



**Diseño de elemento prefabricado biomimético para fachadas basado en la arquitectura
Integración del diseño biomimético arquitectónico a la fachada de la Ecovilla UPB**

Samuel Arciniegas Arbeláez

Monografía de especialización presentada para optar al título de Arquitecto

Docente

Luis Felipe Lalinde Castrillón, Doctor (PhD) en Ingeniería de la construcción

Manuela Murillo Galvis, Magíster (MSc) en Bioclimática

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Arquitectura y Diseño

Arquitectura

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi madre, cuyo respaldo incondicional y fortaleza fueron fundamentales a lo largo de este proceso. Su compañía constante, apoyo emocional y colaboración activa en momentos clave de la investigación hicieron posible la culminación de este proyecto.

Extiendo también mi gratitud a los docentes que me guiaron con su conocimiento, exigencia académica y orientación oportuna. Su compromiso con la formación integral ha dejado una huella profunda en mi formación profesional y personal.

A mis amigos, gracias por su compañía, por los espacios de conversación, por las palabras de ánimo y por brindarme apoyo cuando más lo necesité. Su presencia fue vital para mantener el equilibrio en las etapas más exigentes de este camino.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por formar parte esencial de este logro.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta monografía.

A mi madre, por su amor incondicional, su apoyo constante y su fe inquebrantable en mis capacidades. Gracias por estar presente en cada etapa de este proceso, brindándome no solo ánimo, sino también ayuda concreta en momentos clave del desarrollo de este proyecto.

Agradezco profundamente a los docentes Luis Felipe Lalinde Castrillón y Manuela Murillo Galvis, por su acompañamiento académico, su orientación experta y por incentivar mi pensamiento crítico durante el desarrollo de esta investigación. Sus aportes fueron fundamentales para el rigor y la solidez del trabajo presentado.

A mis amigos, quienes, con su compañía, comprensión y palabras de aliento, aportaron equilibrio y motivación en los momentos más exigentes. Gracias por estar, por escuchar y por compartir conmigo este camino.

Finalmente, a la Universidad Pontificia Bolivariana por brindar el espacio, los recursos y la formación que hicieron posible esta experiencia académica.

A todos ustedes, mi más profunda gratitud.

Tabla de contenido

Resumen	14
Abstract	15
Introducción	16
1. Planteamiento del problema	18
2. justificación	20
3. Objetivos	22
4. Marco teórico conceptual	24
5. Marco contextual.....	31
6. Metodología	36
Diseño de la investigación	36
Enfoque de la investigación.....	36
Alcance	37
Técnicas de investigación	37
Método	38
Recolección de datos.....	41
Muestra	44
Instrumentos.....	45
5 Resultados	47
Resultados del diseño del elemento prefabricado	47

Elección de biomecanismos	47
Biomecanismos elegidos	49
Abstracción de patrones	51
Elección de técnicas biomiméticas	52
Elección de técnicas biomiméticas.....	52
Técnicas biomiméticas elegidas	55
Identificación de fachada a intervenir en la Ecovilla UPB	58
Diseño del sistema estructurante	60
Diseño de los patrones biomiméticos.....	64
Evaluación del prototipo	75
Prueba de simulación digital	85
Resultados finales del elemento prefabricado arquitectónico en fachada	90
Recomendaciones y Metodología replicable para futuras investigaciones	92
8. Conclusiones	97
9. Bibliografía.....	102

Lista de tablas

Tabla 1 Ejemplos de Biomimética en la Arquitectura	25
Tabla 2 Beneficios generales para la arquitectura renovable	26
Tabla 3 Ejemplos de Biomimecanismos de ventilación natural	28
Tabla 4 Instrumentación.....	45
Tabla 5 Información de la investigación.....	46
Tabla 6 Criterios de selección de biomecanismos	47
Tabla 7 Justificación de selección de biomecanismos	49
Tabla 8 Criterios de selección de técnicas de biomimética.....	53
Tabla 9 Justificación de selección de técnicas biomiméticas.....	54
Tabla 10 Criterios de selección de fachada.....	58
Tabla 11 Implementación de patrones biomiméticos.....	65
Tabla 12 Opciones de materiales para elemento prefabricado arquitectónico.....	73
Tabla 13 Criterios de selección de material	74
Tabla 14 Experimentos con recipientes llenos de agua	77
Tabla 15 Experimentos con recipientes vacíos	77
Tabla 16 Experimentos con recipientes tapados	80
Tabla 17 Experimentos con recipientes destapados	81
Tabla 18 Diseño fachadas	85
Tabla 19 <i>Área total analizada – 1,3m cúbicos</i>	88

Tabla 20 Pruebas con el elemento – Mojado/Compartimiento de agua lleno89

Tabla 21 Pruebas con el elemento húmedo – Sin agua en su compartimiento dedicado.....89

Lista de figuras

Figura 1 Universidad Pontificia Bolivariana, década de 1950.....	31
Figura 2 Ubicación de la Ecovilla en el campus UPB Medellín.....	33
Figura 3 Campus UPB en Medellín (Vivir en el poblado, 2023).....	34
Figura 4 Isométrico Ecovilla.....	35
Figura 5 Norte Ecovilla.....	35
Figura 6 UPB. (2021). Biomimética y diseño: Un enfoque interdisciplinario. UPB Repository. https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/4263/Biomimetica%20y%20dise%C3%B1o.pdf	38
Figura 7 Refrigeración y ventilación.....	42
Figura 8 Implicación de geometrías en la velocidad del aire.....	42
Figura 9 Desarrollo metodológico.....	46
Figura 10 Escarabajo - <i>Stenocara gracilipes</i>	49
Figura 11 Camellos.....	50
Figura 12 Texturas.....	52
Figura 13 Never Enough Architecture. (2023, 10 de julio). El Centro Eastgate. https://neverenougharchitecture.com/es/project/el-centro-eastgate/	55
Figura 14 Gordon, K. (2012, 14 de agosto). En construcción: Biblioteca escolar en Gando / Kéré Architecture. ArchDaily Colombia. https://www.archdaily.co/co/02-179418/en-construccion-biblioteca-escolar-en-gando-kere-architecture ArchDaily Colombia.....	57
Figura 15 Extraído de modelo 3D de la Ecovilla - Revit.....	59
Figura 16 Extraído de modelo 3D de la Ecovilla - Revit.....	59

Figura 17 Aplicación de la fachada en isométrico	60
Figura 18 Aplicación de la fachada en planta	60
Figura 19 <i>Imagen representativa, autoría propia</i>	61
Figura 20 Distribución interior.....	62
Figura 21 Resultados.....	64
Figura 22 Medidas frontales – Profundidad 15 cm	64
Figura 23 Patrón 1 Figura 24 Patrón 2 Figura 25 Patrón 3	65
Figura 26 Pregunta 1	66
Figura 27 Pregunta 2	67
Figura 28 Pregunta 3	67
Figura 29 Pregunta 4	68
Figura 30 Pregunta 5	68
Figura 31 Pregunta 6	69
Figura 32 Pregunta 7	69
Figura 33 Pregunta 8	70
Figura 34 Implementación de la forma estética	71
Figura 35 Visualización frontal.....	71
Figura 36 <i>Visualización acoplada en conjunto - Isométrico</i>	72
Figura 37 <i>Visualización acoplada en conjunto – Ortogonal frontal</i>	72
Figura 38 Montaje final – Segundo piso de la Ecovilla UPB	76

Figura 39 Rectangular	76
Figura 40 Circular	76
Figura 41 Cuadrado	76
Figura 42 Montaje	79
Figura 43 Montaje final.....	79
Figura 44 Experimentación	79
Figura 45 Sistema estructurante	84
Figura 46 Enumeración	85
Figura 47 Simulación de Ecovilla UPB entera.....	85
Figura 48 Simulación de fachada con elemento prefabricado arquitectónico integrado	86
Figura 49 Cara posterior.....	87
Figura 50 Cara frontal	87
Figura 51 Imágenes del elemento prefabricado arquitectónico impreso.....	89
Figura 52 Imagen del montaje de réplica de experimento #1	90
Figura 53 <i>Imágenes del elemento prefabricado de fachada arquitectónico instalado en la fachada de análisis de la Ecovilla UPB, Medellín. Extraídas de modelo 3D – Plataforma Revit</i>	<i>91</i>
Figura 54 Patrón en modelo	91
Figura 55 Modelo	91
Figura 56 Imagen del modelo.....	91
Figura 57 Infografía escolar	95

Figura 58 Infografía ejemplificada.....96

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
UPB	Universidad Pontificia Bolivariana
LOD	Leve lof developing
M/S	Metros por segundo (velocidad)
POT-IN-POT	Técnica de refrigeración pasiva de origen africano
DIST	Distancia
VEL	Velocidad

Resumen

Esta monografía explora la integración de la biomimética en la Ecovilla de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), un proyecto pionero en sostenibilidad y diseño arquitectónico innovador en Medellín. El objetivo principal es analizar cómo las soluciones inspiradas en la naturaleza pueden optimizar y mejorar la calidad del aire y gestionar adecuadamente los recursos en este espacio académico. Para ello, se emplea una metodología de investigación mixta que combina el análisis teórico con estudios de caso y observaciones en el entorno de la Ecovilla.

La importancia de este enfoque radica en su potencial para abordar problemas críticos relacionados con la sostenibilidad y el bienestar humano en entornos urbanos. La integración de la biomimética se plantea como una estrategia que no solo mejora el desempeño ambiental de la Ecovilla, sino que también prepara a los estudiantes para enfrentar desafíos contemporáneos en el diseño urbano y arquitectónico. Este enfoque representa un paso hacia la creación de entornos más saludables y sostenibles, que pueden servir como referencia para futuras iniciativas en otras ciudades.

De esta forma, se plantea mediante el desarrollo de un elemento prefabricado con diseño arquitectónico para fachadas biomimético, utilizando biomecánica encontrada en el cuerpo o técnicas llevadas a cabo por organismo vivos y el uso de texturas y patrones naturales, el desarrollo de una segunda piel para la Ecovilla UPB, con el objetivo de mejorar su condición interior, desarrollar su papel como edificio sostenible, desarrollar las técnicas para este tipo de investigación y realizar una metodología replicable para el futuro de esta área de diseño arquitectónico funcional basado en la naturaleza.

Palabras clave: biomimética, sostenibilidad, calidad del aire, diseño arquitectónico, biomecánica, elemento prefabricado, sostenibilidad

Abstract

This monograph explores the integration of biomimetics in the Ecovilla of the Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), a pioneering project in sustainability and innovative architectural design in Medellín. The main objective is to analyze how solutions inspired by nature can optimize and improve air quality and properly manage resources in this academic space. To this end, a mixed research methodology is employed that combines theoretical analysis with case studies and observations in the environment of the Ecovillage.

The importance of this approach lies in its potential to address critical problems related to sustainability and human well-being in urban environments. The integration of biomimicry is posed as a strategy that not only improves the environmental performance of the Ecovillage, but also prepares students to address contemporary challenges in urban and architectural design. This approach represents a step towards the creation of healthier and more sustainable environments, which can serve as a reference for future initiatives in other cities.

Thus, it is proposed through the development of a prefabricated element with biomimetic architectural design for facades, using biomechanics found in the body or techniques carried out by living organisms and the use of natural textures and patterns, the development of a second skin for the Ecovilla UPB, with the objective of improving its interior condition, develop its role as a sustainable building, develop the techniques for this type of research and perform a replicable methodology for the future of this area of functional architectural design based on nature.

Keywords: biomimetics, sustainability, air quality, architectural design, biomechanics, prefabricated element, sustainability.

Translated with DeepL.com (free version)

Introducción

La sostenibilidad en la arquitectura ha emergido como una necesidad crucial para enfrentar los desafíos ambientales y de salud del siglo XXI (**García & Martínez, 2022; Sánchez, López, & Morales, 2020**). En este contexto, la biomimética se presenta como una estrategia de diseño que imita las formas, procesos y sistemas de la naturaleza para optimizar la eficiencia y sostenibilidad en la construcción (**Pérez, 2021; MDPI, 2023**). Esta metodología permite no solo reducir el impacto ambiental, sino también crear entornos saludables y resilientes (**PMID, 2023; Cho, 2023**). La integración de la biomimética en el diseño arquitectónico, particularmente en proyectos de carácter educativo y experimental como la Ecovilla de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), abre nuevas posibilidades para la innovación y el desarrollo de modelos sostenibles (**UPB, 2021**).

La Ecovilla de la UPB representa un espacio en el que convergen investigación, educación y sostenibilidad (**UPB, 2021**). Sin embargo, a pesar de los avances logrados en este proyecto, persisten desafíos relacionados con la calidad del aire, la gestión de recursos y el bienestar de sus ocupantes (**Zhou, Zhang, & Li, 2021; Sensor One Stop, 2025**). La biomimética, al ofrecer soluciones inspiradas en la naturaleza, tiene el potencial de optimizar estos aspectos, proporcionando respuestas arquitectónicas eficientes frente a problemas críticos (**AskNature, n.d.; Biomimicry NE, 2023**). Esta integración no solo favorecería la sostenibilidad ambiental y propia de las edificaciones, también crearía un modelo educativo que fomente la innovación arquitectónica entre estudiantes y profesionales, además de proveer de un estilo único de diseño (**García, 2022; Rodríguez, 2023**).

El presente trabajo se centra en analizar cómo la integración de la biomimética en el diseño de la Ecovilla puede mejorar su sostenibilidad y contribuir a resolver problemas relacionados con la calidad del aire, el uso eficiente de recursos y la salud de sus habitantes (**Jones & Smith, 2023; MDPI, 2023**). A través de un enfoque que toma lecciones del mundo natural, esta monografía plantea que la biomimética puede ser una herramienta clave para desarrollar soluciones arquitectónicas que no solo respondan a los retos actuales, sino que también se alineen con los objetivos educativos de la universidad (**PMID, 2023; Cho, 2023**).

Además, se explorarán ejemplos y referentes biomiméticos aplicados a la arquitectura para ilustrar cómo estos conceptos pueden ser implementados en la Ecovilla, maximizando su eficiencia y creando un espacio más saludable y resiliente (**AskNature, s.f.; JSTOR, 2023**). El objetivo es demostrar que la naturaleza ofrece un vasto repertorio de soluciones innovadoras que, adaptadas a las necesidades humanas, pueden redefinir el futuro del diseño arquitectónico sostenible (**MDPI, 2023; Wilson, 2022**).

1. Planteamiento del problema

En un contexto global marcado por el cambio climático, la contaminación urbana y la creciente demanda de construcciones sostenibles, la arquitectura tradicional enfrenta desafíos importantes al intentar equilibrar eficiencia energética, calidad del aire y bienestar humano (AP News, 2023; García & Martínez, 2022). En Medellín, las temperaturas máximas oscilan entre los 28 °C y 32 °C; estas condiciones climáticas exigen que los espacios construidos respondan de forma eficiente y adaptativa (Sensor One Stop, 2025; Libertad Digital, 2022).

La Ecovilla, ubicada en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, se plantea como un referente de sostenibilidad; sin embargo, su diseño no incorpora de manera eficaz principios biomiméticos que mejoren su adaptación al entorno, puesto que fue necesario integrar ventilación mecánica (aire acondicionado) por motivos de confort según la opinión de sus más recurrentes usuarios, siendo esto una contradicción a su diseño original (UPB, 2021). Diversos estudios académicos y científicos señalan que los diseños bioinspirados pueden reducir significativamente la carga térmica en edificaciones, disminuyendo la necesidad de ventilación artificial (Jones & Smith, 2023; MDPI, 2023).

Por ejemplo, se ha demostrado que las fachadas con diseño biomimético pueden reducir el consumo energético operacional en diferentes tipos de clima, incluyendo los tropicales y húmedos continentales (Biomimetic building facades demonstrate potential to reduce energy consumption for different building typologies in different climate zones, 2021); además, diseños inspirados en mecanismos naturales optimizan el rendimiento térmico y disminuyen la temperatura de las superficies interiores (Biomimetic design of building facades: an evolutionary-based computational approach inspired by elephant skin for cooling in hot and humid climates, 2024).

Esta carencia en la innovación de sus fachadas genera un consumo energético un 20 % mayor debido al gasto agregado del aire acondicionado que opera en casi todo momento en su interior que, en comparación con modelos parecidos pero basados en diseños biomiméticos, no está presente y a su vez limita su valor como herramienta formativa para estudiantes y profesionales interesados en encontrar y experimentar mediante soluciones basadas en la naturaleza. En el ámbito

académico de la UPB, donde la formación en arquitectura sostenible es prioritaria, la Ecovilla tiene el potencial de convertirse en un laboratorio vivo que materialice los “Objetivos de Desarrollo Sostenible” de la agenda 2030, específicamente en sus numerales 11 y 13: “ciudades sostenibles” y “acción por el clima”. No obstante, la falta de estrategias biomiméticas impide consolidar un modelo replicable que integre eficiencia energética, salud ambiental y aprendizaje. Por ejemplo, la implementación de un sistema de filtración inspirado en biomecanismos reales, como las cavidades nasales del camello (*Camelus dromedarius*) podría mejorar notablemente la calidad del aire interior, lo cual es esencial en un campus que acoge diariamente a 1.200 estudiantes expuestos a partículas contaminantes.

El problema central de esta investigación radica en que la ausencia de un diseño biomimético en la Ecovilla limita tanto su sostenibilidad como su capacidad de funcionar como recurso pedagógico.

Así, la pregunta orientadora es:

¿Cómo puede la integración de sistemas biomiméticos en la fachada de la Ecovilla UPB reducir su consumo energético, mejorar la calidad del aire interior y establecer un modelo educativo replicable en arquitectura sostenible?

2. Justificación

La creciente preocupación por el deterioro ambiental y los desafíos que enfrentan las ciudades contemporáneas requieren de un enfoque innovador en la arquitectura y el urbanismo. La sostenibilidad, entendida como la capacidad de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer las de futuras generaciones, se ha convertido en un imperativo en el diseño arquitectónico actual. En este contexto, la biomimética emerge como una estrategia que busca aprender de los procesos y estructuras naturales para resolver problemas humanos, promoviendo la eficiencia y el respeto por el medio ambiente.

Bajo estos desafíos, en este documento de investigación se decide enfocar en la calidad de la ventilación y su eficiencia en el desarrollo de futuras prácticas arquitectónicas. Esto con el fin de seguir procurando imprimir unas características mínimas de habitabilidad en los diseños arquitectónicos a futuro, sin la necesidad de emplear mecanismos con un alto consumo de energía y sin propiedades renovables. Diseñar métodos pasivos inspirados en la naturaleza que generen edificios sostenibles es un avance contra el deterioro ambiental, a la vez que se promueven la unión con el medio ambiente.

La elección de la Ecovilla de la UPB como objeto de estudio es particularmente relevante. Este proyecto no solo representa un esfuerzo por crear un modelo de vivienda sostenible, sino que también actúa como un laboratorio viviente que permite la investigación y la aplicación de soluciones arquitectónicas innovadoras. A través de la integración de la biomimética, la Ecovilla tiene el potencial de abordar problemas críticos relacionados con la calidad del aire, el manejo de recursos y la salud de sus ocupantes, aspectos que son esenciales para el bienestar humano y la sostenibilidad urbana.

La importancia de este trabajo radica en su enfoque exploratorio y experimental, que permitirá identificar y analizar cómo la biomimética puede optimizar el diseño de la Ecovilla. La investigación no solo se centrará en las aplicaciones prácticas de la biomimética, sino que también buscará establecer un modelo educativo que inspire a estudiantes y profesionales a repensar el diseño arquitectónico desde una perspectiva holística y en armonía con la naturaleza. Esta

monografía contribuirá al desarrollo de un enfoque interdisciplinario que fomente la colaboración entre la biología, la ingeniería y la arquitectura.

Desarrollar un elemento prefabricado arquitectónico para la envolvente de fachada busca mejorar la adaptación de los edificios a la intemperie, protegiéndolos de la radiación solar, la humedad y patologías que deterioren el material o su estética. Inspirada en la biomimética (técnica de adaptación de mecanismos biológicos para solucionar problemas), requieren encontrar sistemas para regular el flujo de aire y trabajar con la humedad para optimizar la climatización pasiva, reduciendo la carga térmica y el desgaste estructural. Este diseño, mejora el confort térmico y minimiza la necesidad de sistemas mecánicos, promoviendo una arquitectura más eficiente y sostenible.

