

Convergencias en concreto:

El cemento Portland y la construcción del espacio

Joseph Aspdin

21 de octubre de 1824



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Editor: Abiel Treviño Aldape

82 AÑOS FARQ



FARQ

FACULTAD DE ARQUITECTURA

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FCB



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Convergencias en concreto: El cemento Portland y la construcción del espacio

Universidad Autónoma de Nuevo León

Av. Universidad s/n, Ciudad Universitaria 66455, San Nicolás de los Garza, N.L.

Dr. Santos Guzmán López, Rector de la UANL

Dr. Mario Alberto Garza Castillo, Secretario General

Dra. María Teresa Cedillo Salazar, Directora de la Facultad de Arquitectura

Dr. José Ignacio González Rojas, Director de la Facultad de Ciencias Biológicas

Dr. Daniel Salas Limón, Director de la Facultad de Ingeniería Civil



Primera edición 2026

© Universidad Autónoma de Nuevo León

© Abiel Treviño Aldape

ISBN: 978-607-27-2924-7

Edición General [Diseño de portada y formación de interiores] (apoyado por IA):



Edición y Corrección de estilo (apoyada por IA):

Hilda Margarita Jiménez Olvera

Este libro fue sometido a un proceso de evaluación por pares ciegos, cumpliendo con los criterios de calidad de investigación al ser dictaminado positivamente.

Las opiniones y puntos de vista expresados en la presente obra son responsabilidad única y exclusiva de cada autor(es), y no necesariamente representan las posiciones u opiniones de la UANL ni de sus dependencias.

Queda permitida la reproducción, almacenamiento o transmisión total o parcial de esta obra, ya sea por medios electrónicos, mecánicos o de fotocopiado para fines académicos, siempre y cuando se cite apropiadamente la fuente; prohibido hacer uso comercial de la obra.

Convergencias en concreto:

El cemento Portland y la construcción del espacio



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Editor:

Abiel Treviño Aldape



FARQ

FACULTAD DE ARQUITECTURA

FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



FCB

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



Índice

Prólogo	1
Presentación	6
Capítulo 1	12
Huellas topomorfológicas: El legado <i>concreto</i> en la obra de los <i>Pritzker</i>	
<i>Proemio</i>	
Topomorfolología Urbana: Relación entre laus formas y las experiencias del lugar	17
El premio Pritzker y el cemento: Convergencia de huellas topomorfológicas	30
<i>a) Integración al paisaje natural y cultural</i>	
<i>b) Uso del concreto como elemento expresivo</i>	
<i>c) Creación de espacios para la memoria y la reflexión</i>	
<i>d) Generación de experiencias sensoriales a través de la forma y la luz</i>	
<i>e) Monumentalidad y referencias culturales</i>	
<i>f) Adaptabilidad al terreno y contexto</i>	
Cementando el cierre: Consolidando hallazgos y abriendo nuevos horizontes topomorfológicos	45
<i>Ecopoiesis Asistida</i>	
<i>Narrativa Espacial</i>	
<i>Materialidad Tectónica</i>	

<i>Dialéctica Espacio-Sociedad:</i>	
<i>Poética de la Construcción</i>	
<i>Geometría del Lugar</i>	
<i>Arquitectura como Archivo</i>	
Referencias	56
 Capítulo 2	 60
 Desarrollo sostenible a través del micelio: Aplicaciones y comparativas con el concreto	
Introducción	61
Fundamento biológico del micelio	66
<i>a) Los hongos</i>	
<i>b) Estructura y crecimiento del micelio</i>	
<i>c) Capacidad de colonización y unión de sustratos</i>	
<i>d) Principios de autoensamblaje biológico</i>	
<i>e) Ventajas biológicas relevantes para la construcción</i>	
<i>f) Tendencia del micelio como elemento material</i>	
Exposiciones y pruebas de concepto de biocompuestos basados en micelio (BCMs)	74
• <i>The Living. HY-FI Tower</i> • <i>Taylor-Foster, James. Mushroom House</i> • <i>Phil Ross, MycoWorks. MycoTexture</i> • <i>MycoTech. MycoTree</i> • <i>Erik Klarenbeek Studio. The Growing Pavilion</i>	

- *MOGU. Home, Box, Garden, MycoPlastic*

Producción de biocompuestos basados en micelio (BCMs)

83

- *a) Consideraciones generales*
- *b) Obtención de cepas*
- *c) Aislamiento por medio de tejido*
- *d) Aislamiento por medio de esporas*
- *e) Obtención de cepas comerciales o de registro*
- *f) Preparación de inóculo líquido*
- *g) Comprobación del crecimiento axénico*
- *h) Preparación de sustratos*
- *i) Inoculación de sustratos*
- *j) Incubación 1*
- *k) Modelado de piezas*
- *l) Incubación 2*
- *m) Secado*
- *n) Propiedades mecánicas del Micelio*
- *o) Resistencia a la compresión, flexión y tracción*
- *p) Comportamiento frente a factores ambientales*
- *q) Comparativa con otros biomateriales*
- *r) Estudios experimentales de sus propiedades*

Aplicaciones potenciales del micelio

104

- a) Aislamiento térmico y acústico*
- b) Paneles de construcción y revestimientos*
- c) Sustituto de materiales plásticos y compuestos sintéticos*
- d) Incorporación de mezclas de concreto*

Comparación mecánica entre micelio y concreto

109

- a) Análisis comparativo de resistencia y durabilidad*
- b) Limitaciones estructurales del micelio*

<i>c) Sinergias potenciales al combinar ambos materiales</i>	
Sostenibilidad	112
<i>a) Impacto ambiental del concreto frente al micelio</i>	
<i>b) Análisis de ciclo de vida de materiales basados en micelios</i>	
<i>c) Reducción de huella de carbono y residuos industriales</i>	
Integración del micelio al concreto	115
<i>a) Métodos de incorporación</i>	
<i>b) Resultados de estudios experimentales</i>	
<i>c) Retos tecnológicos y perspectivas futuras</i>	
Conclusiones	118
Referencias	120

Capítulo 3 126

Aprovechamiento de los residuos agroindustriales en la construcción

<i>Resumen</i>	
<i>Ejemplos reales que inspiran</i>	
<i>One Bryant Park, Nueva York</i>	
<i>Autopista A16 en Países Bajos</i>	
<i>¿Cómo se hace el concreto verde?</i>	
Introducción	129

Enfrentando los grandes retos globales: hambre, urbanización y cambio climático

El desafío del hambre

Crecimiento urbano acelerado

La emergencia climática

Una solución con *triple beneficio* 131

Residuos agroindustriales: un recurso desaprovechado 132

El impacto ambiental de la construcción 133

Contaminación en Monterrey: buscando soluciones sostenibles 134

Desechos agroindustriales: de residuo a recurso 135

a) Cáscara de arroz (160.000 toneladas anuales)

b) Bagazo de caña (15 millones de toneladas)

c) Cáscara de café (1 millón de toneladas aproximadamente)

Concreto verde: construyendo con menos impacto 137

Medir el impacto: el ciclo de vida de los materiales 138

Hacia una construcción más sostenible: el papel de los materiales verdes 139

Casos de éxito con *concretos verdes* en el mundo 140

One Bryant Park, Nueva York, USA

Carretera A16 Rotterdam-Dordrecht, Países Bajos

Y en México, ¿Cómo vamos? 141

¿Cómo funciona

Beneficios ambientales

¿Cómo se elabora el concreto verde? Un proceso en 3 etapas	143
--	-----

1. Selección de materia prima

2. Caracterización del material

3. Elaboración de la mezcla

Conclusiones: Oportunidades y desafíos	146
--	-----

Referencias	147
-------------	-----

Capítulo 4

153

Economía circular en la industria de la construcción

Resumen

Introducción	155
--------------	-----

Economía lineal versus Economía circular	159
--	-----

a) Modelo lineal tradicional

b) Fundamentos de la economía circular

Cemento, concreto y circularidad	161
----------------------------------	-----

a) Optimización del uso de recursos

b) Diseño de ciclos de vida prolongados

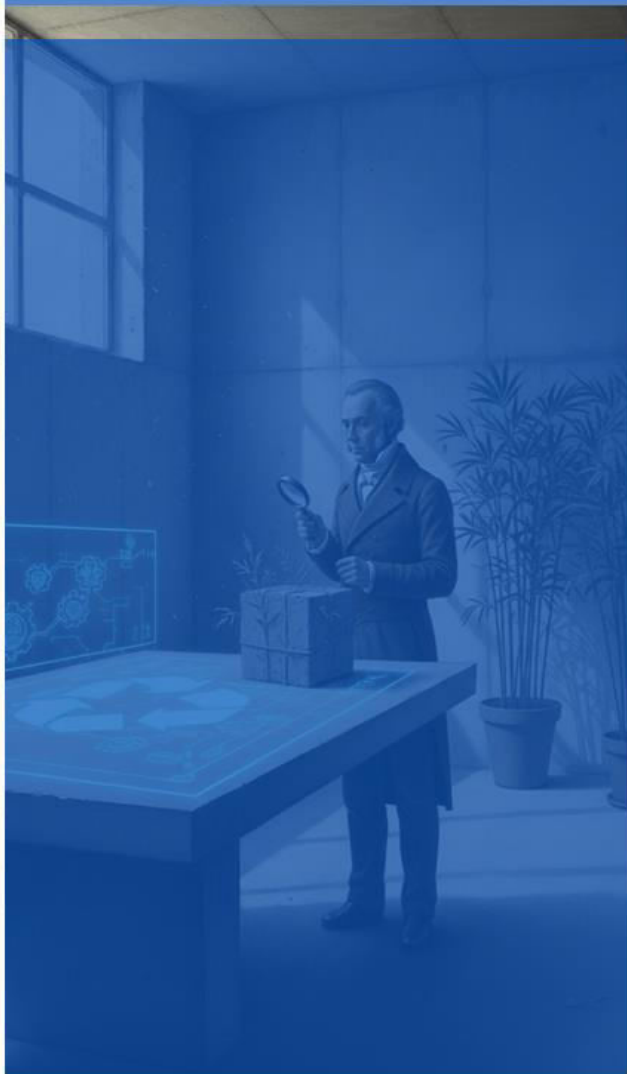
c) Captura y reutilización de CO₂

Diseño para la circularidad	165
-----------------------------	-----

a) Adaptabilidad y reutilización

<i>b) Diseño modular y prefabricación</i>	
<i>c) Reparabilidad y reciclabilidad</i>	
Innovaciones tecnológicas	167
<i>a) Nuevos materiales</i>	
<i>b) Digitalización y BIM</i>	
<i>c) Automatización y manufactura aditiva (impresión 3D)</i>	
Casos de estudio	169
<i>a) Concreto Holcim ECOPact (Francia)</i>	
<i>b) Renovación del edificio De Schilde (Países Bajos)</i>	
Rol del sector público y privado	172
<i>a) Políticas y acciones clave</i>	
<i>Sector público</i>	
<i>Sector privado</i>	
<i>b) Gobernanza colaborativa y responsabilidad compartida</i>	
Barreras y retos	173
<i>a) Principales barreras en la industria de la construcción</i>	
<i>b) Oportunidades derivadas del abordaje de barreras</i>	
Contribución al cambio climático y a los ODS	175
<i>a) Impactos positivos de la economía circular</i>	
Conclusiones	177
Referencias	180
Sobre los autores	184

PROLOGO



Prólogo

En el devenir de la arquitectura contemporánea, pocas cuestiones resultan tan apremiantes como la necesidad de repensar la relación entre el espacio construido y el territorio que lo sustenta. En un contexto global marcado por la aceleración urbana, la transformación del paisaje y la creciente complejidad social, la arquitectura ya no puede entenderse únicamente como una práctica técnica o formal, sino como un campo de conocimiento capaz de articular dimensiones culturales, ambientales y simbólicas. Este libro surge precisamente desde esa inquietud: la de comprender la arquitectura como una disciplina que, más allá de construir objetos, configura experiencias, produce significados y establece vínculos profundos entre el ser humano y su entorno.

A doscientos años de la consolidación del cemento como uno de los materiales fundamentales de la modernidad, se vuelve imprescindible cuestionar su papel dentro de la producción arquitectónica contemporánea. Tradicionalmente asociado a la solidez estructural y a la eficiencia constructiva, el concreto ha sido, durante mucho tiempo, reducido a su dimensión técnica. Sin embargo, las investigaciones reunidas en este volumen demuestran que los materiales de construcción poseen una dimensión mucho más amplia: son vehículos de transformación territorial, innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y experiencia humana.

El presente libro reúne cuatro aproximaciones diversas en sus metodologías y objetos de estudio, pero que convergen en una preocupación común: la necesidad de replantear la relación entre arquitectura, territorio, materialidad y sustentabilidad. Cada uno de los autores aporta una mirada particular que, al integrarse, construye

una reflexión interdisciplinaria sobre el futuro de la construcción y del habitar contemporáneo.

En *Huellas topomorfológicas: El legado concreto en la obra de los Pritzker*, Abiel Treviño plantea una lectura crítica de la arquitectura contemporánea a partir del concepto de topomorfológica urbana. Su trabajo explora cómo las formas arquitectónicas establecen relaciones profundas con el contexto geográfico, cultural y social en el que se insertan. A través del análisis de obras emblemáticas de arquitectos galardonados con el Premio Pritzker, Treviño demuestra que el concreto no es únicamente un recurso estructural, sino también un lenguaje expresivo capaz de construir memoria, identidad y experiencia sensorial. El autor desarrolla categorías analíticas vinculadas al contexto, la espacialidad, la materialidad, la percepción y el paisaje, proponiendo axiomas transformadores como la ecopoiesis asistida, la narrativa espacial y la arquitectura como archivo, conceptos que enriquecen significativamente la discusión contemporánea sobre arquitectura y territorio.

Por otra parte, Efrén Robledo introduce una línea de investigación particularmente innovadora mediante el estudio del micelio como material constructivo emergente. Su aportación explora las posibilidades biotecnológicas de este organismo natural en el desarrollo de sistemas constructivos biodegradables, ligeros y sostenibles. El capítulo dedicado al micelio abre un horizonte experimental que cuestiona las nociones convencionales de materialidad y permanencia en la arquitectura. Más allá de sus propiedades físicas, este trabajo invita a pensar la construcción desde una lógica regenerativa, donde los materiales no solo reduzcan su impacto ambiental, sino que establezcan nuevas relaciones entre naturaleza, tecnología y hábitat.

Preocupados por el tema ambiental, David García, Aldo González, Raymundo Pérez, David Ortiz, Joel Elizondo y Michel Stephane desarrollan una investigación centrada en el aprovechamiento de residuos agroindustriales para la elaboración de concretos verdes. Su trabajo aborda restos orgánicos derivados de procesos agrícolas —como cáscaras de arroz, bagazo de caña o residuos del café— que, lejos de considerarse desechos inútiles, pueden transformarse en recursos valiosos para la construcción sustentable. A través de este análisis, demuestran que la innovación material representa una vía concreta para disminuir el impacto ambiental de la industria cementera, particularmente en lo relativo a la emisión de gases de efecto invernadero. Su investigación no solo evidencia la viabilidad técnica de estos materiales alternativos, sino que también plantea una reflexión ética sobre la responsabilidad ambiental de la arquitectura contemporánea.

Finalmente, y en continuidad el tema medioambiental, José Manuel Mendoza y Jorge Humberto Díaz, desde la perspectiva de la economía circular, introducen una reflexión indispensable sobre la necesidad de transformar los modelos tradicionales de producción y consumo dentro de la industria de la construcción. Su aportación evidencia cómo el aprovechamiento eficiente de los recursos, la reducción de residuos y la reutilización de materiales constituyen estrategias fundamentales para enfrentar los desafíos ambientales actuales. Ellos no solo plantean la urgencia de migrar hacia sistemas constructivos más responsables, sino que también subrayan la importancia de integrar criterios ecológicos y económicos en el diseño arquitectónico y urbano, proponiendo una visión donde sostenibilidad y desarrollo dejan de entenderse como conceptos opuestos.

En conjunto, los textos reunidos en este volumen construyen una visión integral de la arquitectura y la construcción contemporánea, donde la técnica, la teoría y la sustentabilidad convergen para responder a las problemáticas del mundo actual. A

lo largo de sus páginas se revela una preocupación constante por comprender el territorio como un sistema vivo, cargado de memoria, identidad y posibilidades futuras.

Este libro invita al lector a reflexionar sobre la manera en que habitamos el mundo y sobre las implicaciones culturales, ambientales y sociales de toda intervención arquitectónica. Desde la dimensión fenomenológica del espacio hasta la experimentación con nuevos materiales sustentables, las investigaciones aquí reunidas evidencian que la arquitectura del futuro deberá construirse necesariamente desde una conciencia ecológica, humana y territorial.

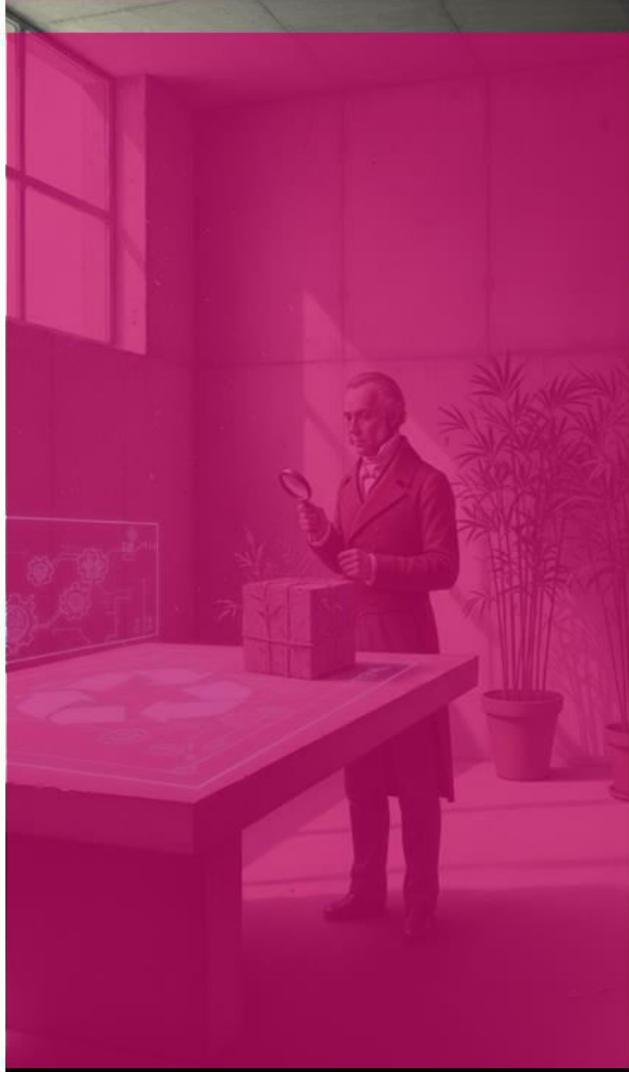
Así, este volumen no solo constituye una aportación académica relevante, sino también una invitación a imaginar nuevas formas de relación entre arquitectura, naturaleza y sociedad. En ese diálogo entre materia, paisaje, innovación y experiencia humana, se encuentra el verdadero valor de las reflexiones que el lector descubrirá en las páginas siguientes.

CO
2
editor

M.A. Carlos A. Ortiz González

San Pedro Garza García, Nuevo León, a 18 de mayo del 2026

PRESENTACIÓN



Presentación

Una *Convergencia Transdisciplinar*, a doscientos años de la Patente para la obtención del cemento Portland (1824-2024)

La Efeméride como catalizador

La conmemoración del bicentenario de la patente obtenida por Joseph Aspdin en 1824 para la producción de cemento Portland no representa únicamente un hito en la cronología de la industria de la construcción; constituye, en esencia, el punto de partida de una transformación global que alteró de forma irreversible la relación entre el ser humano y su hábitat.

El 23 de septiembre de 2024 —prácticamente un mes previo a la fecha precisa — se efectuó un Seminario Académico en la Facultad de Arquitectura de la UANL — *Convergencias en concreto: El cemento Portland y la construcción del espacio*, que da nombre a la presente publicación— como respuesta a la urgencia de repasar el impacto de un material que, tras dos siglos de omnipresencia edilicia, demanda una [re]valoración profunda. No celebramos la inercia de un material, sino la oportunidad de diseccionar su evolución y dictar pautas para su resiliencia futura.

El cemento Portland ha sido, desde su concepción, el lenguaje común de la modernidad. Su capacidad para transitar de un estado natural a pulverulento, luego a plástico y de allí a una solidez pétrea, ha permitido a la humanidad liberarse de las limitaciones de la piedra natural y del ladrillo, permitiendo la insigne verticalidad, los grandes claros y la infraestructura global.

Sin embargo, al alcanzar estos dos siglos, la comunidad académica reconoce que el análisis unilateral es insuficiente. El reto actual no reside solo en la *resistencia a la compresión*, sino en la integración sabia y armónica con la *madre Tierra*.

Triada multidisciplinar: Arquitectura, Ingeniería Civil y Ciencias Biológicas

El Seminario se distinguió por su naturaleza colaborativa e interinstitucional, rompiendo los bastimentos del conocimiento tradicional para forjar un diálogo *transdisciplinario*. La **Convergencia** entre la Arquitectura, las Ciencias Biológicas y la Ingeniería Civil no es un ejercicio retórico, sino una necesidad operativa frente a la complejidad del entorno contemporáneo.

Desde la Arquitectura: El cemento es abordado como el sustrato de la implementación constructiva intensiva ↔ creativa. La disciplina aporta desde la visión de la configuración espacial y la adaptabilidad del objeto arquitectónico en la topomorfología del lugar, explorando cómo el material ha moldeado y a su vez ayuda a modelar la estética urbana y cómo puede [re]valorarse esta, para edificar espacios urbanos más humanos, responsables y resilientes capaces de transformar nuestra vida cotidiana.

Desde la Ingeniería Civil: Se aporta el rigor de la innovación técnica y la eficiencia estructural. El enfoque se centra en los potentes avances tecnológicos y las nuevas técnicas constructivas que permiten optimizar el uso del material, garantizando la seguridad de la infraestructura global, pensando en cómo se minimiza el vaciado de recursos y el desperdicio.

Desde las Ciencias Biológicas: Esta es, quizás, la frontera más disruptiva del Seminario. La biología introduce la métrica de la salud territorial. Desde la extracción responsable de materias primas hasta el desarrollo de bio-cementos y materiales con capacidad de secuestro de carbono, las ciencias de la vida exigen que el cemento deje de ser un objeto inerte para convertirse en un participante activo y respetuoso de los ciclos biogeoquímicos.

Cruce de experiencias: Del laboratorio a la ciudad

La metodología de este Seminario pretendió desde la estructuración del evento, trascender la frontera académica para situarse en la esfera de la Responsabilidad Social Universitaria. Aspiramos a una transferencia y apropiación de conocimientos que impacten directamente en la praxis académica y profesional, mediante la publicación de lo articulado y discutido en el evento académico.

El debate generado en la academia, se transforma aquí en reflexión profunda y emana de la intersección de experiencias técnicas orientadas a la durabilidad y el rendimiento —y visiones sustentables— enfocadas en la humanización del cemento y la mitigación del impacto ambiental.

El diálogo expuesto convertido ahora en prosa, estructura los tres ejes de manera transversal, abordando cuatro *temas proficientes [temas clave]* como:

La extracción proficiente de la tensión tectónica: La acción técnica donde el hormigón no oculta el suelo, sino que extrae su esencia geométrica y memoria sedimentaria (tierra, escombro e historia) para elevarlas a una nueva potencia formal. La proficiencia reside en la precisión casi quirúrgica con la que el material inyectado hereda la potencia del vacío excavado, convirtiendo el hueco en una masa sólida que, lejos de tapar el sitio, lo monumentaliza y domina al transferir la verdad del terreno a la estructura arquitectónica.

La Extracción Proficiente de la Huella Carbónica: El micelio como catalizador biótico. Una operación de descontaminación selectiva y simbiosis técnica. Aquí el hongo actúa como un agente de “extracción” de la toxicidad inherente a la mezcla original, sustituyendo agregados contaminantes por redes de hifas que hibridan la masa. El micelio extrae la rigidez del desecho y la convierte en potencia aglutinante, transformando el diseño bioclimático en una arquitectura de reparación que domina

el ciclo de vida del material, reduciendo drásticamente su impacto ambiental sin sacrificar su inercia térmica.

La Extracción Proficiente del Residuo Metabólico: En el contexto de la valorización agroindustrial como refuerzo de la matriz cementicia, surge la alquimia de los subproductos, donde el diseño de la mezcla extrae el potencial técnico oculto en los desechos del campo (cenizas de cascarilla, fibras lignocelulósicas o bagazos). Radica en la capacidad de transmutar la biomasa residual en un agregado puzolánico o estructural que optimiza la mezcla, inyectando sostenibilidad en la inercia mineral. Disminuye la carga contaminante y mejora el desempeño bioclimático al convertir el desecho industrial en un recurso de alta precisión que domina la economía del material y su huella ambiental.

La Extracción Proficiente de la Descarbonización: Se manifiesta como la desarticulación técnica de la huella de carbono mediante la sustitución clínica de componentes. No se busca reemplazar el estándar mundial del cemento Portland, sino eliminar procesos ineficientes para inyectar materiales cementicios suplementarios (cenizas volantes, escorias o arcillas activadas) y aditivos químicos de vanguardia, para reducir el factor clínker sin comprometer la versatilidad, durabilidad y resistencia mecánica que definen al material. El hormigón hereda su capacidad estructural histórica, pero la transfiere a una nueva realidad de bajo impacto, donde la innovación domina la termodinámica de los hornos y la química del fraguado para consolidar un urbanismo de responsabilidad planetaria.

La conclusión con estos escritos no pretende ser un cierre, sino un arranque hacia una nueva etapa en la historia de la construcción. El objetivo es identificar los desafíos y las oportunidades que el siglo XXI impone al uso del cemento. No buscamos la tabula rasa, sino una intervención transdisciplinar consciente que respete y potencie la memoria del entorno construido mientras proyecta su viabilidad futura minimizando la huella climática desde el entendimiento y el respeto bioambiental.

Reunir a investigadores de diversas disciplinas e instituciones bajo el pretexto del bicentenario de una patente industrial nos permitió co-construir desde la academia una búsqueda donde el uso del cemento en la edificación sea más sostenible, eficiente y, sobre todo, consciente de su rol social. La meta es clara: transitar de la mera construcción de objetos arquitectónicos e ingenieriles hacia la creación de un hábitat que sea un testimonio de nuestra capacidad técnica, pero también de nuestra madurez técnica y ética ante el medio ambiente.

El Seminario y esta publicación que de él emana, fue, en última instancia, una responsabilidad compartida. Un compromiso para que la herencia de Aspdin sea imperecedera bajo los valores de la Responsabilidad Social Universitaria, la sustentabilidad y la innovación colectiva, refrendando que el mundo que construyamos sea capaz de albergar la vida en todas sus dimensiones, desde la firmeza del concreto y la flexibilidad del pensamiento multidisciplinario.

Dr. Abiel Treviño Aldape

Facultad de Arquitectura de la UANL

Monterrey, Nuevo León, a 30 de abril de 2026

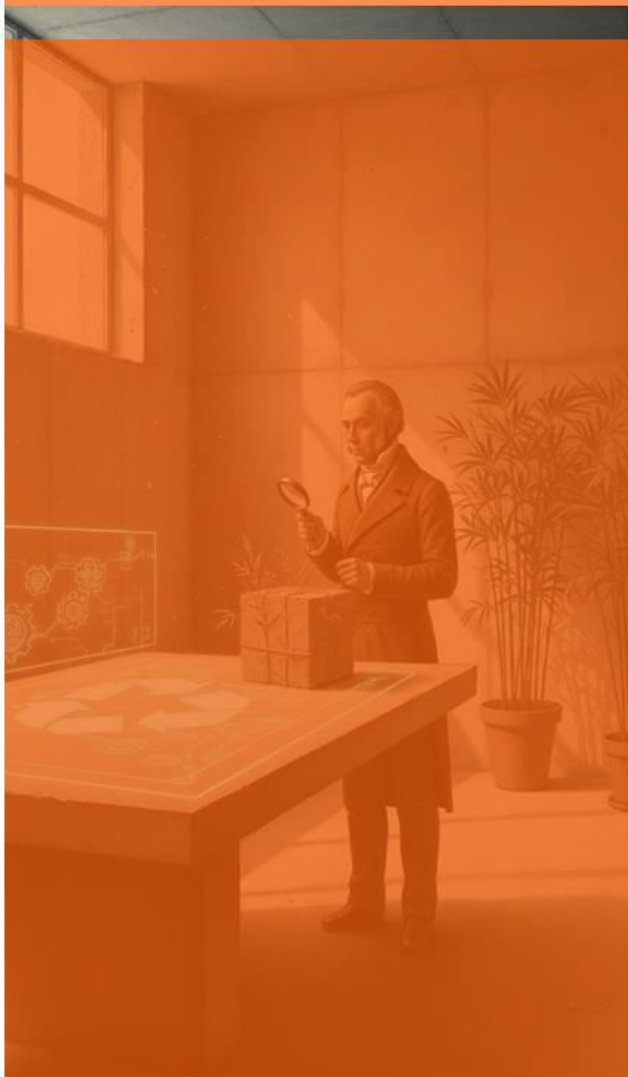
1



Joseph Aspdin

Huellas topomorfológicas:

El legado *concreto* en la obra de los *Pritzker*



Huellas topomorfológicas:

El legado concreto en la obra de los Pritzker

Abiel Treviño Aldape ¹

Los arquitectos tienen relativamente poco poder para cambiar las realidades subyacentes, al menos deben expresar alternativas, y disfrutar construyéndolas [...] Múltiples situaciones generarán múltiples respuestas, que por sí solas no podrán producir cambios, pero si transformar comportamientos.

Charles Jencks, 2012

En una vasta extensión de lava al sur de la ciudad de México me propuse, arrobado por la belleza de ese antiguo paisaje volcánico, realizar algunos jardines que humanizaran, sin destruir tan maravilloso espectáculo.

Discurso de aceptación del premio Pritzker | Luis Barragán, 1980

Proemio

Como contexto introductorio, es posible sostener que, si bien la patente que detonó el uso cuasi-masivo y a gran escala del cemento Portland fue obtenida hace exactamente dos siglos (1824), y permitió el control de calidad necesario para asegurar un producto con características homogéneas, facilitando así el estudio y la comprensión precisa de sus propiedades físicas, el cemento no ha sido desconocido ni desaprovechado como elemento constructivo primordial prácticamente desde los inicios de la humanidad.

Existen vestigios de hace casi diez mil años de mezclas primitivas elaboradas a partir de calcio y yeso, utilizadas en el Cercano Oriente con diversos fines, entre ellos, por supuesto, la construcción. Emplazamientos como Cayönü (zona oriental de Anatolia próxima a Mesopotamia), Yiftah'el (en la Baja Galilea, al norte de Israel) y Jericó (en Cisjordania, a unos 30 kilómetros al este de Jerusalén) (cfr. Olvera, 2013) constituyen ejemplos palpables de estas primeras aplicaciones.

¹ Arquitecto, Maestro en Ciencias y Doctor en Filosofía por la Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Email: abiel.trevinoal@uanl.edu.mx Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6744-7892>

Siguiendo la línea del tiempo (hacia el 7000 a.C.) se documenta el uso de hormigón de cal hidráulica en Israel; posteriormente, - hormigón en los suelos de cabañas hacia el 5600 a.C. en Lepenski Vir, Serbia; mortero de cal alrededor del 2000 a.C. en el Minoan Palace of Phaistos, en Creta; así como una cisterna arcaica de planta rectangular, revestida con yeso, en Kameiros, Grecia, aproximadamente en el 1000 a.C.

Mención especial merece la cúpula semiesférica que corona el Panteón de Agripa, en Roma: una extraordinaria pieza edilicia de aproximadamente 43.5 metros de diámetro, construida únicamente con hormigón —es decir, sin acero de refuerzo— en el año 118 d.C., y que permanece en pie hasta hoy. Otro ejemplo emblemático de avance constructivo se encuentra en la cimentación de concreto que sostiene la Catedral de Salisbury (Inglaterra), edificada en el año

1200 de nuestra era. Se trata de una aplicación técnico-empírica orientada a la seguridad estructural del objeto arquitectónico y, por extensión, de los usuarios que ahí se congregan.

