquitectónico donde se pueden aplicar estas herramientas son abordados detalladamente (Matter & Gado, 2024).

DESARROLLO METODOLÓGICO

La teorización de la inteligencia biomimética en arquitectura comprende el estudio de alternativas de solución frente a la problemática del desarrollo urbanístico, para lograr la eficiente disminución de emisiones de calor residual y la remediación ambiental. Se requiere de un modelo extendido (Sandoval-Ruiz, 2021) que considere este componente de energía residual y su realimentación al sistema, formulado mediante ecuaciones paramétricas con coeficientes adaptativos, con un conjunto de objetivos de aprendizaje para la formulación del tejido arquitectónico inteligente, el método comprende la fractalización por capas. En la primera fase, se realizó una revisión sistemática de conceptos del tópico de estudio (Tabla I).

En la segunda fase, se planteó la geometrización (Sandoval-Ruiz, 2025c) de las estructuras biomiméticas, como la superposición de patrones para reconstruir la geometría referente.

Este proceso consiste en la observación, el estudio de los mecanismos y su eficiencia, reconociendo patrones de interferencia (Sandoval-Ruiz, 2025d) y deduciendo ecuaciones (Sandoval-Ruiz, 2025e), a través de cicloides y progresiones geométricas que permiten describir el comportamiento del atractor para moldear la dinámica de la formación geométrica. Un caso de estudio es el desarrollo de árboles: identificando la relación de la luz solar en la direccionalidad del tallo, patrón en la formación de raíces, registro secuencial de la progresión geométrica de ramas de sustentación estructural, intervalos de crecimiento, optimización de recursos y reconocimiento de simetrías de equilibrio. Este tipo de análisis permite correlacionar parámetros como luz solar, dosificación de agentes constructivos y soportes orientables para la direccionalidad de la estructura. La modelización de palmeras con proporciones Fibonacci, arrecifes coralinos con geometría hiperbólica, órbitas elípticas y ecuaciones geodésicas (Sandoval-Ruiz, 2025f) de seguimiento solar. Todo esto para definir patrones óptimos en la distribución geométrica de la flora y tejidos biológicos de la fauna, en condiciones ambientales del ecosistema del proyecto.

Técnicas	Conceptualización biomimética del atractor generativo en proyectos arquitectónicos
Arquitectura Germinal	Reconocimiento de elementos esenciales de la naturaleza para aplicarlos en la arquitectura (Giacomán & Sartor, 2023), desarrollando un código semilla.
Biomimética	La envolvente del edificio como una interfaz de acoplamiento amortiguado entre los espacios interiores y exteriores, donde se pueden lograr ganancias significativas de energía, aprendiendo de la naturaleza y diseñando sistemas adaptativos (Öztürk <i>et al.</i> , 2024). El método de diseño biomimético que define la obra como un organismo integrado en su entorno, reduciendo sus efectos nocivos y preservando la biodiversidad (Mohammed, 2023). Las estructuras biomiméticas en la captación de energía (Sandoval-Ruiz, 2023).
Tecnologías Generativas	La arquitectura paramétrica es una técnica de diseño arquitectónico que utiliza algoritmos, criterios y programación para crear formas y estructuras complejas (Segui, 2022), aplicando tecnologías para modelos regenerativos con ajustar de parámetros de la configuración.
Superficies Inteligentes	La envolvente responsiva (Corporan <i>et al.</i> , 2025) se refiere al diseño una superficie, o fachada, que se adapta y responde activamente a estímulos como condiciones climáticas, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética.
Diseño Computacional	En el marco biodigital (Fraile, 2021) se analizó la morfogénesis donde la naturaleza es fuente de inspiración en los procesos de ideación del diseño y las herramientas computacionales son aceleradores para lograr minimizar los tiempos de convergencia hacia modelos geométricos más eficientes y compatibles con el entorno, donde el atractor matemático (Sandoval-Ruiz, 2024) genera la forma y la esencia proyecto.