Además, en un momento en que las ciudades enfrentan retos como el cambio climático y la urbanización desmedida, la integración de la biomimética en la Ecovilla puede servir como un modelo replicable en otras iniciativas urbanas. Esto no solo beneficiará a Medellín, sino que también puede ofrecer lecciones valiosas para otras ciudades en crecimiento que buscan implementar soluciones sostenibles y adaptativas.

En síntesis, la monografía presentada de carácter cuasi-experimental no solo pretende contribuir al campo de la arquitectura sostenible, también busca generar conciencia sobre la importancia de la biomimética como herramienta de innovación para diversificar la forma y carácter con que diseñamos nuestros entornos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar un elemento prefabricado arquitectónico de fachada biomimético para la Ecovilla en UPB, Medellín, que mejore la calidad de la ventilación, estableciendo una metodología replicable basada en principios naturales.

3.2 Objetivos específicos

1. Identificar principios biomiméticos aplicables a diseños arquitectónicos sostenibles, enfocándose en la optimización de la calidad, circulación de la ventilación en entornos urbanos tropicales como Medellín.
 - Ejemplo: Estudiar mecanismos como las cavidades nasales del camello (*Camelus dromedarius*) para filtrar y regular el flujo de aire, así como el caparazón del escarabajo del Namib (*Stenocara gracilipes*) para capturar humedad.
2. Prototipar un elemento prefabricado, basado en la biomimética y de carácter arquitectónico, que optimice la ventilación natural y se reduzca la carga térmica y la necesidad de ventilación mecánica
3. Evaluar el impacto del diseño biomimético propuesto en términos de calidad y ventilación del aire, mediante experimentos y simulaciones en base a mediciones cuantitativas (temperatura, humedad, velocidad del aire), además de verificar su percepción estética para los usuarios.
 - Ejemplo: Realizar un experimento para verificar la teoría aplicada al diseño de la estructura del elemento prefabricado.

4. Establecer una metodología replicable para futuras investigaciones en el ámbito de arquitectura sostenible, combinando principios de biología, ingeniería para crear soluciones innovadoras y sostenibles.
 - Ejemplo: Documentar el proceso de abstracción de patrones naturales e investigación de biomecanismos y su aplicación en geometrías arquitectónicas basadas en la experimentación y resultados afines a los objetivos.

4. Marco teórico conceptual

Biomimética

La biomimética es un enfoque de diseño que busca emular y adaptar diferentes soluciones presentes en la naturaleza, evidenciadas en biomecanismos sea de plantas o animales, para resolver problemas humanos, tales como optimizar la sostenibilidad y funcionalidad de algunos sistemas artificiales que tienen demasiado consumo energético, encontrar soluciones respecto a la adaptación climática, etc. Inspirada por los procesos evolutivos de millones de años, esta aproximación al diseño permite crear edificaciones más eficientes, resilientes y respetuosas con el medio ambiente mediante nuevos sistemas extraídos desde el reino natural. En palabras de Janine Benyus (1997), promotora del término "biomimética", la naturaleza ofrece un repertorio inagotable de estrategias que pueden ser adaptadas al diseño arquitectónico.

Desde una perspectiva arquitectónica, la biomimética se emplea desde tres niveles fundamentales:

- Forma: Inspiración en estructuras naturales como fractales, geometrías complejas presentes en conchas, panales de abejas o caparazones.
- Materiales: Uso de materiales que imitan propiedades biológicas, como la auto reparación o adaptabilidad climática.
- Procesos: Emulación de ciclos naturales donde cada recurso se reutiliza, eliminando conceptos como "desechos".

La sostenibilidad es uno de los principios fundamentales de la biomimética. Los ecosistemas naturales operan de manera autosuficiente y equilibrada, lo que permite minimizar el consumo de recursos y la generación de residuos. En la arquitectura, esto se traduce en un diseño que favorece el uso de fuentes de energía renovables, el aprovechamiento del agua y la reducción del impacto ambiental.

Uno de los aspectos más relevantes de la biomimética es su aplicación en sistemas de ventilación, donde se pueden implementar soluciones inspiradas en la naturaleza. Por ejemplo, la arquitectura de termiteros ha inspirado el diseño de sistemas de ventilación natural que permiten mantener una

temperatura estable sin necesidad de aire acondicionado. Estas estructuras, que utilizan la convección natural del aire, crean un ambiente interior confortable al aprovechar las condiciones ambientales externas. También se pueden desarrollar sistemas de purificación de aire que imiten el funcionamiento de árboles y plantas, utilizando filtros naturales para capturar partículas contaminantes. Este enfoque no solo mejora la salud de los ocupantes, sino que también contribuye a la sostenibilidad del entorno urbano.

Antecedentes Biomimética

La biomimética, definida como la emulación de estrategias naturales para resolver problemas de diseño, se ha convertido en un enfoque fundamental en la arquitectura sostenible, buscando inspiración en las formas, funciones y mecanismos empleados por organismos vivos para crear edificios innovadores y sostenibles. Este campo se ven casos como el sistema refrigeración del *Eastgate Centre*, inspirado en los termiteros, el *Proyecto Edén*, con sus cúpulas geodésicas inspiradas en burbujas y granos de polen, o *El Gherkin*, con su estructura inspirada en la esponja *Venus Flower Basket*. Estos casos ilustran la versatilidad de la biomimética para mejorar la eficiencia energética, optimizar el uso de materiales y aumentar la resiliencia en el diseño arquitectónico. La creciente adopción de este enfoque refleja un cambio hacia la creación de entornos construidos que no solo satisfacen las necesidades humanas, sino que también promueven la sostenibilidad y la armonía con el mundo natural.

Tabla 1 Ejemplos de Biomimética en la Arquitectura

Nombre del Edificio	Ubicación	Arquitecto(s)	Inspiración Natural	Aplicación Biomimética	Beneficios Clave de Sostenibilidad
Eastgate Centre	Harare, Zimbabue	Mick Pearce	Termiteros	Sistema de ventilación natural	Reducción significativa del consumo energético para refrigeración
Proyecto Edén	Cornualles, Reino Unido	Nicholas Grimshaw	Burbujas de jabón, polen	Cúpulas geodésicas ligeras y resistentes	Uso eficiente de materiales, optimización de la luz natural

The Gherkin (30 St Mary Axe)	Londres, Reino Unido	Norman Foster	Esponja Venus Flower Basket	Forma y estructura reticular para resistencia al viento	Reducción de la deflexión del viento, ventilación natural
Museo de Arte de Milwaukee	Milwaukee, EE. UU.	Santiago Calatrava	Alas de pájaro	Brise soleil cinético para control solar y térmico	Reducción de la necesidad de iluminación y refrigeración artificial
Centro Acuático Nacional de Pekín	Pekín, China	PTW Architects, CSCEC	Burbujas de jabón	Estructura y fachada inspiradas en la formación de burbujas	Optimización de la luz natural, eficiencia estructural

Tabla 2 Beneficios generales para la arquitectura renovable

Beneficios	¿Por qué es beneficioso?	Desafíos	Descripción
Eficiencia energética	Reduce la dependencia de sistemas de refrigeración mecánicos, disminuyendo el consumo de energía eléctrica.	Uso de agua	Requiere una fuente de agua constante para mantener la humedad en los materiales porosos, lo que puede ser problemático en regiones áridas.
Sostenibilidad	Utiliza materiales naturales y de bajo impacto ambiental como la cerámica y el adobe.	Control de la humedad	El aumento de la humedad interior podría ser perjudicial en climas húmedos o en ciertas épocas del año, afectando el confort y la salubridad.
Confort térmico	Potencial para crear ambientes interiores más	Escalabilidad	Adaptar una técnica de pequeña escala a edificios

	frescos y confortables en climas cálidos y secos.		completos presenta desafíos de diseño e ingeniería.
Bajo costo de operación y mantenimiento	Los sistemas pasivos generalmente requieren menos energía para funcionar y tienden a tener costos de mantenimiento más bajos que los sistemas mecánicos.	Rendimiento dependiente del clima	La efectividad del enfriamiento evaporativo varía según la temperatura y la humedad relativa del aire exterior. En condiciones de alta humedad, el rendimiento puede ser limitado.

Elementos prefabricados arquitectónicos:

3.1 Definición

Los elementos prefabricados arquitectónicos son componentes no estructurales de una edificación, manufacturados fuera de la obra. Esta técnica ofrece ventajas significativas en reducción de tiempos de ejecución, control de calidad al ser garantes de características específicas brindadas por el proveedor, menor generación de residuos/desechos, y la posibilidad de incorporar tecnologías sostenibles y estrategias pasivas de climatización en su diseño (Sánchez et al., 2020, SciELO).

En el contexto de la arquitectura sostenible, estos elementos están cobrando relevancia por su capacidad de integrarse con tecnologías biomiméticas, materiales adaptativos y geometrías que permiten la ventilación natural y el control térmico (García & Martínez, 2022, Scopus). El uso de envolventes arquitectónicas prefabricadas permite diseñar “pieles inteligentes” para edificios específicos que mejoran su desempeño energético mediante captación solar, regulación del aire y aprovechamiento de la humedad (Zhou et al., 2021, Web of Science).

Biomecanismos:

4.1 Definición

Según Otto Schmitt en los años 50, el término de biomimética se refiere a la transferencia de ideas y análogos de la biología a la tecnología (Vincent et al., 2006). Desde esta perspectiva y el enfoque del documento, estos biomecanismos representan las soluciones evolutivas presentadas la mecánica/técnicas de los cuerpos y comportamientos en organismos de origen salvaje empleados

para enfrentarse diferentes problemas de su ecosistema y probadas en su supervivencia, que pueden ser transferidas a la arquitectura para mejorar la sostenibilidad y el rendimiento de las edificaciones. En la tecnología humana se presentan desafíos que incluyen: la mejora de la sostenibilidad y funcionalidad de sistemas artificiales con alto consumo energético, así como la búsqueda de soluciones para la adaptación a diferentes condiciones climáticas. El documento destaca dos ejemplos de biomecanismos relevantes para la arquitectura en este ámbito investigativo.

Tabla 3 Ejemplos de Biomimecanismos de ventilación natural

Organismo / Estrategia	Beneficios	¿Por qué es beneficioso?	Desafíos al implementar en un contexto arquitectónico	Descripción
Termiteros (Macrotermes)	Ventilación pasiva eficiente	Regula temperatura sin energía artificial	Requiere adaptación a clima y materiales locales	Sistemas de túneles que regulan flujo de aire
Conchas de mar	Control térmico por geometría	Estructuras curvas dispersan calor solar	Complejidad en diseño y construcción curvilínea	Formas curvas con propiedades térmicas óptimas
Plumas de pingüino	Aislamiento y ventilación	Retiene calor y permite circulación de aire	Difícil replicar estructura a escala arquitectónica	Estructuras microtubulares con control térmico
Espiráculos del escarabajo del desierto	Regulación controlada del aire	Permite intercambio eficiente de gases	Requiere sistemas mecánicos o inteligentes para imitación	Aperturas que regulan el flujo de aire externo
Escamas de cactus	Reducción de temperatura	Disipan calor y protegen del sol	Materiales sintéticos limitan replicación exacta	Estructuras superpuestas que reflejan calor

Fosas nasales del camello	Protección térmica adaptativa	Mantiene temperatura corporal interna estable	Reproducción de texturas porosas es un reto	Superficie porosa que regula humedad y calor
---------------------------	-------------------------------	---	---	--

4.2 Posible aplicación en la arquitectura

- Captación pasiva de agua del aire: Emulación de superficies con patrones hidrofóbicos e hidrofílicos para recolectar humedad ambiental.
- Redirección del líquido mediante geometrías integradas: Diseño de estructuras que guíen el agua condensada hacia sistemas de recolección o almacenamiento.
- Filtrado del aire mediante geometría interna: Diseño de conductos de ventilación con formas que imiten las estructuras nasales para mejorar la calidad del aire interior.
- Recuperación de humedad del aire exhalado o interior: Implementación de sistemas que retengan y reutilicen la humedad del aire, reduciendo la necesidad de humidificadores artificiales (aire acondicionado).
- Control térmico por intercambio de calor con bolsas de aire cerradas: Integración de cavidades de aire cerradas para aislar las características del exterior.

Efectos de la humedad en aire

La humedad relativa del aire desempeña un papel fundamental en cómo percibimos el calor y en los mecanismos de transferencia térmica; su efecto se manifiesta en distintos procesos físicos que afectan tanto al confort humano como al clima (Libertad Digital, 2022; Sensor One Stop, 2025).

5.1 Evaporación y percepción del calor

El sudor se evapora para ayudar a enfriar el cuerpo humano. Este proceso es esencial para mantener la temperatura corporal estable. Sin embargo, cuando la humedad en el aire es elevada, el ambiente

pierde parte de su capacidad de absorción del vapor del agua. Como resultado, la evaporación del sudor disminuye y el cuerpo se enfría con menor eficacia, haciendo que la temperatura percibida (percepción térmica) se vuelve más alta que la temperatura real (Libertad Digital, 2022; AP News, 2023).

5.2 Efecto invernadero generado por el vapor de agua

El vapor de agua también actúa como un gas de efecto invernadero: tiene la capacidad de absorber el calor del ambiente, dificultando que escape al entorno (como una réplica en pequeña escala). La energía relacionada con la humedad aumenta la temperatura, sobre todo en regiones tropicales donde la humedad es más intensa (AP News, 2023; Sensor One Stop, 2025).

Dinámica de fluidos

La dinámica de fluidos es el área de la física que estudia cómo se comportan los líquidos y gases. En este caso, nos enfocamos en el aire (considerado también un fluido).

6.1 La ley de continuidad:

“La cantidad de aire que entra a un canal debe ser la misma que la que sale”. Si el espacio dentro del canal se reduce, el aire se mueve más rápido para que la misma cantidad de aire que ingresa sea expulsada al mismo tiempo.

6.2 El principio de Bernoulli:

“Cuando un fluido (como el aire) se mueve más rápido, su presión baja”. Esto quiere decir que, en un canal más angosto, donde el aire aumenta su velocidad (**ley de continuidad**), la presión del aire disminuye.

6.3 Otros factores

También hay otros factores a tener en cuenta, como la fricción generada por la forma o textura del elemento donde ingresa el aire, ya que, si este es muy largo, tiene variaciones en su longitud

(como curvas o esquinas) o su superficie presenta muchas irregularidades el aire pierde velocidad debido a la interacción con dichas características. También se pueden crear turbulencias en variaciones muy bruscas de la corriente durante el trayecto.

5. Marco contextual

1. Contexto

La Ecovilla de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), inaugurada por El Grupo Ecopetrol Antioquia se ubica en el campus de Medellín. Esta es un espacio académico que ha sido pionero en la implementación de proyectos enfocados en la sostenibilidad. Este proyecto educativo no solo busca ofrecer un modelo de vivienda sostenible, sino que también sirve como laboratorio viviente donde estudiantes y docentes investigan y aplican soluciones para diferentes problemas ambientales actuales desde un enfoque respetuoso con el medio ambiente. En este contexto, la biomimética, entendida como la inspiración en procesos y estructuras naturales para el diseño y la construcción, se presenta como un campo emergente que tiene el potencial de llevar la sostenibilidad de la Ecovilla a un nivel superior.



Figura 1 Universidad Pontificia Bolivariana, década de 1950 (Identidad, principios e historia: Línea de tiempo. Recuperado de <https://www.upb.edu.co>)

En el ámbito educativo, la UPB Medellín se ha posicionado como un referente en la formación de arquitectos conscientes de los retos ambientales y sociales. Los proyectos desarrollados en la

Ecovilla son un reflejo de esta visión. No obstante, a pesar de los esfuerzos realizados, algunos problemas persisten, particularmente en lo relacionado con la calidad del aire y el uso eficiente de recursos en el interior de la Ecovilla. Además, las condiciones de salud de los ocupantes son un aspecto clave que requiere atención, dado que los espacios mal ventilados o con deficiente gestión de recursos pueden afectar su bienestar.

Dentro de la oferta actual del centro se destacan cuatro proyectos principales (ECOPETROL - Agencia de Noticias UPB, 2024):

- Laboratorio nacional del sector eléctrico: es un complejo de laboratorios donde se evalúan, certifican tecnologías clave, y se promueve la innovación y el liderazgo en el sector eléctrico en Latinoamérica.

- Pruebas de tecnologías para innovación regulatoria: seleccionará y probará más de 10 tecnologías digitales maduras para pilotaje en las instalaciones del Grupo Ecopetrol, se enfocará en la eficiencia operativa, es decir, reducción de costos, tiempo y generación de beneficios.

- Prospectiva de Talento Humano: construirá una hoja de ruta integral e identificará la cantidad de talento requerido a nivel nacional del sector eléctrico y energético en el marco de la transición energética a 2030 y 2040.

- Laboratorio Nacional de Comunidades Energéticas: espacio para integrar todas las experiencias de innovación, buenas prácticas en soluciones que promuevan modelos energéticos descentralizados, participativos y sostenibles a nivel comunitario.

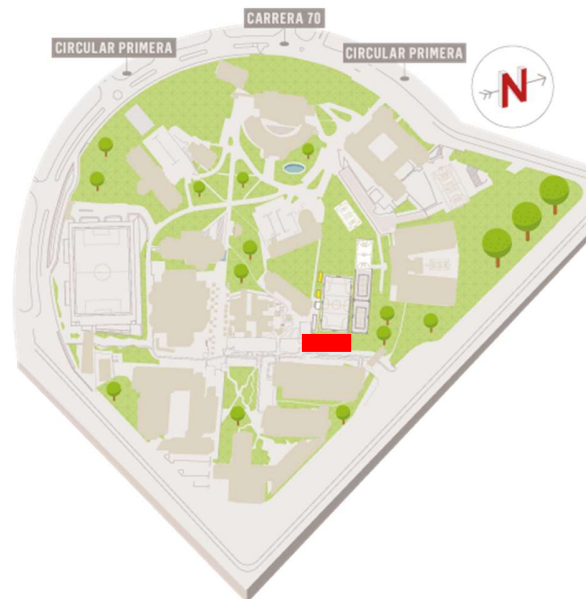


Figura 2 Ubicación de la Ecovilla en el campus UPB Medellín (Recuperado de <https://www.upb.edu.co>)

2. Ubicación

Medellín (Colombia), reconocida por su enfoque proactivo en sostenibilidad y urbanismo, es un escenario ideal para el desarrollo de iniciativas como la Ecovilla. La ciudad ha sido elogiada por la integración de áreas verdes, el transporte sostenible y su compromiso con proyectos ambientales. Sin embargo, al igual que muchas ciudades en crecimiento, Medellín enfrenta problemas de calidad del aire y gestión de recursos, que también se manifiestan en entornos cerrados, como los habitados por estudiantes y profesores en la UPB.

Dentro de este marco, es importante destacar el contexto local de Medellín, una ciudad que ha promovido una serie de políticas y proyectos urbanos que buscan la sostenibilidad ambiental y social. En 2013 fue reconocida como “La ciudad más innovadora del mundo”, título otorgado por el Wall Street Journal y el Urban Land Institute (ULI), así mismo, en años más recientes como 2020 y 2021 fue catalogada como la ciudad más innovadora de Colombia según el Índice de Competitividad de Ciudades, realizado por el Consejo Privado de Competitividad y la Universidad de Rosario. La Ecovilla, al ser un proyecto académico inmerso en este entorno, debe alinearse con dichas políticas y avanzar hacia la creación de un modelo que no solo responda a los desafíos

específicos de su ubicación, sino que también sirva como referente para futuras implementaciones a mayor escala. Este proyecto puede convertirse en un espacio educativo que, a través de la aplicación de la biomimética, inspire a estudiantes, docentes y profesionales a repensar el diseño arquitectónico desde una perspectiva más natural y sostenible.