Transcurrieron poco más de cinco siglos y medio para pasar del aprendizaje basado únicamente en la experiencia acumulada a un positivismo lógico que, en el contexto de la Revolución Industrial, impulsó John Smeaton (1724-1792), figura seminal en la transformación de la ingeniería. Pionero en la conceptualización y profesionalización de la disciplina, - Smeaton acuñó el término “ingeniero civil”, diferenciándolo de la ingeniería militar y estableciendo así los cimientos de una nueva profesión. Sus investigaciones sobre materiales de construcción —especialmente los aglutinantes - hidráulicos como el cemento— resultaron cruciales para el avance ingenieril. La aplicación de sus

hallazgos en el Faro de Eddystone, obra que combinó materiales y técnicas innovadoras, evidenció su rigor científico y su capacidad para ampliar los límites de la naciente disciplina. Asimismo, su influencia perdura en la creación de la - Sociedad de Ingenieros Civiles en 1771, consolidando su legado y promoviendo el desarrollo institucional de la ingeniería civil (Pawlitschko, 2019).

El avance académico continuó de manera acelerada con el científico francés Louis Vicat (1786-1861). Interesado en los aportes constructivos del cemento en la antigua civilización romana, analizó con rigor científico las propiedades y reacciones químicas de la cal hidráulica. En 1818 publicó un tratado sobre la fabricación del cemento, obra por la cual la historia lo reconoce como el - inventor del cemento artificial (Romea, 2014).

Pocos años después, el albañil escocés Joseph Aspdin (1778-1855) obtuvo la patente británica BP 5022 titulada *Una innovación en el modo de producir una piedra artificial* (*An improvement in the modes of producing an artificial stone*), correspondiente a un cemento que —según afirmaba— era tan duro como la piedra de Portland. Con el tiempo, este material sería conocido como cemento Portland (cfr. Romea, 2014: 7). La fecha de la patente: 21 de octubre de 1824.

Corresponde al ingeniero y profesor Charles Rabut (1852-1925) impartir, durante el periodo 1897-1898, en la Escuela Nacional de Puentes y Caminos, el primer curso de hormigón armado en el mundo: *Construcciones de hormigón armado*. Cabe destacar que entre sus discípulos se encontraba Eugène Freyssinet, quien posteriormente sería reconocido como

el padre del hormigón pretensado (Varona et al., 2012).

A partir de entonces se desarrolla un proceso acelerado de mejoras continuas en el aprendizaje e innovación que consolidan el uso del cemento en la construcción. Corresponde ahora a un arquitecto ser señalado por la posteridad como el padre del hormigón armado (reforzado mediante elementos de hierro, como varillas) en la figura de Auguste Perret, con el edificio residencial de la Rue Franklin (1903), considerado el primero construido con esta particularidad.

En 1914 surge una notable megaestructura realizada en hormigón: las Esclusas de Miraflores del Canal de Panamá. Un año después, en 1915, se construyó la entonces estructura de hormigón reforzado más alta del mundo: el Hide and Leather Buil-ding, en Nueva York, de 18 pisos y 225 pies de altura (68.58 metros).

Otro salto significativo se materializa en el Aeropuerto Internacional de Kansai, en la bahía de Osaka, Japón: una isla artificial de cuatro kilómetros de largo por uno de ancho, cuya construcción requirió aproximadamente 21 millones de metros cúbicos de bloques de hormigón, en 1989.

Este breve recuento culmina con el Burj Khalifa, en Dubái, Emiratos Árabes Unidos, superestructura apoyada sobre una gran losa de hormigón armado (a su vez sostenida por pilotes de concreto reforzado) con un espesor de 3.70 metros, construida en cuatro vertidos independientes. Se trata del edificio más alto del mundo en la actualidad: una torre de 186 pisos (162 habitables) que alcanza una altura de 828 metros, —culminada en 2010—.

Es cierto e innegable que el uso generalizado del cemento en la obra arquitectónica contemporánea constituye una práctica atá-

vica por su arraigo en la técnica constructiva primaria y, al mismo tiempo, secular, al haber definido la solidez de la arquitectura durante siglos como material duradero y confiable. De ahí que, más adelante en este trabajo, se profundice en su empleo en edificaciones de diversas escalas, con el propósito de sustentar teóricamente el potencial que este material puede transmitir al sitio donde la obra se implanta, reforzando y acrecentando el sentido y la esencia del lugar.

La arquitectura se considera completa sólo con la intervención del ser humano que la experimenta. [...] Una vez más, lo que es de primordial importancia es la imaginación y la ficcionalidad que la arquitectura contiene más allá de lo sustantivo.

Discurso de aceptación del Premio Pritzker,
Tadao Ando, 1995.

Topomorfología Urbana:

Relación entre las formas y las experiencias del lugar

Entendemos la topomorfología - como la relación íntima entre las formas físico-espaciales que componen y configuran un lugar determinado. Desde una perspectiva conceptual, se reconoce que las características propias de un sitio pueden definir su identidad y conferir carácter al entorno, influyendo directamente en las experiencias y actividades que allí se desarrollan. En este sentido, la topomorfología no se limita a la disposición de los elementos arquitectónicos dentro de un ámbito geográfico, sino que analiza cómo estas configuraciones físicas inciden en la interacción de los usuarios con el lugar y entre sí.

A partir de ello, se subraya la importancia de adaptar el objeto arquitectónico y la intervención urbana al sitio específico. Cada espacio debe diseñarse de manera consciente y particularizada, con-

siderando sus condiciones locales, culturales, climáticas y físicas. Este principio no se orienta únicamente a satisfacer criterios estéticos, sino también a responder a necesidades funcionales y emocionales de la comunidad que habita el espacio. Así, el diseño de los distintos componentes urbanos se convierte en un medio para fortalecer la identidad del lugar y fomentar un sentido profundo de pertenencia entre habitantes y usuarios.

La topomorfología desempeña, por tanto, un papel fundamental en la creación de nuevas territorialidades urbanas, al ofrecer las bases necesarias para comprender la relación entre la forma física del sitio y las experiencias que esta puede generar. Desde este enfoque, es posible proyectar y construir entornos arquitectónicos y urbanos que no solo resulten atractivos en términos visuales y funcionales, sino que además favorezcan la interacción so-

cial, mejoren la calidad de vida y contribuyan al fortalecimiento de los lazos comunitarios.

Elementos como las variaciones topográficas —pendientes sutiles, promontorios recios, oquedades y vanos— no solo modifican la estética y la materialidad del sitio, sino que configuran un entorno dinámico capaz de promover el descubrimiento y la interacción, contribuyendo así a la construcción de un sentido de apropiación del territorio.

En este marco, la topomorfología urbana también alude a la forma física de la ciudad y a los objetos que la integran —edificios, ríos, cerros, entre otros—, organizados en el territorio según sus particularidades físico-geográficas y socioeconómicas. Las diferencias en la configuración del espacio urbano pueden reflejar tensiones sociales y económicas derivadas de la organización y apropiación territorial.

A partir de estas reflexiones, se propone establecer una relación topológica que permita discernir los diversos aspectos y matices capaces de potenciar y fortalecer un sitio determinado mediante la incorporación o modificación de la arquitectura y el diseño urbano.

Se plantean como ejes iniciales para conformar el *corpus teórico* de la topomorfología urbana los siguientes apartados: Contexto Geográfico y Cultural;

Configuración de la Espacialidad Urbana; Materialidad y Técnica Constructiva; Forma y Volumen; Escala y Proporción; Percepción y Experiencia del Usuario; y Territorio Ocupado y Paisaje.

En la Tabla 1 se incluyen tres referentes de investigación y difusión por categoría, sintetizando en el encabezado la fundamentación principal, en atención a las limitaciones de extensión de la publicación.

Tabla 1. Conceptos Topomorfológicos

	Contexto Geográfico y Cultural	Configuración de la Espacialidad Urbana	Materialidad y Técnica Constructiva	Forma y Volumen	Escala y Proporción	Percepción y Experiencia del Usuario	Territorio ocupado y Paisaje
Referentes	Yi-Fu Tuan	James C. Scott	Aldo Rossi	Francis Ching	José de Manjarrés	Juhani Pallasmaa	Ian McHarg
	Christian Norberg-Schulz	Henri Lefebvre	Bruno Zevi	Louis Kahn	Le Corbusier	Gastón Bachelard	Alain Roger
	Edward Relph	Kevin Lynch	Kenneth Frampton	Simon Unwin	Claudio Perrault	Steven Holl	Shamil A. F. Hummadi

Fuente: Elaboración propia, 2024

A continuación, se presenta la síntesis puntual de la aportación de cada autor en relación con los siete rubros topomorfológicos formulados.

En el primer apartado, - **Contexto Geográfico y Cultural**, se analiza la relación entre el ser humano y el espacio desde una perspectiva fenomenológica, cultural y existencial. Los autores revisados (Tuan, Norberg-Schulz y Relph) coinciden en que el espacio no es únicamente un concepto abstracto, sino una construcción social y cultural que se vive y se experimenta de manera subjetiva y personal.

Tuan (1977) subraya la relevancia de la experiencia vivida en la transformación del espacio. El lugar, al cargarse de significado y emoción, otorga sentido de identidad y pertenencia. Norberg-Schulz (1975) profundiza en la estructura del espacio y destaca su dimensión expresiva y simbólica.

Introduce el concepto de *genius loci*, entendido como el carácter propio y singular de cada lugar, y enfatiza la capacidad humana para configurarlo. Por su parte, Relph (1976) amplía esta reflexión al abordar la intimidad comporta-mental y el sentido de lugar, resaltando la importancia de la experiencia individual en la construcción del significado espacial.

En conjunto, los tres autores convergen en la idea de que el espacio es una construcción social y cultural que trasciende lo físico. El lugar, como resultado de esta construcción, se convierte en un componente esencial en la formación de la identidad individual y colectiva. La experiencia espacial es subjetiva y está influida por factores culturales, históricos y personales. Así, la relación entre el ser humano y el espacio es dinámica y bidireccional: el indi-

viduo moldea el espacio y, al mismo tiempo, es moldeado por él.

Al abordar la **Configuración de la Espacialidad Urbana**, se incorporan reflexiones desde diversas perspectivas que enfatizan la interacción entre lo físico, lo social y lo simbólico en la construcción del espacio urbano. Autores como Scott, Lefebvre y Lynch ofrecen aportaciones fundamentales en este debate.

Scott (1998) cuestiona la planificación urbana tradicional y propone un enfoque más orgánico y espontáneo. Defiende la diversidad funcional y la mezcla de usos como condiciones esenciales para generar ciudades vibrantes y resilientes. Lefebvre (2013) amplía esta visión al plantear una comprensión más compleja del espacio urbano, que integra dimensiones sociales, económicas y políticas. Destaca la importancia de la práctica espacial y de las representaciones sociales en la configuración del entorno

construido. Lynch (2008), por su parte, centra su análisis en la percepción individual y colectiva del espacio urbano, sosteniendo que la imagen mental que construimos de la ciudad influye directamente en nuestra experiencia y en nuestra relación con ella.

De este modo, la configuración de la espacialidad urbana se entiende como un proceso dinámico y complejo en el que intervienen múltiples actores y escalas. El espacio urbano no es solo resultado de la planificación formal, sino también de las prácticas cotidianas y de las representaciones sociales. La diversidad y la espontaneidad se consolidan como factores determinantes para la construcción de ciudades vivas y resilientes.

En cuanto a la **Materialidad y Técnica Constructiva**, Rossi, Zevi y Frampton, desde enfoques distintos, coinciden en subrayar su relevancia en la configuración -

topomorfológica del espacio urbano-arquitectónico.

Rossi (1982) destaca la dimensión histórica y social de la arquitectura. Para él, los edificios no son únicamente objetos funcionales, sino portadores de memoria y símbolos de identidad colectiva. La materialidad y la técnica constructiva permiten comprender los procesos de transformación urbana y la relación entre pasado y presente. Zevi (1998), por su parte, enfatiza la experiencia espacial y la función social de la arquitectura. Considera que la materialidad y la técnica no son simples recursos técnicos, sino elementos que influyen directamente en la manera en que percibimos y habitamos el espacio; además, critica el formalismo y promueve una arquitectura sensible a las necesidades humanas y al contexto. Frampton (2005) resalta la importancia del contexto y la historia, señalando que la mate-

rialidad y la técnica deben estar estrechamente vinculadas al lugar. El arquitecto, en este sentido, debe generar espacios auténticos y significativos para quienes los habitan, y enfatiza: “En realidad, mediante el concepto de emplazamiento y el principio de asentamiento, el entorno se convierte en la esencia de la producción arquitectónica” (Frampton; 2005: p.334).

Así, la materialidad y la técnica constructiva se consolidan como actores fundamentales en la configuración del espacio urbano y arquitectónico. No solo cumplen funciones técnicas, sino que también poseen un profundo significado social, cultural e histórico. La arquitectura, como manifestación tangible de la humanidad, refleja las relaciones sociales, las creencias y los valores de una sociedad en un momento determinado.

En el apartado **Forma y Volumen** dentro de la topomorfología,

se integran las reflexiones de - Ching, Kahn y Unwin, quienes, desde perspectivas distintas, analizan esta relación y su impacto en la configuración espacial.

Ching (2002) destaca la función de la forma y el espacio como herramientas para resolver problemas y organizar el entorno. La interacción entre elementos básicos como el punto, la línea y el plano da origen a la forma arquitectónica, que a su vez condiciona la experiencia espacial. Kahn (1984) profundiza en la esencia de la forma y el volumen, vinculándolos con conceptos como orden y belleza; para él, la arquitectura debe revelar su esencia a través de la luz y el espacio, y el arquitecto actúa como mediador entre lo visible y lo invisible. Finalmente, Unwin (2003) examina la relación entre geometría y arquitectura, argumentando que la geometría aporta estructura y orden al espacio, al tiempo que permite flexibilidad en el diseño.

La forma y el volumen constituyen elementos esenciales en la arquitectura, pues determinan tanto la experiencia espacial como la función de los edificios. No se trata de recursos ornamentales, sino de respuestas a necesidades específicas y contextuales. Como creación humana, la arquitectura expresa la cultura, la historia y las aspiraciones de una sociedad.

En relación con la **Escala y Proporción**, Vitruvio, De Manjarrés y Le Corbusier, pese a pertenecer a épocas distintas, coinciden en reconocer su importancia. Para ellos, no se trata únicamente de cálculos matemáticos, sino de principios profundamente vinculados con la experiencia humana y la búsqueda de armonía y belleza.

Vitruvio (citado en el trabajo de Perrault, 1761) establece las bases de la arquitectura clásica al subrayar la relevancia de la proporción, la ordenación y la belleza. La proporción funciona como -

principio unificador que otorga armonía y equilibrio a las construcciones. De Manjarrés (1875) comparte la importancia de la proporción, aunque la relaciona de manera más directa con las necesidades humanas y la percepción; sostiene que debe ser flexible y adaptarse a la función y al contexto del edificio. Le Corbusier (1961) desarrolla el Modulor, un sistema proporcional basado en el cuerpo humano y en la serie de Fibonacci, con el propósito de establecer una armonía entre naturaleza y arquitectura y de proporcionar una herramienta para diseñar espacios a escala humana.

De estas aportaciones se desprende que la escala y la proporción son principios fundamentales y permanentes en la arquitectura, ya que regulan las relaciones entre las partes de un edificio y entre este y su entorno. Una adecuada proporción contri-

buye a la belleza, la armonía y la funcionalidad topomorfológica.

En cuanto a la **Percepción y Experiencia del Usuario**, Pallasmaa, Bachelard y Holl coinciden en destacar su relevancia en la arquitectura y el urbanismo. Más allá de la funcionalidad, la arquitectura debe generar emociones, recuerdos y una conexión profunda con el espacio.

Pallasmaa (2014) sostiene que la arquitectura debe apelar a todos los sentidos y propiciar una experiencia sensorial integral. Considera que su función es transformar las dimensiones infinitas en algo comprensible y habitable para el ser humano. Bachelard (2000) explora la relación entre arquitectura y psicología, vinculando los espacios con la memoria, los sueños y las emociones; la casa, por ejemplo, se entiende como un refugio simbólico que protege al individuo. Holl (2000) enfatiza el carácter dinámico del espacio y

propone que el objeto arquitectónico genere experiencias multisensoriales que conecten al usuario con su entorno.

De esta manera, la arquitectura no se limita a ser una obra edificada, sino que constituye una experiencia integral que involucra los sentidos y despierta emociones. Los espacios no solo cumplen funciones prácticas, sino que también poseen significados simbólicos y culturales.

Finalmente, en el apartado **Territorio Ocupado y Paisaje**, especialistas como McHarg, Roger y Hummadi aportan perspectivas complementarias sobre la relación entre el ser humano, la naturaleza y el espacio construido.

McHarg (2000) subraya la necesidad de comprender y respetar la naturaleza como un sistema complejo y dinámico, y propone una planificación que la integre en el entorno construido

en lugar de imponerse sobre ella. Roger (2014) analiza la dimensión estética y cultural del paisaje, señalando que este es una construcción social que evoluciona con el tiempo y que está cargada de significado. Hummadi (1967) se centra en la planificación urbana y en la importancia de crear ciudades humanas, diversas y adaptables, entendidas como organismos vivos que se desarrollan en interacción con la naturaleza.

En consecuencia, el territorio ocupado y el paisaje son dimensiones interrelacionadas que influyen en la manera en que habitamos y percibimos el mundo. La relación entre el ser humano y la naturaleza ha transitado por distintas etapas —dominación, adaptación y respeto— a lo largo de la historia. En este contexto, la arquitectura y la planificación urbana desempeñan un papel decisivo en la configuración de entornos sos-

tenibles, saludables y significativos.

Sintetizando las ideas principales en cada rubro, se obtiene el siguiente soporte teórico:

1. En el análisis del **Contexto Geográfico y Cultural** desde la Topomorfología, según Yi-Fu Tuan, Christian Norberg-Schulz y Edward Relph, se observa que los tres coinciden en reconocer que los lugares no son únicamente localizaciones físicas, sino construcciones vivenciales cargadas de significado. Tuan sostiene que el espacio se transforma en lugar a través de la experiencia personal y el apego emocional. Norberg-Schulz, por su parte, destaca la percepción del espacio como una interacción existencial y simbólica, estrechamente vinculada con el *genius loci*, es decir, con el carácter propio del lugar. Relph enfatiza la conexión emocional y el sentido de pertenencia, resaltando la au-

tenticidad del paisaje cotidiano como reflejo de las actividades humanas.

Las diferencias entre ellos radican en el enfoque que otorgan a la relación espacio-lugar. Tuan subraya principalmente la experiencia subjetiva y emocional; - Norberg-Schulz integra la función y la percepción estética dentro de una visión existencial del espacio; y Relph pone el acento en la vivencia íntima del lugar mediante la "intimidad comportamental". No obstante, los tres coinciden en situar al ser humano como eje central en la construcción del significado del espacio y del lugar, reconociendo la influencia determinante del contexto geográfico y cultural en esta relación.

2. En cuanto a la **Configuración de la Espacialidad Urbana**, Scott, - Lefebvre y Lynch coinciden en comprenderla como un proceso - dinámico, influido por las interacciones sociales y las prácticas coti-

dianas. Sin embargo, difieren en el énfasis que conceden a los componentes sociales, simbólicos y estructurales del espacio urbano.

Scott plantea que el orden urbano emerge de una red espontánea de normas sociales. Critica la planificación rígida y centralizada, y propone intervenciones pequeñas y reversibles, defendiendo la adaptabilidad y la flexibilidad como condiciones para un entorno urbano resiliente. Lynch centra su atención en la organización simbólica del espacio, destacando la importancia de la claridad y la estructura visual para generar sentido de pertenencia e identidad.

Lefebvre, por su parte, adopta una perspectiva más integral, al incorporar de manera conjunta las dimensiones físicas, sociales y simbólicas del espacio urbano.

3. En relación con la **Materialidad y Técnica Constructiva**, Rossi, Zevi y Frampton coinciden en que la arquitectura no constituye solo una respuesta funcional, sino una manifestación profunda de las relaciones sociales, históricas y culturales propias de su contexto.

Rossi entiende la ciudad como un espacio de memoria, donde los edificios expresan las tensiones entre pasado y presente. Zevi defiende una arquitectura flexible, capaz de responder a las necesidades humanas, y critica el urbanismo rígido; pone especial atención en la relación entre forma y función sin descuidar los aspectos sociales y psicológicos. Frampton, en sintonía con Zevi, resalta la importancia de integrar la arquitectura con su contexto social, aunque hace un énfasis particular en el conocimiento profundo del lugar. Para él, la técnica constructiva es un medio que permite

vincular el espacio con su historia y dotarlo de carácter.

4. En el apartado de **Forma y Volumen**, Ching, Kahn y Unwin coinciden en reconocer que estos elementos son fundamentales para la organización del espacio arquitectónico, aunque difieren en su aproximación.

Ching considera que la forma y el volumen constituyen medios para resolver problemas funcionales y contextuales, dentro de una estructura que trasciende lo meramente visual. Kahn, en cambio, entiende la forma como una expresión esencial del espacio, que se revela mediante la luz natural y se organiza a través del principio del orden. Unwin resalta la geometría como un acto de control que otorga orden al espacio; destaca las formas geométricas como herramientas para generar armonía y flexibilidad, con especial atención a las dimensiones horizontales y a la relación con el suelo.

En síntesis, Ching prioriza la relación entre forma y función en su contexto; Kahn enfatiza la revelación de la esencia espacial a través del orden y la luz; y Unwin concibe la geometría como un medio para estructurar el espacio de manera flexible y armónica.

5. En lo que respecta a **Escala y Proporción**, los tres autores analizados coinciden en su relevancia dentro de la arquitectura, aunque desde perspectivas diferenciadas. Vitruvio sostiene que la proporción es un principio universal orientado a la armonía y la belleza, que organiza la relación entre las partes y el todo. Para él, debe regirse por reglas matemáticas y estéticas que permitan alcanzar una arquitectura funcional y bella. De Manjarrés adopta una postura más flexible, al afirmar que la proporción debe ajustarse a las necesidades humanas y al contexto; no debe depender exclusivamente de cálculos matemáticos,

sino de la adecuación entre forma y función.

Le Corbusier propone el Modulor como un sistema que articula las proporciones del cuerpo humano con principios matemáticos, como la sección áurea. Su objetivo es alcanzar una armonía visual acorde con la escala humana, integrando proporciones naturales con la diversidad formal y funcional de la arquitectura, para garantizar coherencia y variedad en el diseño.

6. En cuanto a la **Percepción y Experiencia del Usuario**, los tres autores coinciden en que la arquitectura debe ofrecer una experiencia sensorial integral que vaya más allá de lo visual. Pallasmaa destaca la importancia de involucrar todos los sentidos y subraya cómo la interacción corporal con el espacio genera una conexión emocional profunda. Bachelard centra su reflexión en la memoria y en los significados simbólicos del

espacio, planteando que la arquitectura puede funcionar como un refugio emocional que trasciende la dimensión estrictamente funcional. Holl introduce la noción de *parallax* y de flujo espacial, enfatizando que el movimiento del observador transforma la percepción y produce una experiencia multisensorial dinámica.

8. Finalmente, en el rubro de **Territorio Ocupado y Paisaje**, McHarg, Roger y Hummadi abordan la relación entre ser humano y entorno desde perspectivas distintas pero complementarias. McHarg resalta la necesidad de respetar la complejidad de la naturaleza, proponiendo un diseño que se adapte a sus procesos orgánicos y geológicos. Roger concibe el paisaje como una construcción sociocultural mediada por la percepción estética; critica la desconexión generada por la revolución industrial y propone

recuperar una relación emocional y estética con el entorno. Hummadi, por su parte, defiende una planificación que fomente la interacción entre los elementos urbanos y naturales, promoviendo una ciudad dinámica y humanizada que estimule la experiencia sensorial.

En conjunto, los tres coinciden en la necesidad de establecer una relación respetuosa y significativa con el paisaje. No obstante, cada uno prioriza un enfoque distinto: McHarg se orienta hacia la dimensión ecológica, Roger hacia la percepción estética y cultural, y Hummadi hacia la experiencia urbana integrada con la naturaleza.

La arquitectura es una forma de ver, pensar y cuestionar nuestro mundo y nuestro lugar en él. Requiere una curiosidad natural, apertura en nuestras observaciones y voluntad de actuar afirmativamente. El crecimiento de un arquitecto requiere bastante tiempo.

Discurso de aceptación del Premio Pritzker,
Thom Mayne, 2005.

El premio Pritzker y el cemento: Convergencia de huellas topomorfológicas

Retomando el hilo conductor de este trabajo, centrado en la conmemoración del bicentenario de la patente para la obtención del cemento Portland, registrada en 1824, y motivado también por una coincidencia circunstancial, ya que en esas mismas fechas se realizaba la lectura de un libro basado en entrevistas a arquitectos galardonados con el Premio Pritzker (Moix, 2022), surge la idea de articular ambos temas a través del concepto de topomorfología desarrollado previamente. El Premio Pritzker, considerado el galardón más prestigioso en el ámbito de la arquitectura, fue creado en 1979 por Jay A. Pritzker y es otorgado por la Fundación Hyatt.

La pregunta que orienta esta convergencia es clara: ¿qué mejores ejemplos de intervenciones arquitectónico-urbanas capaces -

de fortalecer y revitalizar el sitio en el que se insertan que aquellas realizadas por los arquitectos más destacados del mundo?

El premio se entrega anualmente y ha sido concedido de manera ininterrumpida hasta el año pasado. Debido al amplio número de profesionales reconocidos, se optó por limitar la investigación a quienes recibieron el galardón en intervalos de cinco años. El recorrido inicia en 1979, por tratarse del primer año de su entrega, y continúa con 1980, 1985, 1990 y así sucesivamente hasta 2020, incorporando también 2024 por ser el más reciente. La búsqueda de al menos un par de ejemplos emblemáticos en los que el cemento —posteriormente transformado en concreto mediante su mezcla con arena, grava y agua— tuviera un papel protagónico, representó un proceso exhaustivo y minucioso.

Una vez registradas y localizadas geográficamente las obras que cumplían con esta condición, y tras reunir el material bibliográfico necesario para profundizar en los detalles de cada pieza arquitectónica, se procedió a realizar una interpretación sustentada en los siete elementos topomorfológicos formulados. El objetivo fue llevar a cabo una lectura integral y profunda de cada objeto edilicio.

Como ejemplo inicial, correspondiente al primer laureado, - Philip Johnson, se selecciona el JFK Memorial. En cuanto al *Contexto Geográfico y Cultural*, la elección de Dallas como emplazamiento del memorial está directamente vinculada al asesinato del presidente John F. Kennedy. El proyecto no solo busca honrar su memoria, sino también ofrecer a la ciudad un espacio de reflexión y reconciliación. Se trata de un cenotafio, una tumba simbólica a-

bierta, concebida como un ámbito destinado al recogimiento y al recuerdo.

(<https://www.jfk.org/es/john-f-kennedy-memorial-plaza/>).

Respecto a la *Configuración de la Espacialidad Urbana*, el memorial se sitúa en Dealey Plaza, el mismo lugar donde ocurrió el atentado. Esta localización le otorga un carácter profundamente emotivo y cargado de significado histórico. Su inserción urbana es sobria y respetuosa: no compite visualmente con las edificaciones circundantes, sino que se integra al entorno mediante una presencia contenida y silenciosa.

En relación con la *Materialidad y Técnica Constructiva*, el tratamiento del concreto responde a un enfoque purista y minimalista. El empleo de elementos prefabricados agilizó el proceso constructivo y confirió al conjunto una apariencia monolítica y uniforme. La materialidad no solo cumple una función estructural, sino que

refuerza la solemnidad del monumento.

En cuanto a *Forma y Volumen*, el cenotafio se concibe como un cubo abierto, sin cubierta, que sugiere una sensación de infinitud y de conexión con el cielo. Las columnas de concreto, aparentemente suspendidas sobre el suelo, aportan ligereza visual a una masa que, por su material, podría percibirse como pesada. El presidente Johnson lo calificó como “un lugar de refugio tranquilo, un lugar cerrado dedicado al pensamiento y la contemplación separado de la ciudad que lo rodea, pero cerca del cielo y de la tierra”

(<https://www.vaumm.com/jfk-memorial-by-philip-johnson/>).

Desde la perspectiva de *Escala y Proporción*, el memorial, pese a su carácter monumental, mantiene una escala humana que favorece la introspección. Existe un equilibrio entre monumentalidad e intimidad, lo que permite que el visitante

experimente una atmósfera de recogimiento sin sentirse abrumado por la dimensión del conjunto.

En lo relativo a la *Percepción y Experiencia del Usuario*, la sobriedad formal y la ausencia de ornamentación propician el silencio y la contemplación. La luz natural, al penetrar en el espacio interior, construye una atmósfera serena y cambiante que vincula el monumento con el paso del tiempo y el ciclo de las estaciones, intensificando la experiencia emocional del visitante.

Finalmente, al analizar el *Territorio Ocupado y Paisaje*, se entiende el memorial como un marco urbano que delimita y resignifica un acontecimiento histórico. A pesar de su condición monumental, se integra armónicamente al entorno, consolidando un espacio de encuentro y memoria dentro del tejido urbano.

En este punto del análisis, se cuenta con elementos suficientes para sostener que el JFK Memorial de Philip Johnson constituye un ejemplo de cómo la arquitectura puede funcionar como vehículo de memoria y reflexión colectiva. Mediante un lenguaje minimalista y atemporal, el cenotafio trasciende su función conmemorativa para convertirse en un referente urbano con impacto simbólico y emocional.

A partir de esta lectura, se establecen tres palabras clave que permiten comprender cómo, en este caso, un monumento funerario dota de sentido y carga simbólica a la topomorfología urbana preexistente. Estas categorías conceptuales sintetizan la relación entre forma, significado y contexto dentro del caso de estudio:

- Silencio monolítico: Establece un vínculo entre la atmósfera de recogimiento del lugar y la solidez expresiva del material.

- **Reconciliación urbana:**
Enfatiza la intención del memorial de integrarse al tejido urbano, resignificando su entorno y propiciando una relación dialógica entre memoria colectiva y ciudad.
- **Vacío significativo:** Articula la presencia del espacio abierto como recurso compositivo y simbólico, en el que la ausencia se convierte en portadora de significado y reflexión.

Como cierre de cada estudio de caso, se formula una interpretación topomorfológica integral. En el caso de Johnson y del JFK Memorial, esta se sintetiza de la siguiente manera:

Se trata de un ejemplo paradigmático de la arquitectura entendida como herramienta para la memoria y la reconciliación. A través de un diseño minimalista y atemporal, el memorial ha trascendido su función conmemorativa para consolidarse como un hito urbano capaz de conmover y – transformar.

Su impacto topomorfológico se manifiesta en la resignificación de un lugar históricamente cargado, en la creación de un espacio de encuentro y reflexión, y en la generación de una experiencia emocional profunda para quienes lo visitan.

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2015	Frei Otto	Palacio Tuwaiq	Riad, Arabia Saudita	1983 - 1985	Administración [Gubernamental]
Interpretación topomorfológica					
El palacio se integra de manera sublime en el paisaje desértico, creando una relación armoniosa entre la arquitectura y la naturaleza. La forma serpenteante del muro principal sigue las curvas de nivel del terreno, mimetizándose con el entorno; al encontrarse en un entorno aislado, el palacio desarrolla una autonomía arquitectónica, creando un microcosmos que responde a las condiciones climáticas y culturales del lugar. El diseño del palacio se inspira en la arquitectura tradicional árabe, reinterpretando elementos como los patios interiores y los muros altos para crear un espacio contemporáneo.					

Por razones de extensión, las demás obras analizadas en este trabajo se presentarán compendadas en las siguientes tablas de elaboración propia, organizadas -

por tipología arquitectónica, con el fin de ofrecer una visión sistematizada y comparativa de los casos estudiados.

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1979	Philip Johnson	JFK Memorial	Dallas, Texas, EEUU	1968 - 1970	Escultura urbana
Interpretación topomorfológica					
Ejemplo paradigmático arquitectónico como herramienta para la memoria y la reconciliación. A través de su diseño minimalista y atemporal, el memorial ha logrado trascender su función conmemorativa para convertirse en un hito urbano que conmueve y transforma. Su impacto topomorfológico se manifiesta en la redefinición de un lugar cargado de historia, en la creación de un espacio de reflexión y encuentro, y en la generación de una experiencia emocional profunda en los visitantes.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1980	Luis Barragán	Torres de Satélite	Naucalpan de Juárez, Estado de México	1957 - 1958	Escultura urbana
Interpretación topomorfológica					
Su impacto topomorfológico se manifiesta en su capacidad para definir el horizonte de Ciudad Satélite y se convierten en un punto de referencia visual al combinar color, luz y formas simples, creando una experiencia estética y emocional intensa. Encarnan la aspiración de México por modernizarse y construir una identidad propia en el siglo XX. Dialogan con el entorno natural y urbano, creando un equilibrio entre lo artificial y lo natural.					