Tabla I. Teorización del atractor arquitectónico como patrón dinámico de formación del tejido estructural

En la tercera fase, se conceptualizó el atractor, como objeto matemático “abstracto” que define las características del diseño, a través de la cuenca del atractor, mínimos locales y superficies de asentamiento, donde se desarrollará la estructura, una especie de andamiaje inmaterial que da forma a la composición. El concepto es aprender de la naturaleza, obtener un código descriptivo mediante ecuaciones matemáticas, replicar las condiciones del atractor y desarrollar un modelo sobre soportes geométricos, que comprende la definición de las tecnologías, incorporación de un término de compensación simétrica para restablecer el equilibrio, observación de parámetros y coeficientes físico, a fin de establecer la correspondencia, y sistematización del modelo de regeneración de condiciones ambientales.

Entre las técnicas de análisis se tiene regresión lineal múltiple y clustering para el modelado de datos climáticos de incidencia solar, con estos avances buscan definir “una arquitectura que imite el pensamiento biológico, con el objetivo de producir sistemas autónomos y sostenibles. Los edificios generados desde este punto de vista pueden obtener energía mediante la fotosíntesis, regular su temperatura de forma autónoma, purificar el aire interior, optimizar su rendimiento y reducir así su impacto ambiental” (Fraile-Narváez, 2025).

En tal sentido, la combinación de tecnologías de superficies reconfigurables inteligentes RIS –tanto a nivel de replegado en tiempo real, ajuste de nivel, orientación inteligente con seguimiento de variables ambientales, formulación de lentes reflectantes y matriz elastocalórica, mediante un arreglo de tensores, para el control de la recuperación de calor ambiental para aplicaciones de uso habitacional–, descripción de modelos reconfigurables en VHDL y redes inteligentes modeladoras de atractores arquitectónicos.

De la etapa de análisis se identificó una correspondencia del operador matemático de los modelos neuronales y un atractor del campo físico, que permite mediante el ajuste de coeficientes de las ecuaciones descriptivas optimizar la respuesta del sistema, se trata del operador LFSR una estructura de memoria con realimentación lineal, sobre la cual se implementa un término de convolución entre los coeficientes físicos del atractor que modela el sistema arquitectónico, la energía incidente, potencial residual y reflejada.

Así se plantea la aplicación de cometas elastocalóricas como captadoras de energía renovable. Se desarrolló el modelo, con un término de compensación simétrica, donde se considera el efecto, entrelazamiento e impacto sobre el ambiente, configuración geométrica de la trayectoria de la superficie y balance de energía.



Geometría del mecanismo de despliegue



Disposición de las brácteas en ángulo $<\pi$



Rosa polar (5, 1.618)



Arreglo de hipocicloide (89,21)



Figura 2: Geometrización biomimética con $r_i(\theta) = i + f(\cos\theta + \pi/2)$. (a) Progresión geométrica del mecanismo del pavo real (fauna) y helecho (flora). (b) Aproximación a geometría hiperbólica de las brácteas de Buganbilia. (c) Distribución de las espigas del diente de León. (d) Geometría de la Passiflora como una concatenación de Hipocicloide (89,21) externa, rosa polar (3,1) interna. **Fuente:** Composición del autor, 2025

De todo lo anterior, se postuló la definición de atractores y objetos geométricos portables para definir tensores con invariantes por la relación relativa y entrelazamiento, a fin de armonizar el diseño con el potencial del entorno. Una formulación matemática para la composición de patrones de interferencia autocompensados, que se anulan creando espacios de vacío acústico, en un arreglo aditivo de ondas superpuestas que logran un objetivo armónico.

Se plantea así, la bóveda como un atractor geométrico de flujo, que se proyecta en un punto focal creando una composición arquitectónica. Por su parte, los rose-tones son rendijas que crean una red de difracción y la superposición de ondas crean un espacio modulado con propiedades específicas. De esta manera, la identificación de patrones, modelado y optimización de estas estructuras es la siguiente etapa del diseño arquitectónico basado en inteligencia biomimética.