Figura 3 Campus UPB en Medellín (Vivir en el poblado, 2023)

3. Zona de trabajo

El contexto de la Ecovilla en la UPB y la ciudad de Medellín brinda una oportunidad única para aplicar la biomimética como herramienta de innovación arquitectónica. Al responder a los problemas de calidad del aire, recursos y salud, este enfoque tiene el potencial de optimizar la sostenibilidad del proyecto y establecer un modelo educativo que no solo fomente la investigación en arquitectura, sino que también prepare a los estudiantes para enfrentar los retos ambientales del futuro. Para esto, utilizar unas de fachadas de manera específica como área focal para ser el punto final del desarrollo de esta investigación sobre un elemento prefabricado arquitectónico:

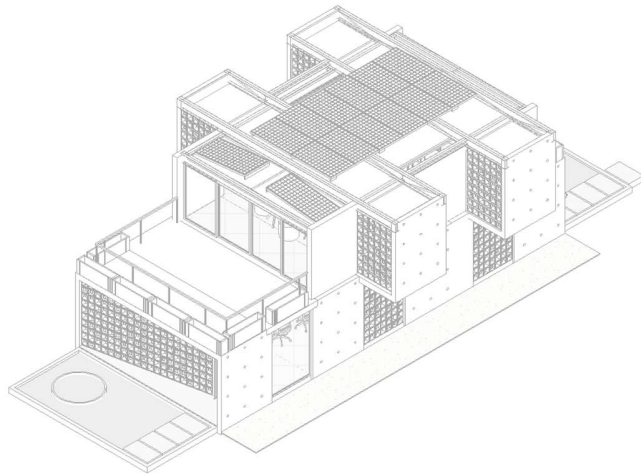


Figura 4 Isométrico Ecovilla (Modelo 3D Revit Ecovilla)

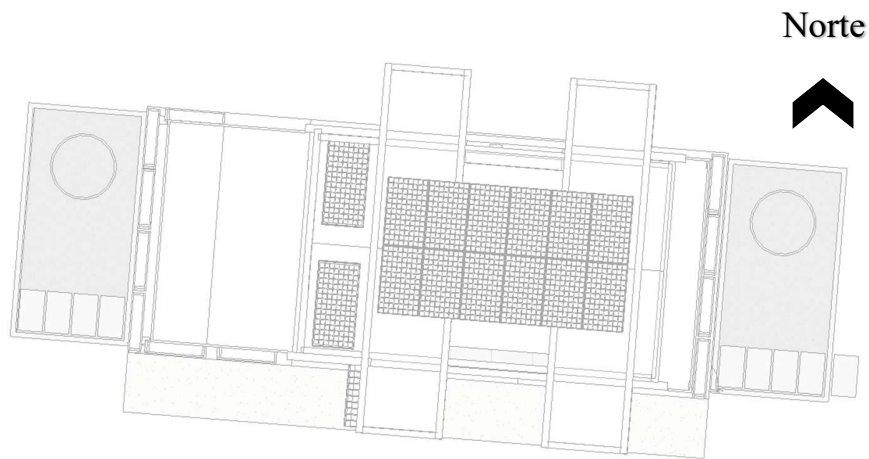


Figura 5 Norte Ecovilla (Modelo 3D Revit Ecovilla)

6. Metodología

Diseño de la investigación

Este documento abarca una investigación de propósito básico, donde se busca ampliar el conocimiento teórico, sin una aplicación inmediata a la realidad. Bajo este paraguas, se interpreta que la metodología es de una índole más conceptual, exploratoria y teórica a una con resolución práctica inmediata.

Con el fin de generar un modelo educativo replicable para futuras investigaciones en el ámbito de arquitectura sostenible como un objetivo secundario, no se plantea llegar a una conclusión cerrada sobre el tema, pero generar y mostrar una serie de pasos que puedan ser adaptados al proceso de diseño arquitectónico de diferentes elementos.

Es de carácter cuasi-experimental. Aunque se busque un resultado práctico aplicable en la fachada de la Ecovilla UPB de Medellín, también es de índole hipotética, y este caso de estudio es meramente demostrativo como la aplicación de la serie de pasos a seguir para diseñar un elemento arquitectónico prefabricado mediante la biomimética.

Enfoque de la investigación

La presente investigación empleará un enfoque **mixto**, combinando métodos **cuantitativos** y **cualitativos** para abordar el diseño y la integración de la biomimética en el elemento prefabricado arquitectónico en un modelo educativo replicable a nuevas investigaciones en el ámbito de arquitectura sostenible.

Los pasos a seguir estarán enfocados en responder a la pregunta problematizadora central, donde se hará un uso primariamente conceptual del marco teórico para llevar a cabo el diseño conceptual del elemento prefabricado arquitectónico mediante procesos biomiméticos.

No se espera hacer una réplica funcional para poner a prueba práctica en un laboratorio, el producto final, debido a la complejidad de elaboración final en la realidad, será puesto a prueba mediante

software y simulación, sin embargo, medir las partes del sistema de manera individual (tanto en teoría como práctica) es posible, además de ser necesario ver si cumplen con su propósito y requisitos mínimos esperados, siempre pensados desde un desarrollo conjunto.

¿Cómo puede la integración de sistemas biomiméticos en la fachada de la Ecovilla UPB puede reducir su consumo energético, mejorar la calidad del aire interior y establecer un modelo educativo replicable en arquitectura sostenible?

Alcance

El alcance de la investigación se centrará en tres áreas clave:

1. **Crear un modelo educativo replicable** para encaminar futuras investigaciones sobre el diseño arquitectónico basado en la biomimética
2. **Propuesta de un diseño de elemento prefabricado** que se implementará en la fachada de la Ecovilla para evaluar su calidad en condiciones reales.
3. **Medición de la eficiencia y estética** del elemento propuesto, a través de diferentes parámetros, incluyendo la temperatura, circulación y confort del aire.

Técnicas de investigación

Se emplearán experimentos prácticos, ideados para ser fáciles de replicar, uso de software 3D accesibles para verificar variables, recolección de datos.

El marco propuesto por el docente de la faculta de ingeniería David Andrés Torreblanca Días será una basa fundamental tanto para la fase de diseño del sistema estructurante como estética del elemento prefabricado arquitectónico.

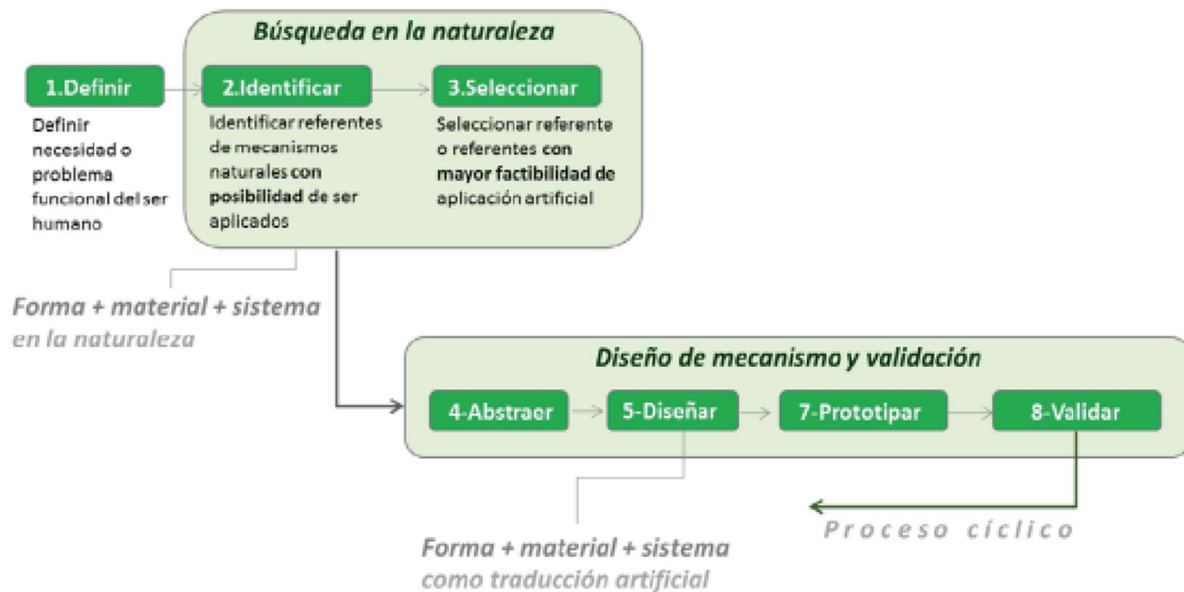


Figura 6 UPB. (2021). Biomimética y diseño: Un enfoque interdisciplinario. UPB Repository.

<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/4263/Biomimetica%20y%20dise%C3%B1o.pdf>

Método

1. Elección de biomecanismos:

- Se llevará a cabo una **revisión bibliográfica exhaustiva** sobre biomecanismos especializado en la regulación del aire, enfocándose en procesos llevados a cabo por organismos vivos, que optimizan la temperatura, circulación y confort del aire.
- Mediante **la creación de unos criterios de selección**, se definirán los casos de estudio más óptimos para emplear en el diseño del elemento prefabricado arquitectónico.
- Se realizará un **estudio sobre los referentes seleccionados**, para lograr aplicar sus principios biomiméticos exitosamente e identificar los elementos específicos que puedan ser adaptados al diseño del elemento prefabricado arquitectónico.
- Se utilizarán métodos de diseño empleando la **abstracción de los biomecanismos**, basada en la observación y el análisis de sus características para elaborar las propuestas de los patrones para el recubrimiento y la selección del material adecuado para su elaboración.

2. Elección de técnicas biomiméticas

- Se llevará a cabo una **revisión bibliográfica exhaustiva** sobre la biomimética aplicada a la arquitectura, enfocándose en procesos biomiméticos exitosos ya trasladados a edificios construidos, que optimizan la temperatura y circulación del aire.
- Mediante **la creación de unos criterios de selección**, se definirán los casos de estudio más óptimos para emplear en el diseño del elemento prefabricado arquitectónico.
- Se realizará un **estudio sobre los referentes seleccionados**, para lograr aplicar sus principios biomiméticos exitosamente e identificar los elementos específicos que puedan ser adaptados al diseño del elemento prefabricado arquitectónico.
- Durante el diseño serán empleadas las técnicas investigadas, basadas en casos reales de comprobado funcionamiento, ideadas para trabajar al unísono y adaptadas para **funcionar en armonía dentro del cuerpo estructurante** del elemento prefabricado de fachada.

3. Identificación de la fachada a intervenir en la Ecovilla UPB

- Se **definirán criterios de selección para elegir la fachada** donde será realizada la simulación final del elemento prefabricado.
- Se mostrará gráficamente la fachada seleccionada desde el modelo 3D, junto a sus medidas para establecer claramente el área de estudio.
- Se argumentará de manera más extensa el problema y oportunidad que presenta dicha fachada.

4. Diseño del elemento prefabricado arquitectónico:

- Se desarrollará una propuesta del sistema estructurante para el funcionamiento del mecanismo del elemento prefabricado arquitectónico de fachada, empleando la información recabada en el marco teórico. Se utilizarán softwares de diseño arquitectónico como Revit o Rhino para crear una representación 3D adecuada.
- Se diseñarán hasta tres patrones inspirados en los referentes teóricos diferentes para su percepción estética y funcionalidad, de los cuales uno será elegido para insertarse en el elemento. Se utilizarán softwares de diseño arquitectónico como Revit o Rhino para crear una representación 3D adecuada, y una encuesta de Google forms para elegir cual es el patrón más apreciable para el público general.

5. Evaluación del prototipo:

- Se realizarán validaciones prácticas en la vida real de las principales características del prototipo del elemento prefabricado arquitectónico para fachadas, bajo una índole cuasi-experimental. Bajo este criterio de experimentación, se busca encontrar la mejor alternativa para acoplarla finalmente al diseño final del elemento prefabricado arquitectónico de fachada.
- Se usará un software de medición de dinámicas de fluidos como SimScale para verificar el resultado del prototipo final, donde se podrá verificar su función real en una simulación controlada.
- Mediante una encuesta se evaluará cual de los patrones biomiméticos es el más aceptado estéticamente por la población (aunque no tenga una implicación en el resultado además del apartado estético).

6. Evaluación de la metodología:

- Se hará una autocrítica a lo planteado en el documento, desde su información teórica a validación práctica, concluyendo si fue un factor importante para el desarrollo final del elemento prefabricado arquitectónico, el nivel de satisfacción y la facilidad

con la que se lleva a cabo dicho proceso, con el fin de establecer la guía para crear el modelo educativo replicable a nuevas investigaciones en el ámbito de arquitectura sostenible.

Recolección de datos

1. Técnicas cualitativas:

- **Creación de modelo 3D:** Se crearán una serie de modelos en escala mediante una réplica 3D en el software de Revit con un LOD de 350. Serán empleadas en pruebas analógicas mediante otro software de medición de dinámicas de fluidos como SimScale, además de brindar una representación gráfica del patrón diseñado.
- **Evaluación de refrigeración y ventilación del aire:** Se creará una estructura en la que se integrarán las características del elemento prefabricado arquitectónico para evaluar como las diferentes opciones de recipientes se comportan al medir las diferentes variables de manera individual, para luego aplicarlas en su mejor opción en el prototipo final.
- **Evaluación de implicación de geometrías en la velocidad del aire.:** Se emplearán sensores de velocidad del aire para medir los m/s de diferentes configuraciones de elementos y como la forma y tamaño pueden afectar la velocidad a la cual circula el aire en un espacio cerrado.

1.1 Montaje de experimentos:

Cada experimento busca validar una característica específica respecto al elemento prefabricado arquitectónico. El diseño empleado para el montaje intenta hacerlo fácilmente replicable, utilizando los instrumentos mínimos para realizar esta clase de mediciones.

Experimento #1: Refrigeración y ventilación del aire



Figura 7 Refrigeración y ventilación

Experimento #2: Implicación de geometrías en la velocidad del aire



Figura 8 Implicación de geometrías en la velocidad del aire

1.2 Desafíos de los experimentos:

La mayor complicación al evaluar mediante los experimentos propuestos y el modelo 3D son:

- **Reemplazo de elementos de medición científicos**, como el anemómetro.
- **Complejidad de los softwares de análisis CFD** (Computational Fluids Dynamics) disponibles de manera gratuita.

Reemplazo de elementos: Encontrar una manera de medir la velocidad del aire sin el uso de equipo especializado puede ser ampliamente ambigua en sus si se realiza mediante un método comparativo sin el debido control, tanto al sistema, dispositivo o elementos usados para la comparación y las características del contexto que, a lo largo del tiempo en que se realice el experimento, pueden variar drásticamente.

Simular en SimScale: En esta investigación se hizo uso del software SimScale para realizar la medición del modelo 3D de la Ecovilla UPB con el elemento prefabricado ya instalado. Estas aplicaciones, aunque reciben modelos directamente en formato .rvt, importado directamente desde Revit (aplicación empleada para elaborar el modelo 3D) no es lo más recomendable, ya que el límite de tolerancia de (en este caso) SimScale con geometrías complejas como el diseño original de las fachadas de la Ecovilla, así como el diseño frontal estético del elemento prefabricado arquitectónico presentaron errores a al momento de que le programa reconociera la geometría e hiciera lectura de ella. Sin embargo, este no es el único reto que presenta esta plataforma, ya que aunque haya aceptado la geometría y empezado una simulación, este puede detenerse abruptamente debido a la superposición de elementos dentro del modelo, perdiendo el tiempo empleado en ejecutar (hasta donde iba) la simulación). **Por esto, se recomiendan las siguientes consideraciones:**

- **Emplear archivos con geometrías simplificadas** (en esta investigación se empleó el formato .STL)
- **Revisar la colisión/superposición de elementos en el modelo**, a pesar de que se encuentre modelado de manera correcta. La colisión presentada durante la medición del archivo ..STL de geometría simplificado fue de columnas de la cubierta, que en rigor del modelado 3D de la disciplina se encontraban de manera correcta, pero que sin embargo presentaron problemas en el simulador CFD SimScale.
- **El tiempo de simulación es extenso**, es recomendable preparar el modelo 3D con antelación para evitar reprocesos.
- **La matriz es compleja**, ya que la mayoría de estas aplicaciones están pensadas para ingenieros con un rigor técnico muy alto. Se recomienda establecer solo las variables necesarias y guiarse de lo mínimo que pide el programa para realizar la simulación.

2. Técnicas cuantitativas:

- **Encuestas y entrevistas probabilísticas:** Se diseñará una encuesta a personas del común (mínimo 20 personas). Las encuestas incluirán preguntas en una escala de Likert (del 1 al 5) para evaluar el diseño estético de los patrones propuestos para el diseño del elemento prefabricado.
- **Autocrítica** final para evaluar el proceso llevado a cabo, definir los pasos necesarios del modelo de estudio replicable, sugerir cambios, compartir la experiencia de elaboración y calificar la satisfacción con el documento.

Muestra

- Un grupo de **mínimo 20 personas** que completarán las encuestas. Este grupo incluirá estudiantes de arquitectura, docentes, personal administrativo de la UPB y personas del común, asegurando una diversidad de opiniones y experiencias.

Instrumentos***Tabla 4 Instrumentación***

Instrumentos	Donde se usa	Propósito/función
	Experimento #1, Experimento #2	Anemómetro: Medir velocidad del aie
	Experimento #1	Medidor de temperatura
	Experimento #1	Medidor de humedad
	Experimento #1, Experimento #2	Secadora de pelo cotidiana: Generar corrientes de aire
	Experimento #1, Experimento #2	Recipientes: Simular el sistema de contención de agua dentro del sistema del elemento prefabricado arquitectónico, simular diferentes geometrías internas
	Experimento #1	Modelo: Replicar la espacialidad interna del elemento prefabricado
	Experimento #2	Conducto: Servir de espacio cerrado para ubicar y evaluar el rendimiento de diferentes geometrías

Matriz – Desarrollo Metodológico

Descripción de actividad	Variable	Tipo de información a usar	Primaria o Secundaria	Herramienta a utilizar	Caso de estudio o actor	Fecha o semana	Tiempo de duración
Revisión bibliográfica sobre biomimética	Elementos biomiméticos identificados	Artículos académicos, libros, investigaciones	Secundaria	Software de gestión bibliográfica (Zotero, Mendeley)	Proyectos biomiméticos exitosos	Semana 1-3	3 semanas
Revisión bibliográfica sobre biomecánica	Elementos biomiméticos pertinentes	Artículos académicos, libros, páginas web sobre proyectos	Primaria	Software de gestión bibliográfica (Zotero, Mendeley)	Mecanismos biomiméticos aplicables	Semana 4 - 5	2 semanas
Identificar casos aplicables a la investigación	Depurar información y desarrollar base teórica	Base de datos investigada	Primaria	Notas depuradas de información investigada	Marco teórico - NO APLICABLE	Semana 6	1 semanas
Abstraer los elementos para diseñar el mecanismo	Casos de éxito en biomimética/biomecánica	Base de datos investigada	Primaria	Notas sobre la información recolectada en semanas posteriores	Elemento prefabricado arquitectónico	Semana 7-8	2 semanas
Modelado de patrones arquitectónicos	Diseño de patrones	Modelos 3D	Primaria	Software de diseño (Revit, Rhino)	Prototipos para Ecovilla	Semana 9-11	3 semanas
Diseño y funcionamiento del elemento prefabricado	Eficiencia de ventilación y refrigeración hacia el interior	Diseño del Prototipo	Primaria	Investigación, información teórica y propiedades biomecánicas abstraídas	Prototipos para Ecovilla	Semana 12-13	2 semanas
Evaluación del flujo y temperatura del aire	Niveles de confort y caudal	Medidas de calidad del aire	Primaria	Sensores de calidad del aire	Espacios interiores de la Ecovilla, maqueta de pruebas a escala del patrón	Semana 14	1 semana
Implementación del diseño en Ecovilla	Aceptación y funcionalidad	Observación, encuestas post- implementación	Primaria	Notas de campo, Google Forms, Revit modelo 3D	Usuarios de la Ecovilla, fachada seleccionada	Semana 15	1 semana
Análisis de resultados y conclusiones	Impacto de la biomimética	Datos cualitativos y cuantitativos	Primaria y Secundaria	Software de análisis estadístico (SPSS, Excel)	Todos los involucrados en la investigación	Semana 16	1 semana

Figura 9 Desarrollo metodológico

Información empleada en el desarrollo de la investigación del desarrollo metodológico

Tabla 5 Información de la investigación

Categoría	Subtemas	Objetivo
Investigación conceptual	Biomimética	Identificar la definición adecuada para trabajar en la investigación, así como antecedentes que pueda guiar su implementación.
	Biomecánica	Especificar el método de aproximación al concepto principal del documento (biomimética)
Casos de estudio	Casos arquitectónicos	Observar y abstraer de aquellos más cercanos a los objetivos de la investigación las técnicas empleadas para su resolución bioclimática/sostenible
	Casos de organismos	Observar y abstraer de aquellos más cercanos a los objetivos de la investigación las técnicas empleadas por dichos organismos, explicar su función y el trabajo que realizan
Aplicación en la arquitectura	Conclusiones de los referentes arquitectónicos	Definir y entender las cualidades de las técnicas, así como su posible método de empleo, beneficios y funciones dentro del diseño del elemento prefabricado arquitectónico
	Conclusiones de los referentes biomecánicos	Definir y entender las cualidades de las técnicas, así como su posible método de empleo, beneficios y funciones dentro del diseño del elemento prefabricado arquitectónico

Nota. Adaptado de Ruiz Rojas (2014).