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1980	Luis Barragán	Faro del comercio	Monterrey, Nuevo León, México	1983 - 1984	Escultura urbana
Interpretación topomorfológica					
El Faro del Comercio transforma el paisaje urbano de Monterrey, definiendo el horizonte de la ciudad y convirtiéndose en un punto de referencia visual [un hito arquitectónico]. La iluminación nocturna transforma al Faro en una escultura luminosa que cambia a lo largo del tiempo. Se convierte en un espacio de encuentro y convivencia para los ciudadanos.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1990	Aldo Rossi	Monumento a los partisanos	Segrate, Lombardía, Italia	1965 - 1967	Escultura urbana
Interpretación topomorfológica					
Obra que trasciende su función conmemorativa para convertirse en una reflexión profunda sobre la memoria, la historia y la condición humana. A través de una geometría elemental y una materialidad austera, se erige como un espacio de recogimiento y recuerdo que dialoga con el paisaje y con la conciencia del espectador. El hormigón y las formas geométricas simples confieren al monumento una apariencia atemporal. Es referente de la arquitectura clásica y a los monumentos funerarios.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2024	Riken Yamamoto	Namics-technocore	Niigata, prefectura de Japón	2007 - 2008	Industria
Interpretación topomorfológica					
El edificio se inserta en un contexto donde naturaleza y tecnología coexisten. Su forma orgánica, establece un diálogo con el entorno natural, mientras que su estructura de concreto y su función industrial lo vinculan con la tradición tecnológica de Niigata. Representa un punto de referencia para la innovación en el diseño industrial y corporativo. El concreto no solo es estructural, convirtiéndose en un elemento expresivo que define la identidad del edificio. La escala del edificio está en equilibrio con su función, creando un espacio que es a la vez imponente y acogedor.					

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1985	Hans Hollein	Museo Guggenheim	Monchesberg, Salzburg, Austria	Proyectado en 1989	Servicios [Museo]
Interpretación topomorfológica					
Aunque no construido, representa una visión utópica que habría enriquecido el paisaje del Monchesberg y se habría convertido en un nuevo hito cultural. La integración del museo en el paisaje habría ofrecido una experiencia sensorial y emocional única. Podría haber sido un hito arquitectónico que habría transformado la relación entre el hombre y la naturaleza. Su legado radica en su capacidad para inspirar a futuras generaciones de arquitectos y urbanistas.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1985	Hans Hollein	Vulcania	Saint-Ours- Les-Roches, Auvernia, Francia	1994 - 2002	Servicios [Museo]
Interpretación topomorfológica					
Su impacto topomorfológico es evidente en su capacidad para crear formas orgánicas que se integran en el paisaje volcánico. Es una metáfora visual de las fuerzas geológicas que han moldeado el paisaje. El uso del concreto permite crear formas orgánicas que se integran en el paisaje volcánico, simulando las texturas y las formas de las rocas.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2000	Rem Koolhaas	Casa da Música	Porto, Portugal	2001 - 2005	Servicios [Cultura]
Interpretación topomorfológica					
Volumen escultórico que redefine el paisaje urbano de Oporto, creando un nuevo centro de gravedad visual. El edificio se convierte en un catalizador de la renovación urbana, revitalizando la zona y atrayendo nuevos públicos. La forma facetada del edificio, inspirada en un instrumento musical, se convierte en una metáfora de la función del edificio y de su relación con la ciudad.					

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2000	Rem Koolhaas	Biblioteca Nacional de Qatar	Doha, Qatar	2012 - 2017	Servicios [Cultura]
Interpretación topomorfológica					
A través de una cuidadosa combinación de forma, materialidad y función, Koolhaas creó un edificio monumental, acogedor e innovador. La forma dinámica del edificio, con sus volúmenes que parecen flotar sobre el suelo, genera una sensación de ligereza y movimiento; además la inspiración en las dunas del desierto demuestra la capacidad de la arquitectura para adaptarse y responder al entorno y crear una nueva identidad.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2010	Kazuyo & Sejima (SANAA)	Grace Farms	New Canaan, Connecticut, EEUU	2014 - 2015	Servicios [Arte/ Educación]
Interpretación topomorfológica					
Se inserta en un paisaje cultural de gran riqueza, donde la arquitectura se convierte en un elemento más del entorno natural, la arquitectura se integra de manera fluida en el paisaje, creando un todo único donde los límites entre lo construido y lo natural se difuminan. La forma orgánica de los edificios permite crear espacios interiores acogedores y flexibles, que se adaptan a las diferentes actividades que se desarrollan en el complejo.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1995	Tadao Ando	Centro Roberto Garza Sada	San Pedro Garza García, N.L., México	2011 - 2013	Servicios [Educación]
Interpretación topomorfológica					
Volúmenes sólidos de hormigón y espacios vacíos crean una dinámica espacial que enriquece la experiencia del usuario, convirtiéndose en un nuevo paisaje institucional; lugar donde arquitectura, educación y cultura se entrelazan. Enriquece el entorno a través de una cuidadosa selección de materiales, una composición volumétrica precisa y una profunda conexión con el contexto.					

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2005	Thom Mayne	41 Cooper Square	Manhattan, Nueva York, EEUU	2004 - 2006	Servicios [Educación]
Interpretación topomorfológica					
Reinterpreta la tradición educativa en un contexto contemporáneo e insertándose en un tejido urbano denso y heterogéneo, estableciendo un diálogo con los edificios históricos y contemporáneos que lo rodean. La estructura de hormigón armado, con sus escaleras y puentes que conectan los diferentes niveles, crea una sensación de dinamismo y movimiento; además está envuelta en una piel de aluminio y vidrio, creando una tensión entre la solidez y la transparencia.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2010	Kazujo & Sejima (SANAA)	Rolex Learning Center	Lausana, Suiza	2008 - 2010	Servicios [Educación]
Interpretación topomorfológica					
Se inserta en un campus universitario en constante evolución, convirtiéndose en un nuevo centro de gravedad y catalizador de la vida académica. La arquitectura se inspira en el paisaje alpino suizo, creando una conexión entre el interior y el exterior y estableciendo un diálogo con la naturaleza. La cubierta ondulada de hormigón blanco se convierte en un elemento icónico del edificio, creando una sensación de movimiento y dinamismo. La continuidad espacial entre el interior y el exterior genera una sensación de fluidez y conexión con el entorno.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2020	Farrell & McNamara (GRAFTON)	Edificio Marshall	Londres, Reino Unido	2016 - 2022	Servicios [Educación]
Interpretación topomorfológica					
Inserto en un contexto urbano denso y heterogéneo, dialoga respetuosamente con su entorno, integrándose de manera sutil en el tejido urbano existente. Crea una continuidad visual que enriquece el paisaje urbano, revitalizando el área y ofreciendo un referente arquitectónico para futuras intervenciones. La estructura de hormigón crea una trama espacial que organiza los diferentes espacios del edificio, generando una sensación de orden y claridad y conectando visual y físicamente con el entorno urbano, revitalizando el área.					

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2020	Farrell & McNamara (GRAFTON)	Instituto Mines - Telecom	Palaiseau, Francia	2018 - 2021	Servicios [Educación]
Interpretación topomorfológica					
Se adapta a la topografía suavemente inclinada del terreno, creando una relación fluida entre arquitectura y paisaje circundante. Las terrazas y niveles escalonados siguen las curvas de nivel, generando una sensación de continuidad. Cuenta con espacios serenos y flexibles, capaces de adaptarse a las diferentes actividades que se desarrollan en el edificio. El hormigón, utilizado de manera expresiva, se convierte en un material versátil que permite crear espacios con diferentes atmósferas y escalas.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1979	Philip Johnson	The New York State Pavilion, N.Y., EEUU	Flushing Meadows- Corona, Park en el barrio de Queens	1962 -1964	Servicios [Pabellón]
Interpretación topomorfológica					
Representa un hito en la historia de la arquitectura moderna, no solo por su diseño innovador sino también por su capacidad para generar una experiencia espacial única y memorable. Su impacto topomorfológico se manifiesta en su capacidad para marcar un territorio, generar un diálogo con el entorno natural y crear un hito arquitectónico que perdura en la memoria colectiva.					

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1995	Tadao Ando	Caza Azuma	Sumiyoshi, Osaka, Japón	1975 - 1976	Vivienda [Casa habitación]
Interpretación topomorfológica					
Es un ejemplo de cómo la arquitectura puede transformar un espacio reducido en un lugar de gran riqueza espacial y simbólica. Al combinar la fuerza del hormigón con la delicadeza de la luz natural y la vegetación, Ando crea un espacio que invita a la reflexión y la contemplación.					

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2005	Thom Mayne	Casa Blades	Santa Bárbara, California, EEUU	1993 - 1997	Vivienda [Casa habitación]
Interpretación topomorfológica					
A través de una geometría fragmentada, materialidad expresiva e integración profunda con el entorno natural privilegiado de Santa Bárbara, se convierte en una escultura habitada que dialoga intensamente con el paisaje. El hormigón armado se utiliza para expresar la energía y la fuerza de la naturaleza, creando una arquitectura que es a la vez poderosa y delicada. La casa se convierte en una escultura habitada que fragmenta el paisaje y lo reinterpreta, creando una nueva relación entre la arquitectura y la naturaleza.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
1990	Aldo Rossi	Complejo Monte Amiata Gallaratese House	Gallaratese, Milan, Italia	1969 - 1972	Vivienda [Departamentos]
Interpretación topomorfológica					
Establece una nueva relación entre la arquitectura y la ciudad, proponiendo una nueva tipología de vivienda colectiva. El complejo Gallaratese ha sido objeto de numerosos estudios y análisis, convirtiéndose en un referente para las generaciones posteriores de arquitectos. Combina la innovación formal con una profunda reflexión sobre la vivienda y la ciudad.					
Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2015	Frei Otto	Ökohaus	Berlin, Alemania	1982 - 1988	Vivienda [Departamentos]
Interpretación topomorfológica					
Inserto en un contexto urbano en constante transformación, siendo un testimonio de la reconstrucción y renovación de la ciudad tras la 2 ^{da} Guerra Mundial. Demuestra la capacidad del hormigón para crear espacios flexibles y adaptables. Busca nuevas formas de habitar, combinando la innovación tecnológica con una sensibilidad hacia el medio ambiente y las necesidades de los usuarios. La forma orgánica del edificio y la integración de la vegetación crean una sensación de continuidad entre la arquitectura y el paisaje.					

Distinción	Pritzker	Obras	Ubicación	Inicio - Término	Tipología
2024	Riken Yamamoto	Hotakubo Housing	Chuo Ward, Kumamoto, Japón	1991	Vivienda [Departamentos]
Interpretación topomorfológica					
Se integra de manera armoniosa en el tejido urbano existente, respetando escala y tipología de las construcciones vecinas. Se convierte en un nuevo centro comunitario, generando un espacio de encuentro y convivencia para los residentes. El uso del hormigón visto, combinado con el objetivo de crear un espacio comunitario, genera una experiencia táctil y sensorial única. La combinación de materiales y texturas, como el hormigón, la madera y el vidrio, genera una experiencia sensorial rica y variada.					

El análisis topomorfológico de las obras seleccionadas, construidas con el concreto como material predominante, revela un enfoque común: la sólida integración de la arquitectura con el paisaje y la generación de experiencias sensoriales singulares.

A continuación, se presenta una relación de coincidencias que potencia el impacto de estas obras en sus respectivos contextos, a partir de la interpretación fenomenológica de sus características topomorfológicas.

a) Integración al paisaje natural y cultural

Las obras mencionadas comparten una profunda relación con su entorno, fusionando la arquitectura con el paisaje natural y cultural. Ejemplos de ello son el Palacio Tuwaiq, que sigue las curvas de nivel del terreno en el desierto, y el Faro del Comercio, que redefine el horizonte urbano de Monterrey mediante su iluminación nocturna, creando un nuevo paisaje en la ciudad. Ambas obras logran una armonización con el entorno, haciendo de la

naturaleza una extensión de la arquitectura.

Por otro lado, el Museo Guggenheim, aún no construido, proponía una integración que habría enriquecido el paisaje de Monchsberg, generando una experiencia sensorial única. De igual manera, Grace Farms establece una fluidez entre lo construido y lo natural, disolviendo las fronteras entre ambos mediante una arquitectura orgánica, mientras que el Centro Roberto Garza Sada se configura como un nuevo paisaje institucional a través de una cuidada composición volumétrica que responde a su contexto.

b) Uso del concreto como elemento expresivo

El concreto no solo se utiliza como material estructural, sino también como un vehículo expresivo que define la identidad de la obra. Namics-Technocore, por ejemplo, emplea el concreto para comu-

nicar la identidad tecnológica de Niigata, mientras que la Casa - Blades se vale de este material para expresar la energía de la naturaleza, configurándose como una escultura habitada.

En este sentido, el concreto se convierte en un lenguaje arquitectónico propio, capaz de reflejar tanto la fuerza del entorno como la poética inherente a la obra misma.

c) Creación de espacios para la memoria y la reflexión

Algunas de estas obras se encuentran profundamente vinculadas a la memoria histórica y colectiva. El JFK Memorial, así como el Monumento a los Partisanos constituyen ejemplos de cómo la arquitectura puede erigirse como un espacio de reflexión, memoria y reconciliación.

A través de geometrías elementales y del uso de materiales austeros como el concreto, ambas obras propician una experiencia

emocional profunda, invitando al espectador a interactuar con la historia. El Faro del Comercio, por su parte, también configura un punto de encuentro al convertirse en un símbolo de la ciudad, cumpliendo una función análoga a la que desempeñan estos monumentos en sus respectivos contextos.

d) Generación de experiencias sensoriales a través de la forma y la luz

La capacidad de estas obras para generar experiencias sensoriales a través de la luz, la forma y la materialidad constituye un rasgo compartido. Torres de Satélite y Vulcania ejemplifican cómo las formas y texturas del concreto dialogan con la luz para producir experiencias visuales intensas. Mientras que las Torres de Satélite definen el horizonte urbano de Ciudad Satélite mediante el uso del color y la iluminación, Vulcania se integra en el paisaje volcánico,

empleando el concreto para evocar las formas geológicas y generar una experiencia sensorial que vincula el pasado geológico con el presente arquitectónico.

La Biblioteca Nacional de Qatar y el Rolex Learning Center, por su parte, utilizan la luz y la configuración formal dinámica para producir sensaciones de ligereza y fluidez. Ambos edificios aprovechan el concreto para conformar una atmósfera espacial que conecta a los usuarios con su entorno inmediato, mientras que la Casa da Música redefine el paisaje urbano de Oporto mediante formas facetadas que construyen una experiencia visual y emocional en diálogo con su contexto cultural.

e) Monumentalidad y referencias culturales

Muchas de estas obras constituyen también un testimonio de la monumentalidad que caracteriza a la

arquitectura de los siglos XX y XXI. El Monumento a los Partisanos, con su geometría austera, y el JFK Memorial, con su lenguaje minimalista, recurren a formas simplificadas para generar una presencia atemporal en el paisaje.

En esta misma línea, el 41 Cooper Square establece una conexión con su contexto urbano mediante su estructura de concreto, articulando lo moderno con lo histórico en un espacio que se consolida como referente cultural.

f) Adaptabilidad al terreno y contexto

La capacidad de estas obras para adaptarse al terreno y a su contexto inmediato constituye otra coincidencia significativa. El Instituto Mines-Telecom y el Ökohaus evidencian una notable sensibilidad hacia la topografía, al integrarse en terrenos inclinados y establecer una continuidad fluida entre la arquitectura y su entorno.

Este tipo de adaptación no solo responde a las condiciones físicas del sitio, sino que también optimiza la experiencia del usuario, generando espacios serenos y flexibles que se ajustan a la función del edificio.

El Centro de Aprendizaje Rolex [...] es un edificio con una composición espacial tridimensional. Una gran sala ondulante sube y baja, y el propio edificio se convierte en un paisaje cuya topografía ofrece diversos tipos de espacios. Discurso de aceptación del premio Pritzker | Kazuyo Sejima and Ryue Nishizawa [SANAA studio], 2010

Cementando el cierre: Consolidando hallazgos y abriendo nuevos horizontes - topomorfológicos

La relación entre estas obras y su contexto geográfico, cultural y social evidencia un enfoque topomorfológico que potencia el sitio en el que se emplazan, utilizando el concreto de manera innovadora

para generar experiencias sensoriales, emocionales y culturales profundas. La integración de la arquitectura con la naturaleza y la memoria histórica, la configuración de puntos de referencia visual, y el uso expresivo del concreto — con su capacidad de adaptarse a diversas formas— constituyen elementos que consolidan estas intervenciones arquitectónicas como hitos tanto en su paisaje inmediato como en la memoria colectiva.

La topomorfología, entendida como la interrelación entre el territorio contenedor y los objetos arquitectónicos contenidos, se configura como un campo fértil para una reflexión profunda que involucra tanto los aspectos ambientales como los sociales de la intervención humana. A partir de los hallazgos obtenidos, se formula una serie de axiomas transformadores orientados a potenciar la topomorfología de los sitios

desde una perspectiva integral, que articula de manera indisoluble la naturaleza y la cultura.

Ecopoiesis Asistida:

La ecopoiesis asistida, entendida como proceso transformador, integra el contexto geográfico, la espacialidad, la materialidad, la forma, la escala, la percepción y el paisaje para reconfigurar armónicamente la relación entre el ser humano y el territorio; nos referimos a ella como la creación de nuevos ecosistemas a través de la intervención humana. En este marco, la arquitectura no se concibe como una estructura aislada, sino como un agente transformador capaz de regenerar y fortalecer el equilibrio ecológico del sitio.

Este principio se encuentra estrechamente vinculado con la contextualidad, que garantiza que las decisiones arquitectónicas sean pertinentes y respetuosas del en-

torno natural; con la ecología, entendida como la integración armónica con los procesos naturales; con la relación, que establece vínculos profundos entre el ser humano, el entorno construido y la naturaleza; y con la materialidad, dado que la selección de materiales tiene un impacto directo en el ecosistema. Al comprender la ecopoiesis como un proceso constante de regeneración, la arquitectura puede convertirse en un catalizador capaz de restaurar o crear nuevos ecosistemas en espacios previamente degradados, generando así un lugar que no solo se habita, sino que también nutre el entorno.

Esta dimensión se manifiesta fenomenológicamente en la integración al paisaje natural y cultural, donde las obras fusionan lo construido con el entorno, disolviendo fronteras y convirtiendo la naturaleza en una extensión de la arquitectura —como ocurre en

Grace Farms con su fluidez orgánica o en el Centro Roberto Garza Sada mediante una composición volumétrica que responde a su contexto—, así como en la adaptabilidad al terreno y al contexto, evidente en proyectos como el Instituto Mines-Telecom y el --Ökohaus, que se ajustan con sensibilidad a pendientes pronunciadas, logrando una transición gradual entre lo edificado y lo natural que favorece la regeneración ecológica y una vivencia serena del espacio.

Narrativa Espacial:

La narrativa espacial emerge al entrelazar el contexto, la configuración urbana, la materialidad, la forma, la escala, la percepción y el paisaje, generando una experiencia vivencial que articula y reconfigura identidades territoriales. Destaca la capacidad de la arquitectura para evocar emociones y recuerdos a través de su diseño. Esta categoría se vincula

estrechamente con los conceptos de espacialidad y funcionalidad, ya que la forma y la distribución de los espacios deben posibilitar una experiencia fluida que resuene en el usuario.

La legibilidad adquiere un papel fundamental, pues el espacio debe ser comprensible y fácilmente navegable, mientras que la interacción resulta esencial para que los individuos se involucren activamente con su entorno, transformando la arquitectura en un acto de relación. Asimismo, la memoria y las sensaciones oníricas emergen como elementos que permiten que los espacios no solo sean recordados, sino que permanezcan en la experiencia emocional del usuario, evocando imágenes mentales que vinculan la historia del lugar con el presente y el futuro de sus habitantes.

La narrativa espacial constituye, además, una forma de hacer tangible la historia y la identidad

de un sitio, proporcionando una experiencia emocional y memorable que enriquece la relación de las personas con el lugar. Esta dimensión se potencia fenomenológicamente mediante la creación de espacios para la memoria y la reflexión, como ocurre en el JFK Memorial y el Monumento a los Partisanos, donde geometrías elementales y materiales austeros propician experiencias emocionales profundas de reconciliación histórica; así como en la generación de experiencias sensoriales a través de la forma y la luz, ejemplificada en Vulcania —que vincula el pasado geológico con el presente arquitectónico—, en la Biblioteca Nacional de Qatar y el Rolex Learning Center —con su atmósfera de ligereza y fluidez—, y en la Casa da Música, cuya forma facetada redefine el paisaje urbano de Oporto evocando resonancias culturales y emocionales.

Materialidad Tectónica:

La materialidad tectónica articula el contexto geográfico, la espacialidad urbana, la forma y la técnica constructiva, integrando escala, proporción y percepción para generar una relación dinámica entre territorio, paisaje y estructura, y subrayando la importancia de comprender las propiedades de los materiales con el fin de crear espacios significativos.

Este concepto se desarrolla a través de la adaptabilidad de la arquitectura, ya que la adecuada selección de materiales permite que la estructura se ajuste de manera fluida a las condiciones del sitio, tanto físicas como culturales.

La *firmitas* vitruviana —entendida como solidez— constituye una de las características fundamentales en la creación de espacios duraderos y seguros, mientras que la forma se encuentra condicionada por las propiedades de

los materiales, permitiendo que la arquitectura adquiera una identidad propia, vinculada a los orígenes materiales de la construcción. La identidad de un lugar se configura, en gran medida, a través de la materialidad, pues los materiales no solo cumplen una función estructural, sino que también representan de manera tangible la historia, la cultura y las tradiciones del sitio. De este modo, la materialidad se convierte en un puente entre el pasado, el presente y el futuro del lugar, en constante interacción con el entorno.

Esta dimensión tectónica se robustece fenomenológicamente mediante el uso del concreto como elemento expresivo, que trasciende lo estrictamente estructural para definir identidades —como en Namics-Technocore, donde refleja una vocación tecnológica, o en la Casa Blades, donde captura la energía natural como escultura habitada—; así-mismo,

se manifiesta en la monumentalidad y las referencias culturales presentes en obras como el Monumento a los Partisanos, el JFK Memorial y el 41 Cooper Square, donde formas simplificadas y el empleo del concreto generan una presencia atemporal y una articulación entre lo histórico y lo moderno; y también en la generación de experiencias sensoriales a través de la forma y la luz, como en las Torres de Satélite —que definen el horizonte mediante el color y la iluminación— o en Vulcania, cuyo concreto dialoga con las texturas geológicas para intensificar la percepción visual y táctil.

Dialéctica Espacio-Sociedad:

La dialéctica espacio-sociedad surge de la integración del contexto cultural, la espacialidad, la materialidad, la forma, la escala y la percepción, configurando un territorio que refleja y redefine las dinámicas sociales y experienciales

urbanas. Se fundamenta en la premisa de que los espacios no solo deben albergar a las comunidades que los habitan, sino también generarlas y transformarlas.

Este principio enfatiza la contextualidad, ya que la creación de espacios debe considerar las características sociales y culturales del sitio, garantizando que la arquitectura no permanezca ajena a las dinámicas propias de las comunidades locales. La identidad de los habitantes —expresada en los espacios que ocupan— se ve enriquecida por la interacción constante entre las personas y su entorno, mientras que la *venustas* (belleza) de dichos espacios no responde únicamente a criterios estéticos, sino también a su capacidad para fomentar la cohesión social y el bienestar colectivo.

En consecuencia, la dialéctica espacio-sociedad no constituye solamente una cuestión de diseño, sino un proceso continuo de -

transformación que fortalece el tejido social, promueve la participación y consolida la identidad comunitaria a través de la arquitectura.

Esta dimensión se manifiesta fenomenológicamente en la creación de espacios para la memoria y la reflexión, como en el JFK - Memorial y el Monumento a los Partisanos, que propician reconciliación colectiva y cohesión social mediante geometrías elementales y materiales austeros; asimismo, en la monumentalidad y las referencias culturales, evidentes en obras como el 41 Cooper Square, que articula lo moderno y lo histórico para consolidarse como referente cultural urbano; y en la generación de experiencias sensoriales a través de la forma y la luz, como ocurre en el Faro del Comercio, que funciona como punto de encuentro simbólico de la ciudad, o en la Casa da Música, cuya forma facetada favorece

resonancias culturales y emocionales de carácter colectivo.

Poética de la Construcción:

La poética de la construcción fusiona contexto, espacialidad, materialidad y forma, generando una experiencia sensorial y simbólica que redefine el territorio y su paisaje estructural, y hace referencia a la valoración artesanal y técnica del trabajo con materiales como el cemento. Este enfoque subraya la importancia de la *firmitas* previamente mencionada, ya que el uso del concreto no responde únicamente a requerimientos estructurales, sino que incorpora una dimensión poética en la que la solidez y la materialidad se convierten en una declaración visual y táctil a través de una amplia gama de colores y texturas.

La materialidad del concreto, empleada con destreza técnica y sensibilidad artesanal, produce -

experiencias sensoriales que trascienden lo estrictamente funcional. Los procesos constructivos, abordados con cuidado y precisión, permiten que la obra se transforme en una manifestación estética que dialoga con la tradición al tiempo que se adapta a las necesidades contemporáneas, estableciendo un vínculo emocional entre el ser humano y el material.

Esta dimensión poética se potencia fenomenológicamente —mediante el uso del concreto como elemento expresivo, que supera lo meramente estructural para constituirse en lenguaje arquitectónico— como ocurre en Namics-Technocore, donde comunica una identidad tecnológica, o en la Casa Blades, donde expresa la energía natural como escultura habitada—; asimismo, se manifiesta en la generación de experiencias sensoriales a través de la forma y la luz, ejemplificada en las Torres de Satélite, donde el color, la

textura y la iluminación del concreto configuran declaraciones visuales intensas, y en Vulcania, cuyo concreto evoca formas geológicas para propiciar una experiencia táctil y simbólica que vincula la tradición constructiva con una sensibilidad contemporánea.

Geometría del Lugar:

La geometría del lugar surge de la integración del contexto, la espacialidad, la materialidad, la forma y la escala, generando una estructura perceptible que articula identidad, experiencia y relación con el territorio ocupado, y estableciendo que la arquitectura debe responder a las características geofísicas preexistentes. La forma de los edificios no puede ser arbitraria, sino que debe emanar de una comprensión profunda del terreno y de su contexto.

La contextualidad resulta aquí fundamental, pues el diseño debe ajustarse a las formas, pendientes

y condiciones geográficas del sitio para integrarse de manera natural. La ecología desempeña igualmente un papel esencial, ya que la arquitectura debe considerar los procesos naturales y climáticos del lugar, estableciendo una relación simbiótica entre lo construido y lo natural. En consecuencia, la geometría del lugar permite que la arquitectura se configure como una extensión del paisaje, reflejando sus contornos y particularidades, y generando un equilibrio armónico entre ambas dimensiones.

Esta geometría se potencia fenomenológicamente mediante la integración al paisaje natural y cultural, como se observa en el Palacio Tuwaiq, que sigue las curvas de nivel del desierto; en Grace Farms, con su disolución orgánica de fronteras; o en el Centro Roberto Garza Sada, a través de una composición volumétrica contextual. Asimismo, se

manifiesta en la adaptabilidad al terreno y al contexto, presente en el Instituto Mines-Telecom y el Ökohaus, que se moldean a las irregularidades del relieve para establecer una integración orgánica con el entorno, promoviendo armonía ecológica y fluidez perceptiva.

Arquitectura como Archivo:

La arquitectura como archivo codifica el contexto geográfico, la espacialidad urbana, la materialidad y la forma, preservando en su estructura la memoria social, cultural y perceptiva del territorio y del paisaje, y reconociendo que los edificios pueden resguardar las huellas del pasado y transmitir las a futuras generaciones. Este axioma se vincula estrechamente con la identidad y la memoria del lugar, pues los edificios se convierten en depositarios de historias, tradiciones y acontecimientos significativos.

La contextualidad resulta fundamental en este proceso, ya que las estructuras deben establecer un diálogo con el pasado mientras se proyectan hacia el futuro. En este sentido, la arquitectura actúa como testigo y como archivo tangible que permite a las generaciones venideras comprender la evolución del sitio, su cultura y su historia, al tiempo que ofrece un marco desde el cual esa historia puede continuar desarrollándose.

Esta dimensión archivística se manifiesta fenomenológicamente en la creación de espacios para la memoria y la reflexión, como ocurre en el JFK Memorial y el Monumento a los Partisanos, que codifican la historia colectiva mediante materiales austeros y geometrías elementales; asimismo, en la monumentalidad y las referencias culturales presentes en obras como el Monumento a los Partisanos y el 41 Cooper Square, que preservan una presencia a-

temporal y un diálogo histórico; y en el uso del concreto como elemento expresivo, que opera como depósito tangible de identidad cultural —por ejemplo, en Namics-Technocore o en Vulcania, donde se conectan el pasado geológico y tecnológico con huellas perceptivas proyectadas hacia futuras generaciones—.

Estos axiomas transformadores ofrecen un marco conceptual sólido para comprender y potenciar la topomorfología de cualquier sitio. A través de la integración de las diversas categorías propuestas, es posible concebir una arquitectura y elementos urbanos que no solo se adapten al lugar, sino que también lo enriquezcan y transformen, fomentando una relación armónica entre lo natural, lo construido y lo social.

En doscientos años de uso generalizado del cemento como material de construcción, las posibilidades técnico-constructivas han

avanzado de manera significativa. En esta investigación se otorgó prioridad a la interpretación topomorfológica de objetos edificados con cemento; sin embargo, la incorporación de otros materiales —como el acero, los sistemas tensoestructurados, las piedras naturales y las combinaciones híbridas— amplía el espectro de posibilidades para conformar una paleta diversa de materias primas constructivas, capaces de adaptarse a distintas condiciones físico-espaciales del lugar y de generar experiencias sensoriales extraordinarias.

Referencias

Bachelard, G. (2000 [1957]). *La poética del espacio*. Fondo de Cultura Económica.

Cullen, G. (1981). *El paisaje urbano. Tratado de estética urbanística*. Editorial Blume.

Ching, F. D. K. (2002 [1987]). *Arquitectura: forma, espacio y orden*. Gustavo Gili.

De Manjarrés, J. (1875). *Teoría estética de la arquitectura*. Imprenta y Fundición de Manuel Tello.

Frampton, K. (2005 [1981]). *Historia crítica de la arquitectura moderna*. Gustavo Gili.

Holl, S. (2000). *Parallax*. Princeton Architectural Press.

Hummadi, S. A. F. (1967). *The city as a response to nature (Tesis de maestría)*. Massachusetts Institute of Technology.

Kahn, L. I. (1984). *Forma y diseño*. Ediciones Nueva Visión.

Le Corbusier. (1961). *El Modulor: Ensayo sobre una medida armónica a la escala humana aplicable universalmente a la arquitectura y a la mecánica*. Editorial Poseidón.

Lefebvre, H. (2013 [1974]). *La producción del espacio*. Capitán Swing Libros.

Lynch, K. (2008 [1960]). *La imagen de la ciudad*. Gustavo Gili.

McHarg, I. L. (2000). *Proyectar con la naturaleza*. Gustavo Gili.

Moix, L. (2022). *Palabras de Pritzker: Conversaciones con 23 ganadores del principal premio de arquitectura*. Editorial Anagrama.

Norberg-Schulz, C. (1975). *Existencia, espacio y arquitectura*. Editorial Blume.

Olvera Gorts, M. B. (2013). *Tecnología y organización social. Análisis de caso en el neolítico*.
https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/iee/Numero_60/MONICA_OLVERA_1.pdf

Pallasmaa, J. (2014). *Los ojos de la piel: La arquitectura y los sentidos*. Gustavo Gili.