La selección de las variables de optimización, la arquitectura de la red neuronal de aprendizaje y los parámetros de los algoritmos de entrenamiento son determinantes en la simplificación del problema, la tasa de con-

vergencia y la eficiencia de los resultados. Pero, aparece un aspecto adicional y es la composición armónica del diseño arquitectónico, donde se recurre a la contemplación de la naturaleza. En este caso, las técnicas de reconocimiento de patrones y modelos de regresión para estudiar el efecto de cada variable en el sistema vienen a representar el equivalente tecnológico a las prácticas de biomiméticas –de observar, comprender y aplicar principios o mecanismos de la naturaleza para resolver problemas arquitectónicos y diseñar soluciones innovadoras y sostenibles–, una red que puede emular este proceso está más cercana a alcanzar la meta de un diseño responsable.

Un atractor referencial es la dinámica de interacción de un glaciar, considerando el efecto de la gravedad sobre la masa de hielo, la erosión –que moldea valles y cuencas semicirculares, en forma de anfiteatro, sobre la zona de acumulación del glaciar– y el flujo acelerado –que origina las cascadas de hielo– éste permite aprender de la formación estructural e ingeniería de tejidos, tanto en estudios regenerativos de estos monumentos naturales, como en la simulación de síntesis estructural para la arquitectura generativa.

RESULTADOS

Para lograr los objetivos de seguridad y adaptabilidad de los complejos arquitectónicos y urbanismo se deben combinar técnicas de arquitectura –en el diseño de los espacios–, ingeniería –en el control de variables para soluciones específicas frente a riesgos locales y eficiencia energética– y un nuevo paradigma como la inteligencia biomimética –en la formulación de soluciones a la medida de las especificaciones climáticas y potencialidades de la región–. En este sentido, se definió una función de optimización sobre un caracterizador del campo geométrico –por medición de la densidad de líneas de flujo–, en términos del tensor de tensión-energía $\tau_{\mu\nu}$, al que está sometida la superficie envolvente –entiéndase la condición de borde–, curvatura del campo $g_{\mu\nu}$, densidad de energía Λ y vorticidad de recirculación de flujo rotacional $\Omega(r,k)$.

$$\nabla \otimes G = \Lambda g_{\mu\nu}(i) + \tau_{\mu\nu}(i - 1) \pm \Omega(r, t)$$

Las nuevas tecnologías inteligentes representan un acelerador del proceso de diseño de materiales donde se optimizan continuamente los parámetros experimentales para obtener nuevos materiales funcionales, así la aparición de la ciencia de los materiales impulsada por estos avances anuncia una nueva era con un potencial considerable para abordar los crecientes desafíos relaciona-

dos con la energía y el medio ambiente (Bai & Zhang, 2025). En este orden de ideas, se plantea la formulación a medida de los materiales biodegradables, a base de recursos locales y reciclabilidad, así la sostenibilidad en arquitectura puede ser impulsada por técnicas inteligentes, tanto en el diseño de materiales con alta resistencia estructural y ultra baja densidad, desarrollados por algoritmos de optimización multiobjetivo para explorar miles de geometrías, como en la configuración óptima de los espacios, la compensación de efectos y soluciones orientadas al equilibrio de la obra arquitectónica con el medio.

Es en ese escenario donde la tecnología inteligente viene a aportar alternativas valiosas desde la capacidad de cómputo, para procesar datos, modelos y aprendizaje del entorno, tanto en soluciones predictivas como ajustes dinámicos en tiempo real, adaptándose a las condiciones existentes. De las técnicas biomiméticas –inspiradas en procesos de desarrollo estructural de la naturaleza–, para el diseño arquitectónico se propuso la modulación de agentes constructivos, con el objetivo de obtener la cristalización de estructuras y moldeado de sustratos, a través de instrucciones codificadas, para establecer los enlaces de materia y energía reciclada.