5 Resultados

Resultados del diseño del elemento prefabricado

Elección de biomecanismos

1. Criterios de selección

Para elaborar los criterios de selección, se partirá de una premisa de la tabla metodológica para diseño biomimético elaborada por el profesor David Andrés Torreblanca Días, donde indica:

“Seleccionar referente o referentes con mayor factibilidad de aplicación artificial”

Esta premisa será tratada como un axioma para diseñar los criterios de selección para filtrar la *“tabla 3: Ejemplos de Biomimecanismos de ventilación natural”*:

Tabla 6 Criterios de selección de biomecanismos

Criterios	Descripción	Justificación
<i>Simplicidad del mecanismo</i>	Qué tan simple es el principio biológico a replicar (estructura, movimiento, reacción).	Mecanismos simples son más fáciles y económicos de imitar.
<i>Escalabilidad</i>	Capacidad del mecanismo para funcionar eficientemente en escalas arquitectónicas (fachada).	Debe poder escalarse sin perder su funcionalidad.
<i>Grado de automatización requerido</i>	Nivel de tecnología o automatización que necesita para funcionar (pasivo vs. activo).	Soluciones pasivas son preferibles por sostenibilidad y bajo mantenimiento.
<i>Conocimiento técnico</i>	Existencia de estudios, precedentes o tecnología que facilite su interpretación	Facilita el desarrollo y la validación.
<i>Mantenimiento</i>	Estimación de inversión inicial y mantenimiento requerido para su integración.	Proyectos económicamente viables tienen mayor probabilidad de realizarse.

A partir de los criterios establecidos en la **tabla #4 criterios de selección** y las opciones contenidas en la **tabla #3 de biomecanismos**, se puede realizar un filtrado que seleccione los referentes más

viables. Los *espiráculos del escarabajo del desierto* y *las fosas nasales del camello* destacan como los más favorables:

- **Simplicidad relativa del mecanismo:** estructuras pasivas o semipasivas, basadas en pequeñas grietas y texturas para contener la humedad, sin necesidad de una tecnología compleja.
- **Escalabilidad:** su funcionamiento puede replicarse mediante materiales porosos o estructuras modulares sin importar la longitud del elemento prefabricado.
- **Requerimiento de baja automatización:** son sistemas pasivos, sin necesidad de mucha tecnología o energía para funcionar de manera adecuada.
- **Conocimiento técnico:** existen bastantes investigaciones biomiméticas y aplicaciones en ventilación y filtrado que emplean mate
- **Mantenimiento reducido:** las texturas porosas, al combinarse con una técnica biomimética de ventilación, permiten crear un sistema de autolimpieza polvo si se diseñan correctamente.

Tabla 7 Justificación de selección de biomecanismos

Organismo / Estrategia	Beneficios	Descripción	Justificación de selección	Material sostenible para replica
<i>Espiráculos del escarabajo del desierto</i>	Regulación eficiente del aire	Aperturas que regulan flujo externo	Escalable mediante estructuras modulares porosas. Mecanismo pasivo con mínima intervención mecánica o energética.	Cerámica porosa reciclada: permite paso de aire y humedad controlada, adaptable y de bajo impacto.
<i>Fosas nasales del camello</i>	Protección térmica adaptativa	Superficie porosa que regula humedad	Textura replicable mediante impresión 3D o biomateriales moldeables. Autolimpieza mediante diseño funcional del patrón.	Biocompuestos con fibras vegetales: permiten control de porosidad, reciclables y termoestables.

Biomecanismos elegidos

1. Caparazón del escarabajo del desierto:

1.1 Hábitat / Adaptación:

El *Stenocara gracilipes* es un escarabajo originario del desierto del Namib, una de las regiones más áridas del planeta. Ha desarrollado mecanismos altamente eficientes para capturar humedad del aire y regular su temperatura corporal.

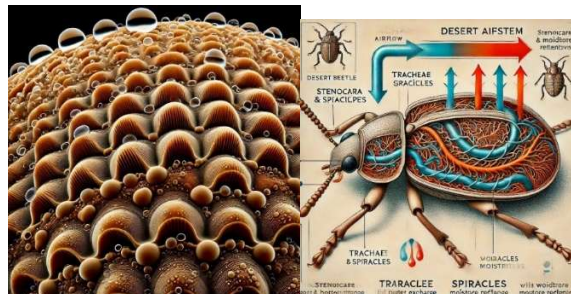


Figura 10 Escarabajo - *Stenocara gracilipes*

Textura microcelular y composición corporal del caparazón del escarabajo del desierto, imágenes generadas con IA

1.2 Mecanismo biológico:

La estructura de su caparazón presenta una microtextura compuesta por regiones hidrofílicas (que atraen agua) e hidrofóbicas (que repelen agua). El flujo de aire dentro de su cuerpo está diseñado para generar un gradiente térmico, lo que permite un intercambio de calor eficiente sin perder humedad.

2. Cavidades nasales del camello.

2.1 Hábitat / Adaptación:

Los camellos han evolucionado para sobrevivir en condiciones extremas de calor y sequía, como los desiertos del Sahara y Gobi. Una de sus adaptaciones más notables es su sistema de respiración altamente eficiente, diseñado para minimizar la pérdida de agua y regular la temperatura del aire que inhalan y exhalan.

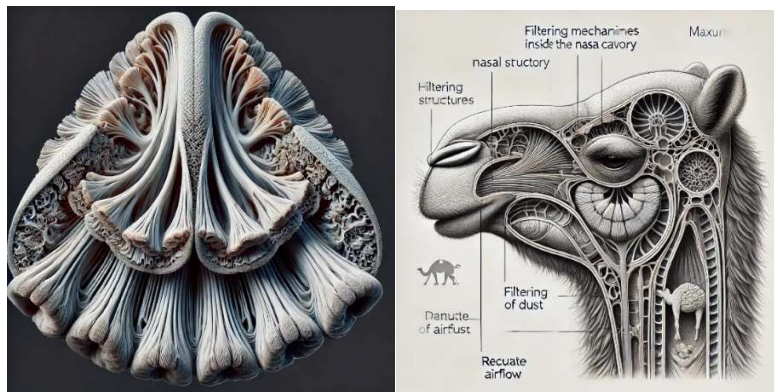


Figura 11 Camellos

2.2 Mecanismo biológico:

En sus fosas nasales poseen estructuras complejas con pliegues y cilios que capturan partículas y purifican el aire antes de que llegue a los pulmones. Cuando el camello exhala, el aire caliente y húmedo pasa por sus cavidades nasales, donde la temperatura es más baja. Este mecanismo reduce el estrés térmico de su organismo.

Abstracción de patrones

1. Identificación de apariencia clave

Identificar las características claves en la apariencia de dichos biomecanismo:

- **Cavidades nasales del camello:** Pliegues y cilios en su textura corporal.
- **Caparazón del escarabajo del desierto:** Superficie con regiones marcadas por pequeñas grietas o montículos, textura física porosa.

2. Traducción de geometrías

Analogía de las cavidades nasales del camello:

- **Patrón geométrico:** Pliegues en forma de "U" invertida en la sección inferior de la fachada (ver Figura X).
- **Función:** Filtros pasivos que reducen partículas en el aire y facilitan el intercambio térmico mediante evaporación controlada.

Analogía con el escarabajo:

- **Patrón geométrico:** Textura en relieve con microburbujas hidrofílicas (ver Figura X).
- **Función:** Captación de humedad del aire para enfriar el flujo de aire mediante evaporación.

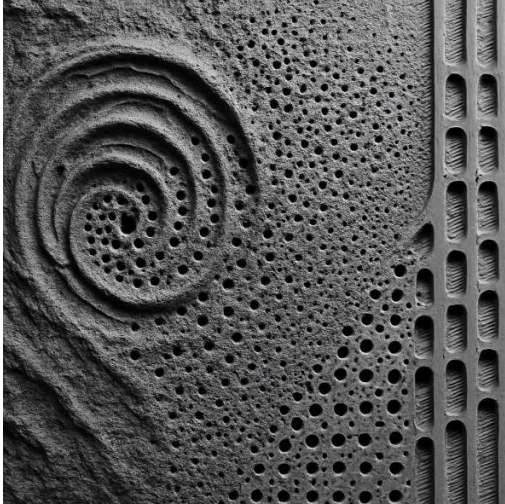
3. Resultado de la abstracción

3.1 Interpretación de IA:

Se usará el modelo de IA **GPT -4o** para **generar dos IMÁGENES CONCEPTUALES de los patrones extraídos**. Se utilizará el siguiente prompt para generarla: “Genera una imagen donde interpretes, desde los pasos a seguir en este apartado de resultados, las texturas de los biomecanismos, donde sigas paso a paso cada instrucción del documento para llegar al resultado esperado. De carácter monocromática, esquemático semi-realista, sin texto, con énfasis en interpretar las descripciones de las texturas brindada.”

3.2 Resultados de la IA **GPT -4o** :

Resultado para la TEXTURA del camello



Resultados para la TEXTURA del escarabajo

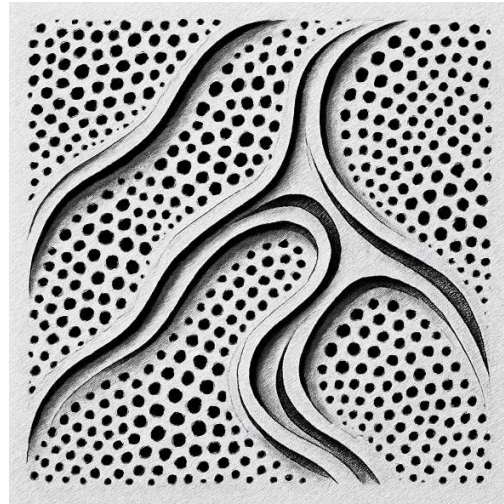


Figura 12 Texturas

Estas imágenes conceptuales serán empleadas en el proceso final de diseño del elemento
Elección de técnicas biomiméticas

Elección de técnicas biomiméticas

1. Criterios de selección

Para elaborar los criterios de selección, se partirá de una premisa de la tabla metodológica para diseño biomimético elaborada por el profesor David Andrés Torreblanca Días, donde indica:

“Seleccionar referente o referentes con mayor factibilidad de aplicación artificial”

Esta premisa será tratada como un axioma para diseñar los criterios de selección para filtrar la
“Tabla 1: Ejemplos de Biomimética en la Arquitectura”

Tabla 8 Criterios de selección de técnicas de biomimética

Criterios	Descripción	Justificación
<i>Simplicidad de la técnica</i>	Qué tan simple es el principio de la técnica biomimética a replicar (estructura, movimiento, reacción).	Mecanismos simples son más fáciles y económicos de imitar.
<i>Fabricación</i>	Facilidad de fabricación a nivel micro, meso y marco (entorno inmediato, ciudad, departamento)	Su método fabricación debe estar al alcance de la mano y de bajo – mediano costo.
<i>Grado de automatización requerido</i>	Nivel de tecnología o automatización que necesita para funcionar (pasivo vs. activo).	Soluciones pasivas son preferibles por sostenibilidad y bajo mantenimiento.
<i>Conocimiento técnico</i>	Existencia de estudios, precedentes o tecnología que facilite su interpretación	Facilita el desarrollo, adaptación y la validación.
<i>Compatibilidad</i>	Estimación de que las técnicas biomiméticas (2) sean compatibles.	No deben obstruirse durante el desarrollo del elemento prefabricado arquitectónico

A partir de los criterios establecidos en la **tabla #5 criterios de selección de técnicas biomiméticas** y las opciones contenidas en la **tabla #1 técnicas biomiméticas**, se puede realizar un filtrado que seleccione los referentes más viables. *El Centro Eastgate (Harare, Zimbabwe) – Técnica Pot-in-Pot* y *Biblioteca del Campus de Gando (Burquina Faso) – Ventilación estilo termitero africano* destacan como los más favorables:

- **Simplicidad de la técnica:** Estructuras pasivas o semipasivas, donde el flujo natural del aire, debido a sus dinámicas físicas, ejecuta el propio mecanismo.
- **Escalabilidad:** Su funcionamiento puede replicarse a pequeña y gran escala arquitectónica (evidenciable en los proyectos).

- **Requerimiento de baja automatización:** Son sistemas pasivos o semipasivos, sin necesidad de mucha tecnología o energía para funcionar de manera adecuada.
- **Conocimiento técnico:** Son ejemplos reales donde la técnica es funcional, además de contar con historial proceso investigativo tras ellas.
- **Compatibilidad:** Son técnicas compatibles, que pueden beneficiarse mutuamente para salvaguardar puntos débiles individuales.

Tabla 9 Justificación de selección de técnicas biomiméticas

Caso de estudio/técnica biomimética	Beneficios	Descripción	Justificación de selección	Compatibilidad/Aporte de beneficios a la otra técnica
<i>El Centro Eastgate – Técnica Pot-in-Pot</i>	Enfriamiento pasivo del aire	Uso de recipientes con agua para enfriar el aire mediante el intercambio térmico	Simplicidad elevada pero efectiva. Es replicable a varias escalas y es fácil de adaptar a casi cualquier modelo. Posee diferentes estilos	Generar humedad pasiva que pueda moverse mediante los conductos puede disminuir la necesidad de mantenimiento por motivos de limpieza
<i>Biblioteca del Campus de Gando (– Ventilación estilo termitero africano</i>	Ventilación natural pasiva extendida	Sistema de conductos para el transporte del aire	No requiere de ningún mecanismo automatizado. Adaptable a diferentes escalas	Puede ayudar a circular la humedad de una mejor manera, evitando una alta concentración en el sistema.

Técnicas biomiméticas elegidas

1. El Centro Eastgate (Harare, Zimbabwe):

Es un centro comercial y un bloque de oficinas que utiliza ingeniosamente medios naturales para la ventilación y la refrigeración. Diseñado por Mick Pearce, el edificio se inspira en los montículos de termitas africanas que se auto-refrigeran, constituyendo un ejemplo notable de biomimética en la arquitectura.

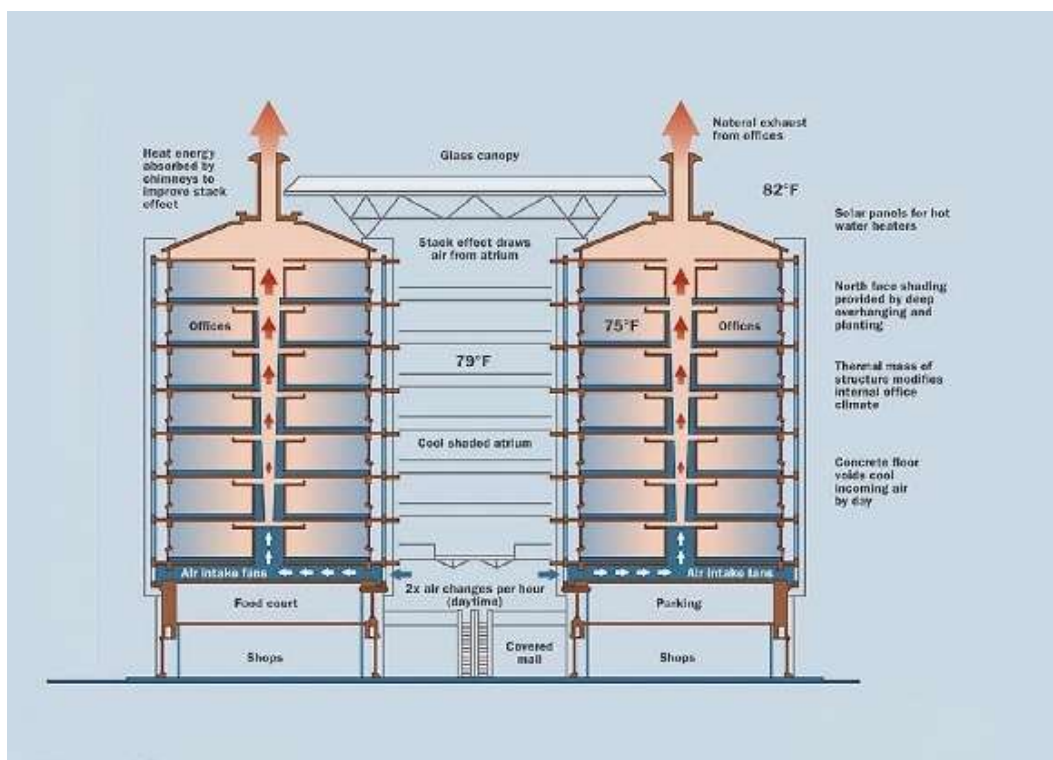


Figura 13 Never Enough Architecture. (2023, 10 de julio). El Centro Eastgate.

<https://neverenougharchitecture.com/es/project/el-centro-eastgate/>

1.1 Técnica de ventilación de termiteros africanos:

Los termiteros africanos, edificados por *Macrotermes michaelseni*, integran un sistema de refrigeración pasiva basada en principios físicos. Esta permite conservar unas condiciones internas de temperatura estables, pese a las variaciones climáticas externas. Su diseño arquitectónico está compuesto por una chimenea central, conductos verticales y una red de galerías internas, además, utiliza las oscilaciones térmicas para generar corrientes de ventilación, con el fin de hacer circular el aire, renovarlo y regular la temperatura. Durante el día, el calor solar calienta las paredes externas, esto provoca un flujo ascendente de aire por los canales laterales. Sin embargo, durante noche, el enfriamiento del exterior revierte dicho flujo (Ocko et al., 2017). Este proceso no solo mantiene una temperatura interna cercana a los 30 °C internos cuando el exterior se encuentra a 40 °C (una reducción de 10 °C o más grados) (Turner, 2001).

Por otra parte, la orientación y morfología de los termiteros optimizan su eficacia. En regiones de elevada radiación solar, estas estructuras son edificadas con una inclinación que favorezca su exposición al sol, tanto en la mañana como en la tarde; esto acelera el inicio del ciclo de intercambio térmico diario (King et al., 2015). Así, estos mecanismos naturales de control climático se han convertido en referentes para la arquitectura biomimética, especialmente en el diseño de edificaciones sostenibles, que apuestan por sistemas de ventilación pasiva y eficiente

2. Biblioteca del Campus de Gando (Burquina Faso):

Es la expansión diseñada por Kere Architecture para la escuela de campo de Gando. Este proyecto adapta la técnica de refrigeración pot-in-pot para enfriar el aire que circula al interior mediante su paso sobre vasijas con agua que lo humeden para generar el intercambio térmico apropiado.



Figura 14 Gordon, K. (2012, 14 de agosto). En construcción: Biblioteca escolar en Gando / Kéré Architecture. ArchDaily Colombia. <https://www.archdaily.co/co/02-179418/en-construccion-biblioteca-escolar-en-gando-kere-architecture> ArchDaily Colombia

2.1 Técnica Pot-in-Pot

La técnica Pot-in-Pot es un sistema de enfriamiento evaporativo pasivo que se utiliza principalmente en arquitectura y diseño sostenible para la conservación de alimentos y el enfriamiento de espacios. Esta consiste en recipientes de barro concéntricos con agua en su interior (Evans & Lee, 2022 - Scopus).