Pawlitschko, R. (2019). "Engineers as entrepreneurs – Influences on the development of civil engineering and society". *Visionaries and Unsung Heroes*, 119–123. <https://doi.org/10.11129/9783955534615-030>

Perrault, C. (1761). *Compendio de los diez libros de arquitectura [de Marco Vitruvio Polión]*. Imprenta de D. Gabriel Ramírez.

Relph, E. (1976). *Place and placelessness*. Pion Ltd.

Roger, A. (2014). *Breve tratado del paisaje*. Éditions Gallimard.

Romea, C. (2014). "El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario." En M. A. Pérez (Ed.), *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos de la obra civil y la edificación*. OmniaScience.

Rossi, A. (1982 [1966]). *La arquitectura de la ciudad*. Gustavo Gili.

Scott, J. C. (1998). *Seeing like a state: How certain schemes to improve the human condition have failed*. Yale University Press.

Tuan, Y.-F. (1977). *Space and place: The perspective of experience*. University of Minnesota Press.

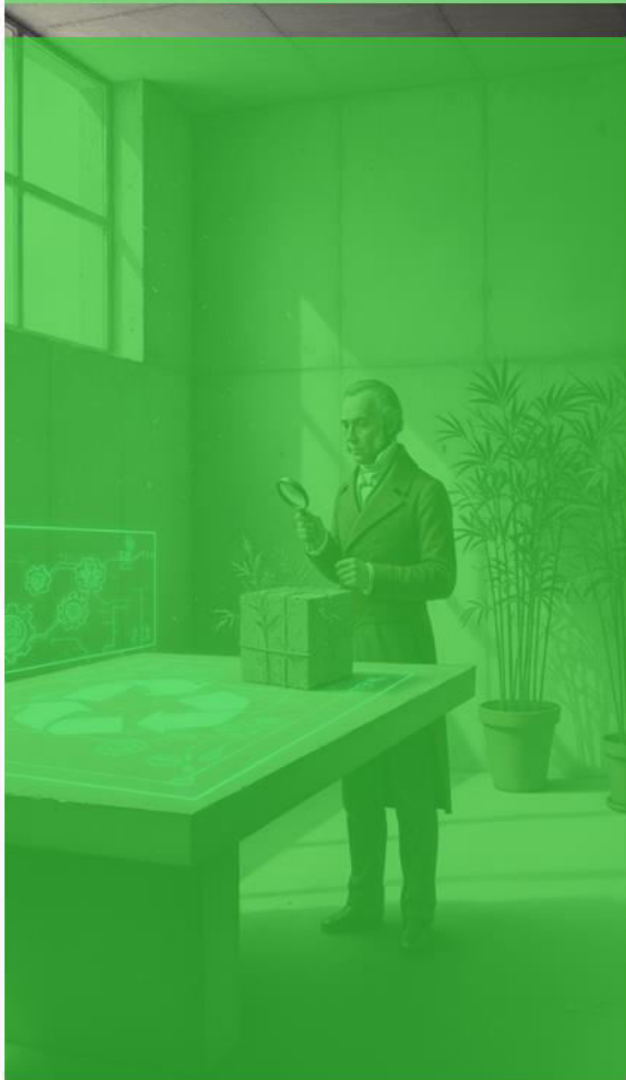
Unwin, S. (2003). *Análisis de la arquitectura*. Gustavo Gili.

Varona Moya, F. M., López Juárez, J. A., & Bañón Blázquez, L. (2012). *Apuntes de hormigón armado. Adaptados a la instrucción EHE-08*. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante.

Venturi, R. (1978). *Complejidad y contradicción en la arquitectura*. Gustavo Gili.

Zevi, B. (1998 [1948]). *Saber ver la arquitectura*. Ediciones Apóstrofe.

Desarrollo sostenible a través del micelio: Aplicaciones y comparativas con el concreto



Desarrollo sostenible a través del micelio: Aplicaciones y comparativas con el concreto

Efrén Ricardo Robledo Leal¹

Introducción

El sector de la construcción constituye uno de los motores fundamentales del desarrollo socioeconómico global; no obstante, también es reconocido como una de las actividades productivas más impactantes ambiental. Diversos estudios documentan que los procesos constructivos —desde la extracción de materias primas hasta la operación y posterior demolición de las edificaciones— generan efectos ambientales directos e indirectos de gran magnitud, lo que posiciona al sector como uno de los principales responsables de la degradación ambiental actual (Enshassi et al., 2014).

Uno de los mayores impactos asociados a la industria de la construcción es su contribución significativa de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero; originando principalmente durante la producción de materiales intensivos en energía —como el cemento, el acero y el vidrio—, así como en el transporte de insumos y el uso de maquinaria pesada en obra. Se estima que el entorno construido es responsable de aproximadamente entre el 20 % y el 30 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en un actor clave dentro de la problemática del cambio climático (UNEP, 2023; Enshassi et al., 2014).

¹ Departamento de Microbiología e Inmunología, Facultad de Ciencias Biológicas, UANL.
Email: efrén.robledoll@uanl.edu.mx Orcid 0000-0002-1445-2839

De manera paralela, el consumo energético y de recursos naturales por parte del sector de la construcción resulta particularmente elevado. La edificación y operación de infraestructuras demandan grandes volúmenes de energía, agua, madera, minerales y materiales vírgenes. De acuerdo con estimaciones ampliamente citadas, este sector es responsable de entre el 30 % y el 40 % del consumo energético global, del 12 % al 16 % del uso de agua dulce y de hasta el 40 % de la extracción de materiales vírgenes, tanto en países desarrollados como en economías en desarrollo (Macozoma, 2012; Enshassi et al., 2014). Este uso intensivo de recursos acelera su agotamiento y ejerce una presión considerable sobre los ecosistemas naturales.

Otro aspecto crítico del impacto ambiental del sector es la generación de residuos, en particular los residuos de construcción

y demolición. Estos desechos constituyen uno de los flujos de residuos sólidos más voluminosos a nivel mundial e incluyen materiales inertes, residuos reciclables y, en menor proporción, residuos peligrosos. Una gestión inadecuada de estos residuos contribuye a la saturación de vertederos, a la contaminación del suelo y del agua, así como a la emisión secundaria de contaminantes atmosféricos, lo que agrava los efectos ambientales derivados de la actividad constructiva (Enshassi et al., 2014).

Ante este panorama, se ha vuelto imperativa la necesidad de desarrollar y adoptar materiales de construcción más sostenibles, capaces de reducir las emisiones de carbono, el consumo energético y la generación de residuos a lo largo de su ciclo de vida. En respuesta a esta problemática, en las últimas décadas se han promovido enfoques fundamentados en

el análisis de ciclo de vida, la eficiencia en el uso de recursos y la economía circular, con el propósito de transformar la manera en que se diseñan, producen y emplean los materiales constructivos (UNEP, 2023).

En este contexto surge la incorporación de los biomateriales en la construcción, entendidos como materiales total o parcialmente derivados de recursos biológicos renovables. Estos materiales ofrecen ventajas potenciales tales como una menor huella de carbono incorporada, menores requerimientos energéticos durante su producción y la posibilidad de biodegradación, reutilización o reciclaje al final de su vida útil. El creciente interés en los biomateriales refleja un cambio de paradigma dentro del sector, orientado hacia sistemas constructivos más sostenibles, resilientes y alineados con los objetivos globales de mitigación del cambio

climático y protección ambiental (UNEP, 2023). Dicho interés se ha intensificado de manera significativa en las últimas décadas como respuesta a la necesidad de reducir el impacto ambiental del entorno construido. Estos materiales se caracterizan por derivar total o parcialmente de recursos biológicos renovables y por presentar, en numerosos casos, menores emisiones de carbono incorporadas, menor consumo energético durante su producción y un mejor desempeño ambiental a lo largo de su ciclo de vida en comparación con materiales convencionales (Ashby, 2019; UNEP, 2023).

Entre los biomateriales ya consolidados en la construcción destacan aquellos de origen vegetal. La madera estructural, incluyendo productos de ingeniería como la madera laminada encolada (MLE o Glulam) y la madera contralaminada (CLT), se ha posicionado como una alternativa

viable al acero y al concreto en determinados sistemas constructivos, debido a su capacidad de almacenamiento de carbono, su elevada relación resistencia-peso y su menor huella ambiental cuando se gestiona de manera sostenible (Cabeza et al., 2014; Churkina et al., 2020). Asimismo, fibras vegetales como el bambú, el cáñamo, el lino y el sisal se han empleado tanto en elementos estructurales como en materiales compuestos y aislantes, aprovechando su rápido crecimiento y sus propiedades mecánicas favorables (Amziane & Arnaud, 2013).

Otro grupo relevante de biomateriales lo conforman los materiales aislantes de origen biológico, tales como la celulosa reciclada, la lana de oveja, el corcho y las fibras de madera. Estos materiales presentan adecuadas propiedades térmicas y acústicas, además de un menor impacto ambiental asociado a su producción y disposición

final, lo que los convierte en alternativas atractivas frente a aislantes sintéticos derivados de combustibles fósiles (Pacheco-Torgal, 2014).

De manera paralela, han surgido biomateriales emergentes - orientados a ampliar las posibilidades funcionales y estructurales de la construcción sostenible. Entre ellos destacan los biocompuestos, que combinan matrices poliméricas —con frecuencia biopolímeros— con refuerzos de fibras naturales, dando lugar a materiales con propiedades mecánicas ajustables y aplicaciones potenciales en paneles, recubrimientos y elementos no estructurales (Faruk et al., 2012). Estos biocompuestos constituyen un - paso intermedio entre los materiales tradicionales y las soluciones completamente biobasadas.

En un esquema aún más innovador se sitúan los biomateriales cultivados, desarrollados a partir

de procesos biológicos controlados. En esta categoría se incluyen materiales producidos mediante el crecimiento de organismos vivos, como bacterias, algas y hongos. Estos enfoques permiten concebir materiales “crecidos” en lugar de fabricados, lo que abre nuevas posibilidades para reducir el consumo energético, emplear residuos agroindustriales como sustratos y diseñar materiales con propiedades específicas desde su origen biológico (Hebel et al., 2019). Dentro de este grupo, los materiales basados en micelio fúngico han despertado un interés creciente tanto en la investigación como en la práctica experimental. El micelio actúa como una matriz natural que aglutina partículas lignocelulósicas, dando lugar a materiales ligeros, aislantes y potencialmente biodegradables, con aplicaciones en paneles, bloques, elementos de relleno y componentes no estructurales. Si bien su uso a gran escala aún

enfrenta desafíos técnicos y normativos, estos materiales representan una de las líneas más prometedoras dentro del panorama de biomateriales emergentes orientados a la construcción sostenible (Jones et al., 2017; Attias et al., 2020).

En conjunto, la diversidad de biomateriales existentes y emergentes evidencia una transición progresiva del sector de la construcción hacia sistemas más alineados con los principios de sostenibilidad, economía circular y bioeconomía. La integración de estos materiales no solo implica un cambio tecnológico, sino también un replanteamiento conceptual del diseño arquitectónico y constructivo, en el que los procesos naturales y biológicos comienzan a desempeñar un papel central en la configuración del entorno construido. En este sentido, el presente capítulo busca ofrecer una mirada al potencial del micelio como

alternativa funcional y sostenible para complementar y sustituir parcialmente algunos materiales de construcción, con el propósito de contribuir a la reducción de los impactos ambientales asociados a los materiales convencionales.

Fundamento biológico del micelio

a) *Los hongos*

Los hongos constituyen un reino biológico independiente, filogenéticamente diferenciado de plantas, animales y bacterias, caracterizado por una organización celular eucariótica y por una nutrición heterótrofa basada en la absorción externa de nutrientes (Alexopoulos et al., 1996; Moore et al., 2011). A diferencia de las plantas, los hongos no realizan fotosíntesis; en lugar de ello, obtienen su energía a partir de la descomposición y asimilación de materia orgánica preexistente. Asimismo, no pre-

sentan tejidos diferenciados como los organismos vegetales superiores, sino una arquitectura filamentosa altamente ramificada que les permite colonizar de manera eficiente diversos ambientes y fuentes de materia orgánica.

La mayor parte del cuerpo fúngico está constituida por el micelio, una red tridimensional de filamentos microscópicos denominados hifas, que se extiende a través del sustrato —es decir, el medio nutritivo— en el cual el hongo crece. Esta red micelial representa la fase vegetativa del organismo y cumple funciones esenciales tales como la exploración del entorno, la secreción de enzimas extracelulares, la absorción de nutrientes y la interacción estructural con el medio (Carlile et al., 2001). Desde el punto de vista funcional, el micelio actúa como un sistema vivo distribuido, capaz de adaptarse dinámicamente a condiciones ambientales variables.

Desde una perspectiva ecológica y tecnológica, el micelio puede entenderse como una infraestructura biológica natural, configurada evolutivamente para conectar, estabilizar y transformar materiales orgánicos presentes en el entorno. Esta capacidad de agregación y cohesión, derivada de su crecimiento filamentosos y su acción enzimática, ha despertado un interés creciente en disciplinas como la arquitectura, la ingeniería de materiales y el diseño sostenible, donde se busca emular o aprovechar principios biológicos para el desarrollo de soluciones constructivas de bajo impacto ambiental (Haneef et al., 2017).

b) Estructura y crecimiento del micelio

La estructura del micelio se fundamenta en la organización de las hifas, que consisten en tubos celulares elongados delimitados por una pared celular compuesta prin-

cialmente por polisacáridos estructurales, tales como quitina y glucanos. Estas paredes celulares confieren al micelio una notable estabilidad biológica y le permiten conservar su integridad estructural durante los procesos de crecimiento y ramificación (Bowman & Free, 2006). El crecimiento micelial ocurre predominantemente en los extremos apicales de las hifas, regiones en las que se concentra una intensa actividad metabólica y biosintética responsable de la síntesis de nuevos componentes de pared celular y membrana.

El patrón de crecimiento del micelio no es aleatorio, sino que responde a señales químicas, físicas y nutricionales presentes en el entorno. A medida que el micelio se expande, conforma una red interconectada que optimiza tanto la exploración espacial como la distribución interna de recursos (Fricker et al., 2007). Esta arquitectura reticular permite al orga-

nismo redistribuir nutrientes desde zonas con mayor disponibilidad hacia regiones en expansión, operando como un sistema adaptativo descentralizado que crece sobre y dentro del sustrato. Además, el micelio presenta una elevada capacidad de anastomosis, entendida como la fusión entre hifas compatibles, lo que incrementa la cohesión de la red y refuerza su continuidad estructural. Este fenómeno contribuye a la consolidación de un entramado micelial continuo, capaz de integrar múltiples puntos de crecimiento en una sola entidad funcional (Rayner, 1991).

c) Capacidad de colonización y unión de sustratos

Una de las características más relevantes del micelio es su notable capacidad para colonizar y consolidar sustratos de origen orgánico. En los ecosistemas natu-

rales, los hongos desempeñan un papel fundamental como agentes de descomposición y reciclaje de biomasa, penetrando materiales lignocelulósicos como madera, paja, hojas y residuos agrícolas, y transformándolos mediante la secreción de enzimas extracelulares (Swift et al., 1979).

Durante el proceso de colonización, el micelio crece entre las partículas del sustrato, envolviéndolas y conectándolas a través de su red hifal (figura 1). Esta interacción estrecha genera una matriz biológica continua que integra los componentes del sustrato en una estructura cohesionada que puede llegar a adquirir rigidez, dependiendo del tipo de hongo empleado, el tiempo de colonización y el proceso posterior de deshidratación del material.

A nivel microscópico, las hifas actúan como puentes biológicos que atraviesan los espacios intersticiales, configurando un sistema

altamente interconectado que refuerza la estabilidad interna del conjunto (Jones et al., 2017).

La capacidad del micelio para adaptarse a la geometría y composición del sustrato le permite colonizar materiales heterogéneos, irregulares y de bajo valor económico, transformándolos en matrices funcionales.

Esta propiedad resulta particularmente significativa desde una perspectiva de sostenibilidad, ya que abre la posibilidad de valorizar residuos agroindustriales y biomateriales locales sin recurrir a procesos altamente industrializados (Islam et al., 2018).

Más allá de la simple colonización física, el micelio establece una relación activa con el sustrato, modulando su crecimiento en función de la disponibilidad de nutrientes, la humedad, la genética propia del hongo y otros factores ambientales.

Este comportamiento dinámico lo distingue de los aglutinantes inertes convencionales y constituye la base conceptual para su uso como elemento biológico integrador en sistemas constructivos.

d) Principios de autoensamblaje biológico

El micelio constituye un ejemplo paradigmático de autoensamblaje biológico, entendido como el proceso mediante el cual sistemas complejos emergen de manera espontánea a partir de interacciones locales entre componentes simples, sin intervención externa directa (Whitesides & Grzybowski, 2002).

Figura 1. Micelio colonizando granos de sorgo



Fuente: Laboratorio de Micología y Fitopatología, FCB, UANL

En el caso de los hongos, este autoensamblaje se manifiesta en la formación de redes miceliales organizadas que resultan del crecimiento, ramificación e interconexión progresiva de hifas individuales.

El autoensamblaje micelial está gobernado por principios biológicos tales como el quimiotropismo, la mecanosensibilidad y la regulación metabólica, los cuales permiten al organismo detectar estímulos físicos y químicos del

entorno y ajustar su patrón de crecimiento en función de dichas condiciones (Money, 2008).

De este modo, la estructura resultante no se encuentra prefijada de antemano, sino que emerge como consecuencia de un proceso adaptativo continuo que integra información ambiental y respuestas fisiológicas.

Al autoensamblarse, el micelio genera estructuras cohesionadas sin requerir ensamblajes mecánicos adicionales, adhesivos sintéticos ni elevados insumos energéticos. Esta capacidad lo posiciona como un modelo biológico de alto interés para el desarrollo de soluciones constructivas inspiradas en la naturaleza.

Asimismo, la producción del material en moldes permite obtener una amplia diversidad de propiedades estéticas y mecánicas, ya que la configuración final depende tanto de la geometría del molde

como de las condiciones de crecimiento y del grado de compresión aplicado al sustrato antes del desarrollo micelial.

La tolerancia del sistema a distintos niveles de compactación influye directamente en la densidad, cohesión y comportamiento estructural del material resultante, evidenciando la relación intrínseca entre proceso biológico y desempeño físico.

e) Ventajas biológicas relevantes para la construcción

Las ventajas del micelio como base biológica para aplicaciones en la construcción se derivan directamente de sus propiedades intrínsecas como organismo vivo. En primer lugar, su capacidad de crecimiento a temperatura ambiente y bajo condiciones de procesamiento suaves lo posiciona como una alternativa de bajo impacto energético en comparación con materiales convencionales cuya fabricación requiere altas tempera-

turas y procesos industrializados intensivos (Attias et al., 2020). Esta característica adquiere especial relevancia en el contexto global actual, marcado por la necesidad de reducir emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir el consumo energético asociado al entorno construido.

En segundo lugar, el micelio presenta una elevada eficiencia en el uso de recursos, dado que transforma biomasa residual en nuevas estructuras funcionales, alineándose con los principios de economía circular y valorización de residuos (Jones et al., 2018). Esta capacidad contribuye tanto a disminuir la presión sobre recursos no renovables como a reducir la generación de desechos.

Además, al incorporar la biomasa en su propio cuerpo —es decir, al convertirla en tejido micelial— el organismo retiene el carbono contenido en el sustrato durante un periodo prolongado,

retardando su liberación a la atmósfera y, por ende, su contribución al efecto invernadero y al cambio climático.

Esta cualidad se vincula con su biodegradabilidad controlada, que permite concebir materiales con ciclos de vida cerrados, desde su origen biológico hasta su eventual reintegración al ambiente al término de su uso. Desde una perspectiva de sostenibilidad, esta condición representa una diferencia sustancial frente a materiales de alta persistencia ambiental, cuya degradación es lenta o inexistente y cuyos residuos pueden permanecer durante décadas o siglos en los ecosistemas.

Finalmente, el micelio constituye una plataforma biológica versátil, susceptible de ser guiada y modulada mediante la manipulación de variables como las condiciones de crecimiento, la selección de especies y la composición del sustrato. Esta capacidad de

ajuste abre un amplio espectro de posibilidades para su futura integración en sistemas constructivos sostenibles, adaptativos y regenerativos (Haneef et al., 2017), en los que el material no solo cumple una función estructural o de cerramiento, sino que forma parte de un enfoque más amplio de diseño basado en procesos biológicos.

f) Tendencia del micelio como elemento material

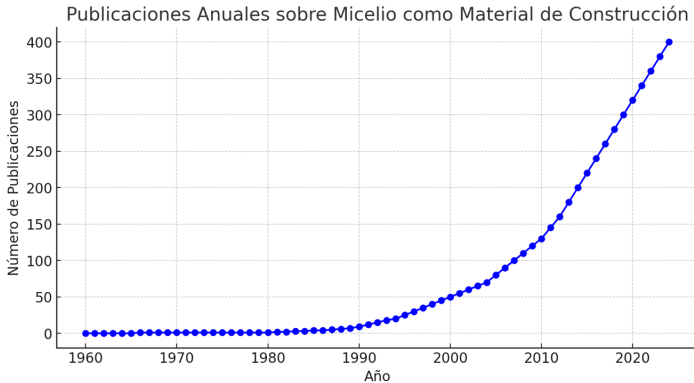
En los últimos años se ha observado un aumento notable en la cantidad de publicaciones científicas relacionadas con materiales basados en micelio, lo cual evidencia un interés creciente tanto en el ámbito académico como en la práctica profesional por el uso de estos materiales sostenibles. Desde la década de 1960 hasta la actualidad, la curva de producción científica muestra un incremento progresivo y sostenido, lo que pone de manifiesto la consolidación del tema como una línea

relevante de investigación. Este crecimiento destaca el potencial del micelio en múltiples aplicaciones industriales, particularmente en los sectores de la construcción y el embalaje ecológico.

En sus primeras etapas, las investigaciones sobre micelio aplicado a materiales eran escasas y de carácter esporádico. No obstante, a partir de la década de 1990 se observa un cambio significativo en la tendencia, marcado por un aumento más constante y acelerado en la producción académica (figura 2).

Este cambio puede interpretarse como consecuencia de una mayor conciencia global respecto a los problemas ambientales asociados a los materiales de construcción tradicionales, los cuales presentan, en muchos casos, altos niveles de emisión de carbono, elevado consumo y generación de

Figura 2. Tendencia de las publicaciones científicas relacionadas con el micelio como elemento en la industria de la construcción



Fuente: Base de datos PUBMED de la National Library of Medicine

residuos no biodegradables.

Exposiciones y pruebas de concepto de biocompuestos basados en micelio (BCMs)

A continuación, se presentan algunos casos de estudio que han obtenido reconocimiento internacional y que evidencian el potencial de los biomateriales basados en micelio dentro del contexto arquitectónico:

- ***The Living. HY-FI Tower***

El estudio neoyorquino *The Living* resultó ganador del concurso - MoMA PS1 Young Architects - Program (YAP) mediante un diseño que empleó ladrillos de micelio cultivado sobre tallos de maíz (olote), utilizados para construir una torre en el patio de la galería MoMA PS1 en Nueva York (figura 3).

Figura 3. The living Hy-Fi Tower



Fuente: Museo de Arte Moderno, NY

El director del estudio, David Benjamin, propuso un conjunto de torres circulares elaboradas completamente con materiales naturales como parte de su participación en el YAP, programa que anualmente invita a destacados arquitectos emergentes a diseñar una estructura temporal destinada a albergar los eventos de verano

organizados por el MoMA PS1 en la galería de Queens.

La estructura, denominada Hy-Fi, fue construida íntegramente con materiales reciclables. The Living colaboró con la empresa de construcción sostenible Ecovative para la fabricación de los ladrillos que conformaron la base de la torre. En la sección superior de la estructura se incorporaron ladrillos

reflectantes, los cuales fueron -manufacturados mediante la aplicación de una película espejeada, con el propósito de favorecer la reflexión de la luz hacia el interior de la instalación.

Los huecos presentes en los ladrillos contribuyeron a la ventilación natural del conjunto, permitiendo la entrada de aire frío por la parte inferior y la expulsión de aire caliente por la parte superior, favoreciendo así la circulación térmica pasiva.

La torre de ladrillos de micelio alcanzó una altura de 12 metros requirió aproximadamente 10,000

unidades de ladrillos. Fue exhibida en el museo de arte contemporáneo de Nueva York en 2014 y, hasta el momento de su construcción, representó el proyecto de mayor escala realizado con micelio.

- **Taylor-Foster, James.**
Mushroom House

The Mushroom Tiny House, con dimensiones aproximadas de 12' x 7', constituye un proyecto de menor escala en el que destaca el uso de materiales sostenibles (figura 4).

A diferencia de las viviendas convencionales, que suelen incor-

Figura 4. The Mushroom Tiny House



Fuente: Ecovative LLC

porar aislamiento de poliestireno, las paredes de madera de esta pequeña vivienda fueron revestidas con aislamiento a base de micelio.

Este material sella herméticamente la vivienda y actúa como un aislante térmico eficiente. Según Ecovative, el material presenta además características de accesibilidad económica y resistencia al fuego, lo que amplía su potencial de aplicación en soluciones habitacionales sostenibles.

- **Phil Ross, MycoWorks.**
MycoTecture

Durante un periodo prolongado, Phil Ross trabajó de manera sistemática para superar la percepción negativa que muchas personas asocian con el cultivo de hongos en estado crudo. A través de múltiples ensayos y procesos experimentales, demostró que el micelio puede constituir un ma-

terial de construcción viable y funcional, más allá de su dimensión artística (figura 5).

En sus propias palabras: “Hice un gran número de pruebas de ingeniería el año pasado como parte del proceso de patente para entender qué factores hacen que los hongos se fortalezcan o no. En todos los sentidos, parece que este proceso puede emplearse en una amplia gama de aplicaciones, que abarcan desde mobiliario o materiales de construcción hasta propuestas más ambiciosas como el crecimiento de formas fúngicas para desarrollar órganos humanos, baterías orgánicas o incluso computadoras. Por lo tanto, puede transformarse en muchas cosas; es algo así como un plástico que potencialmente puede utilizarse para “Dios sabe qué”, declaró Ross a *Glasstire* en una entrevista publicada por Dailymotion en 2016.

Figura 5. MycoTecture, de Phil Ross



Fuente: Phil Ross, Mycoworks

Figura 6. MycoTree, de MycoTech



Fuente: Sustainable Construction, Karlsruhe Institute of Technology

- **MycoTech. MycoTree**

Es una estructura de ramificación espacial construida a partir de – componentes de micelio con capacidad portante. Su geometría fue desarrollada mediante cálculo estructural tridimensional, manteniendo el material trabajando exclusivamente a compresión, condición en la que presenta mejor desempeño (figura 6). Los nodos complejos que articulan la estructura fueron cultivados en moldes fabricados digitalmente.

La estructura, realizada únicamente con micelio y fibra de bambú, plantea una perspectiva innovadora respecto a la manera en que se obtienen y emplean los materiales de construcción. En lugar de centrarse exclusivamente en la resistencia intrínseca del material, explora la posibilidad de alcanzar estabilidad estructural a través de la geometría. Este enfoque permite considerar el uso seguro y estructural de materiales

relativamente débiles, sugiriendo que la combinación de recursos regenerativos con estrategias avanzadas de diseño estructural – puede constituir una alternativa viable frente a materiales tradicionales, contribuyendo así a una industria de la construcción más sostenible.

La geometría de MycoTree fue diseñada utilizando técnicas tridimensionales desarrolladas por el Block Research Group en ETH Zürich. Este método transforma la técnica tradicional de diseño estructural bidimensional en sistemas completamente espaciales, mediante el uso de diagramas de fuerzas y formas poliédricas.

Dicho enfoque permite explorar configuraciones estructurales eficientes y expresivas, superando las limitaciones propias de sistemas basados exclusivamente en el arco o la bóveda en compresión.

La geometría ramificada de MycoTree constituye un ejemplo de forma poliédrica construida – íntegramente para trabajar a compresión, sin requerir optimización estructural adicional.

Asimismo, los nodos complejos pueden materializarse mediante superficies desarrollables, susceptibles de ser cortadas a partir de material en lámina, facilitando su fabricación y ensamblaje.

- **Erik Klarenbeek Studio. The Growing Pavilion**

The Growing Pavilion, diseñado por Pascal Leboucq, se caracteriza por el uso extensivo de materiales de base biológica, exhibiendo la materia prima natural en su máxima expresión. Esta decisión material otorgó al pabellón una textura y una tonalidad singulares, de carácter orgánico y no estandarizado. Un ejemplo represen-

tativo es el empleo de micelio en los muros del pabellón. Como se ha señalado: “Las manchas y la textura natural del crecimiento del micelio son impresionantes, creando una especie de piel orgánica en lugar de una pared blanca y uniforme” (figura 7).

Durante la exhibición de The Growing Pavilion, se organizaba diariamente un “momento de cosecha” de hongos del género *Pleurotus*. Este acontecimiento se convirtió en uno de los momentos más dinámicos y concurridos de la jornada, permitiendo al equipo del proyecto compartir su proceso y narrativa con un público amplio, además de ofrecer la posibilidad de experimentar el pabellón de manera directa y participativa.

El proyecto permitió comprender la construcción con micelio como una forma de arquitectura viva, capaz no solo de ser habitada, sino también de producir alimentos.

Figura 7. The Growing Pavilion



Fuente: Erik Klarenbeek Studio

Asimismo, cada componente del pabellón presentaba un acabado singular, resultado de las condiciones orgánicas específicas bajo las cuales fue cultivado el material.

Esta variabilidad material evidenciaba la relación directa entre proceso biológico y expresión arquitectónica.

La colección MOGU Acoustic comprende cuatro modelos con distintas configuraciones formales y texturales, concebidos para responder a una diversidad de requerimientos en oficinas, espacios públicos y entornos residenciales. Estos paneles integran funcionalidad técnica y una estética natural, destacándose además por sus características de seguridad.

- **MOGU. Home, Box, Garden, MycoPlastic**

Las pruebas realizadas han demostrado que los productos son

hipoalergénicos, libres de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y cuentan con una clasificación destacada en resistencia al fuego, lo que los posiciona como una alternativa más segura frente a numerosos materiales convencionales de diseño interior. El proceso de desarrollo impulsado por MOGU, fundamentado en principios de biofabricación y economía circular, plantea una vía para la producción responsable de materiales sostenibles, duraderos y ambientalmente respetuosos (figura 8).

En la revista *CLOT*, Maurizio Montalti, cofundador y director de investigación y desarrollo tecnológico de MOGU, señala la existencia de una brecha significativa entre la naturaleza experimental de muchos proyectos de diseño — que abren nuevas perspectivas conceptuales y materiales— y su implementación efectiva a escala colectiva. Esta observación subraya los desafíos que aún enfrenta la transición de innovaciones biomateriales desde el ámbito experimental hacia su adopción generalizada en la industria.

Figura 8. Paneles de MOGU



Fuente: MOGU, Italia

Producción de biocompuestos basados en micelio (BCMs)

a) Consideraciones generales

El trabajo con micelio de hongos requiere el acondicionamiento – previo de espacios adecuados y la adquisición de infraestructura que permita la generación de zonas limpias, con aire filtrado y, de ser posible, con capacidad para sanitizar el ambiente de manera frecuente.

Estas condiciones son fundamentales para evitar contaminaciones y asegurar el desarrollo controlado del organismo.

Las herramientas de trabajo —como asas, navajas, espátulas, entre otras— deben desinfectarse de manera constante utilizando alcohol al 70%.

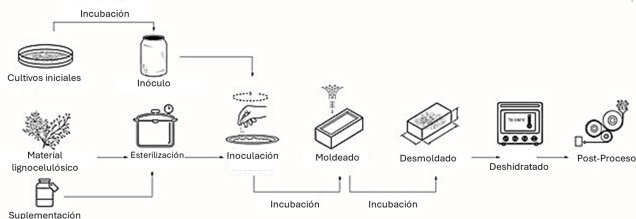
Asimismo, es recomendable trabajar siempre con guantes de

látex o nitrilo, cofia y cubrebocas, con el fin de mantener condiciones asépticas durante los distintos procedimientos.

En la figura 9 se presenta un flujo general de trabajo para la producción de biomateriales a base de micelio.

Cada etapa del proceso debe ejecutarse bajo condiciones estrictas de limpieza y precaución, con especial énfasis en la fase de desmoldado, ya que, dependiendo de la geometría y dimensiones de las piezas producidas, existe el riesgo de afectar su integridad estructural si no se manipulan adecuadamente.