Un aspecto fundamental es acercar el proyecto al compromiso ambiental, eficiencia energética y conservación de ecosistemas, diseñando lentes de flujo para protección especies de flora y fauna. Para esto se incorporan variables del atractor, a fin de medir la evolución de un

Requerimientos	Recursos Potenciales	Solución propuesta para la formulación inteligente
Protección de fauna ante agentes de riesgo como colisiones de aves	Tecnología óptica reflectante Filtros selectivos por longitud de onda Patrones Moiré de entretramado	Formulación de patrones e índices ópticos para visibilizar las superficies traslucidas, en base a la capacidad de las aves para detectar la luz ultravioleta y evitar colisiones.
Control de riesgos sísmicos y variación de nivel freático	Boyas marítimas Cilindros neumáticos o hidráulicos Cilindros neumáticos o hidráulicos	Osciladores acoplados al mecanismo basculante en las bases, mediante cilindros neumáticos de amortiguación dinámica y tecnología náutica por sistema giroscópico
Materiales ecológicos con análisis de propiedades físicas (resistencia, flexibilidad)	Arena de origen local Fibras de nopal y subproductos Residuos de conchas marinas Residuos textiles	Formular un material a base de carbonato de calcio de la arena y residuos marinos con fibras de nopal como gelificante, en la composición de paneles prefabricados. Reciclaje de textiles en paneles constructivos.
Moduladores de flujo de energías renovables	Alta Energía solar incidente Patrones de energía eólica en ráfagas	Cometas eólicas parasoles para redirigir el flujo de manera controlada hacia el atractor del complejo arquitectónico.
Modularidad, eficiencia, e infraestructura removible	Estructuras sobre pilotes/neumáticos Módulos replegables Captadores de energía	Cálculo del ángulo óptimo y formulación de un lente óptico para redirigir por elementos reflectantes la luz solar a puntos específicos.

Tabla II. Diseño de estrategias basadas en inteligencia biomimética

Capa Oculta Interna		Capa de Salida Interna (elementos del sistema convertidor)			Capa optimización externa	
Pesos	Umbrales	Pesos de la capa implementada			Umbrales	Targets de optimización
7.69	-1.62	6.34	0.93	5.24	8.95	% Filtrado espectral
1.15	-1.25	Capa Oculta	3 neuronas F.A: Sigmoide		épocas: 80	% calor regenerativo realimentado
3.73	1.96	Capa Salida	1 neurona F.A: Lineal		Error: 1.45	Seg. solar bioinspirado en plantas

* A partir de la arquitectura del modelo, se realizó el cálculo de los pesos y bias, en base a la radiación solar incidente y temperatura ambiental, para los coeficientes dinámicos de optimización se plantea el entrenamiento supervisado por bio-optimizadores de referencia, configurables en hardware.

sistema a través del seguimiento de trayectorias de flujo en la naturaleza –patrones de vuelo de las abejas, geometría de flores en el seguimiento solar–, todos estos mecanismo evolutivos, que pueden aportar valiosos criterios al momento de interpretación de las trayectorias sobre atractores, basados en una simetría de compensación que modela las dimensiones del espacio en capas con proporciones de los números trascendentes.

Estos modelos de inteligencia biomimética se presentan como herramientas no invasivas de estudio –gemelos de los sistemas arquitectónicos, donde se combina el modelado matemático, funcionalización de materiales mediante ondas e interpretación de principios físicos–, sobre el cual se puedan estudiar las respuestas de un sistema complejo. Esto interpretando las ondas incidentes de radiación solar y potencial eólico como un tejido de patrones de interferencia que se superponen para el modelado inteligente de una arquitectura resonante. De tal manera, que se conforma un campo físico el cual puede ser completamente caracterizado mediante una estructura matemática LFSR, estimando los coeficientes del polinomio generatriz y directriz del arreglo concatenado, mediante aprendizaje supervisado con targets, a partir de las mediciones de campo. En la tabla II se presenta la interpretación física y las propiedades geométricas y topológicas de la red –estas últimas no aparecen en modelos previos–.