Mohamed Bah Abba es reconocido por haber desarrollado y popularizado el sistema de refrigeración Pot-in-Pot en tiempos modernos durante la década de 1990 en el norte rural de Nigeria, con el fin de preservar alimentos. Sin embargo, el principio subyacente: “enfriamiento pasivo por evaporación” tiene casos más antiguos:

- **Valle del Indo** (alrededor 3000 a. C.): En los restos de esta civilización se han descubierto vasijas de barro que, según se cree, eran utilizadas para enfriar agua.
- **Antiguo Egipto** (alrededor 2500 a. C.): Frescos muestran a esclavos abanicando jarras de agua, lo que indica el uso del enfriamiento evaporativo con recipientes porosos.

El reto de esta técnica consiste en abstraer estos principios y adaptarlos a una escala constructiva mayor; así, es posible desarrollar sistemas pasivos que emulen el comportamiento térmico del Pot-in-Pot. En consecuencia, esta técnica podría incorporarse en componentes como fachadas,

envolventes térmicas o módulos prefabricados, proponiendo soluciones sostenibles que, inspiradas en tecnologías tradicionales, respondan a las necesidades ambientales contemporáneas.

Identificación de fachada a intervenir en la Ecovilla UPB

1. Criterios de selección de fachada

Tabla 10 Criterios de selección de fachada

Criterios	Descripción	Justificación
<i>Exposición solar</i>	Cual fachada recibe más tiempo la luz directa del sol y a que horas	El elemento prefabricado será más efectivo en fachadas en horas de la tarde
<i>Equipamiento ligado</i>	Verificar que clase de equipo se encuentra ligado a la fachada	Evitar comprometer equipo de recolección de datos
<i>Área/Superficie</i>	Los m2 totales en los que se debería implementar el elemento prefabricado	Elegir un área controlable, no muy grande ni pequeña para tener una muestra adecuada

2. Elección de fachada

A partir de los criterios establecidos en la **tabla #9 criterios de selección de fachada**, se puede realizar un filtro que seleccione la zona de trabajo más viable de la Ecovilla:

- **Exposición solar:** Esta recibe de frente la luz de la tarde, así también debido a su ángulo frente al norte recibe parte de la radiación solar de la mañana.
- **Equipamiento interno:** Tanto en el interior como el exterior no se encuentra ningún dispositivo que puede verse afectado por la instalación de una segunda piel en la fachada.
- **Área/Superficie:** Área controlable, igual que su espacio interno al ser un especie de cubículo de trabajo que resalta del cuerpo principal del edificio.

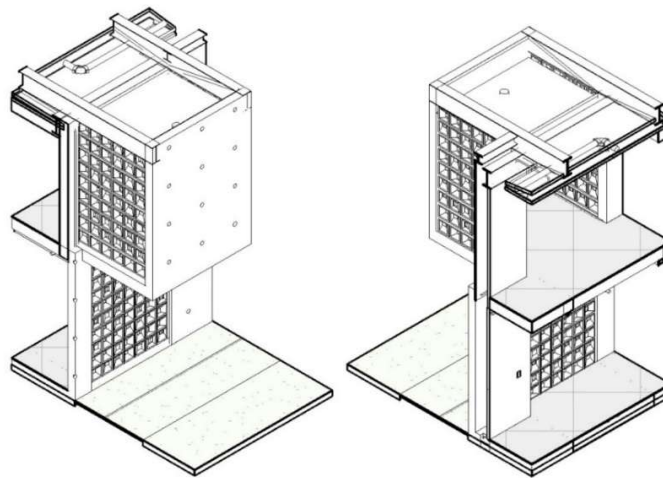


Figura 15 Fachada de estudio (Modelo 3D Revit Ecovilla)

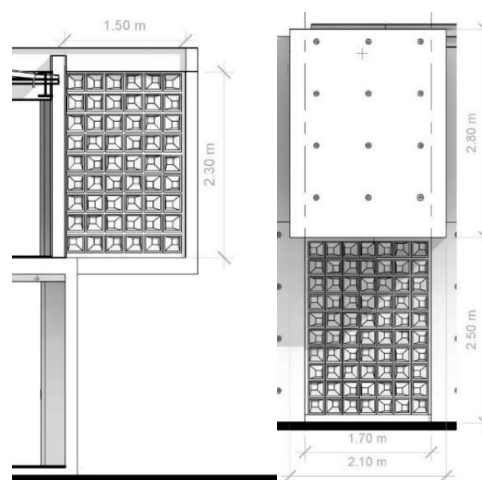


Figura 16 Fachada de estudio (Modelo 3D Revit Ecovilla)

Estas fachadas, diseñadas en un principio con aberturas para generar una ventilación pasiva al interior, además de proveer luz natural, han sido selladas para instalar un sistema de aire acondicionado en su segundo nivel, erradicando el propósito original de su función para evitar, justamente, emplear mecanismos poco acordes a su misión desde el ejemplo como un centro de investigación amigable con el medio ambiente y un ejemplo vivo dentro del campus de arquitectura renovable.

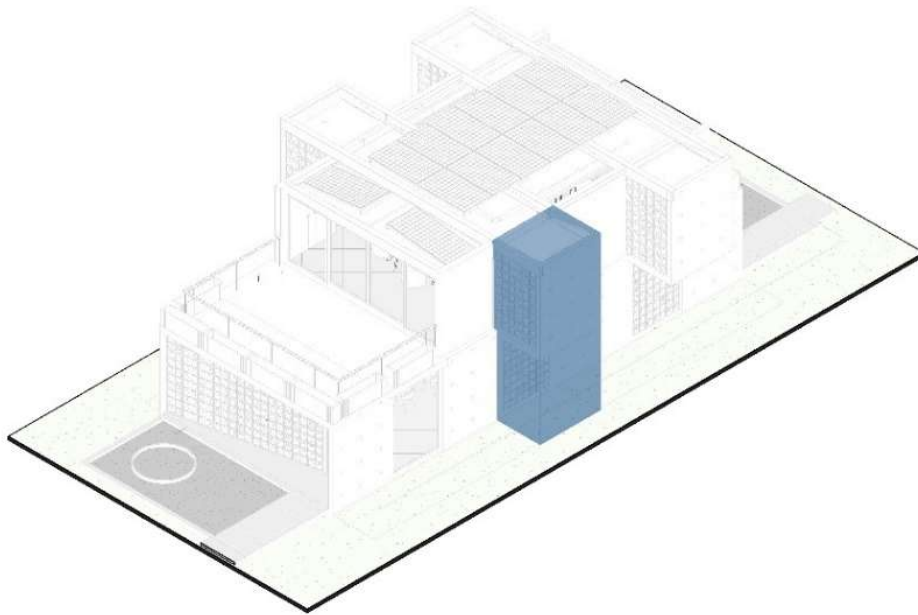


Figura 17 Aplicación de la fachada en isométrico (Modelo 3D Revit Ecovilla)

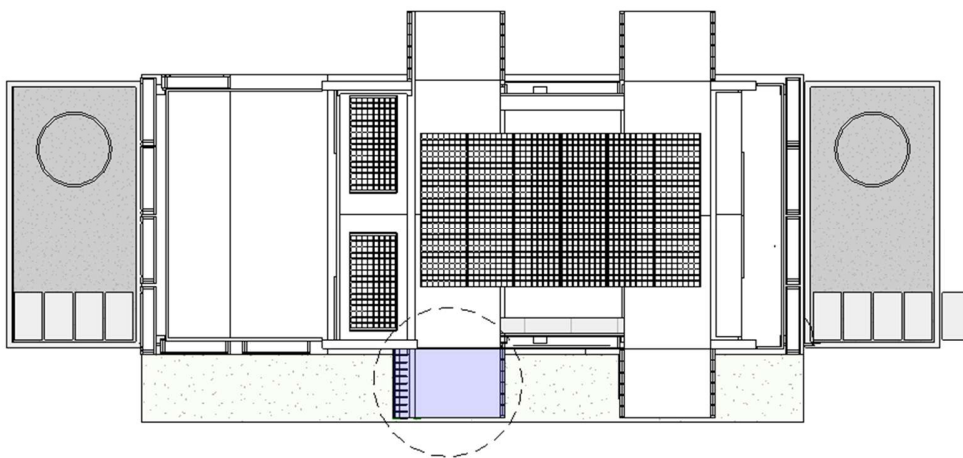


Figura 18 Aplicación de la fachada en planta (Modelo 3D Revit Ecovilla)

Diseño del sistema estructurante

1. Distribución e implementación de técnicas biomiméticas

Para el desarrollo del sistema estructurante, es decir, el/los mecanismos (en caso de ser varios) encargados que hacen posible el funcionamiento correcto, eficiente y respetuoso con el medio

ambiente que lo convierten en arquitectura sostenible, se llevó a cabo el uso de las dos técnicas abstraídas y explicadas en el marco teórico: refrigeración pasiva por evaporación del método Pot-in-Pot y el método de ventilación del termitero africano.

El diseño requirió de cuestionar las principales variables de estudio que se buscan controlar, siendo la temperatura y velocidad del aire al pasar a través del elemento prefabricado de fachada, para integrar de manera adecuada en un solo sistema ambas técnicas de modo que cumplan con los requerimientos esperados por el prototipo, a su vez que sea de una manera armónica, donde las técnicas no choquen, sino que se transformen en un mecanismo unificado.

El mecanismo estructurante del elemento prefabricado de fachada se encuentra dividido en dos partes que operan en unísono, estando una sobre la otra.

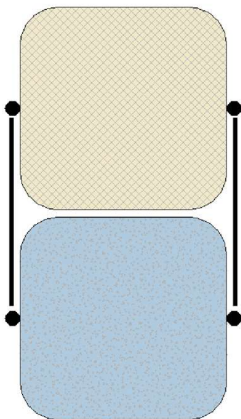


Figura 19 *Imagen representativa, autoría propia*

La zona superior emplea la técnica de ventilación del termitero africano para replegar nuevamente hacia el exterior las corrientes de aire caliente, disminuir la velocidad a la cual el aire llega hasta el otro lado del elemento prefabricado estructural y expulsar el exceso de humedad

Mientras, la zona inferior se refiere al lugar donde es aplicada la técnica de Pot-in-Pot, con el fin de enfriar mediante su proceso de evaporación todo el aire que pase a través de ella.

Ambas zonas se encuentran unidas mediante un conducto de ventilación y hacen parte del mismo cuerpo. De esta manera se pueden resolver varios de los conflictos y dificultades que presenta la adecuación de dichas técnica a una escala arquitectónica.

2. Proceso de diseño

2.1 Desafíos

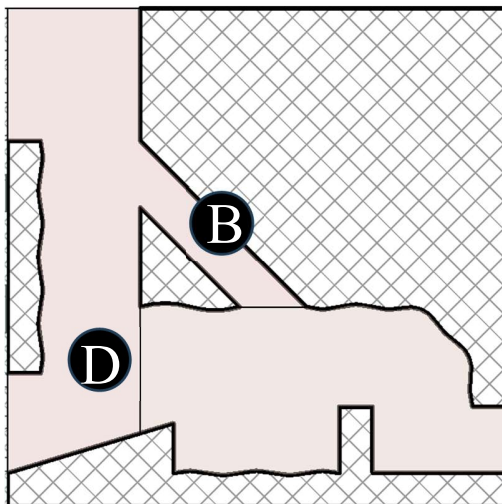
La zona inferior del elemento prefabricado arquitectónico integra la técnica biomimética Pot-in-Pot como la espina vertebral de su mecanismo para cumplir con su función principal: enfriar el aire que ingresa desde el exterior hasta el interior. Esto trae varios retos (ver tabla #2: Beneficios generales para la arquitectura renovable), siendo los principales desafíos: **uso del agua, control de la humedad, escalabilidad y rendimiento dependiente del clima.**

Para esto, el diseño de la zona inferior debe contar con contramedidas es estos problemas:

Desafíos
Uso de agua
Control de la humedad
Escalabilidad
Rendimiento dependiente del clima

Contramedidas
Aprovechar el clima y el reciclaje
Canales de ventilación
Referentes investigados escalables
Configuración para diferentes climas

Sección transversal del elemento de fachada arquitectónico



La distribución interior está dividida en las partes superior (rojo), inferior (naranja), el sistema estructural.

Figura 20 Distribución interior

2.1 *Contramedidas*

A continuación, se explicarán las contramedidas a profundidad, y como funcionan en el sistema (ubicados en el gráfico de sección)

A. Contramedida de aprovechamiento climático y reciclaje: Se infiere la posibilidad de usar agua reciclada para nutrir al sistema, además de aprovechar la propia humedad del ambiente para abastecerlo. Esta toma de humedad se da mediante los patrones de los referentes biomecánicos (explicado en *Diseño de los patrones biomiméticos*)

B. Contramedida de canales de ventilación: La humedad, aunque sea la principal aliada y método de enfriamiento del aire del sistema, en exceso puede resultar en un efecto contrario, aumentando la percepción térmica de los usuarios presentes en el espacio. Para solucionar este problema, se emplea el sistema de vertientes verticales de los termiteros africanos para movilizar el aire caliente desde su interior al exterior. Mediante un túnel de ventilación adicional, sobre la zona de concentración de mayor humedad, se realiza la evacuación del exceso de humedad al interior del elemento prefabricado arquitectónico.

C. Contramedida de escalabilidad: Una complicación de trabajar en la escala arquitectónica es el hecho de trabajar con dimensiones muy extensas. Sin embargo, este desafío había sido tomado desde el principio, aplicada tanto para la búsqueda como en los criterios de selección finales, tanto de las técnicas biomiméticas como de los biomecanismos elegidos para el diseño final, verificando que si puedan ser aplicables a la escala real de trabajo. **(EVIDENCIABLE EN EL DISEÑO)**

D. Contramedida de configuración climática: El clima, específicamente una fuerte lluvia puede comprometer la operatividad del sistema, y de requerir mantenimiento después de que ocurra alguna de estas. Para esto se diseño con una inclinación en suelo de la chimenea, además de hacer más bajo el lateral más próximo a la boquilla de entrada de aire, diseñada para que en caso de inundación interna tenga un camino claro hacia la pendiente de expulsión.

3. Resultados del sistema estructurante

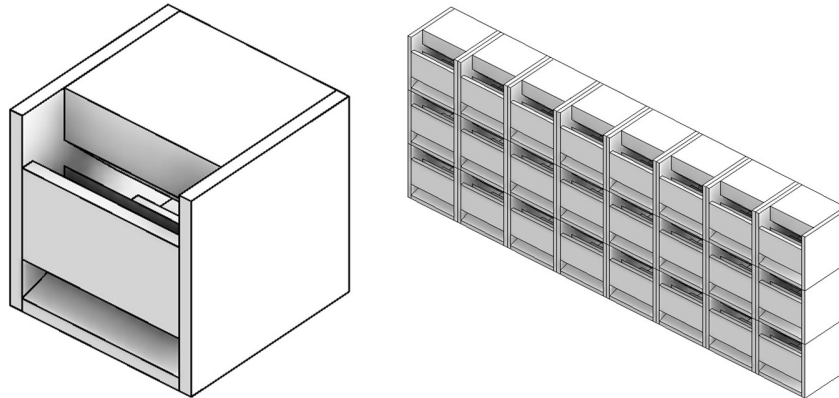


Figura 21 Resultados

Elemento diseñado

Elemento diseñado en conjunto

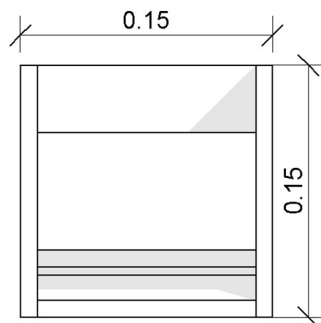


Figura 22 Medidas frontales – Profundidad 15 cm

Diseño de los patrones biomiméticos

1. Distribución e implementación de los biomecanismos

Los patrones en el desarrollo del elemento prefabricado arquitectónico de fachada se emplean con dos fines: **1. Estética**, **2. Función en base a los biomecanismos**. Esto es muy importante, puesto que la disciplina propia de la arquitectura busca unificar funcionalidad y atractivo visual, siendo en este caso con la intención de representar artísticamente las características bioinspiradas, abstrayendo con ellas un biomecanismo que se integre en el elemento prefabricado arquitectónico funcional.

La distribución de estos patrones se reparte entre la funcionalidad y la estética, cada una de estas tiene requerimientos para ser implementadas de forma eficiente y cumplir con su propósito:

Tabla 11 Implementación de patrones biomiméticos

Características	Descripción	Requerimientos
<i>Estética</i>	Cualidad arquitectónica para hacer agradable a la vista la pieza de diseño	Repercusión visual, congruencia al encajarse junto a otros elementos
<i>Función en base a los biomecanismos</i>	Implementar el biomecanismo de los referentes a través de dichos patrones	Implementarse en la mayor parte de la superficie del elemento (POROSIDAD)

2. Creación de patrones

Para desarrollar dichos patrones, se hizo uso de las imágenes conceptuales de texturas (Figuras X, Y) de los referentes biomecánicos que enseñan las texturas de dichos sistemas biológicos. Se le pidió a la IA de la página *krea.ia* que analizara las imágenes conceptuales, y junto al módulo de pensamiento IA *GPT -4^o* se combinó junto al resto del documento y la “*tabla #8: implementación de patrones biomiméticos*”, para crear tres patrones base, inspirados en las texturas conceptuales ya abstraídas (denominados “patrón #1, patrón #2 y patrón #3 respectivamente):

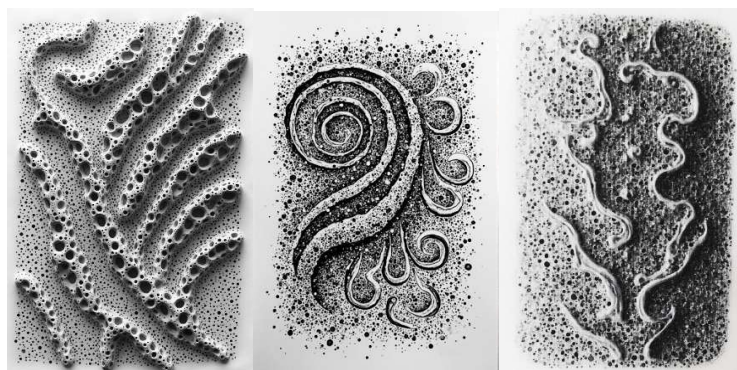


Figura 23 Patrón 1

Figura 24 Patrón 2

Figura 25 Patrón 3

2.1 Elección de patrón final

Para la elección del patrón principal que será implementado en el diseño tanto estético como funcional, será elegido mediante una encuesta realizada por **mínimo 20 personas**. Este grupo incluirá estudiantes de arquitectura, docentes, personal administrativo de la UPB y personas del común, asegurando una diversidad de opiniones y experiencias.