Figura 9. Flujo general de trabajo para la producción de piezas de micelio



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Elsacker et al., 2020

b) Obtención de cepas

Para aislar y mantener el micelio de un hongo se emplean medios de cultivo sólidos que proporcionan los nutrientes necesarios para su desarrollo adecuado. Aunque en muchos laboratorios los medios de cultivo se adquieren a través de proveedores comerciales en presentaciones listas para su preparación, también es posible formularlos de manera independiente utilizando sus componentes por separado.

A un aislamiento específico de un hongo se le denomina cepa.

Esta puede desarrollarse sobre un medio de cultivo artificial o directamente sobre un sustrato vegetal. Para realizar un aislamiento primario (primoaislamiento), existen tres alternativas principales: mediante tejido del carpóforo (estructura de fructificación del hongo), mediante esporas o a partir de una porción de sustrato previamente colonizado por micelio.

En cualquiera de las tres modalidades, se recomienda disponer del siguiente material:

- Navaja o bisturí
- Pinzas de disección
- Aguja de disección
- Aplicadores de madera
- Frascos de vidrio
- Papel secante estéril
- Mecheros
- Alcohol o hipoclorito de sodio
- Cajas Petri con medio de cultivo

c) Aislamiento por medio de tejido

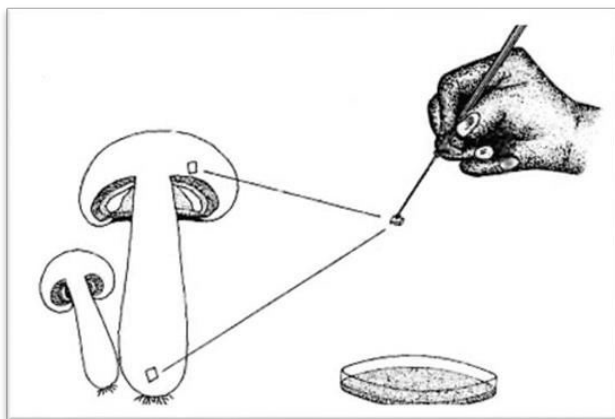
Este método se caracteriza por su simplicidad y permite obtener una copia genéticamente idéntica del hongo (clon) del cual se realiza el aislamiento. A partir de una muestra fresca del carpóforo, se efectúa un corte a lo largo de su eje mayor y, posteriormente, se extraen pequeños fragmentos de tejido del interior de la muestra (figura 10). Este procedimiento posibilita la obtención de tejido libre de contaminación superficial y con micelio viable para su posterior crecimiento en el medio de cultivo.

Para llevar a cabo esta técnica pueden emplearse los instrumentos que resulten más convenientes para el operador; sin embargo, es indispensable considerar que tanto el área de trabajo como los instrumentos deben estar previamente sanitizados.

Asimismo, es fundamental evitar corrientes de aire en el espacio de trabajo, con el fin de minimizar el riesgo de contaminación por bacterias u otros hongos presentes en el ambiente.

Una vez inoculadas las placas con los fragmentos de tejido, estas deben colocarse a la temperatura adecuada para la especie en cuestión (habitualmente, entre 25 y 30 °C) y mantenerse en un sitio oscuro. Transcurridos de 2 a 3 días, si el procedimiento fue ejecutado correctamente y el tejido conserva

Figura 10. Flujo general de trabajo para la producción de piezas de micelio



Fuente: Growing Gourmet and Medicinal Mushrooms, Paul Stamets

viabilidad, será posible observar el desarrollo del hongo con una apariencia algodonosa en la periferia del fragmento inoculado. En caso de que no se presenten contaminaciones, la placa puede mantenerse en crecimiento. Si, por el contrario, se detectan contaminantes, es posible realizar un corte de la porción algodonosa libre de contaminación y transferirla a una nueva placa con medio de cultivo,

aislándola así de los microorganismos indeseados.

d) Aislamiento por medio de esporas

Para llevar a cabo este procedimiento es necesario obtener esporas del hongo que se desea aislar. Una técnica común consiste en realizar una esporada, la cual implica colocar el carpóforo con el

himenio —región fértil donde se producen las esporas— orientado hacia abajo durante un periodo de 8 a 12 horas, sobre un papel estéril. Es recomendable que, durante este tiempo, el hongo permanezca completamente cubierto para protegerlo de posibles contaminantes presentes en el aire (figura 11).

Una vez obtenida la esporada, se emplea una navaja de bisturí o tijeras previamente sanitizadas para cortar un fragmento del papel donde se depositaron las esporas. Dicho fragmento se introduce en un frasco que contenga 100 mL de agua destilada estéril fría.

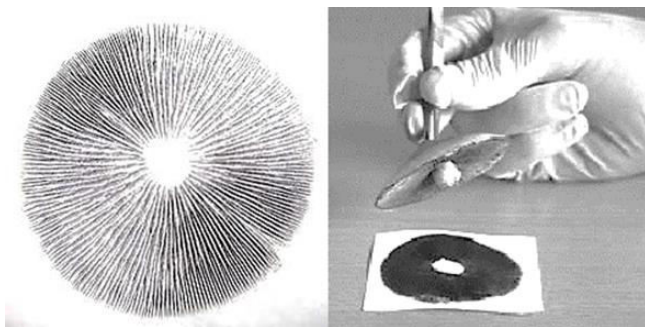
A partir de esta suspensión de esporas, pueden tomarse pequeños volúmenes utilizando una pipeta de transferencia o un gotero limpio, para posteriormente depositarlos sobre el medio de cultivo. Tras la inoculación, las placas se incuban bajo las mismas condiciones descritas para el aislamiento por medio de tejido y se pro-

cede de forma equivalente en el seguimiento del crecimiento.

Una alternativa a la esporada consiste en recolectar directamente las esporas desde el himenio, preferentemente con ayuda de un asa bacteriológica o un aplicador de madera estéril. El instrumento se introduce cuidadosamente en el himenio para permitir que las esporas se adhieran, y posteriormente se realiza la inoculación por estría sobre el medio de cultivo. En todos los casos, es indispensable garantizar condiciones estrictas de limpieza antes de iniciar el procedimiento, así como evitar corrientes de aire que puedan favorecer la contaminación.

Dado que el aislamiento a partir de esporas conlleva un riesgo intrínseco de contaminación, los medios de cultivo pueden suplementarse con cloranfenicol o gentamicina al 0.2% para inhibir el crecimiento bacteriano y, cuando sea posible con benomilo al 0.1%

Figura 11. Esporada de un hongo



Fuente: Growing Gourmet and Medicinal Mushrooms, Paul Stamets

para limitar el desarrollo de hongos contaminantes.

e) Obtención de cepas comerciales o de registro

Una alternativa adicional consiste en la adquisición de cepas disponibles comercialmente, ya sea a través de proveedores especializados en inóculos para el cultivo de hongos o mediante, bancos de cepas reconocidos, como la American Type Culture Collection (ATCC).

Si bien esta opción implica un costo económico considerable en comparación con los métodos de aislamiento directo, ofrece una mayor certidumbre respecto a la identidad taxonómica, estabilidad genética y robustez del hongo adquirido.

f) Preparación de inóculo líquido

Por su capacidad de crecer de manera exponencial, el micelio de los hongos puede “expandirse” o propagarse rápidamente a partir

de un inóculo inicial. Para la generación de inóculo en grandes cantidades, una estrategia efectiva y económicamente viable consiste en elaborar inóculos en caldo. Para este propósito, se prepara una fórmula simple, que se detalla en la Tabla 1.

Una vez preparado el caldo, se esteriliza en autoclave durante 15 minutos a 121 °C. Tras la esterilización se deja reposar hasta que su temperatura disminuya a la del ambiente.

Para inocular los caldos, se depositan (en condiciones asépticas)

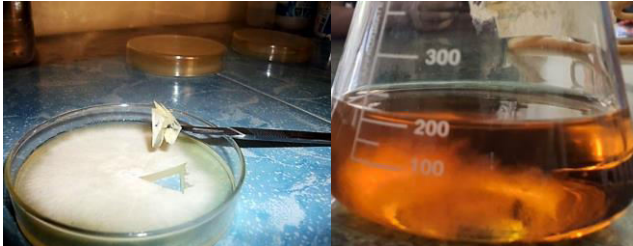
uno o dos trozos de micelio provenientes de un cultivo en agar, utilizando una navaja o aplicador estéril. El caldo inoculado se incuba a 25 °C durante 10 a 15 días, hasta obtener una masa micelial visible. El contenedor del caldo debe agitarse diariamente por unos minutos, con el fin de fragmentar el micelio y favorecer su propagación de manera uniforme y eficiente (Figura 12).

Tabla 1. Fórmula para la preparación de caldo para la elaboración de inóculo líquido

Reactivo	Cantidad	Función
Dextrosa	10 gramos	Fuente de carbono
Extracto puro de malta	10 gramos	Fuente de carbono
Agua	1 litro	Solvente, vehículo

Fuente: Laboratorio de Micología y Fitopatología, FCB, UANL

Figura 12. Izquierda: Muestra de los cortes de micelio usados para inocular los caldos. Derecha: Formación de micelio en caldo



Fuente: Laboratorio de Micología y Fitopatología, FCB, UANL

g) Comprobación del crecimiento axénico

Es fundamental, para la preparación de biomateriales con hongos, que los inóculos preparados contengan únicamente al hongo de interés, ya que la presencia de otros organismos —fúngicos y/o bacterianos— compromete el crecimiento del hongo seleccionado y dificulta una colonización adecuada del sustrato.

Adicionalmente, dado que los basidiomicetos típicamente no esporulan en cultivo, la confirmación de su identidad se realiza me-

dante la observación de fíbulas, estructuras responsables de la distribución de núcleos en las hifas.

Para corroborar lo anterior, se tomaron muestras de los caldos - obtenidos y se colocaron en porta-objetos para su observación al microscopio a 40X, verificando - únicamente la presencia de hifas con fíbulas en su estructura (Figura 13), sin indicios de esporas ni células bacterianas, obteniendo así cultivos axénicos satisfactorios.

Figura 13. Observación de hifas con fibulas (círculos rojos) y ausencia de esporas o células bacterianas



Fuente: Laboratorio de Micología y Fitopatología, FCB, UANL

h) Preparación de sustratos

La preparación del sustrato consiste en mezclar todos los componentes de manera homogénea, -asegurándose previamente de que el aserrín no contenga fragmentos grandes ni materiales ajenos, co-

mo metales, plásticos, ramas o piedras. Todos los elementos deben combinarse exhaustivamente para garantizar una distribución uniforme de los nutrientes y de las propiedades mecánicas resultantes. Es recomendable dejar repo-

sar la mezcla durante aproximadamente una hora, para permitir que el agua se absorba adecuadamente antes de continuar con los siguientes pasos de preparación.

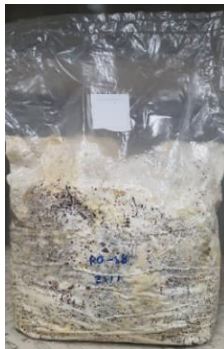
Una vez transcurrido este tiempo, se forman paquetes de sustrato —denominados “bloques” — dentro de bolsas de polipropileno resistentes al calor. Estas bolsas incluyen un filtro con poros de diámetro menor a 0.5 micras, lo que permite que el hongo, una vez inoculado, pueda obtener oxígeno

sin que microorganismos externos contaminen el sustrato (Figura 14).

Las bolsas están disponibles en distintos tamaños para contener diferentes volúmenes de sustrato; en este caso se emplearon bolsas de 2 kg y otras más grandes de 5 kg de sustrato.

Una vez llenas con la cantidad deseada, las bolsas se someten a esterilización en autoclave, elevando la temperatura a 121 °C y generando una presión aproximada

Figura 14. Muestra de un bloque inoculado y colonizado al 100%. Se observa el filtro (cuadro blanco) que permite el intercambio gaseoso del hongo



Fuente: Fungi Monterrey SA de CV.

de 15 libras, manteniéndola durante hasta cuatro horas. Este proceso asegura la eliminación de cualquier microorganismo presente en los sustratos, garantizando un medio limpio para el desarrollo del micelio.

j) Inoculación de sustratos

Para la inoculación, se utiliza el inóculo líquido previamente preparado, el cual debe tener entre 10 y 15 días de crecimiento, con un máximo de 30 días. Antes de su aplicación, el inóculo se agita vigorosamente para suspender homogéneamente el micelio en el líquido y fragmentar las hifas, aumentando así los puntos de inoculación disponibles en el sustrato.

En condiciones asépticas —ya sea dentro de una cabina de seguridad, frente a aire filtrado o en un entorno equivalente—, se introducen 50 ml de inóculo por cada kilogramo de sustrato prepa-

rado. Las bolsas de sustrato inoculado deben sellarse preferentemente mediante calor, con el objetivo de evitar la entrada de contaminantes y preservar la pureza del sistema durante el proceso de colonización.

j) Incubación 1

El proceso de incubación constituye un eslabón crítico en la producción de biomateriales, ya que es en esta etapa donde se desarrolla la materia prima final que será utilizada para moldear las piezas deseadas. El empleo de bolsas con filtro simplifica significativamente el proceso, al asegurar la delimitación biológica del sustrato respecto al ambiente externo y, al mismo tiempo, mantener una humedad interna superior al 70 %. La variable que requiere control preciso es la temperatura. En el caso de *Ganoderma sp.*, las temperaturas de incuba-

ción deben mantenerse dentro de un rango de 25 a 30 °C, siendo la presencia de luz una condición opcional.

Bajo estas condiciones, la colonización del sustrato por el micelio debe ser evidente a partir de las 96 horas de incubación, alcanzando una colonización completa en promedio alrededor de los 15 días. A partir de este punto, el sustrato está listo para proceder al moldeado de las piezas.

k) Modelado de piezas

Una vez lograda la colonización completa del sustrato —es decir, cuando el 100 % de la superficie está cubierta por micelio blanco— se puede iniciar la desagregación del sustrato para su posterior moldeado. El tiempo de incubación adecuado para moldear piezas varía entre 10 días y 4 meses. Es importante considerar que, a mayor tiempo de incubación, mayor

será la resistencia del sustrato al desagregado; por ello, se recomienda realizar esta operación dentro de los primeros 30 días.

El desagregado del sustrato debe efectuarse en un cuarto limpio. Se extrae el sustrato de la bolsa que lo contiene y, usando manos protegidas con guantes de látex o nitrilo previamente sanitizados, se desmorona en un contenedor limpio, preferentemente de plástico o acero, que puede ser desinfectado con alcohol al 70 %. Una vez obtenido un sustrato particulado y homogéneo, este se coloca en el molde de elección, distribuyéndolo de manera uniforme. La compactación del sustrato determinará las características finales de la pieza: una mayor compactación genera piezas densas y sólidas, mientras que una compactación menor produce piezas más ligeras y frágiles, cada una con beneficios particulares.

l) Incubación 2

Una vez colocado el sustrato en los moldes, se recomienda cubrirlos con sus tapas correspondientes o situarlos en un espacio donde la temperatura y, especialmente, la humedad ambiental, puedan mantenerse elevadas de forma constante. Esto puede lograrse, por ejemplo, envolviendo los moldes en bolsas plásticas, colocándolos dentro de una caja o sobre un anaquel o estantería forrada con plástico para conservar la humedad. La temperatura de incubación debe mantenerse en el mismo rango que en la primera incubación, siendo la luz nuevamente una condición no requerida.

A partir de este punto, el micelio empezará a colonizar nuevamente el sustrato moldeado en tan solo tres días, alcanzando una colonización completa entre 10 y los 12. Con la colonización completa, las piezas pueden extraerse del molde para iniciar el secado;

sin embargo, se recomienda prolongar la incubación el mayor tiempo posible para favorecer la ramificación de las hifas dentro del sustrato, aumentando así su resistencia y durabilidad.

Para lograr un exterior estético y completamente recubierto de micelio, se debe extraer cuidadosamente la pieza del molde y permitir que incuben unos días adicionales. Esto permite que el área que estuvo en contacto directo con las paredes del molde genere micelio aéreo, recubriendo la superficie y ocultando la textura y color del sustrato, resultando en piezas visualmente más atractivas y uniformes.

m) Secado

Una vez concluido el tiempo de incubación establecido, las piezas deben someterse a un proceso de secado con el propósito de inactivar el crecimiento del hongo y

reducir el contenido de agua. Este procedimiento permite eliminar el peso adicional asociado a la humedad, incrementar la resistencia del material y prevenir el crecimiento de otros organismos — particularmente mohos— sobre las piezas terminadas.

El secado puede realizarse a 80 °C durante 24 horas o, alternativamente, a temperaturas menores durante un periodo más prolongado, procurando siempre la presencia de corrientes de aire que favorezcan la eficiencia del proceso.

Es importante considerar que aquellas piezas cuya área superficial sea elevada en relación con su grosor o profundidad tienden a deformarse —ya sea por contracción o torsión— si se someten a temperaturas altas en intervalos cortos de tiempo. Estas deformaciones pueden minimizarse empleando temperaturas más bajas durante periodos más extensos o

colocando elementos que restrinjan la deformación sin obstaculizar el proceso de secado.

n) Propiedades mecánicas del Micelio

El micelio ha emergido como un material innovador dentro de la industria de la construcción y el diseño sostenible. Su capacidad para conformar materiales compuestos a partir de residuos lignocelulósicos, junto con su bajo impacto ambiental, lo posiciona como una alternativa atractiva frente a materiales convencionales.

No obstante, resulta indispensable comprender sus propiedades mecánicas para evaluar su viabilidad en aplicaciones estructurales y de diseño. En los últimos años, la investigación en torno al micelio ha adquirido creciente relevancia, impulsada por la demanda de soluciones sostenibles y e-

cológicas en los sectores de la construcción y la manufactura.

En este contexto, Alaneme et al. (2023) realizaron una revisión de las propiedades del micelio en diversos materiales y su comparación con materiales tradicionales de construcción, cuyos resultados se sintetizan en la Tablas 2a y 2b.

o) Resistencia a la compresión, flexión y tracción

La resistencia a la compresión del micelio depende de múltiples factores, entre los que se incluyen el tipo de hongo empleado, el sustrato utilizado para su crecimiento, la densidad alcanzada en el

material final y el proceso de secado aplicado.

Diversos estudios han reportado que la resistencia a la compresión de compuestos de micelio puede oscilar entre 0.2 y 2 MPa (Jones et al., 2017), valores considerablemente inferiores a los del concreto convencional, cuya resistencia típica varía entre 20 y 40 MPa.

No obstante, este rango de resistencia puede resultar suficiente para aplicaciones no estructurales, tales como paneles de aislamiento y elementos decorativos. Se ha observado, además, que el tipo de sustrato empleado durante el crecimiento del micelio influye -

Tabla 2a. Comparación de propiedades materiales selectos contra BCM

Propiedades [Materiales de construcción]	Cemento	Polímeros	Yeso	BCM
Densidad (kg/m³)	1800-1950	22-30	417-945	110-330
Resistencia a la compresión (MPa)	I. Cemento: 3.45 II. Ladrillo de arcilla: 8.6-17.2	Plásticos: 0.069-0.40 Resina fenólica formaldehído: 0.2- 0.55 Espumas de poliestireno: 0.03- 0.69 Poliuretano: 0.002- 48	0.06-0.55	0.36- 0.52 0.17-1.1
Absorción de agua (% en peso)	Cemento: 12	Madera contrachapada: 5-49	Plásticos: 6.9	52-200 40-580
Tiempo hasta la ignición (s)	Madera conglomerada: 173	Espuma de poliestireno: 61	-	311-370
Propiedades [Materiales de aislamiento]	Lana de oveja	Poliestireno	Kenaf	BCM
Conductividad térmica (W/m·K)	0.05	0.03	0.04	0.05- 0.07
Propiedades [Materiales de amortiguación acústica]	Azulejos de techo	Tablero de espuma de poliuretano	Madera contrachapada	BCM
Capacidad de absorción de ruido (dBA)	61	64	65	52-54

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Alaneme et al., 2023

Tabla 2b. Comparación de aplicación de materiales selectos contra BCM

Propiedades [aplicaciones diversas]	Polímeros	Madera contrachapada	BCM
Resistencia a la flexión (MPa)	Poliuretano: 0.21-57 Resina fenólica formaldehído: 0.38-0.55 Espumas de poliestireno: 0.07-0.70	35-78	0.87-15 MPa 0.05-0.29 MPa
Propiedades de tensión (MPa)	Poliuretano: 0.08-103 Resina fenólica formaldehído: 0.19-0.46 Espumas de poliestireno: 0.15-0.7	Resistencia a la tracción: 10-44 Resistencia a la compresión: 8-25	0.03-0.24MPa Hasta 0.343MPa
Módulo Elástico	Poliestireno: 3400MPa	Conglomerado de cáscara de nuez de macadamia y goma arábica: 1810MPa	97MPa

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Alaneme et al., 2023

significativamente en la resistencia del material final.

La resistencia a la compresión del micelio depende de múltiples factores, entre los que se incluyen el tipo de hongo empleado, el sustrato utilizado para su crecimiento, la densidad alcanzada en

el material final y el proceso de secado aplicado.

Sustratos de mayor densidad, como el aserrín o el cáñamo triturado, tienden a generar compuestos con mayor desempeño mecánico.

Si bien el micelio no constituye una alternativa adecuada para soportar cargas estructurales importantes, su resistencia resulta notable considerando la simplicidad de su conformación y el hecho de que el micelio actúa como el único agente aglutinante que mantiene cohesionadas las partículas del sustrato. Un ejemplo ilustrativo fue la demostración realizada por la empresa Fungi Monterrey en 2024, en la que una pieza cilíndrica elaborada con micelio cultivado en aserrín de encino soportó parcialmente la carga de un automóvil de pasajeros, presentando una deformación mínima y sin alteraciones estructurales significativas (figura 15).

Casos como este permiten considerar al micelio no solo como un material decorativo, sino también como un elemento con capacidad de ofrecer resistencia modesta ante ciertas cargas, am-

pliando así su espectro potencial de aplicaciones.

En lo que respecta a la resistencia a la flexión, el micelio presenta limitaciones inherentes a su naturaleza fibrosa y a su estructura porosa. Investigaciones recientes señalan que los materiales basados en micelio poseen módulos de flexión bajos, lo que restringe su utilización en componentes sometidos a esfuerzos de flexión (Appels et al., 2019).

Sin embargo, al combinar el micelio con otros materiales naturales —como fibras vegetales o resinas biodegradables— se ha logrado mejorar su desempeño mecánico. En cuanto a la resistencia a la tracción, está también es reducida, ya que el material tiende a fracturarse cuando se somete a cargas tensiles elevadas. A pesar de esta limitación, se han propuesto estrategias de diseño estructural que aprovechan las propiedades intrínsecas del mico-

Figura 15. Demostración del desempeño de una pieza de micelio soportando parcialmente un automóvil de 1.3 toneladas



Fuente: Fungi Monterrey SA de CV.

lio para optimizar la distribución de cargas y disminuir el riesgo de fractura.

p) Comportamiento frente a factores ambientales

El micelio, debido a la presencia significativa de componentes - lignocelulósicos en su matriz com-

puesta, presenta sensibilidad frente a condiciones ambientales como la humedad y la temperatura. La absorción de humedad puede comprometer su integridad estructural, ya que incrementa su peso y reduce su resistencia mecánica (Islam et al., 2018). Asimismo, la exposición prolongada a am-

bientes húmedos puede favorecer la colonización por hongos tipo moho, lo cual constituye un aspecto indeseable y potencialmente perjudicial para la salud humana.

Por esta razón, resulta fundamental emplear tratamientos de impermeabilización o recubrimientos protectores que aseguren la durabilidad del material. En este contexto, se han desarrollado recubrimientos de origen natural, como ceras de abeja y aceites vegetales, que mejoran la resistencia a la humedad sin comprometer la biodegradabilidad del biomaterial.

En relación con la temperatura, el micelio mantiene estabilidad estructural dentro de rangos térmicos moderados; sin embargo, la exposición a fuentes de calor intenso puede inducir procesos de descomposición o carbonización (Haneef et al., 2017). El comportamiento del micelio frente al fuego constituye un campo de inves-

tigación en desarrollo, en el cual se exploran tratamientos que incrementen su resistencia térmica mediante el uso de aditivos naturales.

A pesar de estas consideraciones, los materiales basados en micelio son aptos como retardadores de fuego, dado que presentan baja propagación de la flama en caso de incendio. Adicionalmente, poseen una conductividad térmica reducida, lo que respalda su promoción como materiales con propiedades relevantes de aislamiento térmico.

q) Comparativa con otros biomateriales

En comparación con otros biomateriales, el micelio presenta tanto ventajas como limitaciones. Por ejemplo, los bioplásticos derivados de almidón o PLA (polímero de ácido láctico) exhiben mayor resistencia mecánica; no obstante, su producción demanda mayores

insumos energéticos y puede generar residuos adicionales. En contraste, el micelio es biodegradable y su proceso de producción requiere un consumo energético reducido, aunque sus propiedades mecánicas son inferiores (Elsacker et al., 2019).

De manera similar, los paneles elaborados con fibras naturales como kenaf o bambú superan al micelio en resistencia a la tracción y a la flexión. Sin embargo, el micelio destaca por su capacidad de autoadhesión y crecimiento adaptativo, lo que permite conformar estructuras complejas sin necesidad de adhesivos adicionales.

Además, el micelio puede crecer directamente dentro de moldes personalizados, eliminando la necesidad de procesos de manufactura complejos y reduciendo las etapas industriales convencionales asociadas a la conformación de materiales.

r) Estudios experimentales de sus propiedades

Diversas investigaciones han analizado de manera experimental las propiedades mecánicas del micelio, evaluando la influencia de variables biológicas y de procesamiento en su desempeño estructural.

Appels et al. (2019) estudiaron el efecto de distintas especies de hongos y tipos de sustrato sobre la resistencia mecánica de compuestos de micelio, concluyendo que la especie *Ganoderma lucidum* genera materiales con mayor resistencia a la compresión en comparación con otras especies evaluadas.

Por su parte, Islam et al. (2017) realizaron ensayos de compresión y flexión en muestras de micelio tratadas y no tratadas, demostrando que la aplicación de prensado en caliente mejora de manera sig-

nificativa el rendimiento mecánico del material.

Asimismo, Elsacker et al. (2019) analizaron la influencia de la densidad y de los métodos de secado sobre la resistencia del micelio, encontrando que un secado controlado contribuye a la reducción de la porosidad y al incremento de la resistencia mecánica.

De manera complementaria, Jones et al. (2018) propusieron la combinación del micelio con fibras vegetales como estrategia para mejorar sus propiedades estructurales. En esta misma línea, otros estudios han explorado la incorporación de biopolímeros y la aplicación de tratamientos térmicos con el objetivo de incrementar la resistencia y optimizar el desempeño mecánico del material

Aplicaciones potenciales del micelio

a) Aislamiento térmico y acústico

El micelio ha demostrado ser un material eficaz para el aislamiento térmico y acústico debido a su estructura porosa y baja densidad (Jones et al., 2018). Estas características permiten reducir la transferencia de calor y sonido, posicionándolo como una alternativa sostenible frente a aislantes tradicionales como la lana mineral y las espumas sintéticas (Elsacker et al., 2019).

En estudios experimentales, Jones et al. (2018) cultivaron micelio de *G. lucidum* sobre residuos lignocelulósicos y evaluaron su conductividad térmica, obteniendo valores comparables a los de materiales comerciales de aislamiento. De manera complementaria, Elsacker et al. (2019) realizaron pruebas de absorción sonora, demostrando que el micelio presenta eficacia en la mitigación de ruidos de frecuencia media a alta.

La empresa italiana Mogu, reconocida por su innovación en materiales compuestos basados en micelio (BCM), ha desarrollado paneles acústicos elaborados a partir de este biomaterial (Figura 16). Estos paneles destacan por sus propiedades técnicas sobresalientes, particularmente por su elevada capacidad de absorción acústica, atribuida directamente a la estructura ligera y porosa del micelio, que favorece la disipación del sonido y mejora el confort acústico en distintos entornos arquitectónicos.

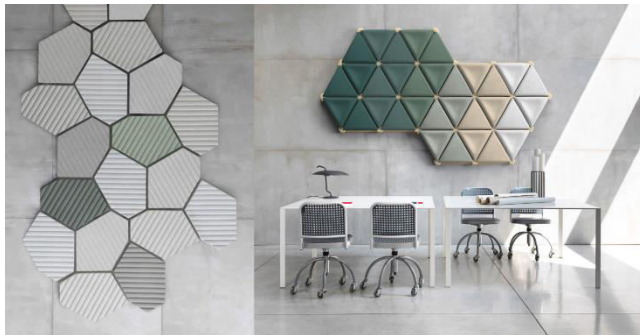
La integración estética y funcional de estos paneles en espacios interiores evidencia su viabilidad tanto técnica como comercial. Asimismo, la empresa enfatiza su compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad corporativa, garantizando que sus productos se fabriquen con un impacto ambiental mínimo y promoviendo activamente la economía

circular en la industria de la construcción. La incorporación de estos sistemas responde a la creciente demanda de materiales ecológicos y eficientes, al tiempo que refleja una visión orientada a la convergencia entre innovación biotecnológica y aplicaciones comerciales sostenibles.

b) Paneles de construcción y revestimientos

Los paneles fabricados con micelio han sido explorados como soluciones innovadoras para la construcción, debido a su ligereza, resistencia moderada y propiedades ignífugas (Appels et al., 2019). Estos sistemas pueden emplearse en revestimientos interiores y exteriores, constituyendo una alternativa ecológica frente a paneles de madera y compuestos plásticos convencionales.

Figura 16. Paneles acústicos elaborados a partir de BCM (Mogu)



Fuente: MOGU, Italia

Appels et al. (2019) investigaron la resistencia mecánica de paneles de micelio elaborados a partir de mezclas de sustratos lignocelulósicos, observando que variables como la presión de compactación y el contenido de humedad influyen significativamente en la resistencia final del material. Por su parte, Islam et al. (2017) evaluaron la resistencia al fuego de paneles tratados con retardantes naturales, obteniendo resultados favorables que respaldan su potencial apli-

cación en entornos arquitectónicos.

c) Sustituto de materiales plásticos y compuestos sintéticos

El micelio se ha propuesto como un sustituto viable de plásticos y compuestos sintéticos en diversas aplicaciones, entre ellas empaques, mobiliario y componentes estructurales ligeros (Haneef et al., 2017). Su producción a partir de residuos agroindustriales disminuye significativamente la dependencia de

recursos no renovables y favorece modelos productivos alineados con la economía circular (Attias et al., 2020).

Haneef et al. (2017) diseñaron y fabricaron prototipos de envases biodegradables, evaluando su resistencia a la humedad y a la compresión. Los resultados demostraron que los materiales basados en micelio pueden competir con plásticos convencionales en determinadas aplicaciones. Por su parte, Attias et al. (2020) experimentaron con distintas combinaciones de residuos orgánicos con el objetivo de mejorar la flexibilidad y durabilidad del micelio en aplicaciones estructurales, evidenciando que la selección del sustrato influye de manera directa en el desempeño final del material.

d) Incorporación de mezclas de concreto

Una de las aplicaciones emergentes del micelio consiste en su incorporación en mezclas de concreto, con el propósito de mejorar propiedades como la resistencia a la tracción y la flexibilidad (Lingam et al., 2023). En estudios experimentales, se integraron fibras de micelio con cemento Portland y se evaluó su comportamiento mecánico, observándose mejoras en la resistencia a la fractura y una reducción en la densidad del concreto resultante (Lingam et al., 2023).

Además, investigaciones realizadas por Menon et al. (2017) indicaron que la inclusión de micelio puede favorecer la autorreparación de microfisuras mediante el crecimiento fúngico en las grietas, contribuyendo así a prolongar la vida útil de las estructuras. Este fenómeno fue evaluado a través de pruebas de ciclado de carga y observación microscópica de las fisuras.

En relación con esta línea de investigación, y aunque no se refiere específicamente al uso de micelio sino al empleo de hongos en general, se ha explorado la utilización de especies con capacidad de calcificación para mejorar las propiedades del concreto. Este enfoque se basa en la biocalcificación, proceso biológico mediante el cual ciertos microorganismos precipitan carbonato de calcio en sus estructuras celulares (Dhami et al., 2013). La incorporación de estos organismos en el concreto permite la reparación de fisuras y el incremento de la durabilidad estructural mediante mecanismos naturales y sostenibles.