La propuesta no solo es innovadora sino también ambiciosa en aspectos de técnicas constructivas de bajo impacto ambiental, apoyada en el aprendizaje biomimético, para replicar la formulación de estos procesos naturales de formación de estructuras. De esta manera, se busca aplicar los años de evolución de la naturaleza frente a su entorno, para diseñar una arquitectura más empática. Desde el modelado de los flujos incidentes, las interacciones de la obra con agentes erosivos, hasta la optimización de la recirculación de ventilación en espacios

Tabla III. Formulación de celdas de aprendizaje por capas del atractor geométrico

interiores, todos estos aspectos pueden ser delegados a un asistente de aprendizaje profundo, para establecer combinaciones estratégicas.

Con esta estrategia se pretende alcanzar una estructura de modelado matemático, basado en redes neuronales fractales, desarrollando las etapas en correspondencia con la escala. Las etapas pueden ser modeladas como una curva de nivel, con los datos de las trayectorias geodésicas, a fin de concatenar las k etapas de las ecuaciones elípticas resultantes, considerando patrones de radiación solar y rosa de viento, para el ajuste dinámico de los ángulos de incidencia, mediante los coeficientes de las elípticas (Tabla III).

Por otra parte, en el caso de moduladores de luz solar dinámicos, los patrones ópticos se construyen mediante ecuaciones de curvas elípticas, así se establece la relación geométrica ε de forma paramétrica, para la proyección de luz solar selectiva en el plano. Siendo R el radio de la circunferencia fija y r el de la circunferencia que gira en un ángulo π , en el caso de las coordenadas de altura en k etapas.

Discusión de Resultados

En esta investigación se ha propuesto una teoría de arquitectura sostenible sobre las bases de teoría de la información, específicamente en el área de códigos en álgebra de campos finitos, es un enfoque multidisciplinario, en el que se aplican conceptos matemáticos y principios físicos de óptica y fluidodinámica, como estrategia para métodos constructivos basados en la codificación de recursos renovables para la configuración del tejido arquitectónico, minimizando el consumo de materiales y energía durante la vida útil del proyecto y mejorando la