El **objetivo principal de la encuesta** es encontrar cual es el patrón más aceptado en términos estéticos por el común, siendo aquel que reciba más feedback positivo quien será implementado. También se llevarán a cabo una evaluación de **cada imagen generada en este proceso, para validar su pertinencia en el proceso llevado hasta el momento:**

Pregunta #1

Percepción estética de formas inspiradas en la naturaleza dentro del diseño arquitectónico

31 respuestas

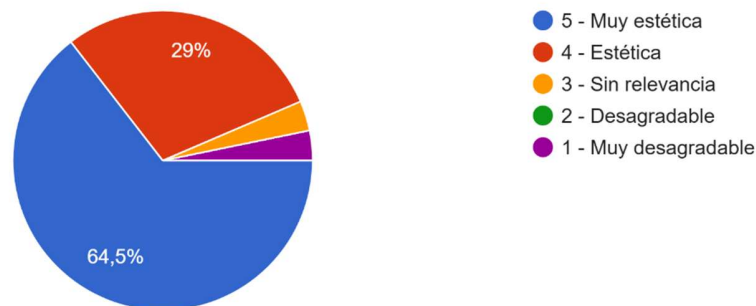
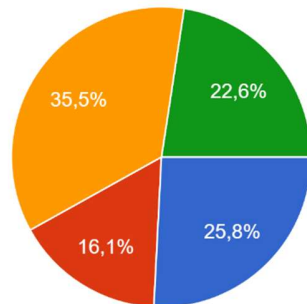


Figura 26 Pregunta 1

Pregunta #2 – Imagen proporcionada, Figura X

Percepción estética de los patrones del caparazón del escarabajo el desierto (representación artística)

31 respuestas



- 5 - Muy estética
- 4 - Estética
- 3 - Agradable
- 2 - Desagradable
- 1 - Muy desagradable

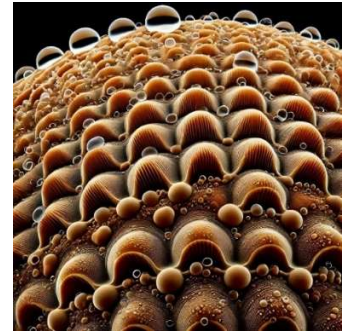
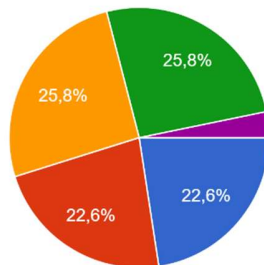


Figura 27 Pregunta 2

Pregunta #3 – Imagen proporcionada, Figura X

Percepción estética de los patrones del internos de las fosas nasales del camello (representación artística)

31 respuestas



- 5 - Muy estética
- 4 - Estética
- 3 - Agradable
- 2 - Desagradable
- 1 - Muy desagradable



Figura 28 Pregunta 3

Pregunta #4 – Imagen conceptual proporcionada, Figura X

Percepción del resultado de abstracción de formas unificado - Textura #1 (representación esquemática)

31 respuestas

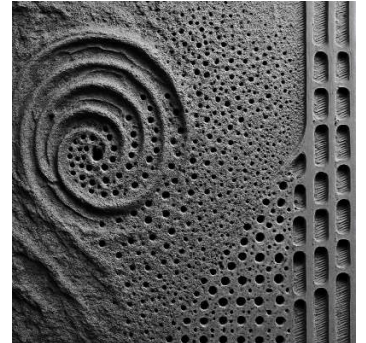
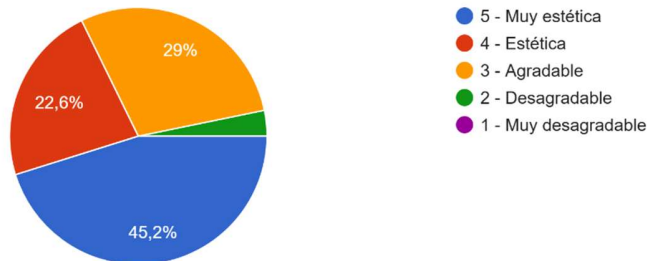


Figura 29 Pregunta 4

Pregunta #5 – Imagen conceptual proporcionada, Figura X

Percepción del resultado de abstracción de formas unificado - Textura #2 (representación esquemática)

31 respuestas

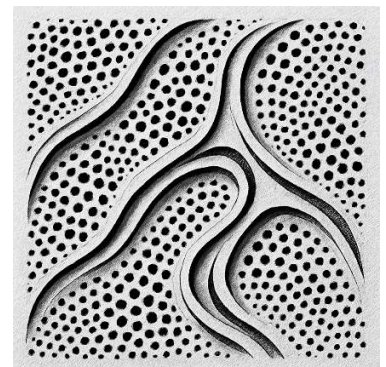
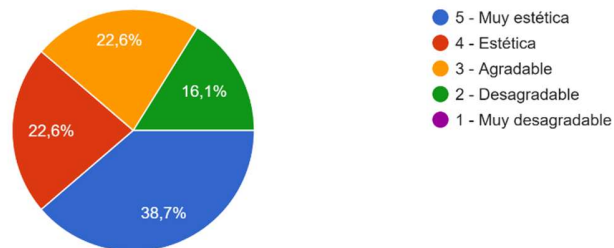


Figura 30 Pregunta 5

Pregunta #6 – Imagen de patrón #1 proporcionada, Figura X

Percepción del resultado de abstracción de patrones - Patrón #1
31 respuestas

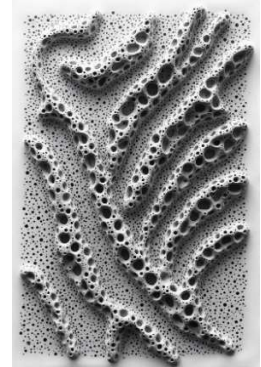
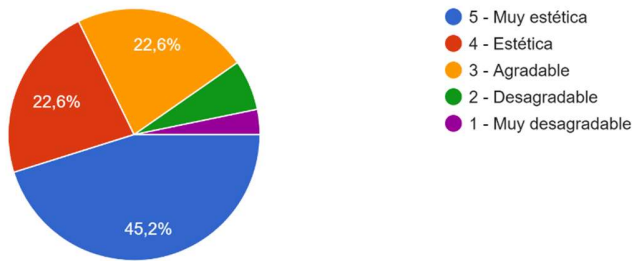


Figura 31 Pregunta 6

Pregunta #7 – Imagen de patrón #2 proporcionada, Figura X

Percepción del resultado de abstracción de patrones - Patrón #2
31 respuestas

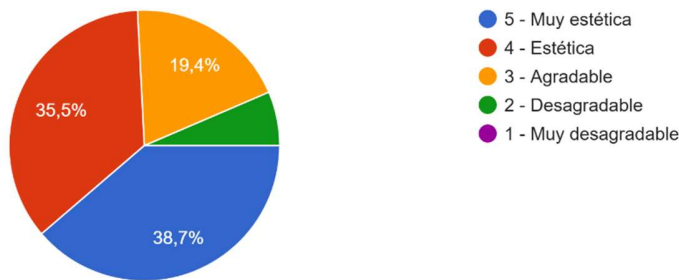


Figura 32 Pregunta 7

Pregunta #8 – Imagen de patrón #3 proporcionada, Figura X

Percepción del resultado de abstracción de formas unificado - Patrón #3

31 respuestas

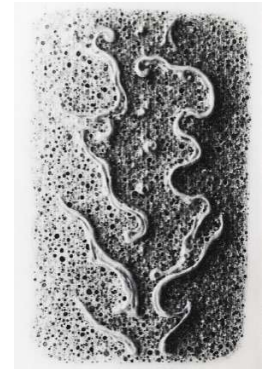
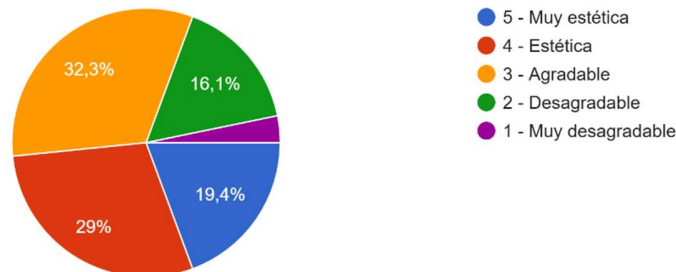


Figura 33 Pregunta 8

2.1.1 Resultados de encuesta

Cantidad de participantes – 31 personas

El patrón con más respuestas a su favor es el patrón #2, **con el 74,2% encontrándolo mínimo un 4 sobre 5 en la escala de Likert**, al marcar la opción de “Estética”, le sigue el patrón #1, **con el 67.8% de sus votos en un 4 sobre 5**, a pesar de haber sido el resultado con más votos en “Muy estética”, finalmente el patrón #3, **con el 48.4% de sus votos dándole al menos un 4 sobre 5**.

A pesar de que el patrón #1 recibió la mayor cantidad de votos con un valor de 5 sobre 5 “Muy estética” en la escala de Likert, recibió de igual forma votos en una valoración de 1 sobre 5 “Muy desagradable”, mientras que el patrón #2 no recibió ningún voto con dicha valoración.

3. Implementación de la forma estética

Siguiendo el proceso planteado, se llegó al siguiente diseño (modelo 3D propio, Revit):

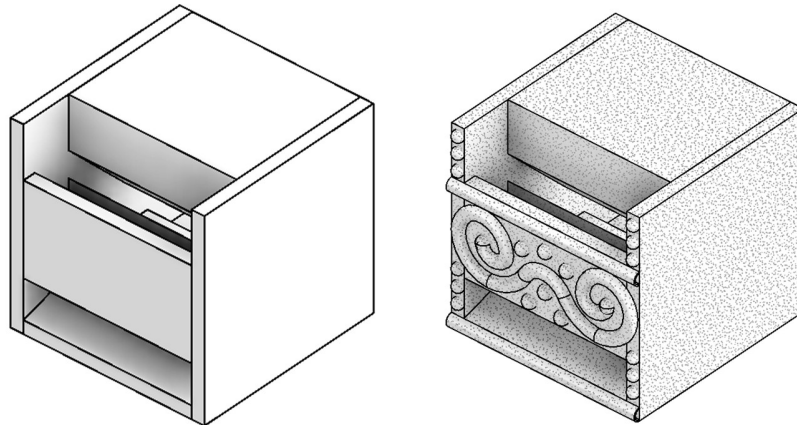


Figura 34 Implementación de la forma estética

Elemento sin diseño

Diseño a base de patrón #2 integrado

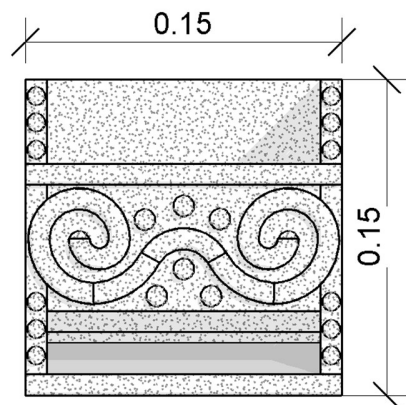


Figura 35 Visualización frontal

Visualización frontal, elemento único

Visualización acoplada en conjunto - Isométrico

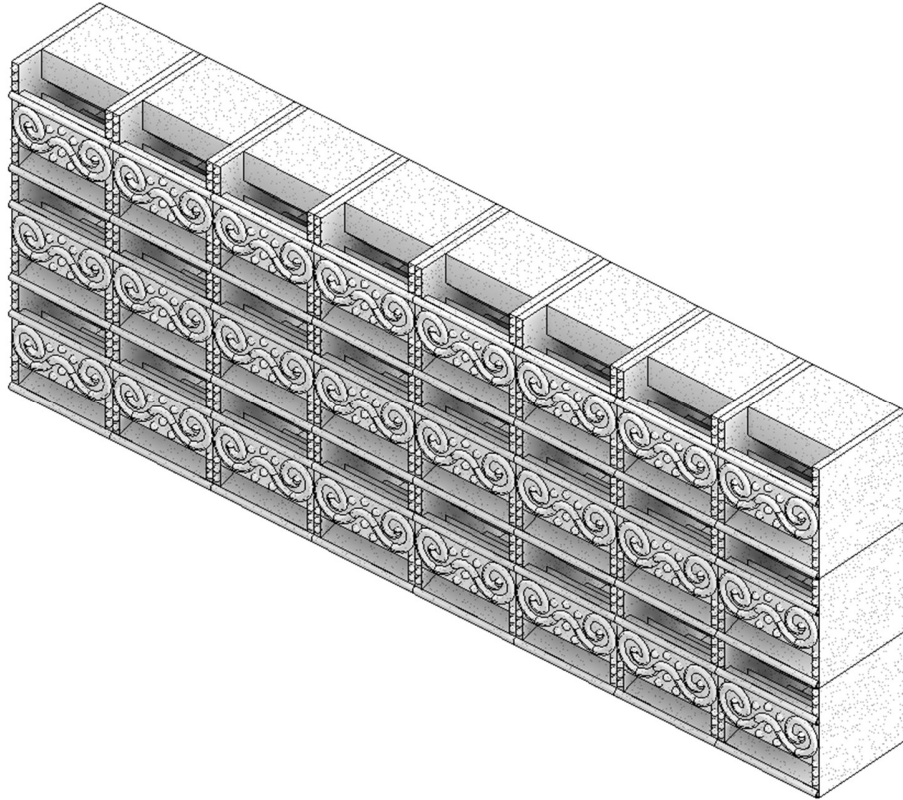


Figura 36 *Visualización acoplada en conjunto - Isométrico*

Visualización acoplada en conjunto – Ortogonal frontal

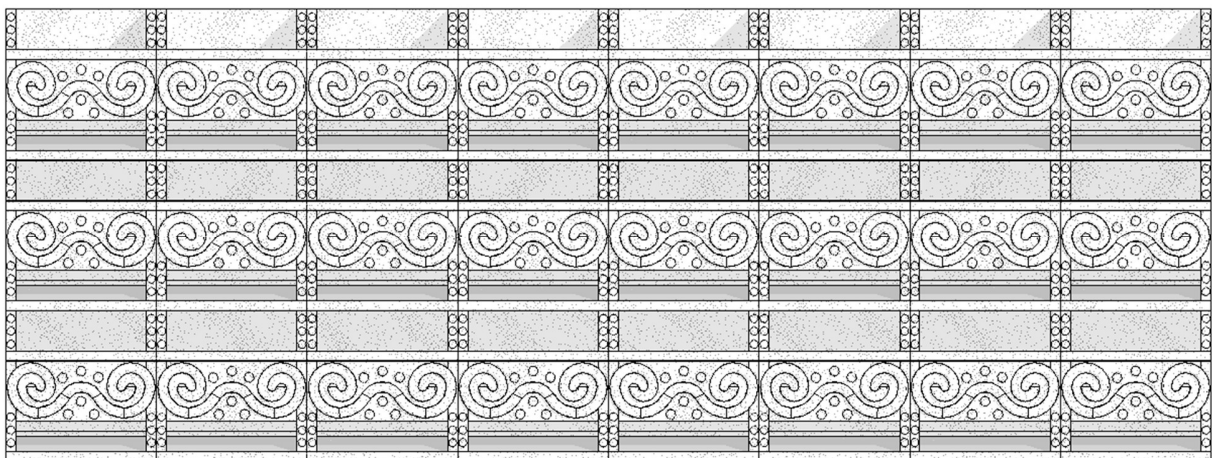


Figura 37 *Visualización acoplada en conjunto – Ortogonal frontal*

4. Implementación de la función - Material

El requisito principal para que el patrón tenga la función esperada, aportar en la recolección de humedad y regulador de la temperatura interna (referentes biomecánicos), es que este ocupe la mayor cantidad de superficie posible para **garantizar su porosidad**.

Para lograr cumplir con este requisito, el material elegido debe estar en armonía con su forma y sistema según la metodología propuesta por el profesor David Andrés Torreblanca Días:

Estoada de diseño 5

Tabla 12 Opciones de materiales para elemento prefabricado arquitectónico

Material	Características principales	Justificación para elementos pequeños
Cerámica para impresión 3D	Porosidad ajustable según diseño, alta resolución de detalle, inerte a la imtemperie	Permite crear geometrías complejas y reproducibles con porosidad controlada milimétrica.
Barro artesanal (cerámica tradicional)	Estructura micro-porosa natural, fácil de moldear, bajo costo	Ideal para prototipos y piezas artesanales donde no se requiere alta automatización.
Espuma de polímero poroso	Ligera, buena absorción de impactos, poros interconectados	Útil en amortiguadores o difusores de aire en mini-módulos por su baja densidad.
Sinterizado de metal (MIM)	Porosidad fina y uniforme, alta resistencia mecánica	Apto para componentes estructurales pequeños que requieren rigidez y conductividad.
Diatomita	Muy alta porosidad (>80%), material natural	Excelente para filtración y captación de humedad en mini-filtros pasivos.

Bio-espuma (quitina/chitosán)	Biodegradable; poros interconectados; modulación de porosidad biológica	Buena opción en aplicaciones médicas o ambientales de pequeña escala.
----------------------------------	--	---

4.1 Criterios de selección de material

Tabla 13 Criterios de selección de material

Criterio	Descripción
Porosidad	Porosidad en términos tamaño, forma y distribución de los poros.
Resolución y detalle	Nivel de control en la implementación del patrón en la superficie del elemento.
Facilidad de fabricación	Infraestructura, tiempo de proceso y curva de aprendizaje.
Costo	Inversión en materia prima, energía y equipos.
Resistencia mecánica	Fragilidad o dureza de la pieza para soportar cargas o manipulaciones.
Impacto ambiental	Origen y reciclabilidad de la materia, emisiones durante producción y fin de vida.

Argumento de viabilidad:

Cerámica de impresión 3D, Barro artesanal (cerámica tradicional)

Tanto la cerámica para impresión 3D como el barro son los materiales más viables para fabricar piezas elementos de pequeñas/medianas dimensiones, en este caso aún más, al buscar aprovechar su porosidad como un sistema funcional. La impresión 3D aporta un control preciso de la geometría

de elemento, ideal para entornos de investigación que demande alto control. El barro artesanal permite adaptaciones rápidas, flexibilidad y bajos costos, perfecto para contextos de recursos limitados. Ambos materiales pueden emplearse según la escala de producción y la infraestructura disponible para realizar el elemento prefabricado arquitectónico. Así, la decisión final depende del balance entre precisión, costo y contexto.

Evaluación del prototipo

1. Experimento #1: Refrigeración y ventilación del aire

Para esta prueba se contó con un modelo de funcionamiento similar del sistema propuesto para el elemento prefabricado arquitectónico.

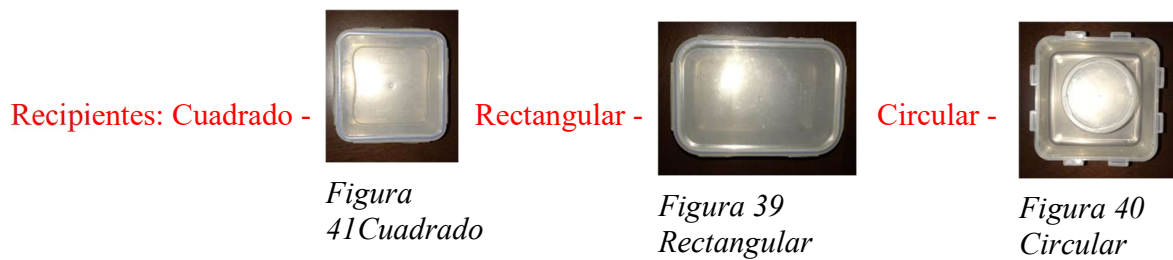
Descripción del experimento: Se diseñó un modelo con dos aperturas, para el ingreso y salida del flujo de aire. La salida consta con $\frac{1}{4}$ del área del orificio de entrada. Esta corriente de aire es generada artificialmente por una secadora de pelo cotidiana, con una potencia de expulsión de aire en 55 °C a 9,5 m/s. Este sistema de cartón cuenta con una superficie removible para ingresar diferentes recipientes. Se posiciona un anemómetro en el orificio de salida para medir a la velocidad en que el aire es expulsado desde el interior de la caja, así como un sensor de temperatura para medir los grados a los que sale. Antes de cada prueba se toma la temperatura externa e interna del sistema. **Se realizarán 2 series de pruebas: con recipientes llenos de agua y vacíos, con el fin de verificar las implicaciones de dichos recipientes y el agua sobre el flujo del aire, en su temperatura y velocidad.**

Montaje final – Segundo piso de la Ecovilla UPB

Docente acompañante: Luis Felipe Lalinde



Figura 38 Montaje final – Segundo piso de la Ecovilla UPB



1.1 Resultados del experimento

Medidas iniciales

- **Humedad:** 67%
- **Temperatura del aire expulsado por el secador:** 55 °C

1.1.1 Experimentos con recipientes llenos de agua

Tabla 14 Experimentos con recipientes llenos de agua

Prueba	Recipiente	Duración	Temp. salida	Vel. aire	Distancia secador	Temp. ambiente
#1	Cuadrado	1:30 min	45 °C	1.7 m/s	15 cm	25 °C ext / 25 °C int
#2	Rectangular	1:30 min	43 °C	1.6 m/s	15 cm	25 °C ext / 25 °C int
#3	Circular	1:30 min	39 °C	1.7 m/s	15 cm	26 °C ext / 26.75 °C int

1.1.2 Observaciones:

- El flujo de aire derramó el agua de todos los recipientes; el rectangular perdió más agua.
- Recipientes no se calentaron perceptiblemente. El cuadrado vacío donde estaba el recipiente circular mostró un calentamiento significativo solo en la cara frontal.
- Enfriamiento de la caja tras cada prueba: con cubierta: 5–8 min / cubierta removida: 4 min.