La biocalcificación inducida por hongos no solo contribuye a la reparación de microfisuras, sino que también disminuye la permeabilidad del material, reduciendo la penetración de agua y otros agentes erosivos. Como consecuencia, se prolonga la vida útil

de las estructuras de concreto y se reduce la necesidad de mantenimiento y reparaciones frecuentes.

No obstante, pese a sus beneficios potenciales, la aplicación de hongos en la industria del concreto enfrenta desafíos significativos. El crecimiento y la actividad metabólica de los hongos deben controlarse cuidadosamente para evitar comprometer la integridad estructural del material. Además, estos organismos requieren condiciones específicas de humedad y temperatura para su desarrollo, lo que puede limitar su implementación en determinados entornos.

La investigación en este ámbito aún se encuentra en etapas iniciales, por lo que se requieren estudios adicionales para optimizar los métodos de aplicación y evaluar la viabilidad y efectividad a largo plazo de estas tecnologías en condiciones reales de construcción (De Muynck et al., 2008).

Comparación mecánica entre micelio y concreto

a) Análisis comparativo de resistencia y durabilidad

El micelio y el concreto presentan propiedades mecánicas sustancialmente distintas, derivadas de sus composiciones y estructuras intrínsecas. El concreto, conformado por una mezcla de cemento, agregados y agua, exhibe una resistencia a la compresión elevada, generalmente superior a 20 MPa y capaz de alcanzar valores mayores en función del diseño específico de la mezcla (Neville, 2012).

En contraste, el micelio, constituido por redes de hifas fúngicas que se desarrollan sobre sustratos orgánicos, presenta una resistencia a la compresión considerablemente menor, que oscila entre 0.2 y 1.2 MPa, dependiendo de la densidad del material y de la especie fúngica empleada (Jones et al., 2017).

Los estudios realizados por Appels et al. (2019) señalan que la resistencia del micelio puede incrementarse mediante la optimización de parámetros de fabricación, tales como la compresión aplicada durante el crecimiento y la implementación de tratamientos térmicos posteriores. No obstante, aun con estas mejoras, la resistencia alcanzada continúa siendo significativamente inferior a la del concreto convencional.

Del mismo modo, Elsacker et al. (2019) demostraron que la incorporación de distintos sustratos lignocelulósicos influye directamente en la densidad y resistencia del micelio, lo que sugiere que la selección adecuada del sustrato constituye un factor determinante para optimizar sus propiedades mecánicas.

En términos de durabilidad, el concreto es ampliamente reconocido por su longevidad y su capacidad para resistir condiciones cli-

máticas adversas, aunque puede verse afectado por procesos como la carbonatación y la reacción álcali-silice (Mehta & Monteiro, 2014). Por su parte, el micelio, pese a ofrecer ventajas asociadas a su biodegradabilidad y carácter renovable, resulta vulnerable a la degradación causada por la humedad y la acción de microorganismos, lo que limita su uso en ambientes expuestos si no se aplican tratamientos complementarios (Elsacker et al., 2019).

Islam et al. (2017) identificaron que la morfología del micelio influye de manera directa en su resistencia frente a la humedad, subrayando la importancia de considerar diseños específicos cuando se contemplan aplicaciones en condiciones ambientales exigentes.

b) Limitaciones estructurales del micelio

Las propiedades mecánicas del micelio restringen su aplicación

estructural principalmente a elementos no portantes o de carácter decorativo. Su baja resistencia a la tracción y a la flexión impide su utilización como componente principal en estructuras sometidas a cargas significativas (Appels et al., 2019).

Adicionalmente, su susceptibilidad frente a la humedad y al ataque biológico hace necesaria la aplicación de tratamientos de impermeabilización o su combinación con otros materiales, con el fin de mejorar su durabilidad (Jones et al., 2017).

Estas limitaciones, sin embargo, no excluyen su implementación en aplicaciones donde la carga estructural no es determinante, como paneles de aislamiento térmico y acústico o elementos de diseño arquitectónico. En este sentido, Elsacker et al. (2019) propusieron el uso de recubrimientos protectores para reducir la absorción de humedad, am-

pliando así el espectro de aplicaciones potenciales del micelio dentro del ámbito constructivo y de diseño.

c) Sinergias potenciales al combinar ambos materiales

La combinación de micelio y concreto plantea oportunidades para el desarrollo de materiales compuestos que integren las fortalezas de ambos sistemas. Por ejemplo, el micelio puede incorporarse como agregado biodegradable dentro de matrices de concreto con el objetivo de reducir la densidad del material y mejorar sus propiedades de aislamiento térmico (Lingam et al., 2023).

Asimismo, se ha propuesto el uso del micelio como molde temporal que, al degradarse, genere vacíos internos capaces de aligerar las estructuras de concreto sin comprometer de manera significativa su resistencia mecánica. Esta aproximación fue explorada por

Jones et al. (2017), quienes demostraron que la inclusión de micelio puede contribuir a mejorar la eficiencia térmica de elementos de concreto.

Otra posibilidad contempla el empleo del micelio como recubrimiento en estructuras de concreto, aportando cualidades estéticas y funcionales con un impacto ambiental reducido (Jones et al., 2017). De igual manera, la integración parcial de componentes biogénicos como el micelio puede contribuir a la mitigación de la huella de carbono asociada al concreto, sustituyendo fracciones de materiales de alta emisión. Lingam et al. (2023) sugieren que esta sinergia podría desempeñar un papel relevante en el desarrollo de soluciones orientadas hacia una construcción más sostenible.

Estas estrategias pueden derivar en sistemas constructivos más sostenibles, en los que el concreto aporte resistencia estructural -

mientras el micelio contribuya a la eficiencia térmica y a la reducción de la huella de carbono. No obstante, se requieren investigaciones adicionales para optimizar las interacciones entre ambos materiales y asegurar su viabilidad técnica y económica.

Sostenibilidad

a) Impacto ambiental del concreto frente al micelio

El concreto constituye uno de los materiales de construcción más utilizados a escala global, pero también representa una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero dentro del sector. La producción de cemento, componente esencial del concreto, es responsable de aproximadamente el 8 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂), debido tanto al proceso de calcinación de la piedra caliza como al elevado consumo

energético implicado (Scrivener et al., 2018).

Además, la extracción de materias primas destinadas a la fabricación de concreto genera alteraciones ecológicas significativas, incluyendo pérdida de biodiversidad y degradación del suelo (Habert et al., 2020).

En contraste, los materiales basados en micelio destacan por su menor impacto ambiental. Su producción consiste en el cultivo de hongos sobre residuos orgánicos, lo cual evita la explotación de recursos vírgenes y, simultáneamente, contribuye a la valorización de residuos agroindustriales (Jones et al., 2018).

Aunque este proceso requiere condiciones controladas de crecimiento, su demanda energética es considerablemente inferior en comparación con la fabricación de concreto. Adicionalmente, los materiales de micelio son completa-

mente biodegradables, lo que disminuye la generación de residuos al finalizar su vida útil (Appels et al., 2019).

Por otra parte, su producción descentralizada posibilita el fortalecimiento de economías locales mediante el uso de residuos regionales como sustrato, reduciendo el impacto ambiental asociado al transporte de materiales (Jones et al., 2018).

b) Análisis de ciclo de vida de materiales basados en micelios

El análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) constituye una herramienta metodológica que permite evaluar de manera integral el impacto ambiental de un material, considerando todas las etapas de su existencia, desde la obtención de materias primas hasta su disposición final.

Estudios comparativos han evidenciado que los materiales basados en micelio presentan una huella ecológica significativamente menor en comparación con el concreto. Haneef et al. (2017) señalan que los compuestos de micelio requieren menores cantidades de energía para su producción y generan emisiones mínimas de CO₂. Asimismo, el micelio puede cultivarse sobre residuos agrícolas, lo que disminuye el impacto ambiental asociado a la extracción de materias primas vírgenes, favoreciendo la valorización de subproductos agroindustriales.

El análisis de ciclo de vida también pone de manifiesto que la producción de micelio no involucra el uso de productos químicos tóxicos ni procesos industriales de alta complejidad. En contraste, la fabricación del concreto implica emisiones de polvo, consumo intensivo de combustibles fósiles y potencial contaminación del agua

(Habert et al., 2020). Esta diferencia refuerza la consideración del micelio como una alternativa sostenible en aplicaciones donde no se requiera una elevada resistencia estructural.

Adicionalmente, el uso de micelio podría integrarse en estrategias de captura y almacenamiento de carbono (CCS), contribuyendo de manera complementaria a la mitigación del cambio climático (Appels et al., 2019).

c) Reducción de huella de carbono y residuos industriales

Una de las principales ventajas de los materiales basados en micelio radica en su potencial para reducir tanto la huella de carbono como la generación de residuos industriales. Al emplear residuos orgánicos como sustrato de crecimiento, se evita la acumulación de desechos agrícolas y se promueve un mo-

delo de economía circular (Jones et al., 2018).

En contraste, el concreto presenta desafíos significativos en la gestión de residuos, ya que la demolición de estructuras produce grandes volúmenes de escombros que requieren procesos de reciclaje costosos y con elevada demanda energética.

En este contexto, la combinación de micelio y concreto puede dar lugar a soluciones híbridas en las que el micelio funcione como encofrado biodegradable o como material de aislamiento, reduciendo el volumen total de concreto requerido y, en consecuencia, su impacto ambiental (Elsacker et al., 2020). Estas aplicaciones híbridas no solo contribuyen a disminuir la

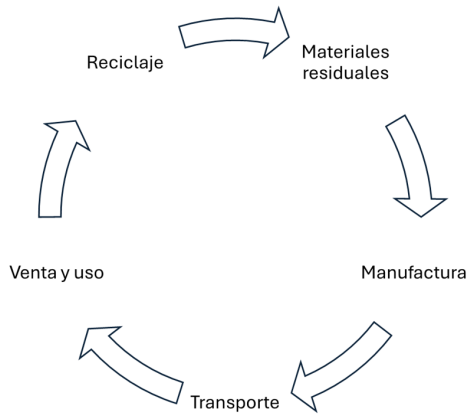
huella de carbono, sino que - también mejoran la eficiencia energética de los edificios gracias a las propiedades naturales de aislamiento térmico del micelio.

Integración del micelio al concreto

a) Métodos de incorporación

La integración del micelio en el

Figura 17. Ciclo general de vida de los BCM



Fuente: Laboratorio de Micología y Fitopatología, FCB, UANL

La biodegradabilidad del micelio garantiza que, al concluir su ciclo de vida, el material pueda reincorporarse al entorno natural sin generar residuos persistentes (Figura 17).

concreto ha sido abordada mediante diversos enfoques, principalmente a través de mezclas híbridas y recubrimientos superficiales.

Las mezclas híbridas consisten en la incorporación del micelio -

dentro de la matriz cementicia, ya sea como aditivo o como componente parcial de los agregados (Jones et al., 2017). Este procedimiento tiene como finalidad aprovechar la capacidad del micelio para mejorar la tenacidad del material compuesto y aumentar su resistencia a la fractura. La interacción entre la matriz cementicia y los componentes biogénicos busca generar un comportamiento mecánico más dúctil en comparación con el concreto convencional.

Por otra parte, la aplicación de recubrimientos de micelio sobre superficies de concreto representa una estrategia alternativa de integración. Estos recubrimientos pueden aportar propiedades adicionales al sistema constructivo, tales como mayor resistencia a la humedad y mejoras en el aislamiento térmico (Haneef et al., 2017). En este caso, el micelio actúa como una capa funcional complementaria, sin alterar de manera directa

la composición estructural del concreto base.

b) Resultados de estudios experimentales

Diversas investigaciones experimentales han puesto de manifiesto el potencial del micelio para optimizar determinadas propiedades del concreto.

Jones et al. (2017) observaron que la incorporación de micelio en mezclas de concreto puede incrementar la resistencia a la fractura hasta en un 20 %, evidenciando una mejora en el comportamiento frente a esfuerzos que inducen propagación de grietas. Este resultado sugiere que el micelio puede contribuir a modificar los mecanismos de fisuración del material compuesto.

Asimismo, Haneef et al. (2017) reportaron que los recubrimientos basados en micelio reducen la ab-

sorción de agua en estructuras de concreto, lo que se traduce en un incremento de la durabilidad del material al limitar procesos asociados a la degradación por humedad.

Otros estudios han indicado que el micelio puede participar en procesos de autorreparación de microfisuras, debido a su capacidad para colonizar grietas y depositar materiales orgánicos que sellan las fracturas (Yang et al., 2020). Este fenómeno abre la posibilidad de desarrollar concretos con propiedades de autocuración, ampliando la vida útil de los elementos estructurales.

c) Retos tecnológicos y perspectivas futuras

A pesar de los resultados prometedores, la integración del micelio en el concreto enfrenta desafíos técnicos relevantes. Entre los principales retos se encuentra la com-

patibilidad entre el crecimiento biológico del micelio y el entorno altamente alcalino característico de los componentes cementicios (Zhu et al., 2021). Esta condición puede afectar la viabilidad del micelio y limitar su desempeño dentro del sistema compuesto.

Otro desafío importante radica en la estandarización de los métodos de producción a escala industrial. La variabilidad inherente a los procesos biológicos requiere protocolos controlados que garanticen uniformidad en las propiedades del material final.

Adicionalmente, la durabilidad a largo plazo de estos compuestos híbridos demanda investigaciones complementarias que evalúen su comportamiento bajo condiciones ambientales extremas, tales como variaciones térmicas, ciclos de humedad-sequedad y exposición a agentes químicos.

No obstante, las perspectivas futuras resultan alentadoras. Las líneas actuales de investigación se orientan hacia el desarrollo de concretos autorreparables y estructuras híbridas con menor impacto ambiental, consolidando la integración del micelio como una estrategia potencial dentro de la construcción sostenible.

Conclusiones

El análisis exhaustivo del uso del micelio como material de construcción ha permitido identificar su potencial como alternativa sostenible frente a materiales tradicionales como el concreto. El micelio sobresale por su biodegradabilidad, su bajo impacto ambiental y su versatilidad en aplicaciones arquitectónicas y artísticas.

Si bien presenta una resistencia mecánica inferior en comparación con el concreto, investigaciones recientes han evidencia-

do que su combinación con otros materiales o su modificación mediante técnicas de biofabricación puede mejorar de manera significativa sus propiedades estructurales. Asimismo, el micelio ofrece ventajas en términos de aislamiento térmico y acústico, además de registrar una menor huella de carbono durante su proceso de producción.

El micelio representa una oportunidad relevante para la innovación dentro de la industria de la construcción, particularmente en el desarrollo de materiales compuestos que integren micelio y concreto. Esta sinergia permitiría aprovechar la resistencia estructural del concreto junto con la sostenibilidad y flexibilidad inherente al micelio.

Entre las aplicaciones potenciales se encuentran paneles de aislamiento, elementos decorativos, encofrados biodegradables y estructuras temporales. De igual

manera, la biofabricación de componentes constructivos a partir de micelio podría contribuir a la reducción del consumo de energía y de recursos no renovables, en concordancia con los objetivos globales de sostenibilidad.

Resulta indispensable profundizar en investigaciones orientadas a mejorar las propiedades mecánicas del micelio mediante procesos de modificación genética, -tratamientos químicos y su combinación con otros materiales sostenibles.

Asimismo, es fundamental evaluar su durabilidad y comportamiento bajo condiciones ambientales extremas, con el propósito de garantizar su viabilidad en aplicaciones de larga duración.

Las líneas futuras de investigación deberían incorporar análisis de ciclo de vida aplicados a pro-

ductos híbridos de micelio y concreto, así como el desarrollo de normativas técnicas que faciliten su adopción en el sector de la construcción.

En virtud de sus propiedades mecánicas actuales, el micelio no constituye un sustituto viable del concreto; no obstante, puede desempeñar un papel estratégico como material complementario que favorezca la incorporación de soluciones sostenibles y promueva la adopción de tecnologías ambientalmente responsables, siempre que se cumplan las disposiciones normativas y los estándares de seguridad correspondientes.

Referencias

Alaneme, K. K., Anaele, J. U., Oke, T. M., Kareem, S. A., Adediran, M., Ajibuwa, O. A., & Anabaranze, Y. O. (2023). "Mycelium-based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications". *Alexandria Engineering Journal*, 83, 234–250. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.012>

Alexopoulos, C. J., Mims, C. W., & Blackwell, M. (1996). *Introductory mycology* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Amziane, S., & Arnaud, L. (2013). *Bio-aggregate-based building materials: Applications to hemp concretes*. Wiley.

Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., & Wösten, H. A. B. (2019). "Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites". *Materials & Design*, 161, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>

Ashby, M. F. (2019). *Materials and sustainable development*. Butterworth-Heinemann.

Attias, N., Danai, O., Abitbol, T., Tarazi, E., & Ezra, A. (2020). "Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis". *Journal of Cleaner Production*, 246, 119037. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037>

Bowman, S. M., & Free, S. J. (2006). "The structure and synthesis of the fungal cell wall". *BioEssays*, 28(8), 799–808. <https://doi.org/10.1002/bies.20441>

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). "Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>

Carlile, M. J., Watkinson, S. C., & Gooday, G. W. (2001). *The fungi* (2nd ed.). Academic Press.

Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., & Schellnhuber, H. J. (2020). "Buildings as a global carbon sink". *Nature Sustainability*, 3, 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>

De Muynck, W., Cox, K., De Belie, N., & Verstraete, W. (2008). "Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete". *Construction and Building Materials*, 22(5), 875–885.

Dhami, N. K., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2013). "Biocalcification by *Bacillus pasteurii* urease: A novel application". *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 40(6), 673–678.

Elsacker, E., Vandeloock, S., Brancart, J., Peeters, E., & De Laet, L. (2019). "Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates". *PLOS ONE*, 14(7), e0213954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>

Elsacker, E., Vandeloock, S., Van Wylick, A., Ruytinx, J., De Laet, L., & Peeters, E. (2020). "A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites". *Science of the Total Environment*, 725, 138431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431>

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010". *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Fricker, M. D., Boddy, L., Bebbler, D., & Jones, T. H. (2007). "Mycelial networks: Structure and dynamics". *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 649–660. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl230>

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries". *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559–573.

Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., & Athanassiou, A. (2017). "Advanced materials from fungal mycelium: Fabrication and tuning of physical properties". *Scientific Reports*, 7, 41292. <https://doi.org/10.1038/srep41292>

Hebel, D. E., Heisel, F., & Javadian, A. (2019). *Building from waste: Recovered materials in architecture and construction*. Birkhäuser.

Islam, M. R., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., & Picu, R. C. (2017). "Morphology and mechanics of fungal mycelium". *Scientific Reports*, 7(1), 13070. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13295-2>

Islam, M. R., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., & Picu, R. C. (2018). "Mechanical behavior of mycelium-based particulate composites". *Journal of Materials Science*, 53. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2797-z>

Jones, M., Bhat, T., Kandare, E., Thomas, A., Joseph, P., Dekiwadia, C., Yuen, R., John, S., Ma, J., & Wang, C. H. (2018). "Thermal degradation and fire

properties of fungal mycelium and mycelium-biomass composite materials". *Scientific Reports*, 8(1), 17583. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36032-9>

Jones, M. P. & Bhat, Tanmay & Huynh, Tien & Kandare, Everson & Yuen, Richard & Wang, Chun & John, Sabu. (2018). "Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety". *Fire and Materials*. 816-825. 10.1002/fam.2637.

Jones, M. P., Huynh, T., Dekiwadia, C., Daver, F., & John, S. (2017). "Mycelium composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics." *Journal of Bionanoscience*, 11, 241–257. <https://doi.org/10.1166/jbns.2017.1440>

Lingam, D., Narayan, S., Mamun, K., & Charan, D. (2023). "Engineered mycelium-based composite materials: Comprehensive study of various properties and applications". *Construction and Building Materials*, 391, 131841. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131841>

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Menon, Rakenth & Luo, Jing & Chen, Xiaobo & Liu, Zhiyong & Zhou, Guagnwen & Zhang, Ning & Jin, Congrui. (2017). *Fungi-Mediated Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure*. 10.48550/arXiv.1711.10386.

Money, N. P. (2008). "Insights on the mechanics of hyphal growth". *Fungal Biology Reviews*, 22(2), 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2008.03.001>

Moore, D., Robson, G. D., & Trinci, A. P. J. (2011). *21st century guidebook to fungi*. Cambridge University Press.

Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

Pacheco Torgal, F. (2014). "Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020". *Construction and Building Materials*, 51, 151–162.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.058>

Rayner, A. D. M. (1991). "The challenge of the individualistic mycelium". *Mycologia*, 83(1), 48–71. <https://doi.org/10.1080/00275514.1991.12025942>

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry". *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.

Swift, M. J., Heal, O. W., & Anderson, J. M. (1979). *Decomposition in terrestrial ecosystems*. University of California Press.

United Nations Environment Programme. (2023). *Building materials and the climate: Constructing a new future*. UNEP.

Whitesides, G. M., & Grzybowski, B. (2002). "Self-assembly at all scales". *Science*, 295(5564), 2418–2421. <https://doi.org/10.1126/science.1070821>

Yang, Z., Ma, H., & Xu, J. (2020). "Bio-based self-healing concrete: Mechanisms and performance". *Construction and Building Materials*, 247, 118539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118539>

Zhu, C., Li, W., & Zhang, Y. (2021). "Challenges and opportunities in bio-enhanced concrete: A review". *Cement and Concrete Composites*, 122, 104125. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104125>

Aprovechamiento de los residuos agroindustriales en la construcción

3

0

L

U

octubre de 1824

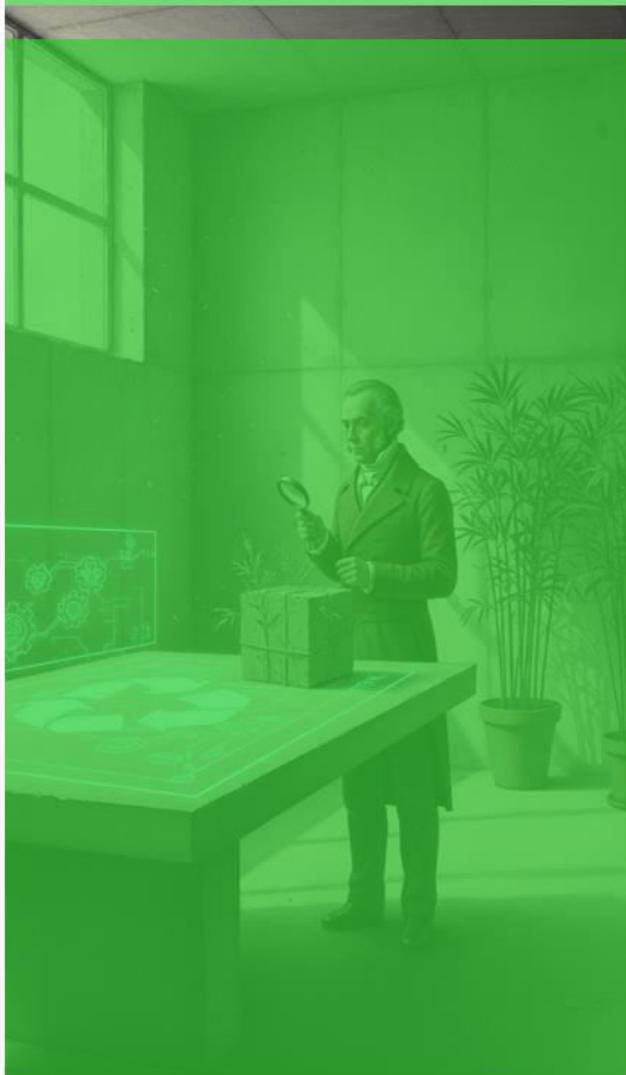
U

L

U

C

A



Aprovechamiento de los residuos agroindustriales en la construcción

David Gilberto García Hernández¹

Aldo Rodrigo González Luna²

Raymundo Alejandro Pérez Hernández³

David Mizael Ortiz Martínez⁴

Joel Horacio Elizondo Luévano⁵

Michel Stéphane Heya⁶

Resumen

¿Te imaginas que los desechos de la cosecha, como la paja del arroz o el bagazo de la caña de azúcar, puedan convertirse en materiales para construir ciudades más verdes? Esto ya es una realidad, y está contribuyendo a enfrentar algunos de los mayores desafíos globales, como el cambio climático, el crecimiento urbano y la necesidad de reducir la contaminación.

La construcción tradicional consume grandes cantidades de energía y re-

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas. Cuerpo Académico Ciencia Experimental. Email: david.garciahrz@uanl.edu.mx Orcid: 0000-0001-8409-139X

² Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas. Cuerpo Académico Ciencia Experimental. Email: AGONZALEZL@uanl.edu.mx Orcid: 0000-0002-1943-5181

³ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas. Cuerpo Académico Ciencia Experimental. Email: Raymundo.perezhrz@uanl.edu.mx Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3981-8737>

⁴ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas. Cuerpo Académico Ciencia Experimental. Email: DORTIZM@uanl.edu.mx Orcid: 0000-0003-0372-7291

⁵ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, Laboratorio de Parasitología. Email: joel.elizondolv@uanl.edu.mx Orcid: 0000-0003-2954-5939

⁶ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Salud Pública y Nutrición. Email: michel.heyax@uanl.edu.mx Orcid: 0000-0002-6886-4724

cursos, y constituye una de las – principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero. Al mismo tiempo, miles de toneladas de residuos agrícolas —como paja de arroz, trigo, maíz y bagazo— se generan cada año, especialmente en regiones como Asia. En lugar de quemarlos o dejarlos descomponerse, hoy es posible darles una segunda vida.

Estos materiales pueden aprovecharse para distintos fines, entre los que destacan:

- Combustible limpio (biomasa).
- Alimento para animales.
- Materiales de construcción, como paneles aislantes o incluso su incorporación en el concreto.
- Abono natural (composta).

Por ejemplo, las cáscaras de arroz o de café pueden usarse para producir energía o para fabricar bloques de construcción más sostenibles.

El *concreto verde* es una alternativa amigable con el medioambiente en comparación con el concreto tradicional. En lugar de emplear únicamente cemento y arena, se combina con residuos naturales como paja o cáscaras, lo que permite:

- Reducir las emisiones de CO₂.
- Ahorrar recursos naturales.
- Mejorar la calidad del aire al evitar la quema de residuos.

Ejemplos reales que inspiran

- **One Bryant Park, Nueva**

York: Este rascacielos utilizó concreto hecho con cenizas de cáscara de arroz, lo que le valió la certificación LEED Platino, el máximo reconocimiento en construcción sostenible.

- **Autopista A16 en Países**

Bajos: Incorporó cáscara de arroz y paja en el concreto y es una infraestructura energéticamente neutra.

¿Cómo se hace el concreto verde?

El proceso es sencillo, pero incorpora un enfoque innovador:

1. Se seleccionan los residuos agrícolas adecuados.
2. Se caracterizan sus propiedades.

3. Se incorporan en la mezcla de concreto, sustituyendo parcialmente los materiales tradicionales.

Esta propuesta no solo contribuye a combatir el cambio climático, sino que también impulsa economías circulares, genera empleos y mejora la calidad de vida en las ciudades. ¡Lo que antes se consideraba un desecho, hoy se reconoce como un recurso valioso para la construcción del futuro!

Introducción

Enfrentando los grandes retos globales: hambre, urbanización y cambio climático

En un mundo cada vez más poblado, enfrentamos desafíos urgentes que requieren soluciones coordinadas y sostenibles. La Organización de las Naciones Unidas -

(ONU) ha identificado 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) - para orientar los esfuerzos globales hacia un futuro más justo y habitable para el año 2030 (United Nations, 2025). Tres de estos objetivos —hambre cero, ciudades y comunidades sostenibles, y acción por el clima— resultan centrales en la búsqueda de un desarrollo equilibrado.

El desafío del hambre

El hambre sigue siendo una crisis grave. En 2022, 735 millones de - personas —equivalente al 9.2% de la población mundial— padecían hambre crónica, lo que representa un aumento significativo desde - 2019 (United Nations, 2025). Además, alrededor de 2,400 millones de personas enfrentaban inseguridad alimentaria moderada o gra-

ve. Esta situación no solo afecta la salud y el bienestar, sino que también limita las oportunidades de desarrollo de comunidades enteras. Cerca de 2,000 millones de - personas carecen de acceso regular a alimentos nutritivos, y en - 2022, 148 millones de niños sufrían retraso en el crecimiento y 45 millones padecían emaciación (delgadez extrema).

Crecimiento urbano acelerado

La urbanización avanza a un ritmo sin precedentes. Actualmente, más de la mitad de la población mundial vive en ciudades, y se espera que esta cifra alcance el 70% para 2050 (United Nations, 2025). Sin embargo, este crecimiento no - siempre ocurre de manera planificada: más de 1,100 millones de personas residen en barrios mar-

ginales o asentamientos informales, con acceso limitado a servicios básicos.

Además, solo la mitad de los habitantes urbanos cuenta con transporte público adecuado. En este contexto, mejorar la infraestructura y la gestión urbana resulta fundamental para garantizar calidad de vida y sostenibilidad.

La emergencia climática

El cambio climático, impulsado por el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, representa una amenaza crítica. Actualmente, las emisiones globales de CO₂ provenientes de combustibles fósiles alcanzan los 38,100 millones de toneladas anuales (United Nations, 2025). Para limitar el calentamiento global a 1.5 °C —una meta cru-

cial para evitar impactos catastróficos— es necesario reducir estas emisiones a la mitad para 2030. La transición hacia economías bajas en carbono y resilientes no es una opción, sino una urgencia.

Una solución con triple beneficio

Frente a estos desafíos, surgen propuestas innovadoras que buscan dar valor a los residuos agroindustriales —como los desechos de cosechas—, transformándolos en recursos útiles. Por ejemplo, su uso en la fabricación de "concretos verdes" no solo reduce emisiones de CO₂, sino que también ofrece materiales accesibles para la construcción de viviendas e infraestructura urbana sostenible. De esta manera, se contribuye simultáneamente a combatir el hambre —al generar nuevos ingresos para

los agricultores—, mejorar las ciudades y mitigar el cambio climático.

Esta integración de esfuerzos refleja el espíritu de los ODS: problemas interconectados exigen soluciones inteligentes y, sobre todo, colaborativas.

Residuos agroindustriales: un recurso desaprovechado

De toda la tierra habitable en el planeta —entre 8,000 y 10,000 millones de hectáreas—, cerca del 44% se destina a la agricultura. Esta superficie equivale a cinco veces el tamaño de Estados Unidos. Sin embargo, solo la mitad de estas tierras de cultivo producen alimentos para consumo humano directo (Ritchie & Roser, 2024).

Con el aumento en la producción agrícola, también se incrementa la cantidad de residuos generados. Cada año se producen enormes volúmenes de desechos entre los que destacan:

- 731 millones de toneladas de paja de arroz.
- 354 millones de toneladas de paja de trigo.
- 203 millones de toneladas de paja de maíz.
- 180 millones de toneladas de bagazo (residuo de la caña de azúcar).

China e India generan más de la mitad de estos residuos a nivel mundial. Asia es el principal productor de paja de arroz. A estos se suman los desechos de frutas y cáscaras, que aumentan aún más el volumen total.

La quema de estos residuos —una práctica común— libera —grandes cantidades de gases de efecto invernadero, contaminantes y partículas suspendidas que afectan la salud y el medio ambiente. Además, su acumulación genera lixiviados que pueden contaminar los suelos y los cuerpos de agua. Por ello, resulta urgente encontrar formas sostenibles de gestionarlos (Maraveas, 2020).

En 2014, la producción global de residuos agroindustriales superó los 3,000 millones de toneladas. Solo en México, 20 cultivos principales —como maíz, caña de azúcar, trigo y café— generaron más de 75 millones de toneladas de residuos (Gutiérrez-Antonio et al., 2020).

Estos desechos representan un costo adicional para los pro-

ductores y un problema ambiental significativo. Por esta razón, cada vez más investigaciones buscan enfocarse en transformarlos en recursos útiles.

El impacto ambiental de la construcción

Desde mediados del siglo XX, el crecimiento económico global ha tenido un alto costo ambiental, en gran parte debido a actividades humanas como la construcción.

Esta industria es una de las más contaminantes:

- Consume entre el 30% y el 40% de la energía a nivel mundial, tanto directamente en la construcción y uso de edificios como indirectamente en la fabricación de materiales.