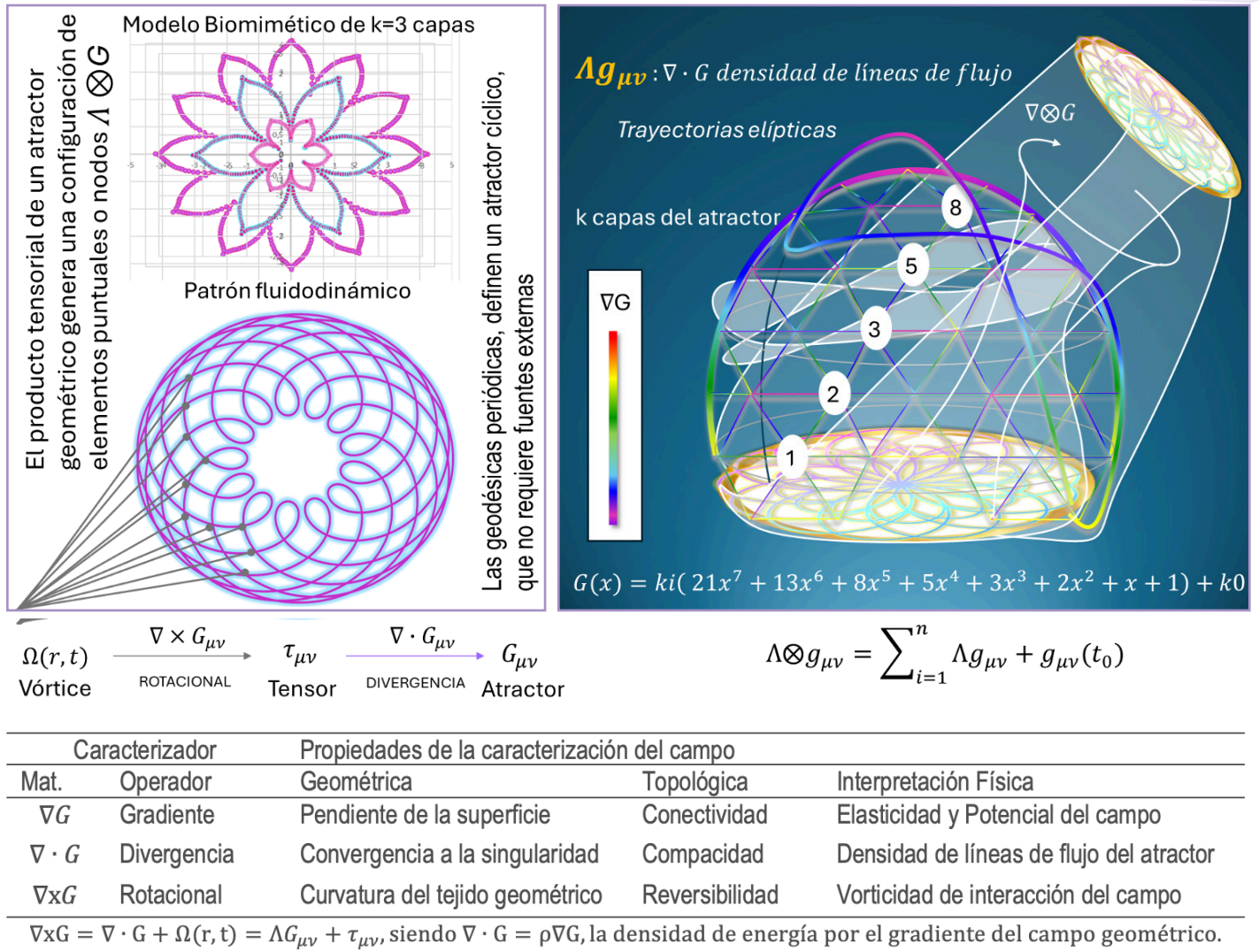


Figura 3. Atractor para un gradiente de campo potencial. **Fuente:** Elaboración propia

eficiencia, a través de sistemas pasivos y diseño biomimético.

Se ha planteado como solución sostenible la arquitectura desplegable para definir los espacios de forma radial, investigaciones previas presentan mecanismos plegables basados en bisagras, que pueden desplegar superficies planas, sin embargo, el modelo propuesto trata de configurar sistemas replegables embovedados, por sus propiedades geométricas, con objetivos definidos en la eficiencia energética de las superficies geodésicas, propiedades de eficiencia energética, resistencia sísmica, equilibrio estructural, con compuerta superior por configuración de curvas cíclicas, la configuración de

las propiedades de los materiales fotocromático para optimización de la luz solar y replegado ante estímulos de luz solar, presión y temperatura, inspirado en el comportamiento inteligente de plantas nativas.

El atractor es un modelo 3D con curvas de nivel y líneas de flujo que modela la totalidad de efectos en cada parámetro del diseño. En este enfoque, sobre el gradiente térmico no solo se trata de equilibrar la temperatura en el interior del edificio, sino de la temperatura del entorno. Además de la aerodinámica del proyecto, se contempla el gradiente de presión, flujo eólico aguas abajo de la obra y turbulencia por formación de vórtices respecto a la interacción con la capa límite.

Una obra arquitectónica interpretada como una red de difracción para los elementos de energía incidente, así mismo puede ser modelada mediante un filtro dinámico, donde los coeficientes son calculados mediante algoritmos adaptativos concurrentes, estimando los recursos asociados a enlaces o nodos. erk es la formulación de un atractor geométrico en forma de bóveda toroidal con líneas de flujo, compuesto por un conjunto de geodésicas elípticas de k capas, que está descrito como un modelo de interacción con el entorno en base al concepto de inteligencia biomimética (Figura 3).