1.1.3 Experimentos con recipientes vacíos

Tabla 15 Experimentos con recipientes vacíos

Prueba	Recipiente	Duración	Temp. salida	Vel. aire	Distancia secador	Temp. ambiente
#4	Cuadrado	1:30 min	54 °C	1.5 m/s	15 cm	27.5 °C ext / 27 °C int
#5	Rectangular	1:30 min	51 °C	1.6 m/s	15 cm	28 °C ext / 28.5 °C int
#6	Sin recipiente	1:30 min	60 °C	3.0 m/s	15 cm	28 °C ext / 28.5 °C int

1.1.4 Observaciones:

- Aumento significativo de temperatura de salida, casi igual a la del secador.
 - Recipientes se calentaron solo en la cara más cercana al ingreso del aire.
 - Menor tiempo de enfriamiento respecto a pruebas con agua (~1 min menos).
 - Mayor velocidad del aire en el experimento sin recipiente (3 m/s).
-

1.1.5 Hallazgos de experimento:

- Recipientes con agua retrasan el enfriamiento de la caja modelo pese a mostrar menor temperatura interior, debido a la humedad retenida.
- La forma del recipiente afecta el flujo y velocidad del aire, incluso con igual volumen ocupado.
- Combinación de recipiente circular con cuadrado vacío ofreció mejores resultados: equilibrio entre humedad y captura de aire.

2. Experimento #2: Implicación de geometrías en la velocidad del aire.

Para esta prueba se contó con un conducto de 50 cm de largo, 23 cm de altura y 14 de ancho para ubicar los mismos recipientes empleados en el experimento anterior (Experimento #1: Refrigeración y ventilación del aire)

Descripción del experimento: Se construyó un conducto para probar la implicación de las geometrías de los recipientes en la velocidad del flujo del aire. Las pruebas se realizarán introduciendo a una profundidad de 15 cm (marcada en el conducto) los recipientes, Se usará una secadora de pelo cotidiana para inducir una corriente de aire (55 °C a 9,5 m/s) al interior del conducto. Con un anemómetro se tomará la velocidad de salida del aire desde arriba de los recipientes como a sus laterales. Se evaluará que forma repercute más en la velocidad de salida lateral y superior a los recipientes. Por cada prueba se tomarán datos 5 veces.

Esquema de posicionamiento de recipientes:

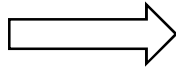


Figura 42 Montaje

Figura 43 Montaje final

Montaje final – Segundo piso de la Ecovilla UPB



Figura 44 Experimentación

2.1 Resultados del experimento

Medidas iniciales

- **Velocidad a través de conducto:** 3.1 m/s
- **Temperatura del aire expulsado por el secador:** 55 °C

2.1.1 Experimentos con recipientes tapados

Tabla 16 Experimentos con recipientes tapados

Prueba	Recipiente	Duración	Vel. salida superior promedio	Vel. salida lateral promedio	Dist. secador de la apertura del conducto
#1	Cuadrado	30 seg	0.9 m/s	4.0 m/s	5 cm
#2	Rectangular	30 seg	2.2 m/s	4.8 m/s	5 cm
#3	Circular	30 seg	0.6 m/s	4.6 m/s	5 cm

2.1.2 Observaciones:

- El recipiente rectangular presentó las mayores velocidades, tanto en salida superior como lateral.
- A pesar de presentar la menor velocidad en la salida superior, el recipiente circular superó la velocidad en la salida superior por un (margen significativo en la escala del experimento, 0.6 m/s) al recipiente cuadrado.

2.1.3 Experimentos con recipientes destapados

Tabla 17 Experimentos con recipientes destapados

Prueba	Recipiente	Duración	Vel. salida superior promedio	Vel. salida lateral	Dist. secador de la apertura del conducto
#1	Cuadrado	30 seg	0.7 m/s	3.8 m/s	5 cm
#2	Rectangular	30 seg	1.1 m/s	4.0 m/s	5 cm
#3	Circular	30 seg	1.1 m/s	4.4 m/s	5 cm

2.1.4 Observaciones:

- Aumento significativo de la velocidad en la salida superior del recipiente circular.
- Hubo una disminución, significativa o menor, en casi todas las medidas de velocidad de todos los recipientes.
- El ángulo de inclinación presentó una mayor variabilidad en las pruebas de con los recipientes destapados, por lo que estabilizar el secador fue un necesario para dar con los resultados

2.1.5 Hallazgos de experimento:

- Los recipientes tapados generan mayores velocidades en las corrientes de aire, tanto en la superior como lateral.
- Destapar los recipientes genera variaciones significativas dentro rumbo que toma el aire al interior del conducto, reteniendo una parte que no es expulsada al instante.
- El recipiente cuadrado presento más estabilidad en ambas pruebas, siendo una geometría estable con respecto a los otros dos.

3. Hallazgos generales de los experimentos

A partir de los dos experimentos realizados y de los principios estudiados sobre humedad y dinámica de fluidos (marco teórico conceptual), se obtienen las siguientes conclusiones generales:

1. La presencia de agua como masa térmica retrasa el intercambio de calor, pero regula la temperatura interior

- Los recipientes con agua disminuyen la temperatura del aire de salida en comparación con los vacíos, al retener calor y liberar lentamente energía térmica, lo que alarga el tiempo de enfriamiento de la estructura (5–8 min con cubierta frente a 4 min sin ella).
- Sin embargo, la humedad adicional reduce la eficacia de la evaporación como mecanismo de enfriamiento, incrementando la percepción térmica en ambientes muy húmedos.

2. La geometría interna condiciona significativamente la velocidad y dirección del flujo de aire

- En el experimento 1, la configuración que combinó un recipiente circular alojado en un espacio cuadrado alcanzó un buen equilibrio entre la captación de aire y la modulación de temperatura (39 °C y 1.7 m/s).
- En el experimento 2, los conductos tapados mostraron que el recipiente rectangular ofrecía las mayores velocidades de salida tanto lateral (4.8 m/s) como superior (2.2 m/s), mientras que el circular, aunque menor en salida superior, superó al cuadrado en destapado (1.1 m/s).

3. El cubrimiento afecta la estabilidad y reproducibilidad del flujo

- Destapar los recipientes introduce mayor variabilidad en la dirección del flujo y hace necesario estabilizar la fuente (secador) para obtener resultados consistentes,

mientras que los recipientes tapados proporcionan flujos más uniformes y predecibles.

4. Principios de continuidad y Bernoulli se confirman en geometrías variables

- Al reducirse el área de salida (1/4 del área de entrada), la velocidad del aire aumenta de forma inversamente proporcional al área (ley de continuidad) y la presión disminuye en los tramos más estrechos (principio de Bernoulli), favoreciendo la extracción activa de aire caliente.

5. Fricción y turbulencias locales

- Las irregularidades en la superficie interna del conducto y cambios bruscos de dirección generan pérdidas de velocidad por fricción y zonas de turbulencia, por lo que es recomendable optimizar la superficie y evitar ángulos muy pronunciados en el diseño arquitectónico.

6. Recomendaciones para diseño biomimético de ventilación

- Incorporar elementos con masa térmica (agua u otros) para amortiguar los picos de temperatura interior.
- Diseñar aberturas con secciones variables que aprovechen Bernoulli para generar flujos auto-regulados según la velocidad del viento exterior.
- Emplear geometrías mixtas (círculo en cuadrado, etc.) para equilibrar captación de masa de aire y velocidad de expulsión.
- Minimizar ángulos y rugosidades (excepto a aquellas basadas en el patrón biomimético final) internas para reducir pérdidas por fricción y turbulencia.

7. Mejores resultados y aplicación en el diseño del elemento prefabricado

El recipiente que presento los resultados más óptimos fue el recipiente circular, que es la combinación del recipiente cuadrado (abierto en todo momento) con uno respectivamente circular más pequeño que se coloca en su centro.

- Fue el elemento que de manera comparativa dio con **mejores resultados en la ventilación y refrigeración del aire.**
- Durante la segunda prueba, en la primera fase presento la mayor reducción en la velocidad del aire cuando este pasaba encima del recipiente. Durante la segunda fase, los resultados fueron muy variables, ya que a esta geometría presenta **resultados diferentes en cuanto se varía el ángulo de inclinación de entrada del aire**, siendo la más rápida registrada en 45° grados hacia abajo, y **la más lenta y controlada (sin fluctuaciones sobre el tiempo) se dio con 45° grados hacia arriba**, esto respecto a la cara lateral más próxima del recipiente.

Estas observaciones se ven reflejadas en el diseño del elemento prefabricado arquitectónico en su sistema estructurante:

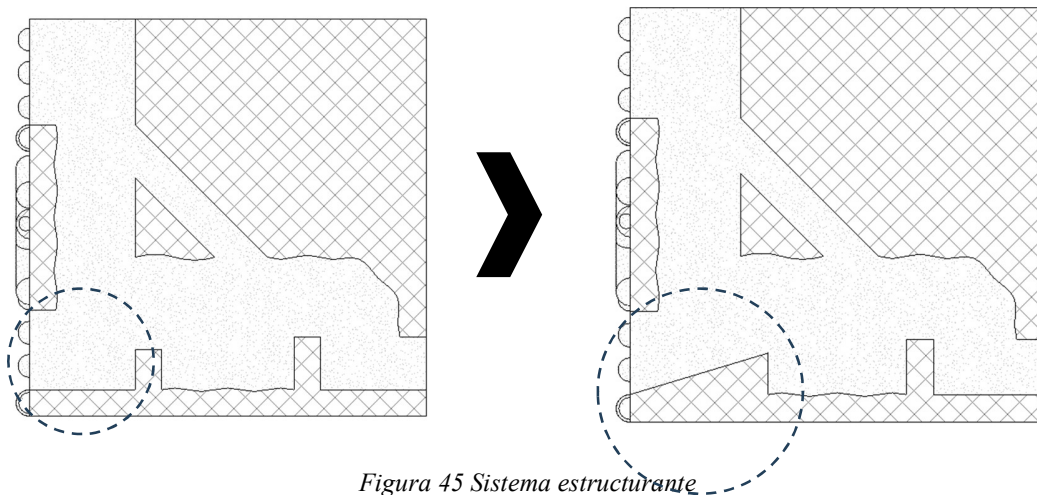


Figura 45 Sistema estructurante

Este cambio en el diseño interior cumple con otra función además de la brindada mediante las **Contramedidas (Diseño del sistema estructurante)**: Brindar un ángulo favorable para la forma interna del elemento de fachada para reducir la presión y velocidad del aire al momento de su ingreso.

Prueba de simulación digital

1. Simulación en fachadas - SimScale

Simulación de Ecovilla UPB entera

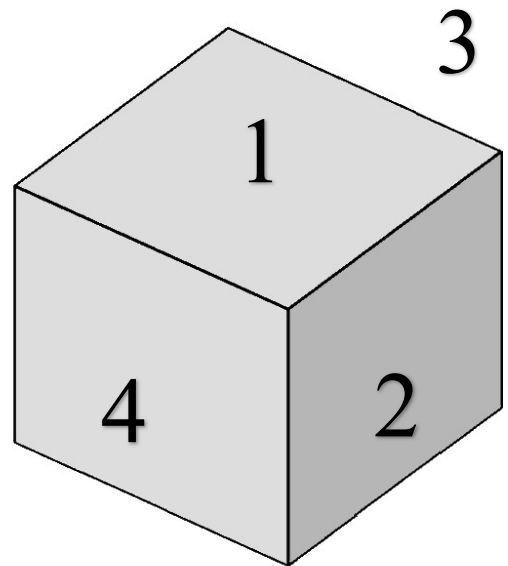


Figura 46 Enumeración

Figura 47 Simulación de Ecovilla UPB entera

Modelo 3D empleado en la simulación general

Diagrama de fachadas

Considerando un viento predominante del norte a velocidad media de 9,5 m/s:

Tabla 18 Diseño fachadas

Fachada	Orientación	Ángulo incidencia	Presión dinámica (Pa)	Observaciones
1	0° (frontal)	0°	15.6	Estancamiento: alta presión impacto; separaciones débiles en bordes.
2	90° (lateral)	90°	-7.8	Zonas de succión; posible turbulencia en esquinas; buena ventilación pasiva.

3	180° (trasera)	180°	-7.8	Presión negativa moderada; separación de flujo y vórtices.
4	270° (lateral)	270°	-7.8	Semejante al Este; succión lateral; recirculación en esquinas.

Simulación de fachada con elemento prefabricado arquitectónico integrado

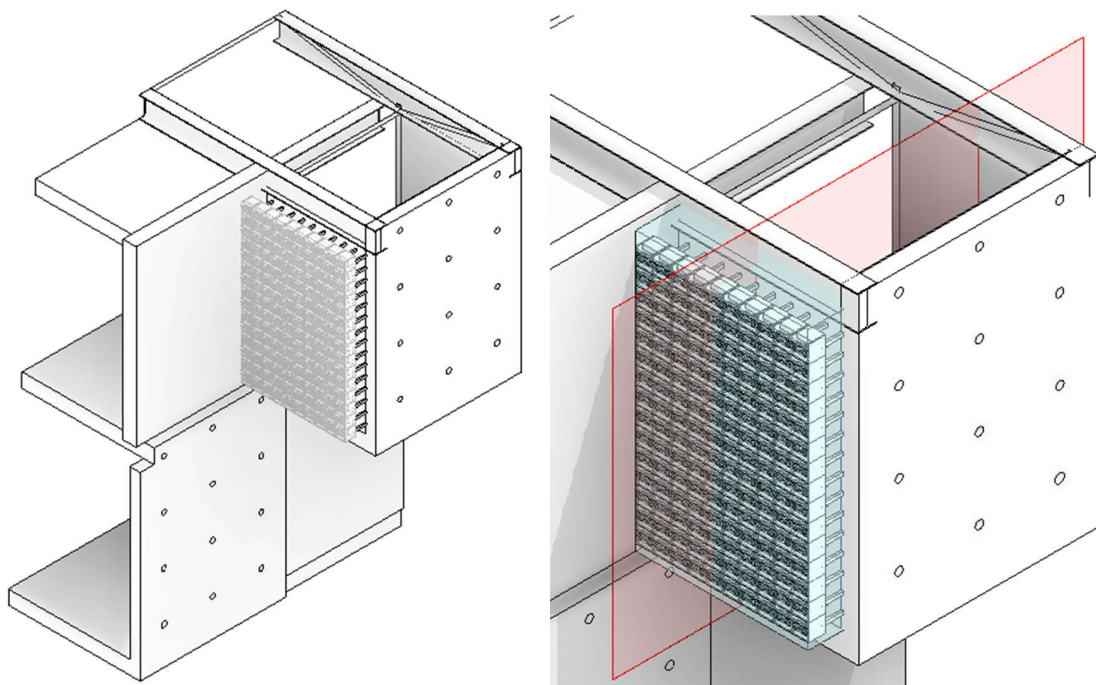


Figura 48 Simulación de fachada con elemento prefabricado arquitectónico integrado (Modelo 3D Revit Ecovilla)

El análisis del fragmento de la Ecovilla se evaluó en la región sombreada de azul, y el viento fue alineado y simulado a partir del eje rojo.

- **Cambio de presión:** En la zona sombreada se registró un cambio de presión significativo en dos superficies, respectivamente la cara frontal y posterior del conjunto de elementos prefabricados arquitectónicos.

- **Succión divergente:** En la superficie frontal del mismo modo se presentaron turbulencias no evidenciada en otras fachadas de la Ecovilla. La turbulencia es generada debido a la dispersión del aire al chocar con una superficie no homogénea, que además posee perforaciones para el ingreso de aire a su interior. Esto marcó en la simulación una superficie donde la presión no era equitativa en cada elemento, donde aquellos más próximos a los bordes presentan los niveles más altos de presión con respecto al promedio general.

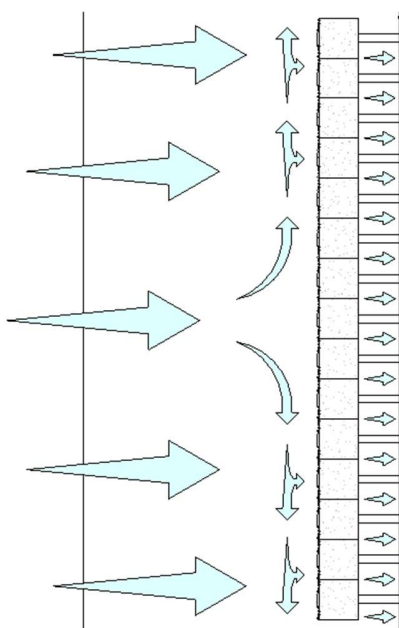
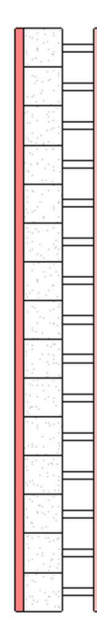


Figura 50 Cara frontal

Cara frontal



Cara posterior

Figura 49
Cara posterior

Gráfico 1 – Distribución de la presión y viento al golpear contra el elemento prefabricado arquitectónico

Gráfico 2 – Superficies referenciadas durante la interpretación de los resultados.

Área total analizada – 1,3m cúbicosTabla 19 Área total analizada – 1,3m cúbicos

Superficie	Presión promedio	Velocidad promedio
<i>Cara frontal</i>	7,8 Pa	9,5 m/s al momento de colisión
<i>Cara posterior</i>	3,34 Pa	5,26 m/s al momento de colisión

Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Era una situación controlada, con el aire apuntando de manera perpendicular al objeto de análisis.
- No hay características ambientales adicionales secundarias que influyan en el resultado de la simulación.
- El modelo debió ser simplificado en gran medida debido a los requisitos y poca tolerancia del simulador CFD de SimScale.

Prueba de elemento real

Se logró realizar la impresión 3D del elemento prefabricado de fachada, el cual fue sometido al experimento #1 bajo las mismas circunstancias, variando únicamente el nivel de humedad en el aire y la temperatura del ambiente, a continuación los resultados:

Imágenes del elemento prefabricado arquitectónico impreso



Figura 51 Imágenes del elemento prefabricado arquitectónico impreso

Pruebas con el elemento – Mojado/Compartimiento de agua lleno

Tabla 20 Pruebas con el elemento – Mojado/Compartimiento de agua lleno

Prueba	Recipiente	Duración	Temp. salida	Vel. aire	Distancia secador	Temp. ambiente
#1	Elemento	1:30 min	35 °C	1.2 m/s	15 cm	24 °C ext / 25 °C int
#2	Elemento	1:30 min	35.5 °C	0.9 m/s	15 cm	25 °C ext / 25 °C int
#3	Elemento	1:30 min	35.5 °C	1.0 m/s	15 cm	25 °C ext / 25 °C int

Pruebas con el elemento húmedo – Sin agua en su compartimiento dedicado

Tabla 21 Pruebas con el elemento húmedo – Sin agua en su compartimiento dedicado

Prueba	Recipiente	Duración	Temp. salida	Vel. aire	Distancia secador	Temp. ambiente
#1	Elemento	1:30 min	39.5 °C	2.2 m/s	15 cm	25 °C ext / 25.5 °C int
#2	Elemento	1:30 min	39 °C	2.2 m/s	15 cm	25.5 °C ext / 25.5 °C int
#3	Elemento	1:30 min	40 °C	2.1 m/s	15 cm	25.5 °C ext / 26 °C int

Imagen del montaje de réplica de experimento #1



Figura 52 Imagen del montaje de réplica de experimento #1

Resultados de experimento con elemento impreso

La conclusión después de analizar los hallazgos de replicar el experimento #1 muestran la eficacia del elemento y efectividad de las técnicas biomiméticas aplicadas en el mismo, mostrando un resultado satisfactorio respecto a lo esperado gracias al análisis digital.

Se demuestra que el uso de esta metodología es efectivo para crear elementos arquitectónicos funcionales sin perder la característica estética principal de la disciplina.

El proceso llevado a cabo indica que la implementación de dicho elemento en la fachada de la Ecovilla UPB le permitiría mejorar la eficacia con que se ventila su interior, así como para refrigerar de manera pasiva y evitar el uso de ventilación mecánica, para acercarse más a su propósito institucional.