- Genera entre el 40% y el 50% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, que alcanzan los 38,100 millones de toneladas anuales.
- Utiliza el 40% de arena y grava, el 25% de la madera virgen y el 16% del agua dulce a nivel global.
- Produce el 30% de los residuos sólidos del mundo —unos 2,200 millones de toneladas anuales— (Abd Rashid & Yusoff, 2015; Acevedo Agudelo et al., 2012; Benachio et al., 2020; Tracy & Novak, 2023).

Estos datos reflejan la urgente necesidad de replantear la manera en que construimos, incorporando materiales más sostenibles y procesos más eficientes.

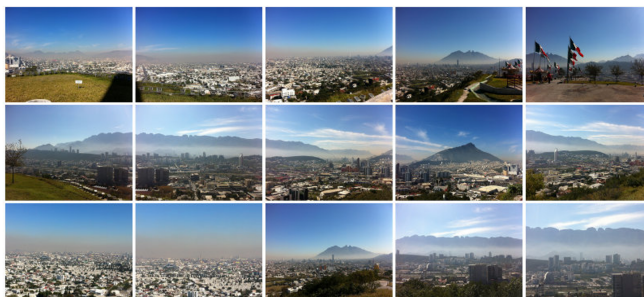
Contaminación en Monterrey: buscando soluciones sostenibles

En el área metropolitana de Monterrey, la contaminación del aire ha afectado significativamente la salud de la población. Entre sus principales causas se encuentran:

- Emisiones de las actividades industriales.
- La gran cantidad de obras de construcción.
- El uso excesivo de automóviles.
- La falta de un sistema eficiente de transporte público.
- La ubicación geográfica de la ciudad, rodeada de montañas que dificultan la dispersión de contaminantes.
- Condiciones atmosféricas -- propias de ciertas épocas del año (Esquivel-Ancona, 2024; Loredó, 2024; Pueblo Bicicletero, 2017).

Ante este panorama, resulta urgente buscar alternativas sostenibles.

Imagen 1.- Panorámica del cielo regiomontano desde el Cerro del Obispedo



Fuente: Imagen tomada de @PuebloBiciclero.

Fotos tomadas del 4 de enero de 2014 a la fecha

nibles, especialmente en el sector de la construcción. Una de ellas es el uso de “concretos verdes”, elaborados a partir de desechos agroindustriales, que permiten reducir el impacto ambiental y dar un nuevo valor a recursos que antes se desperdiciaban.

Desechos agroindustriales: de residuo a recurso

El aumento de la población mundial ha incrementado la produc-

ción agrícola de cultivos como palma, caña de azúcar, maíz, trigo y coco, lo que a su vez genera grandes cantidades de residuos. Estos incluyen todo material sobrante de la transformación de productos agrícolas, como cultivos, frutas, -verduras y productos de origen animal (Khalife et al., 2024).

En México, algunos de los residuos agroindustriales más importantes son:

a) Cáscara de arroz (160.000 toneladas anuales)

Aunque a menudo se subestima, este residuo tiene un gran potencial. El estado de Morelos es uno de los principales productores de arroz en el país (Álvarez Hernández et al., 2018). Entre sus aplicaciones destacan:

- **Combustible de biomasa:** para generar calor y electricidad.
- **Alimento animal:** como -- fuente de fibra dietética.
- **Material de construcción:** mezclado con cemento para fabricar bloques ligeros y económicos.
- **Aislamiento térmico:** útil en paredes y techos.
- **Composta:** para mejorar la fertilidad del suelo (BESTON - GROUP CO., 2025).

b) Bagazo de caña (15 millones de toneladas)

Es el residuo que queda después de extraer el jugo de la caña de azúcar. Tradicionalmente se usa como combustible en ingenios azucareros, pero también puede aprovecharse como:

- Fuente de energía y fertilizante.
- Materia prima para abonos orgánicos y biocombustibles.
- Base para elaborar polímeros biodegradables y alimentos para animales (Aguilar Rivera, 2011; García Culqui et al., 2023).

c) Cáscara de café (1 millón de toneladas aproximadamente)

Representa entre el 30% y 50% de los residuos de la industria cafetalera. Es uno de los materiales más estudiados para su reaprovechamiento:

- **Material de construcción:** ideal para paneles aislantes de sonido y calor.

- **Absorbente natural:** útil para limpiar aguas residuales, como en la remoción de colorantes.

- **Materia prima para polímeros:** gracias a su versatilidad y bajo costo (Yepes & Godoy Pernalet, 2021).

Los principales estados productores de café en México son Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, entre otros (Wong Paz et al., 2013).

Concreto verde: construyendo con menos impacto

Pero, ¿qué es exactamente el **concreto verde**? Según Rosas Díaz et al. (2022), se trata de una mezcla que incorpora materiales lignocelulósicos —como los residuos agroindustriales— y un aglutinante mineral, lo que mejora sus propiedades térmicas y reduce su impacto ambiental.

Este tipo de material contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, ya que:

- Reduce emisiones de CO₂.
- Ahorra recursos naturales.
- Mejora la calidad del aire.

Para que un cemento se considere “verde”, debe cumplir con ciertos criterios:

- Reducir el uso de cemento Portland tradicional.
- Optimizar el proceso de fabricación.
- Aumentar la durabilidad del material.

El objetivo principal es disminuir los gases de efecto invernadero generados por la industria cementera y aprovechar materiales de desecho (CEMEX, 2021; Rodgers, 2018).

Además, el concreto verde ofrece una **resistencia similar al convencional**: más de 27 MPa a los 28 días, y hasta 55 MPa a los 84 días (Bolufer, 2016), lo que lo hace viable para construcción.

Medir el impacto: el ciclo de vida de los materiales

El impacto ambiental de un material de construcción puede evaluarse a lo largo de su **ciclo de vida** (LCA, por sus siglas en inglés), que incluye:

1. **Fase de pre-uso**: extracción de materias primas, manufactura y transporte.

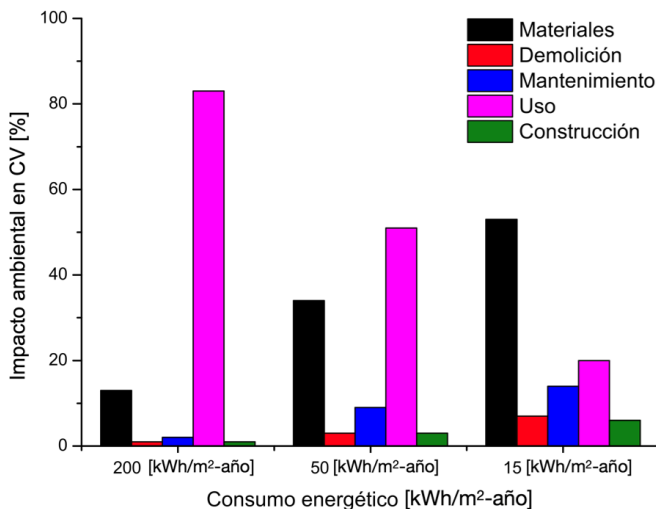
2. **Fase de construcción**: consumo energético durante la edificación.

3. **Fase de uso**: energía operacional y mantenimiento.

4. **Fase final**: demolición y disposición de residuos.

Estudios recientes indican que la **fase de uso** es la que genera mayor impacto, debido al consumo prolongado de energía para electricidad y calefacción. En algunos casos, representa más del 80% del consumo total. Sin embargo, -cuando se reduce el consumo energético anual, la energía incorporada en los materiales —como en el caso del concreto verde— adquiere mayor relevancia.

Figura 2. Impacto ambiental para las diferentes fases de un proyecto, dependiendo de su desempeño energético



Fuente: Elaboración propia

Hacia una construcción más sostenible: el papel de los materiales verdes

El sector de la construcción enfrenta el reto de reducir su impacto ambiental, lo que ha impulsado la investigación de nuevos materiales ecológicos. El uso de **agregados**

vegetales —como residuos agrícolas— es una estrategia clave para fabricar compuestos más sostenibles. Esto permite:

- Preservar recursos naturales.

- Reutilizar residuos agroindustriales.
- Reducir el consumo de energía (Rosas Díaz et al., 2022).

Casos de éxito con concretos verdes en el mundo

One Bryant Park, Nueva York, USA

- **Innovación:** Uso de concreto con ceniza de cáscara de arroz como agregado.
- **Destacado:** Este rascacielos de 55 pisos, sede del Bank of America, obtuvo la certificación **LEED Platino** —la más alta en construcción sostenible— gracias a su uso extensivo de materiales reciclados y prácticas ecológicas innovadoras (Adamson and AAI, 2025).

Figura 3. One Bryant Park, Nueva York, USA



*Fuente. © Copyright 2024
Adamson and AAI desempeño
energético*

Carretera A16 Rotterdam-Dordrecht, Países Bajos

- **Innovación:** Concreto con agregados de cáscara de arroz y paja, combinado con maquinaria 100% eléctrica.
- **Sostenibilidad integral:** Tanto la carretera como su túnel son **energéticamente neutros**. La e-

nergía necesaria se genera mediante paneles solares instalados en el propio proyecto. Además, se incorpora sistemas de iluminación LED, transporte eléctrico y equipos híbridos para minimizar las emisiones de carbono (Van Oord, 2025).

Figura 4. Inicio de la conexión a carretera A16. Países Bajos



Fuente: @A16Rotterdam/X

Y en México, ¿Cómo vamos?

Imagina un concreto más resistente, duradero y amigable con el medio ambiente... ¡elaborado a - partir de nopal! Esto no es ciencia ficción: investigadores del **Instituto Politécnico Nacional (IPN)** en Oaxaca han demostrado que el **mucílago de nopal** —esa sustancia viscosa que se obtiene al cortar esta planta— puede revolucionar la forma en que construimos.

¿Cómo funciona?

Especialistas del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional - (CIIDIR) incorporaron mucílago de *Opuntia ficus-indica* —el nopal común— a mezclas tradicionales de concreto (cemento, arena, grava y agua). Los resultados fueron sorprendentes:

- **En estado fresco:** el concreto fluye mejor y evita que la segregación de los materiales.
- **En estado endurecido:** incrementa su resistencia, reduce su permeabilidad y mejora la protección del acero frente a la corrosión.

Beneficios ambientales

El Dr. Prisciliano Felipe Cano Barrera, líder de la investigación, señala que este desarrollo se enmarca en la búsqueda global del "**concreto verde**": materiales que reduzcan el uso de cemento —cuya producción emite grandes cantidades de CO₂— y que, al mismo tiempo, aprovechen recursos naturales o residuos.

Además del nopal, su equipo investiga el uso de **vidrio molido reciclado** para sustituir parcialmente el cemento o crear agrega-

dos ligeros, lo que permite aligerar las estructuras y mejorar su desempeño como aislantes térmicos y acústicos (Agencia Informativa Conacyt, 2018).

En el ámbito de la innovación y las patentes en México, diversos científicos han enfocado esfuerzos en el desarrollo y producción de materiales con las características de concretos vegetales. Un ejemplo destacable es el trabajo realizado en la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde se desarrolló la patente: "Formulación a base de cemento portland y bioagregados de agave salmiana y su uso como agente de cerramiento", a cargo del Dr. César Antonio Juárez Alvarado, el Dr. David Gilberto García Hernández, el Dr. Felipe Esteban Rosas Díaz y el Ing. José Abelardo Valdez Aguilar.

Esta invención propone una mezcla de cemento Portland -

CPO40R con bioagregados vegetales, principalmente de Agave salmiana, que presenta un peso volumétrico de 1.549 g/cm³, una conductividad térmica de 0.4866 W/mK y una resistencia a la compresión de 8.67 MPa. Estas características lo posicionan como un material prometedor para la fabricación de concreto vegetal y para usarse como material de cerramiento.

Este material mejora su capacidad de aislamiento térmico, lo que lo hace ideal para su aplicación en viviendas. No obstante, su resistencia mecánica —de aproximadamente **8.66 MPa**—, es inferior a la requerida para elementos estructurales como vigas o columnas. Por ello, se recomienda su uso en elementos no estructurales, como muros o paneles, donde se puede aprovechar su excelente desempeño térmico derivado de -

su baja conductividad (Juárez Alvarado et al., 2025)

¿Cómo se elabora el concreto verde? Un proceso en 3 etapas

1. Selección de materia prima

En esta etapa se eligen residuos agrícolas disponibles localmente —como agave, cáscara de arroz,

Figura 5. Agave salmiana, San Luis Potosí, México



Fuente: Fotografía propia

bagazo de caña o cáscara de coco— con el objetivo de reducir las emisiones asociadas al trans-

porte y aprovechar los recursos existentes en cada región.

2. Caracterización del material

Posteriormente, se analizan las propiedades de los residuos selec-

Figura 6. Partículas de agave antes y después de ser secadas en horno



Fuente: Fotografías propias

cionados, tales como humedad,

cenizas, celulosa y otros componentes.

Este proceso se realiza siguiendo normas internacionales, como las establecidas por TAPPI o

Figura 7. Determinación de holocelulosa



Fuente: Fotografías propias

RILEM, lo que permite garantizar la calidad y consistencia del material.

3. Elaboración de la mezcla

En esta fase, se experimenta con distintas proporciones de cemento, agregados vegetales, ceniza volante y otros aditivos, con el fin

de optimizar las propiedades mecánicas y la durabilidad del mate-

rial (Lira Rodríguez, 2023; Rosas Díaz, 2021).

Figura 8. Fabricación de materiales compuestos con bioagregado de A. salmiana



Fuente: Fotografías propias

Figura 9. Cubo de prueba con la mezcla de concreto verde con bioagregado de A. salmiana



Fuente: Fotografías propias

Conclusiones:

Oportunidades y desafíos

- Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU establecen una hoja de ruta clara para avanzar hacia sociedades más sostenibles.
- La crisis climática exige la implementación de alternativas urgentes en la industria de la construcción, uno de los mayores emisores de contaminantes.
- El uso de residuos agroindustriales en "**concretos verdes**"

ofrece ventajas económicas, técnicas y ambientales, lo que los hace viables para aplicaciones como muros, losas y estructuras.

- En México existe aún un amplio potencial para investigar y optimizar el aprovechamiento de estos recursos, lo que abre oportunidades para el desarrollo de proyectos interdisciplinarios que integren la ingeniería, la ciencia de materiales, las ciencias biológicas y la sostenibilidad.

Referencias

Abd Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). "A review of life cycle assessment method for building industry". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>

Acevedo Agudelo, H., Vásquez Hernández, A., & Alejandro Ramírez Cardona, D. (2012). *Sustainability: Actuality and necessity in the construction sector in colombia* (Issue 1).

Adamson and AAI. (2025). *Back to projects One Bryant Park*. <https://www.adamson-associates.com/project/one-bryant-park/>

Agencia Informativa Conacyt. (2018, April 23). "Mucílago de nopal mejora propiedades del concreto". *UNAM Global Revista*.

Aguilar Rivera N. (2011). "Effect of Storing of Sugar Cane Bagasse on Physical Properties from Cellulose for Paper". *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 1, 189–197.

Álvarez Hernández, J. C., Tapia Vargas, L. M., Hernández Pérez, A., Barrios Gómez, E. J., & Pardo Melgarejo, S. (2018). "Estabilidad productiva de líneas avanzadas de arroz grano largo delgado en Michoacán México". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(3), 629–637. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.606>

Benachio, G. L. F., Freitas, M. do C. D., & Tavares, S. F. (2020). "Circular economy in the construction industry: A systematic literature review". *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>

BESTON GROUP CO., LTD. (2025, January 13). *Planta de Carbonización*.
<https://www.bestongrupo.es/planta-de-carbonizacion-de-pirolisis-de-biomasa/>

Bolufer, P. (2016, November 11). *El cemento verde*.
<https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/164549-El-Cemento-Verde.Html>

CEMEX. (2021, October 5). *Ambiciosos objetivos climáticos 2030 de CEMEX validados por estar alineados a la ciencia más actual*.
<https://www.cemex.com/es/w/ambiciosos-objetivos-climaticos-2030-de-cemex-validados-por-estar-alineados-a-la-ciencia-mas-actual>

Esquivel Ancona, E. (2024, February 9). *Pedreras son las principales fuentes de contaminación en Monterrey*.
<https://www.sdpnoticias.com/opinion/pedreras-son-las-principales-fuentes-de-contaminacion-en-monterrey/>

Juárez Alvarado, C. A., García Hernández, D. G., Rosas Díaz, F. E., & Valdez Aguilar, J. A. (2025). *Formulación a base de cemento portland y bioagregados de agave salmiana y su uso como agente de cerramiento* (Patent 428316).

García Culqui, R., Jácome Pilco, C., Guevara Narváez, Lady, & Moreta Guangasi, T. (2023). "Revalorización del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) como residuo importante para la agroindustria". *593 Digital Publisher CEIT*, 8(3), 134–148. <https://doi.org/10.33386/593dp.2023.3.1661>

Gutiérrez Antonio, C., De Lira Flores, J. A., Quiroz Pérez, E., & Martínez Guido, S. Iván. (2020). "Conversión de residuos agroindustriales para la gene-

ración de biocombustibles, productos de valor agregado y bioenergía". *Digital ciencia @uaqro*, Año 13, N° 1, (enero-junio de 2020), 27–35.

Khalife, E., Sabouri, M., Kaveh, M., & Szymanek, M. (2024). "Recent Advances in the Application of Agricultural Waste in Construction". *Applied Sciences*, 14(6), 2355. <https://doi.org/10.3390/app14062355>

Lira Rodríguez, R. (2023). *Efecto de la exposición a diferentes ambientes agresivos en el comportamiento físico y mecánico de materiales compuestos a base de cemento portland y bio agregados de agave salmiana* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Loredo, R. (2024, January 24). *La contaminación en Monterrey es un problema complejo y dos expertos nos explican qué la ocasiona*. https://Animalpolitico.Com/Tendencias/Estilo-de-Vida/Contaminacion-Monterrey-Causas-Soluciones?Rtbref=rtb_32x3av785ueap1vmxa_1714325901937

Maraveas, C. (2020). "Production of Sustainable Construction Materials Using Agro-Wastes". *Materials*, 13(2), 262. <https://doi.org/10.3390/ma13020262>

Pueblo Bicicletero. (2017). *Monterrey, ciudad de las montañas... y del smog (FOTOS)*. <https://Pueblobicicletero.Org/Monterrey-Ciudad-de-Las-Montanas-y-Del-Smog-Fotos/>

Ritchie, H., & Roser, M. (2024, February 16). *Half of the world's habitable land is used for agriculture*. OurWorldinData.Org

Rodgers, L. (2018, December 17). La enorme fuente de emisiones de CO₂ que está por todas partes y que quizás no conocías.

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>

Rosas Díaz, F. E. (2021). *Desarrollo de un material compuesto de matriz a base de cemento portland con agregado vegetal lignocelulósico de agave* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Rosas Díaz, F., García Hernández, D. G., Mendoza Rangel, J. M., Terán-Torres, B. T., Galindo Rodríguez, S. A., & Juárez Alvarado, C. A. (2022). "Development of a Portland Cement-Based Material with Agave salmiana Leaves Bioaggregate". *Materials*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/ma15176000>

Tracy, B., & Novak, A. (2023, January 16). *Cement industry accounts for about 8% of CO₂ emissions. One startup seeks to change that.* <https://www.cbsnews.com/news/cement-industry-co2-emissions-climate-change-brimstone/>

United Nations. (2025, January 3). *Objetivos de desarrollo sostenible.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Van Oord. (2025). *A16: Vía verde de enlace para la región de Róterdam.* <https://www.vanoord.com/en/projects/a16-green-road-link-rotterdam-region/>

Wong Paz, J. E., Guyot, S., & Rodríguez, R. (2013). "Alternativas Actuales para el Manejo Sustentable de los Residuos de la Industria del Café en México". *Acta Química Mexicana*, 5(10). <https://www.researchgate.net/publication/260714119>

Yepes, W. U., & Godoy Pernalet, M. J. (2021). "Revisión-Aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del café en la elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica" ("Review-Use of residues from the coffee agro-industry in the manufacture of polymer matrix composite materials"). *PROSPECTIVA*, 19(2). <https://doi.org/10.15665/rp.v19i2.2590>

4

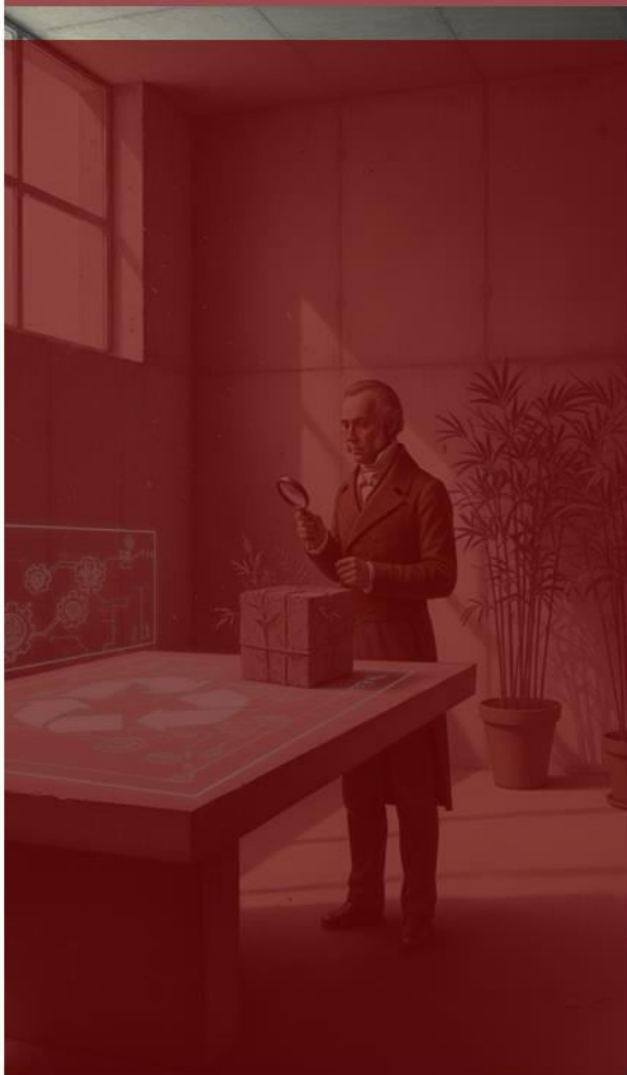
0

U
octubre de 1824

L
M

A

CAPÍTULO



Economía circular en la industria de la construcción

José Manuel Mendoza Rangel ¹

Jorge Humberto Díaz Aguilera ²

Capítulo del libro conmemorativo por el 200 aniversario de la patente del Cemento Portland

Resumen

La economía circular se posiciona como una estrategia fundamental para transformar la industria de la construcción, un sector históricamente caracterizado por elevados niveles de extracción de recursos naturales, generación de residuos y emisiones de gases de efecto invernadero. Frente al modelo lineal tradicional, basado en la lógica de *extraer–producir–desechar*, la economía circular propone un enfoque sistémico y regenerativo orientado a cerrar los ciclos de los materiales, optimizar su uso y prolongar su vida útil. Este paradigma promueve, además, la eficiencia energética, la innovación tecnológica y el rediseño de los procesos constructivos.

El presente capítulo aborda, desde una perspectiva integral, los fundamentos de la economía circular y su aplicación en la cadena de valor del cemento y el concreto, materiales clave en la edificación contemporánea. Se analizan las oportunidades de circularidad a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de estos materiales, incluyendo la incorporación de subproductos

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León. Email: jose.mendozarn@uanl.edu.mx
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5896-6006>

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León. Email: jorge.diaz@uanl.edu.mx
Orcid: orcid.org/0000-0003-4435-7485

industriales como adiciones cementantes, el uso de agregados reciclados y el diseño de soluciones constructivas reversibles y adaptables

Asimismo, se examinan herramientas de apoyo como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y metodologías digitales como el modelado BIM, que permiten mejorar la trazabilidad de los recursos.

A través del análisis de casos internacionales y regionales, se identifican prácticas exitosas en la implementación de principios circulares en proyectos reales, al tiempo que se reconocen las principales barreras técnicas, normativas y culturales que limitan su adopción a gran escala. De igual forma, se reflexiona sobre el papel estratégico que pueden desempeñar tanto el sector público como el privado en la generación de marcos regulatorios e incentivos que impulsen la transición hacia la circularidad.

Finalmente, se destaca que la adopción de un enfoque de economía circular en la construcción contribuye de manera directa al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en lo relativo a la acción climática, la innovación industrial y la sostenibilidad urbana. En este sentido, el capítulo propone una reconfiguración de los modelos de producción y consumo en el sector, posicionando al concreto y al cemento no solo como materiales de alto impacto ambiental, sino también como elementos clave en la construcción de un futuro regenerativo, resiliente y sostenible.

Introducción

La industria de la construcción ha sido, históricamente, uno de los motores fundamentales del desarrollo económico y urbano a nivel global. No obstante, también con-

stituye una de las actividades humanas con mayor impacto ambiental. En este contexto, el sector desempeña un papel determinante, ya que, de acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2020), la construcción —tanto en su vertiente comercial como residencial— es responsable del 39% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) asociadas al consumo de energía. Esta cifra incluye no solo la edificación de nuevas construcciones, sino también la operación de las existentes, a través de sistemas como calefacción, iluminación y otros servicios energéticos.

Adicionalmente, la industria de la construcción concentra un consumo significativo de recursos naturales. Se estima que utiliza aproximadamente el 40% de los materiales pétreos (grava, arena, entre otros), el 25% de la madera, el 16% del agua y el 40% de la

energía primaria, además de generar cerca del 40% de los residuos totales de un país. Por su parte, la industria del cemento contribuye con aproximadamente el 9% de las emisiones globales de CO₂ en comparación con otros sectores industriales (Interempresas, 2020; PNUMA, 2020; Rosas-Díaz et al., 2022). A nivel de edificación, se ha estimado que la construcción de estructuras mediante métodos tradicionales puede representar entre el 40% y el 60% de la huella ambiental total, dependiendo de sus características específicas. En términos generales, estos procesos implican un uso intensivo de combustibles fósiles y una elevada demanda energética, principales fuentes de emisión de CO₂. En el caso de la vivienda residencial, construida con métodos convencionales, se calcula que cada metro cuadrado edificado genera entre 441 y 561 kg de CO₂, variación que depende de las prácticas cons-

tructurivas y de los materiales empleados (Interempresas, 2020).

En el contexto nacional, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2020) reportó que la producción total de residuos asociados a la industria de la construcción alcanzó los 10.5 millones de toneladas en México. A ello se suman las aportaciones de otros sectores industriales, como la metalúrgica (264 kton/a), la agroindustria (52 Mton/a), los lodos provenientes del tratamiento de agua (32 Mton/a) y la industria minera (270 Mton/a). Cada uno de estos residuos conlleva implicaciones ambientales, económicas y de salud pública: desde la afectación de ecosistemas y la supresión de la vida vegetal y animal, hasta costos asociados a su disposición y riesgos sanitarios derivados de la proliferación de bacterias, insectos o la contaminación de alimentos

(SEMARNAT, 2020; Díaz Aguilera et al., 2021).

A pesar de este panorama, es importante señalar que numerosos subproductos industriales pueden ser valorizados, acondicionados y reutilizados como materias primas en la producción de materiales de construcción bajo esquemas circulares. De la misma manera, existen materiales regionales —como arenas volcánicas, puzolanas naturales, materiales calcáreos y arcillas— con potencial para integrarse en estos procesos.

Sin embargo, en México no se dispone de una recopilación sistematizada de información al respecto. Muchas de estas alternativas provienen de investigaciones aisladas que no han tenido continuidad hacia su aplicación práctica.

En este sentido, resulta necesaria la implementación de un proyecto articulador que permita con-

solidar una base de datos nacional, así como promover el mapeo, la caracterización y la evaluación de materiales de construcción circulares con viabilidad a largo plazo.

En esta misma línea, la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) estima que en México se generan aproximadamente 17,000 toneladas diarias de residuos de construcción. De este total, el 39% corresponde a material de excavación, el 25% a concreto, el 24% a escombros y el 12% a otros desechos. No obstante, únicamente el 4% de estos residuos es aprovechado nuevamente —3% mediante reciclaje y 1% mediante reúso—, lo que evidencia una baja tasa de valorización de materiales dentro del sector.

Bajo este contexto, la economía circular emerge como un paradigma transformador que ofrece una vía viable y necesaria para reconciliar el desarrollo cons-

tructivo con los límites planetarios. A diferencia del modelo económico lineal tradicional —basado en la secuencia de “extraer, fabricar, -usar y desechar”—, la economía circular plantea un sistema restaurativo y regenerativo por diseño, en el cual los materiales y productos se mantienen en uso el mayor tiempo posible, y los residuos se reintegran al ciclo productivo mediante estrategias de reutilización, reciclaje, reparación o remanufactura.

Aplicada a la industria de la construcción, esta perspectiva implica replantear integralmente los procesos de diseño, edificación, operación y desmantelamiento de infraestructuras y edificaciones. En este marco, el cemento y el concreto, materiales emblemáticos del sector, desempeñan un papel dual: por un lado, son responsables de una proporción significativa de las emisiones globales de carbono; por otro, presentan un alto po-

tencial de circularidad mediante estrategias como la sustitución de clínker, la incorporación de residuos industriales como adiciones puzolánicas, el reciclaje de agregados, el diseño modular y desmontable, así como la captura de CO₂ en productos cementicios.

El presente capítulo tiene como objetivo analizar, desde una perspectiva integral, las oportunidades, los desafíos y las líneas de acción para la implementación efectiva de los principios de la economía circular en la industria de la construcción.

Para ello, se parte de los fundamentos conceptuales de la circularidad, que posteriormente se contextualizan en el ciclo de vida del cemento y el concreto. Asimismo, se presentan casos de estudio, avances tecnológicos y marcos normativos relevantes, - junto con una reflexión crítica sobre el papel de los actores

públicos, privados y académicos en este proceso de transformación.

En este sentido, la presente contribución no solo busca ofrecer un panorama actualizado del estado del arte en materia de economía circular aplicada al sector, sino también fungir como una guía orientativa para investigadores, profesionales y tomadores de decisiones comprometidos con la construcción de una industria más eficiente, resiliente y sostenible.

Economía lineal versus Economía circular

a) Modelo lineal tradicional

La economía lineal ha constituido el modelo predominante en la industria de la construcción desde los inicios de la Revolución Industrial. Este enfoque se sustenta en una lógica extractiva que sigue la secuencia: *extraer* → *producir* → *consumir* → *desechar*. Si bien este

modelo ha permitido un crecimiento económico acelerado, - también ha generado consecuencias ambientales significativas, tales como el agotamiento de recursos no renovables, la degradación de los ecosistemas y el incremento descontrolado de emisiones de gases de efecto invernadero.

En el caso específico del cemento y el concreto, el modelo lineal se manifiesta en la explotación intensiva de materias primas como la caliza, la arcilla y los agregados naturales, así como en procesos productivos altamente demandantes de energía. A ello se suma la limitada valorización de los residuos de demolición y de los subproductos industriales.

Como resultado, se configura una industria intensiva en el consumo de materiales y en la generación de emisiones, donde los residuos no se reincorporan al ciclo productivo, sino que son destinados en vertederos o escom-

breras (Geyer, Jambeck y Law, 2017).

b) Fundamentos de la economía circular

En contraste, la economía circular plantea un modelo de carácter regenerativo, restaurativo y sistémico. Su premisa central consiste en mantener los materiales en uso durante el mayor tiempo posible, maximizando su valor y minimizando tanto la generación de residuos como la extracción de recursos vírgenes.

Este enfoque implica el diseño de productos y procesos que faciliten la reutilización, la reparación, el reciclaje y la valorización de los materiales al término de su vida útil.

De acuerdo con la Ellen - MacArthur Foundation (2019), la economía circular se estructura a partir de tres principios fundamentales:

1. Eliminar los residuos y la contaminación desde el diseño.
2. Mantener productos y materiales en uso.
3. Regenerar los sistemas naturales.

Aplicados a la industria de la construcción, estos principios se traducen en estrategias como el ecodiseño, el uso de materiales reciclados, la prefabricación modular, el diseño orientado a la deconstrucción y la planificación de ciclos de vida prolongados para edificaciones y sus componentes.

En términos operativos, la economía circular en la construcción incorpora una serie de lineamientos clave:

- Rediseñar los sistemas constructivos para facilitar el desmontaje, la durabilidad y múltiples ciclos de uso.
- Reducir el consumo de materias primas vírgenes.