El gradiente del campo potencial de energía en las inmediaciones de la obra arquitectónica permite modelar variables complejas, que son de interés desde la perspectiva ambiental. En tanto que la divergencia mide la convergencia a un mínimo local y el rotacional del campo permite analizar los vórtices, especialmente útil para el diseño de los mecanismos replegables. Entonces, el modelo de las líneas de flujo de energía da una lectura de la dinámica de los espacios geométricos, es decir las directrices de la obra.

Del mismo modo, la relación inversa también se cumple modelar la geometría del diseño, en el caso de edificaciones patrimoniales, permite reconstruir las ecuaciones proyectivas de la red de difracción, en una composición de orbitales elípticos que siguen un patrón de un atractor geométrico de la dinámica de interacción de la obra. Así se analiza la incidencia del entorno sobre los espacios diseñados y la interferencia de las estructuras sobre sus ecosistemas, siendo un criterio de inteligencia biomimética al evaluar la eficiencia geométrica del diseño urbano.

La investigación permitió acuñar el término de inteligencia biomimética en arquitectura, que combina campos multidisciplinarios, considerando materiales, fluidodinámica y patrones de interferencia, con nodos constructivos del tejido arquitectónico. Este modelo incorpora conceptos físicos que permiten formular un diseño basado en un objeto geométrico abstracto –atractor constructivo–, que describe la dinámica de interacción del sistema arquitectónico con el entorno.

La inteligencia biomimética, tal como ha sido propuesta en este estudio teórico, busca alcanzar criterios de aprendizaje de los mecanismos naturales, es decir, que la optimización de los diseños converja hacia la recuperación de las condiciones de equilibrio, mitigando las

emisiones y revalorizando la energía residual, a fin de no alterar la dinámica del hábitat. La tecnología inteligente representa un valioso recurso, siempre que se aplique de forma responsable, puesto que permite un análisis objetivo de riesgos y potencialidades locales, sin los sesgos de un perfil de estilo.

Sin embargo, resulta fundamental preestablecer criterios de sostenibilidad, en el marco directriz de los profesionales del área, mantener un monitoreo de desempeño y un target biomimético como modelo de referencia para garantizar el diseño sostenible en todas las etapas del proyecto, incluido el ciclo de cierre, donde se deben recuperar las condiciones originales del paisaje, desensamblado la infraestructura y reciclando los materiales de forma simple y segura.

El arquitecto dibuja a mano alzada bosquejos creativos y es proyectado con descriptores algebraicos en una construcción colaborativa de inteligencia biomimética, que se despliega sobre el campo geométrico.

CONCLUSIONES

Gracias al estudio desarrollado se propuso un diseño arquitectónico resiliente, con la capacidad de recuperarse ante riesgos potenciales del entorno. Se logran los objetivos definiendo un modelo matemático, integrando un compensador simétrico de cancelación de efectos de impacto ambiental, operando el sistema con un observador de convolución que opera los datos captados por los sensores de la cometa de compensación y en fuentes de energía residual del campo gradiente fluido-termodinámico.

De esta manera, el atractor del sistema que describe la dinámica de interacción entre la red de difracción y las ondas puede establecer un modelo extendido (Sandoval-Ruiz, 2025b), pero también considerando la interacción de una estructura biomimética con la fauna del entorno, teniendo como criterio fundamental la calidad de vida de las especies en un hábitat pensado en el respeto de las condiciones de equilibrio dinámico, donde se pueda desarrollar un eje de conservación inspirado en los mismos mecanismos de evolución de los animales nativos en su ecosistema.

Incluye el desarrollo de superficies abstractas de interacción en capas concatenadas, convolutas descritas

por elementos dinámicos, dentro de la propuesta de metas compensadoras sobre las elípticas geodésicas de las órbitas de la dinámica solar y la orientación controlada del flujo de energía residual, un enfoque de principios físicos para el modelado del sistema y la aplicación de herramientas matemáticas para estimar los coeficientes adaptativos, para alcanzar la meta de remediación ambiental.