Resultados finales del elemento prefabricado arquitectónico en fachada

Imágenes del elemento prefabricado de fachada arquitectónico instalado en la fachada de análisis de la Ecovilla UPB, Medellín. Extraídas de modelo 3D – Plataforma Revit

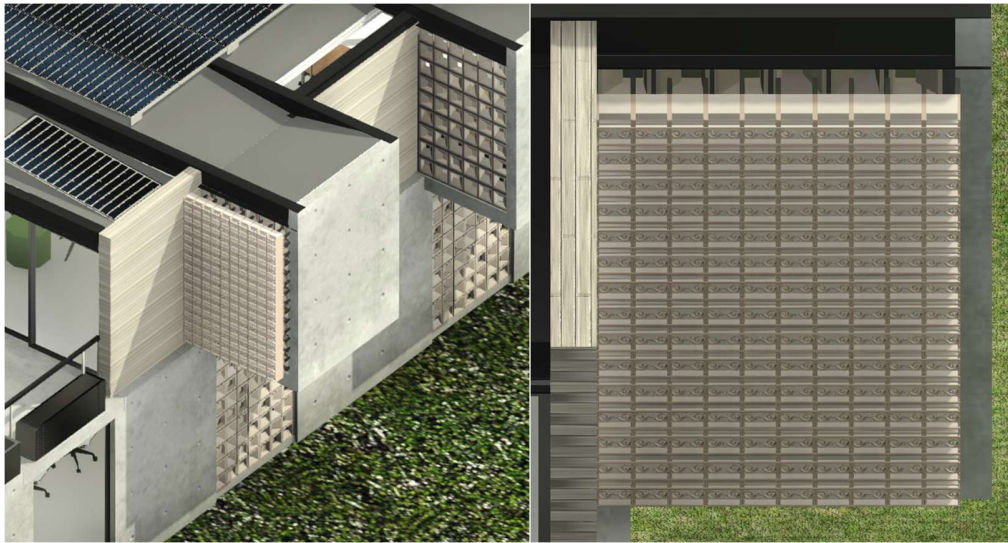


Figura 53 Imágenes del elemento prefabricado de fachada arquitectónico instalado en la fachada de análisis de la Ecovilla UPB, Medellín. Extraídas de modelo 3D – Plataforma Revit



Figura 56 Imagen del modelo

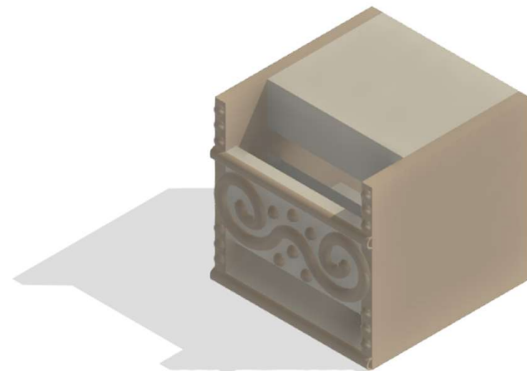


Figura 55 Modelo



Figura 54 Patrón en modelo

Recomendaciones y Metodología replicable para futuras investigaciones

1. Evaluación autocrítica de la metodología:

La sección de metodología describe un enfoque mixto, cuasi-experimental y orientado a generar un modelo educativo replicable:

1.1 Rigor teórico

- **Fortalezas:** Se sustenta en un sólido marco teórico de biomimética, biomecanismos y dinámica de fluidos; incorpora casos de estudio reales (e.g., termitero africano, Pot-in-Pot) y tablas de criterios de selección que articulan teoría y práctica.
- **Oportunidades:** La revisión bibliográfica es amplia, pero podría haberse profundizado en estudios comparativos cuantitativos sobre eficiencia energética en fachadas biomiméticas versus convencionales.

1.2 Proceso de diseño y abstracción:

- **Fortalezas:** El uso de abstracción sistemática de patrones (cavidades de camello y caparazón de escarabajo) para generar geometrías y tres propuestas estéticas evaluadas mediante encuesta aporta rigor y participación de usuarios.
- **Oportunidades:** La dependencia de renderizados y encuestas digitales limita la validación de percepción estética; se sugiere complementar con talleres presenciales o focus groups para mayor profundidad en la usabilidad y sentido arquitectónico.

1.3 Validación práctica

- **Fortalezas:** Se realizaron dos experimentos de laboratorio (caja y conducto) midiendo temperatura y velocidad de aire con y sin agua, confirmando principios de continuidad y Bernoulli, y evidenciando la influencia de la geometría en el flujo
- **Oportunidades:** Los prototipos de cartón y secadora de pelo, aunque ilustrativos, no replican fielmente condiciones reales de fachada ni cargas térmicas propias del clima de Medellín. Una simulación CFD más detallada o pruebas en un módulo de fachada real habrían enriquecido la fiabilidad de los resultados.

1.4 Nivel de satisfacción y facilidad del proceso

- **Fortalezas:** La encuesta sobre patrones obtuvo alta aceptación del “patrón #2” (74% de calificación dando un 4/5 en escala de Likert) y evidencia facilidad de implementación estética.
- **Oportunidades:** La recopilación de datos prácticos requirió montaje manual de conductos y elementos provisionales, lo cual evidencia cierta complejidad logística. Para el modelo educativo, será crucial estandarizar protocolos de montaje y medición, simplificando los materiales y equipos necesarios.

1.5 Importancia para el desarrollo final del elemento prefabricado arquitectónico

- La metodología permitió definir claramente el sistema estructurante (combinación de Pot-in-Pot y ventilación de termitero), el patrón elegido y

el material potencial (cerámica 3D o barro artesanal), lo cual constituye un elemento prefabricado viable y funcional

- No obstante, la transición a escala real demanda ajustes en materia de durabilidad, mantenimiento y conexión con la envolvente existente. Estos aspectos requerirán fases adicionales de prototipado a escala 1:1.
- En conjunto, la metodología ha sido un factor clave para consolidar el diseño conceptual y validar principios fundamentales, a la vez que identifica con claridad los pasos necesarios y las limitaciones para su replicación en un modelo educativo futuro.

2. Infografías de la metodología replicable

Con el análisis autocrítico realizado, donde se habla tanto de ventajas y desventajas de los diferentes puntos tratados y llevados a cabo durante la investigación para la fabricación de un elemento prefabricado de fachada, se realizaron infografías adaptadas a diferentes niveles de educación, con el objetivo de ser replicables en diferentes lugares del sistema educativo.

Es importante promover en todo espacio la buena práctica de la investigación, necesaria para el desarrollo y avance del conocimiento, estas infografías piensan brindan una orientación en el área de investigación promovido a lo largo de este documento, sugiriendo pasos, posibles mejoras y consideraciones a futuros usos de este material.

2.2.1 Infografía escolar

Metodología replicable diseñada para aplicación a nivel escolar media de secundaria, para estudiantes de décimo u onceavo año de estudio. Pensada para orientar a los estudiantes para definir las fases de investigación propias de un trabajo de grado para la titulación escolar.



Figura 57 Infografía escolar

2.2.2 Infografía ejemplificada

Metodología replicable diseñada para aplicarse a nivel institucional de pregrado en un nivel de educación superior, para estudiantes que requieran o deseen realizar una investigación aplicando elementos naturaleza al diseño arquitectónico.



Figura 58 Infografía ejemplificada

8. Conclusiones

1. ¿Qué se obtuvo?

- Se identificaron y seleccionaron dos biomecanismos: las fosas nasales del camello y los espiráculos del escarabajo del desierto, que, por su simplicidad, escalabilidad y biomecanismo pasivo, fueron adecuados para su integración en un elemento prefabricado arquitectónico de fachada.
- Se analizaron dos técnicas arquitectónicas biomiméticas: el sistema de ventilación pasiva inspirado en los termiteros africanos (del Eastgate Centre) y el enfriamiento evaporativo de la técnica “Pot-in-Pot” (empleado en la Biblioteca de Gando) como base para el diseño del sistema estructurante del prototipo.

2. ¿Qué se logró?

2.1 Diseño conceptual de un elemento prefabricado arquitectónico para fachadas, dividido en dos zonas complementarias:

- Zona superior con canales de ventilación al estilo termitero, que expulsa el aire caliente y controla la humedad en exceso.
- Zona inferior con recipientes “Pot-in-Pot” que enfrían el aire por evaporación pasiva.

2.2 Abstracción y evaluación estética de tres patrones biomiméticos inspirados en las texturas del camello y el escarabajo, cuyos resultados de encuesta (31 participantes) dieron como ganador indiscutible al “patrón #2” (74 % de valoración de un mínimo de 4/5 en la escala de Likert).

2.3 Desarrollo de un modelo educativo replicable, que documenta paso a paso la selección de referencias, criterios de diseño, prototipado y validación, adaptable a distintos niveles académicos mediante infografías.

3. Resultados principales

3.1 Reducción de temperatura:

En el experimento #1, el aire de salida pasó de 55 °C (sin elemento) a 39 °C con recipiente circular en posición óptima, logrando un enfriamiento de hasta 16 °C.

3.2 Modulación del flujo de aire

La combinación de geometrías (recipiente circular en recipiente cuadrado) alcanzó velocidades de salida de 1.7 m/s a 39 °C, frente a 3 m/s y 60 °C sin sistema; en el conducto, el recipiente rectangular obtuvo hasta 4.8 m/s lateral y 2.2 m/s superior.

- **Confirmación de principios físicos:** Se validaron la ley de continuidad y el principio de Bernoulli, observando que al reducirse el área de salida aumentaba la velocidad y disminuía la presión, lo que favorece la extracción de aire caliente.
- **Viabilidad técnica y educativa:** El prototipo conceptual demuestra que una segunda piel biomimética puede reducir la carga térmica, mejorar la ventilación natural y servir como laboratorio de aprendizaje, aunque requiere pruebas a 1:1 para evaluar durabilidad y mantenimiento.

4. Respuesta a pregunta problematizadora central

4.1 Reducción del consumo energético

Las fachadas diseñadas a partir de principios biomiméticos, según emergentes de estudios como “Biomimetic building facades demonstrate potential to reduce energy consumption...” (2021) y el enfoque evolutivo inspirado en la piel de elefante para climas húmedos (2024) se demuestra claro una disminución en la carga térmica y la necesidad de refrigeración mecánica en sistemas arquitectónicos. En el caso de la Ecovilla, esa carencia de estrategias pasivas puede llegar a implicar un 20 % más de consumo energético en comparación con edificaciones similares que utilizan

sistemas biomiméticos. Al incorporar el elemento prefabricado arquitectónico de fachada, se optimiza el rendimiento térmico de la envolvente, reduciendo la necesidad de aire acondicionado.

4.2 Mejora de la calidad del aire interior

Un sistema de filtración inspirado en las cavidades nasales del camello (*Camelus dromedarius*), permite retener partículas dañinas y regular la humedad del aire antes de su ingreso al espacio interior al aplicar el sistema de ventilación interno de los termiteros africanos. Encontrar soluciones pasivas para mejorar el confort en espacios de estudio es esencial para el desarrollo en un campus con alrededor de 1.200 estudiantes diarios, expuestos a contaminantes urbanos y cambios climáticos imprevisibles. El uso del elemento prefabricado arquitectónico de fachada puede elevar los estándares de salubridad al interior del campus UPB, sin dependencia de filtros mecánicos ni consumos eléctricos adicionales, que ya es bastante grande en contextos universitario.

4.3 Establecimiento de un modelo educativo replicable

La investigación propone un protocolo cuasi-experimental y de carácter mixto que documenta paso a paso:

- Selección y abstracción de biomecanismos.
- Selección y abstracción de técnicas biomiméticas.
- Diseño conceptual del elemento prefabricado.
- Prototipado y validación mediante experimentos de temperatura, flujo y percepción estética.
- Encuestas de percepción para integrar la dimensión social.
- Uso de herramientas de modelado 3D y simulación virtual accesibles.

Este flujo de trabajo se configura como un “laboratorio vivo” que materializa los ODS 11 y 13, permitiendo que futuros proyectos de arquitectura sostenible repliquen la secuencia metodológica

y adapten sus parámetros a distintos entornos. Así, la Ecovilla no solo mejora su desempeño ambiental, sino que funciona como recurso pedagógico para estudiantes y profesionales interesados en soluciones basadas en la naturaleza.

5. Conclusión general

La integración de sistemas biomiméticos en la fachada de la Ecovilla UPB a modo de un elemento prefabricado arquitectónico cumple plenamente con los objetivos planteados desde el inicio del trabajo, al demostrar que es posible abordar desafíos de ventilación y pedagógicos mediante soluciones inspiradas en la naturaleza dentro de la doctrina arquitectónica. El desarrollo del elemento prefabricado propuesto, basado en principios biomecánicos extraídos de los sistemas respiratorios del camello y del sistema de regulación térmica del caparazón del escarabajo del desierto, además de las técnicas biomiméticas del termitero africano y la técnica del Pot-in-Pot permitió materializar un diseño pasivo que reduce significativamente la temperatura del aire interior sin recurrir a sistemas mecánicos de ventilación ni climatización artificial. Esta reducción térmica, evidenciada en ensayos experimentales, alcanzó en una prueba de característica aislada hasta 16 °C de reducción de la temperatura respecto al que se le era suministrado, mostrando una respuesta eficiente a las condiciones del contexto tropical donde se ubica la Ecovilla UPB.

Además del control térmico, el sistema modula el flujo de ventilación de manera inteligente gracias al uso de formas geométricas y cavidades estratégicamente diseñadas basadas en la abstracción de los patrones y texturas de los mecanismos biomecánicos investigados, que debido a su geometría replican fenómenos físicos como el efecto Venturi y la distribución de presión observada en estructuras naturales. Este enfoque permite no solo una renovación continua del aire, sino también una mejora en su calidad, al filtrarse pasivamente antes de ingresar al interior. Estas estrategias contribuyen directamente a la sostenibilidad operativa del edificio, al disminuir la demanda energética y promover condiciones interiores saludables sin afectar la estética del diseño arquitectónico ni aumentar costos operativos, además de su proceso de fabricación low-cost.

Desde una perspectiva académica y formativa, uno de los logros más relevantes de esta investigación ha sido la construcción de un modelo metodológico replicable, que integra fases de

observación biológica, abstracción formal, conceptualización técnica, prototipado físico y validación experimental. Esta metodología se convierte en una herramienta educativa valiosa para programas de arquitectura sostenible, al brindar un proceso claro y adaptable que puede ser aplicado por estudiantes y docentes en diferentes escalas y contextos. A través de infografías, modelos 3D, encuestas y ensayos, se construyó un recurso didáctico integral que transforma la Ecovilla en un laboratorio vivo de diseño bioinspirado.

En conjunto, estos resultados confirman que la biomimética no solo es una estrategia eficaz para enfrentar los desafíos climáticos y energéticos de la arquitectura contemporánea, sino que también representa una vía innovadora para fortalecer la formación profesional y sensibilizar sobre el valor del diseño inspirado en la naturaleza. En el caso concreto de la Ecovilla UPB, se ha logrado desarrollar una solución con potencial de implementación real, capaz de mejorar el desempeño ambiental del edificio, reducir su huella energética y posicionarse como un referente de buenas prácticas en diseño sostenible. Este trabajo deja así un precedente de cómo la ingeniería, la biología y la arquitectura pueden unirse para construir un futuro más eficiente, resiliente y educativo.

9. Bibliografía

42T. (2023). *Using Biomimicry in Sustainable Product Design*. 42T. <https://42t.com/insights/using-biomimicry-in-sustainable-product-design>

AI Design. (2023). *Biomimicry in Product Design: Learning from Nature's Solutions*. AIDedu. <https://aidedu.in/biomimicry-in-product-design-learning-from-natures-solutions>

AP News. (2023). *La humedad, no sólo el calor, influye en el cambio climático*. <https://apnews.com/article/77328ed8324a03b3ae473e4334b2ab34>

AskNature. (n.d.). *Water vapor harvesting: Beetle collects water from air on back surface*. Biomimicry Institute. Recuperado de <https://asknature.org/strategy/water-vapor-harvesting/>

AskNature. (s.f.). *Biomimética en acción: estudios de casos*. Biomimicry Institute. <https://asknature.org/es/Recursos/estudios-de-casos-de-biomim%C3%A9tica-en-acci%C3%B3n>

Biomimicry Institute. (s.f.). *Biomimicry Case Studies*. Biomimicry Institute. <https://asknature.org>

Biomimicry NE. (2023). *Biomimetic Innovations and Challenges*. Biomimicry NE. <https://www.biomimicryne.org/blog/2016/5/10/biomimetic-innovations-are-hindered>

Cho, J. (2023). *The role of biomimicry in innovative product design*. Cho Design. <https://choidesign.com/the-role-of-biomimicry-in-innovative-product-design>

García, F., & Martínez, D. (2022). *Prefabricación y sostenibilidad en la arquitectura bioclimática*. Journal of Sustainable Design, 14(3), 122–136.

García, M. (2022). *La biomimética y su influencia en el diseño de productos: Una breve revisión*. Universidad de Palermo.

<https://dspace.palermo.edu/ojs/index.php/cdc/article/download/8645/14345>

Infobae. (2021). *Por segundo año consecutivo Medellín fue catalogada como la ciudad más innovadora de Colombia*. <https://www.infobae.com/america/colombia/2021/10/06/por-segundo-ano-consecutivo-medellin-fue-catalogada-como-la-ciudad-mas-innovadora-de-colombia/>

JSTOR. (2023). *Biónica y biomímesis en el diseño de productos*. JSTOR. <https://www.jstor.org/stable/j.ctv1228jtw>

Jones, A., & Smith, B. (2023). *Applications of Biomimicry in Engineering Design*. PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39329545>

Libertad Digital. (2022). *Humedad y temperatura: ¿afecta a la sensación térmica? *. [https://www.libertaddigital.com/chic/vida-estilo/2022-08-10/humedad-y-temperatura-afecta-a-la-sensacion-termica-0e-6921470/Libertad Digital+1Andico+1](https://www.libertaddigital.com/chic/vida-estilo/2022-08-10/humedad-y-temperatura-afecta-a-la-sensacion-termica-0e-6921470/Libertad+Digital+1Andico+1)

MDPI. (2023). *Design and Biomimicry: A Review of Interconnections and Creative Patterns*. MDPI. <https://www.mdpi.com/2313-7673/8/1/61>

PMID. (2023). *Biomimicry as a Sustainable Design Methodology—Introducing the Biomimicry Design Lens*. PMC. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9036301>

Pérez, L. (2021). *Aproximación al diseño biomimético: Aprendizaje y aplicación*. SciELO. https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532014000600023&script=sci_arttext

Revista DYNA. (2022). *Diseño conceptual de productos: Un enfoque biomimético*. Revista DYNA. <https://revista-dyna.com/index.php/DYNA/article/download/1438/1357/2548>

Rodríguez, C. (2023). *La espiral biomimética inspiradora de retos actuales de diseño y sostenibilidad*. Universidad de Cádiz. <https://revistas.uca.es/index.php/proyecta56/7542>

SciELO. (2021). *Biomimicry and Its Role in Product Innovation*. SciELO. https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532014000600023&script=sci_arttext

Sensor One Stop. (2025). *La interacción entre temperatura y humedad: un análisis completo*. <https://sensor1stop.com/es/knowledge/interplay-between-temperature-and-humidity/>

Smith, T., & Johnson, M. (2023). *Using Biomimicry in Sustainable Product Design*. 42T. <https://42t.com/insights/using-biomimicry-in-sustainable-product-design>

Sánchez, A., López, E., & Morales, P. (2020). *Innovación en prefabricados sostenibles para edificaciones urbanas*. Revista de Arquitectura, 22(1), 45–58.

UC Chile. (2017). *Biomímesis y diseño: Una revisión de interconexiones y patrones creativos*. Diseño UC. https://diseno.uc.cl/memorias/pdf/memoria_dno_uc_2017_1_TAGLE_URETA_T.pdf

UPB. (2021). *Biomimética y diseño: Un enfoque interdisciplinario*. UPB Repository. <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/4263/Biomimetica%20y%20dise%C3%B1o.pdf>

Wilson, K. (2022). *Biomimicry Design: Mother Nature's Influence on Products and Design*. Y Studios. <https://ystudios.com/insights-passion/biomimicry-design>

Zhang, P. (2023). *Biomimetic Innovations are Hindered by Challenges to Implementation, Not Inspiration*. Biomimicry NE. <https://www.biomimicryne.org/blog/2016/5/10/biomimetic-innovations-are-hindered-by-their-implementation-not-their-inspiration>

Zhou, Y., Zhang, J., & Li, H. (2021). *Performance evaluation of prefabricated ventilated facades for sustainable buildings*. *Building and Environment*, 188, 107480.