Otro aspecto de interés es la caracterización del atractor matemático mediante ecuaciones iterativas, que reconstruyen el espacio geométrico. Este concepto puede ser aplicado como herramienta de mitigación del impacto ambiental, un objeto matemático que es aplicado para modelar la dinámica de un sistema arquitectónico inteligente, lo que aporta un enfoque emergente, para la creación de soluciones innovadoras en la construcción de un futuro sostenible.

Se sistematizó el concepto a partir del estudio diferencial hasta el concepto abstracto de un espacio matemático (Sandoval-Ruiz, 2025), un clustering dentro de un radio definido como grado de la función del campo de interacción de la obra arquitectónica, soportada sobre algebra de Galois y la superposición de estados por los patrones de interferencia, como un desplazamiento de su posición según el aprendizaje de todas las trayectorias evaluadas por proyecciones. La reflexión de las ondas representa al observador, condición inicial del atractor, implementado mediante el multiplexor de realimentación externa del LFSR.

REFERENCIAS

- Bai, X., & Zhang, X. (2025). Artificial intelligence-powered materials science. *Nano-Micro Letters*, 17(1), 1-30.
- Bölek, B., Tural, O., & Özbaşaran, H. (2023). A systematic review on artificial intelligence applications in architecture. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*, 4(1), 91-104.
- Corporan, L., Constanzo, J., & Peña, J. (2025). Prototipo de envolvente responsiva. *Entrópico Revista de Arquitectura y Urbanismo*, 3(1), 1-40.
- Dai H., Liu, X., Chen, Y., Zhao, C., Yuan, J., Kong, X., ... & Yuan, J. (2025). A novel collaborative optimization method for building energy supply in integrated energy systems considering multiple time scales and demand response. In *Building Simulation*, Tsinghua University Press, 1-22.
- Del Blanco, F., & Martín, S. (2025). Interacción Humano-Máquina impulsada por inteligencia artificial para el diseño y representación de arquitectura. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, 30(54), 148-167.
- Díaz-Parra O., Trejo-Macotela, F., Ruiz-Vanoye, J., Aguilar-Ortiz, J., Ruiz-Jaimes, M., Toledo-Navarro, Y., Penna, A., Barrera-Cámara, R., SalgadoRamírez, J. (2025). Integrated Biomimetics: Natural Innovations for Urban Design, Smart Technologies, and Human Health. *Appl. Sci.*, 15, 7323.
- Fraile, M. (2021). *Arquitectura biodigital: Hacia un nuevo paradigma en la arquitectura contemporánea*. Editorial Nobuko.
- Fraile-Narváez, M. (2025). Diseño biodigital e inteligencia artificial. Procesos y soluciones innovadoras en la arquitectura contemporánea. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 27(1), 195-213.
- Giacomán, A., & Sartor, F. (2023). *Arquitectura germinal: de métodos, técnicas, procedimientos—proyectos*. Locust, (5), 95-110.
- González, F., & Martín, A. (2023). Superficies rectificantes. Concepto, realidad geométrica y distorsión constructiva. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, 28(47), 228-239.
- Kurucan, M., Michailidis, P., Michailidis, I. & Minelli, F. (2025). Un marco modular híbrido de estimación del estado de carga (SOC) con un supervisor para sistemas de gestión de baterías que apoyan la integración de energías renovables en edificios inteligentes. *Energies*, 18 (17), 4537.
- Lezama, Á. (2024). Estrategias para optimizar el consumo energético en edificios inteligentes. *Revista Athea*, 5(18), 33-45.
- Li, Z., Pei, T., Ying, W., Srubar III, W., Zhang, R., Yoon, J., ... & Radlińska, A. (2024). Can domain knowledge benefit machine learning for concrete property prediction?. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(3), 1582-1602.
- Maigue, C. (2020) AuREUS: Aurora Renewable Energy and UV Sequestration. Retrieved from International Design Competition: James Dyson Award: <https://www.jamesdysonaward.org/2020/project/aureus-aurora-renewable-energy-uvsequestration>.

- Universidad de Chile (2025). Explorador solar. Disponible en: <https://solar.minenergia.cl/>