- Reutilizar componentes constructivos y estructuras existentes.
- Reciclar materiales al final de su vida útil.
- Recuperar valor mediante la reincorporación de residuos industriales.
- Regenerar los ecosistemas a través de soluciones basadas en la naturaleza y el uso de materiales de bajo impacto.

Este cambio de paradigma no solo redefine la relación entre economía y medio ambiente, sino que también abre oportunidades para el desarrollo de nuevos modelos de negocio, la generación de empleo verde y la innovación tecnológica en la industria de la construcción.

Cemento, concreto y circularidad

La implementación de los principios de la economía circular en el

sector cementero y del concreto representa una de las estrategias más prometedoras para mitigar el impacto ambiental de la construcción sin comprometer la funcionalidad estructural ni la durabilidad de los materiales.

En la figura 1 se presenta un esquema de los principales indicadores de circularidad a considerar dentro de este enfoque.

Esta sección analiza la aplicación de dichos principios a lo largo del ciclo de vida del cemento y el concreto, con énfasis en el uso eficiente de los recursos, el diseño orientado a la reutilización y el cierre de los ciclos productivos - mediante la valorización de los residuos.

a) Optimización del uso de recursos

Uno de los pilares fundamentales de la economía circular aplicada al cemento y al concreto es la opti-

mización en el uso de los recursos naturales, tanto en las etapas de extracción como en los procesos de transformación.

En este sentido, las plantas cementeras y las plantas dosificadoras de concreto se configuran como espacios estratégicos de intervención, donde es posible mejorar la eficiencia en el consumo de materias primas, energía y agua.

La sustitución de materias primas vírgenes por subproductos industriales —como cenizas volantes, escorias de alto horno o residuos cerámicos— ha demostrado una reducción significativa de las emisiones asociadas a la producción de clínker, el componente más intensivo en carbono del cemento Portland. Además, estas alternativas contribuyen a la conservación de recursos no renovables y a la prolongación del ciclo de vida de los materiales, al evitar que dichos residuos sean dispuestos en vertederos (Habert et al., 2020).

Figura 1. Esquema de indicadores de circularidad en la industria de la construcción

INDICADORES DE CIRCULARIDAD EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Medición cuantitativa del desempeño circular de un edificio a través de tres indicadores clave.



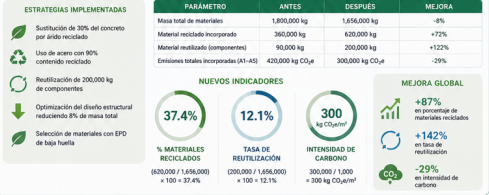
1. ¿QUÉ MEDIMOS?



2. RESULTADOS - EDIFICIO DE 1,000 m² (ESCENARIO ACTUAL)



3. ESCENARIO DE MEJORA CIRCULAR



¿POR QUÉ ES IMPORTANTE?
Incrementar el reciclaje y la reutilización de materiales reduce la extracción de recursos vírgenes y disminuye significativamente las emisiones de carbono incorporado.

METODOLOGÍA Y REFERENCIAS
• Evaluación de Ciclo de Vida (ACV) conforme a ISO 14064:44
• Evaluación ambiental de edificios según EN 15978 (A1-A5)
• Uso de EPDs, Inventarios de materiales y modelos BIM
• Registro de componentes reutilizados (pasaportes de materiales)



Fuente: Infografía elaborada con datos propios de circularidad (porcentaje de materiales reciclados, tasa de reutilización y huella de carbono por m²), generada con apoyo de ChatGPT (OpenAI). Las métricas se basan en metodologías de ACV conforme a ISO 14040 y EN 15978 y criterios de indicadores de economía circular (Upcyclea, Nordic Report 2024).

Por su parte, el uso de agregados reciclados provenientes de escombros de demolición, en sustitución de agregados naturales, representa otra oportunidad relevante dentro de este enfoque. Si bien su aplicación en elementos estructurales aún enfrenta desafíos técnicos y normativos, su uso en obras secundarias, elementos prefabricados y componentes no portantes se encuentra ampliamente documentado y validado (Chertow y Park, 2016).

b) Diseño de ciclos de vida prolongados

El diseño de estructuras con una visión de ciclo de vida extendido constituye otro eje estratégico de la economía circular. Este enfoque implica anticipar, desde la etapa de proyecto, las condiciones que permitan prolongar la vida útil de los sistemas constructivos y facilitar su futura reutilización.

Entre las principales estrategias, se incluyen:

1. Diseño modular y desmontable, que facilita la recuperación y reutilización de elementos estructurales al término de su vida útil en una edificación.
2. Uso de componentes prefabricados, que reduce la generación de residuos en obra, mejora el control de calidad y favorece la reutilización de elementos.
3. Mantenimiento predictivo, apoyado en herramientas como sensores y gemelos digitales, que permite monitorear el desempeño del concreto y extender su vida útil mediante intervenciones oportunas.

c) Captura y reutilización de CO₂

En años recientes, diversas tecnologías emergentes en la industria cementera han comenzado a integrar sistemas de captura y alma-

cenamiento de carbono (CCS), así como procesos de mineralización del CO₂ en productos cementicios. Estos avances permiten replantear el papel del cemento dentro del ciclo productivo, posicionándolo no solo como un emisor de carbono, sino también como un potencial sumidero en el marco de la economía circular.

Diseño para la circularidad

Uno de los principios clave de la economía circular en el sector de la construcción es el diseño intencional orientado a facilitar la reutilización, el desmontaje y el reciclaje de estructuras y materiales al final de su vida útil. Este enfoque se incorpora desde las etapas iniciales del proyecto arquitectónico y estructural, permitiendo extender el ciclo de vida de los productos y reducir significativamente la generación de residuos.

El diseño para la circularidad no se limita al ámbito técnico, sino que integra también dimensiones logísticas, económicas y sociales, que posibilitan la valorización eficiente de los materiales en ciclos sucesivos de uso, sin comprometer su desempeño.

a) Adaptabilidad y reutilización

La adaptabilidad implica concebir edificaciones y sistemas estructurales capaces de modificarse, ampliarse o desmontarse en función de nuevas necesidades utiitarias. Para ello, se diseñan elementos intercambiables, de fácil desensamble, mediante el uso de uniones mecánicas o reversibles que eviten la degradación del material durante su retiro.

Este enfoque permite no solo la reutilización de componentes estructurales —como vigas, columnas o paneles— en nuevos proyectos, sino también la reduc-

ción de la demanda de materiales nuevos y la disminución del volumen de residuos generados. En este contexto, la interoperabilidad entre elementos provenientes de distintas obras y fabricantes se configura como una condición deseable (Crowther, 2005).

b) Diseño modular y prefabricación

La construcción modular representa una oportunidad significativa para impulsar la circularidad en el sector. Además de reducir los residuos generados en obra, los sistemas modulares permiten:

1. Facilitar el montaje y desmontaje sin afectar la integridad estructural.
2. Reutilizar módulos completos o componentes en nuevos proyectos.

3. Optimizar los procesos constructivos mediante métodos más limpios y eficientes.

Asimismo, la prefabricación industrializada favorece la trazabilidad de los materiales, el control de calidad y la incorporación de insumos reciclados en condiciones más controladas que en obra abierta (Allwood et al., 2010).

c) Reparabilidad y reciclabilidad

El diseño circular incorpora, desde su origen, la posibilidad de reparar los componentes con el fin de extender su vida útil. Esto implica la selección de materiales durables, la accesibilidad a elementos clave y la facilidad de desmontaje para intervenciones futuras.

De igual manera, se prioriza el uso de materiales compatibles con procesos de reciclaje mecánico o químico, facilitando su reincorporación al ciclo productivo. En com-

plemento, se promueven técnicas de demolición selectiva que permiten la separación de materiales desde su origen, incrementando su potencial de valorización en aplicaciones posteriores.

Innovaciones tecnológicas

El avance tecnológico se ha consolidado como un catalizador clave para la adopción de prácticas circulares en la industria de la construcción. Desde el desarrollo de nuevos materiales con menor huella ambiental hasta la implementación de sistemas digitales para la gestión del ciclo de vida, la innovación está reconfigurando la manera en que se diseñan, construyen, operan y rehabilitan las infraestructuras.

Estas tecnologías no solo permiten optimizar el uso de recursos y energía, sino que también facilitan la trazabilidad de materiales, promueven la descentralización de

la producción y fortalecen la integración de cadenas de valor más sostenibles.

a) Nuevos materiales

La innovación en materiales constituye una de las áreas más dinámicas en el contexto de la economía circular. Entre los desarrollos más relevantes destacan:

- Cementos con bajo contenido de clínker, como el LC3 (caliza-calcin-clínker), capaces de reducir hasta en un 40 % las emisiones de CO₂ en comparación con el cemento tradicional.
- Geopolímeros, materiales cementantes alternativos sin clínker, elaborados a partir de residuos industriales como cenizas volantes o escorias.
- Aditivos reciclables, que mejor

ran las propiedades mecánicas del concreto sin comprometer su capacidad de reutilización.

- Agregados reciclados, provenientes de residuos de demolición, procesados para cumplir con estándares técnicos en elementos no portantes y, en ciertos casos, estructurales.

Estas innovaciones no solo disminuyen el impacto ambiental del sector, sino que también generan nuevas oportunidades económicas basadas en la valorización de residuos.

b) Digitalización y BIM

La adopción del *Building Information Modeling* (BIM) ha transformado de manera sustancial la planificación, el diseño y la gestión de edificaciones e infraestructuras. En el marco de la economía circular, BIM permite:

- Simular el ciclo de vida completo de un edificio.
- Planificar estrategias de desmontaje y reutilización de componentes.
- Desarrollar bancos digitales de materiales con trazabilidad integrada.
- Evaluar impactos ambientales desde la fase de diseño mediante herramientas como el *Life Cycle Assessment* (LCA).

Asimismo, el uso de gemelos digitales (*digital twins*) posibilita el monitoreo en tiempo real de los activos construidos, lo que favorece intervenciones más eficientes en mantenimiento, rehabilitación y gestión operativa.

c) Automatización y manufactura aditiva (impresión 3D)

La manufactura aditiva aplicada a la construcción, particularmente la

impresión 3D con concreto reciclado o cementos alternativos, representa una de las innovaciones más disruptivas del sector. Esta tecnología permite reducir desperdicios, acortar tiempos de ejecución y generar geometrías optimizadas que minimizan el uso de material.

De forma complementaria, la automatización de procesos en plantas de producción mejora la precisión en las mezclas, optimiza el consumo de recursos y favorece entornos productivos más limpios, aspectos fundamentales dentro de un modelo circular.

Casos de estudio

La transición hacia una economía circular en la industria de la construcción requiere, además de fundamentos teóricos, evidencia empírica que demuestre su viabilidad técnica, económica y ambiental. A continuación, se presen-

tan dos casos emblemáticos que ilustran la aplicación práctica de estrategias circulares en contextos reales.

a) Concreto Holcim ECOPact (Francia)

Holcim ha desarrollado una línea de concretos de bajo carbono denominada ECOPact, que permite reducir hasta en un 30 % la huella de carbono, comparado con concretos convencionales (figura 2). Esta solución ha sido implementada en diversos proyectos en Francia, en alineación con los compromisos climáticos del sector de la construcción.

Entre sus principales características destacan:

- Uso de materiales cementantes suplementarios, como cenizas volantes y escorias.
- Incorporación de agregados reciclados de alta calidad.

Figura 2. Presentación del producto Ecopact de Holcim



Fuente: Camión mezclador con concreto ECOPact de bajo carbono. Tomado de Holcim (s.f.).

- Trazabilidad de componentes para facilitar su reutilización futura.

Adicionalmente, la variante - ECOPact+ integra tecnologías de captura de carbono y promueve la producción local del concreto, reduciendo así las emisiones asociadas al transporte. Este caso demuestra cómo una empresa global puede reconfigurar su modelo - productivo hacia la sostenibilidad

sin comprometer el desempeño técnico del material.

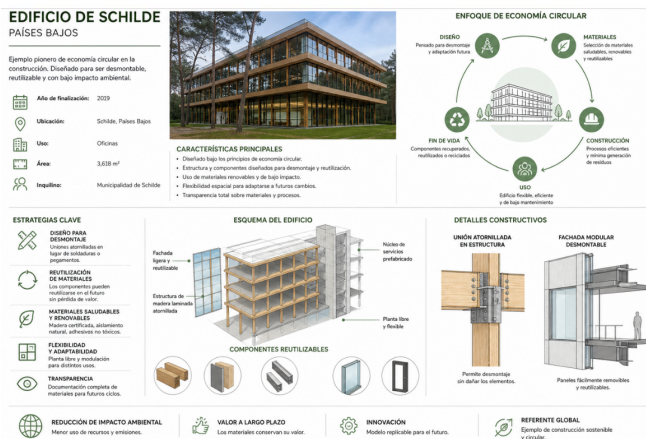
b) Renovación del edificio De Schilde (Países Bajos)

Ubicado en La Haya, el edificio De Schilde constituye un referente internacional en materia de renovación circular. Originalmente concebido como una fábrica de telecomunicaciones, fue transformado en un centro de innovación y emprendimiento bajo criterios de

sostenibilidad y reutilización estructural.

- Incorporación de elementos prefabricados reutilizados y sistemas de acabados desmontables.

Figura 3. Infografía que describe la recuperación del edificio De Schilde



Fuente: Infografía de Indicadores de Circularidad en Construcción (reciclado, reutilización, carbono por m²), generada por IA sobre datos proporcionados por el usuario, mayo 2026

Entre las principales estrategias implementadas incluyen:

- Conservación de la estructura original, evitando emisiones derivadas de la demolición y re-construcción.

- Implementación de sistemas de climatización y eficiencia energética basados en sensores inteligentes.

Este proyecto se ejecutó en el marco de una política nacional de

economía circular que promueve la renovación adaptativa de edificaciones existentes en lugar de su reemplazo total, con el propósito de preservar recursos y dinamizar el entorno urbano. En la Figura 3 se presenta una infografía descriptiva de este ejemplo.

Rol del sector público y privado

La transición hacia un modelo de economía circular en la industria de la construcción requiere una articulación efectiva entre los sectores público y privado. Ambos cuentan con capacidades, responsabilidades e instrumentos diferenciados que, al integrarse de manera estratégica, pueden acelerar significativamente la adopción de prácticas circulares.

a) Políticas y acciones clave

La literatura internacional, junto con diversas experiencias nacio-

nales, ha permitido identificar un conjunto de políticas y acciones prioritarias para cada sector:

Sector público

- Incentivos fiscales para materiales reciclados: La implementación de subsidios, exenciones impositivas y esquemas de compras gubernamentales preferentes puede incrementar la competitividad de los productos reciclados frente a los materiales convencionales.
- Normativas de diseño circular: El desarrollo de regulaciones que promuevan la desmontabilidad, la trazabilidad y la reciclabilidad desde las etapas iniciales del proyecto resulta fundamental para incorporar la circularidad en el diseño.
- Inversión en infraestructura de reciclaje: La creación de plantas

de clasificación, sistemas de logística inversa, centros de acopio y mecanismos de certificación de agregados reciclados constituye una base operativa indispensable para cerrar ciclos materiales.

Sector privado

- Desarrollo de productos reciclables y reutilizables: Las empresas constructoras y proveedoras deben orientar sus procesos hacia materiales con ciclos de vida extendidos y propiedades regenerativas.
- Alianzas para la innovación: La colaboración con universidades, centros de investigación y *startups* permite escalar soluciones tecnológicas y fortalecer la transferencia de conocimiento.
- Modelos de negocio basados en la circularidad: Estrategias como el alquiler de materiales, plataformas de intercambio de residuos valorizables o servicios de -

mantenimiento predictivo representan nuevas oportunidades económicas dentro de un enfoque circular.

b) Gobernanza colaborativa y responsabilidad compartida

El éxito de la economía circular en la construcción depende de la consolidación de marcos de gobernanza multinivel que involucren a actores locales, nacionales e internacionales. En este contexto, las plataformas de colaboración público-privada resultan esenciales para consensuar estándares, coordinar inversiones y dar seguimiento al cumplimiento de objetivos estratégicos.

Barreras y retos

A pesar del creciente interés y de la implementación parcial de estrategias de economía circular en la industria de la construcción, per-

sisten barreras estructurales, culturales y económicas de considerable magnitud que dificultan su adopción generalizada. Superar estos obstáculos requiere una acción coordinada entre los sectores público, privado y académico, así como el desarrollo de políticas públicas integrales.

a) Principales barreras en la industria de la construcción

Entre las barreras más relevantes identificadas en la literatura especializada y en experiencias internacionales destacan:

1. Marcos regulatorios insuficientes y complejos: La normativa vigente, en muchos casos, no incentiva ni facilita el uso de materiales reciclados. La ausencia de estándares claros, certificaciones y estímulos fiscales reduce su competitividad frente a los materiales vírgenes.

2. Altos costos iniciales: La transición hacia modelos circulares implica inversiones en tecnologías, capacitación y reconfiguración de cadenas de suministro, lo que representa una limitante significativa, especialmente para pequeñas y medianas empresas.

3. Resistencia al cambio: La cultura tradicional del sector, sumada a la percepción de riesgos técnicos y económicos, genera inercias institucionales que dificultan la adopción de soluciones innovadoras.

4. Falta de infraestructura de reciclaje y logística inversa: La limitada disponibilidad de plantas de tratamiento, centros de acopio y sistemas logísticos eficientes impide la implementación efectiva de esquemas circulares, particularmente en regiones periféricas o proyectos de menor escala.

b) Oportunidades derivadas del abordaje de barreras

La superación de estas limitaciones no solo facilita la transición hacia la circularidad, sino que también abre oportunidades relevantes para el sector:

- Generación de empleos verdes en nuevos nichos de mercado.
- Incremento en la resiliencia de las cadenas de suministro.
- Fortalecimiento de la reputación corporativa, mediante la adopción de criterios ESG - (*Environmental, Social and Governance*).

Contribución al cambio climático y a los ODS

La economía circular aplicada al sector de la construcción tiene un impacto directo en la mitigación del cambio climático. Al priorizar la reutilización, el reciclaje, el redi-

seño de materiales y la eficiencia en el uso de recursos, este enfoque permite reducir significativamente las emisiones de CO₂ asociadas a la producción y disposición de materiales, particularmente en el caso del cemento y el concreto.

De acuerdo con la *Ellen - MacArthur Foundation* (2019), la adopción de estrategias circulares en sectores intensivos en recursos podría disminuir entre un 30 % y un 40 % las emisiones globales de carbono hacia el año 2050, consolidándose como una herramienta clave en los procesos de descarbonización de la industria.

a) Impactos positivos de la economía circular

La implementación de prácticas circulares en la construcción contribuye de manera significativa a diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

- Mitigación del cambio climático:
 - Reducción del uso de combustibles fósiles en los procesos productivos.
 - Disminución en la extracción de materias primas no renovables.
 - Menor generación de residuos y emisiones a lo largo del ciclo de vida de las edificaciones.
- Contribución a los ODS:
 - ODS 9 – Industria, Innovación e Infraestructura: Impulsa el desarrollo de soluciones tecnológicas sostenibles.
 - ODS 11 – Ciudades y Comunidades Sostenibles: Promueve entornos urbanos resilientes y regenerativos.
 - ODS 12 – Producción y Consumo Responsables: Optimiza
- el uso de recursos y minimiza los residuos.
- ODS 13 – Acción por el Clima: Apoya el cumplimiento de compromisos de reducción de gases de efecto invernadero.
- Crecimiento económico sostenible:
 - Fomenta nuevas cadenas de valor basadas en la circularidad.
 - Incrementa la competitividad y la resiliencia del sector ante la escasez de recursos.
 - Promueve modelos de negocios innovadores centrados en servicios y eficiencia material.

Conclusiones

La transición hacia una economía circular en la industria de la construcción no constituye únicamente una alternativa deseable, sino una

necesidad impostergable frente a los desafíos ambientales, económicos y sociales del siglo XXI. En un sector responsable de una proporción significativa de las emisiones globales, del consumo intensivo de recursos naturales y de la generación masiva de residuos, la adopción de principios circulares representa una vía sólida para reducir impactos negativos y, simultáneamente, generar valor sostenible.

A lo largo de este capítulo se ha evidenciado que el cemento y el concreto, tradicionalmente asociados a una elevada huella ambiental, poseen un importante potencial transformador cuando se integran en modelos circulares. Este potencial abarca desde la optimización del uso de recursos en su producción, pasando por el diseño modular y desmontable, hasta la reutilización de materiales y la incorporación de tecnologías

digitales como BIM y la manufactura aditiva.

No obstante, esta transformación enfrenta barreras de carácter estructural, regulatorio y cultural que demandan una respuesta articulada entre los sectores público y privado. Por un lado, las políticas públicas deben establecer marcos normativos e incentivos que promuevan la circularidad; por otro, el sector empresarial debe adoptar modelos de negocio innovadores, resilientes y ambientalmente responsables.

En este contexto, la economía circular se posiciona como un componente estratégico para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente en lo relativo a la acción climática, la eficiencia en el uso de recursos, la innovación industrial y la sostenibilidad urbana. No se trata únicamente de una estrategia ambiental, sino también de una oportunidad para impulsar el cre-

cimiento económico, generar empleo verde y fortalecer la competitividad del sector.

Más allá de su dimensión conceptual, la economía circular en la construcción se consolida como una decisión técnica medible. La evidencia presentada demuestra que la circularidad no es un atributo superficial del proyecto, sino una propiedad cuantificable del sistema constructivo.

Actualmente es posible evaluar indicadores como el porcentaje de materiales reciclados, las tasas de reutilización y la intensidad de carbono por metro cuadrado, así como integrar herramientas como el análisis de ciclo de vida (ACV) desde las etapas iniciales del diseño.

En este sentido, el desafío principal ya no radica en la generación de conocimiento, sino en la voluntad de incorporarlo de manera sistemática en la práctica pro-

fesional. La industria de la construcción posee una particularidad distintiva: cada edificación puede concebirse como un banco de materiales para el futuro. Cada elemento diseñado para desmontarse, reutilizarse o adaptarse constituye una decisión que trasciende la vida útil inmediata del proyecto y se proyecta hacia futuras generaciones de edificaciones. Diseñar bajo principios circulares implica, por tanto, anticipar los procesos de transformación que ocurrirán en horizontes temporales de largo plazo.

Este cambio de paradigma supone abandonar la concepción del edificio como un objeto terminado y adoptar una visión sistémica en la que se entiende como un ensamblaje temporal de recursos. Bajo esta lógica, el reto es fundamentalmente cultural y profesional:

- Que el proyectista integre indicadores de circularidad con el

mismo rigor con el que evalúa el desempeño estructural.

- Que el constructor documente materiales y procesos con la misma precisión con la que controla volúmenes de obra.
- Que el desarrollador reconozca la circularidad no como un costo adicional, sino como un activo estratégico de largo plazo.
- Que la normativa y la academia consoliden métricas comunes que permitan comparar, evaluar y escalar soluciones circulares frente a modelos convencionales.

La economía circular en la construcción no se consolidará únicamente a través de proyectos emblemáticos, sino cuando sus principios se integren de manera

cotidiana en la práctica del sector. La experiencia analizada demuestra que la circularidad se define - desde las primeras decisiones de diseño y se valida mediante datos a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto.

En última instancia, la invitación que plantea este capítulo es clara: no se trata únicamente de diseñar edificaciones más duraderas, sino de concebirlas como sistemas capaces de transformarse de manera eficiente a lo largo del tiempo. En esa capacidad de adaptación y reconfiguración reside, en gran medida, la verdadera sostenibilidad del entorno construido.

Referencias

Allwood, J. M., Ashby, M. F., Gutowski, T. G., & Worrell, E. (2010). "Material efficiency: A white paper". *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 352–381. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.002>

Chertow, M. R., & Park, J. (2016). "Scholarship and practice in industrial symbiosis: A curated review". En J. M. F. Johnson, S. B. Geela, & A. Ignasi (Eds.), *Routledge handbook of political ecology* (pp. 47–88). Routledge.

Crowther, P. (2005). "Designing for disassembly: Themes and principles". *Environment Design Guide*, 30, 1–7.

Díaz Aguilera, J. H., Rodríguez Reyna, S. L., Flores Vélez, L. M., & Domínguez, O. (2021). "Improvement of mechanical behavior of rubber–cement mortars by catalytic hydration". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33, 04021282. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000389](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000389)

Eberhardt, L. C. M., Birkved, M., & Buser, M. (2020). "Barriers and strategies toward circular construction practices". *Journal of Cleaner Production*, 263, 121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>

Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*.

European Commission. (2020). *Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). "Production, use, and fate of all plastics ever made". *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Ghaffar, S. H., Corker, J., & Fan, M. (2018). "Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution". *Automation in Construction*, 93, 1–11.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries". *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>

Holland Circular Hotspot. (2021). *Public-private collaboration for circular built environment*.

Holcim. (2022). *Circular economy: Building new from the old*.

Holcim France. (2024). *Driving circular construction with ECOPact recycled*. <https://holcim.fr/en>

Interempresas. (2020). *Cada metro cuadrado construido en edificación residencial supone 441 kg de CO₂*.

<https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/298814-Cada-metro-cuadrado-construido-en-edificacion-residencial-supone-441-Kg-de-CO2.html>

International Organization for Standardization. (2020). *ISO 20887:2020: Sustainability in buildings and civil engineering works—Design for disassembly and adaptability*.

Jensen, T. (2022). *De Schilde, The Hague: Circular construction*. <https://www.circuloconstruction.nl>

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2018). "Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU)". *Ecological Economics*, 150, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>

Meyer, C. (2009). "The greening of the concrete industry". *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601–605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>

PNUMA. (2020). *Emisiones del sector de los edificios alcanzaron nivel récord en 2019*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/emisiones-del-sector-de-los-edificios-alcanzaron-nivel>

Rosas Díaz, F. E., García Hernández, D. G., Mendoza Rangel, J. M., Terán Torres, B. T., Galindo Rodríguez, S. A., & Juárez Alvarado, C. A. (2022). "Development of a Portland cement-based material with *Agave salmiana* leaves bioaggregate". *Materials*, 15(17), 6000. <https://doi.org/10.3390/ma15176000>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos 2020*. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-los-residuos-2020>

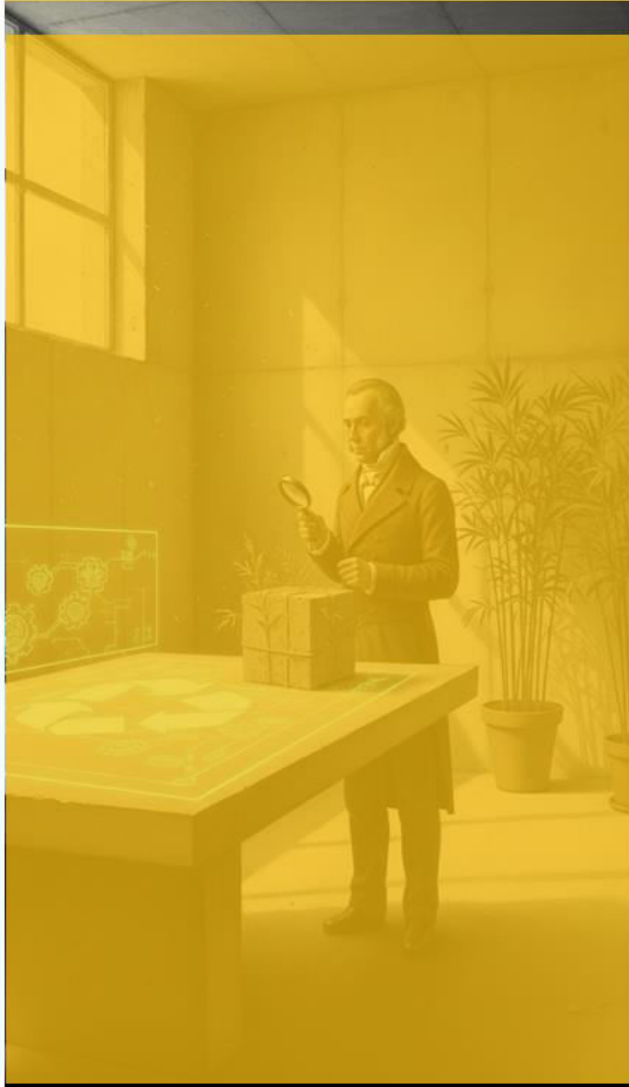
United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*.

United Nations Environment Programme. (2022). *Building sector emissions report*.

United Nations Environment Programme. (2023). *Global status report for buildings and construction*.

Sobre los AUTORES

Joseph Aspaun



Abiel Treviño Aldape

Doctor en Filosofía con orientación en Arquitectura y Asuntos Urbanos por la Universidad Autónoma de Nuevo León. Mención *Magna Cum Laude* en su trabajo doctoral.

Investigador Nivel I del Sistema Nacional de Investigadores (SECIHTI). Su labor científica se centra en la intersección de la "Segregación socioespacial", la "Psicogeografía y los Imaginarios topomorfológicos", extendiendo recientemente su análisis hacia las dinámicas del "Metaverso inmobiliario y la financiarización virtual".

Con una sólida trayectoria en la difusión del conocimiento, ha participado en más de 70 foros nacionales e internacionales, y cuenta con una producción que incluye más de 20 artículos indexados y 33 capítulos de libro, así como diversos artículos de divulgación.

Autor del libro: Monterrey, Agua e Imaginarios Urbanos y coordinador del volumen: Arquitectura y Salud: Aproximaciones analíticas desde la visión de la infraestructura médica.

Actualmente, compagina su labor como evaluador editorial con la docencia, y la dirección y codirección de tesis de posgrado en la UANL, la UNAM y la UdeG.

Efrén Ricardo Robledo Leal

ESTUDIOS: Doctorado en Ciencias con especialidad en Microbiología, Facultad de Ciencias Biológicas, con distinción *Magna Cum Laude* en el Doctorado.

EXPERIENCIA: Biología de hongos, evaluación de susceptibilidad antifúngica de hongos de importancia médica, determinación y caracterización del fenotipo killer en levaduras, evaluación del potencial biocontrolador de levaduras frente a hongos de importancia fitopatogénica, producción de hongos comestibles y medicinales, fabricación de materiales compósitos con materiales ligno-celulósicos y micelio de hongos. Director de la empresa Fungi Monterrey.

PRODUCCIÓN: Participación en 2 proyectos CONACYT: ciencia básica y fronteras de la ciencia. Participación en 3 proyectos PAICYT. 50+ publicaciones científicas. 10 conferencias nacionales. 1 podcast sobre hongos.

FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS: Dirección y co-dirección: 1 estudiante de maestría, 3 estudiantes de doctorado, 15 estudiantes de licenciatura. Participación en comités de tesis: 2 estudiantes de maestría, 6 estudiantes de licenciatura.

PREMIOS Y RECONOCIMIENTOS: SNI Nivel 1 (2017 – actual).

“Reconocimiento a la Responsabilidad Social a Través del Voluntariado, edición 2015”. U.A.N.L., 11 de noviembre de 2015.

Ganador del concurso Ingenio Emprendedor: de la Idea a la Práctica, organizado por la Alianza FIIDEM y el Fondo Sectorial de Innovación FINNOVA (Abril, 2016).

Primer Lugar en el Premio Komenko a la Excelencia Emprendedora 2016, organizado por Komenko Startup Lawyers (Noviembre, 2016).

Primer Lugar, V Encuentro de Jóvenes Investigadores en el Estado de Nuevo León, Área Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, Octubre 2017.

Segundo Lugar, V Encuentro de Jóvenes Investigadores en el Estado de Nuevo León, Área Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, Octubre 2017.

Tercer Lugar, IV Encuentro Interinstitucional de Jóvenes Investigadores, Área de Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, Noviembre 2017.

David Gilberto García Hernández

Es Químico Bacteriólogo Parasitólogo por la Facultad de Ciencias Biológicas, UANL. Doctor en Ciencias con Acentuación en Química de Productos Naturales.

A lo largo de la trayectoria ha dirigido tesis de Licenciatura y Posgrado tanto de la Facultad de Ciencias Biológicas como de la Facultad de Odontología y de Ingeniería Civil.

Cuenta con la publicación de artículos científicos en revistas indexadas y del padrón de SECIHTI, de impacto nacional e internacional, capítulos de libros, así como presentaciones en congresos, obras de difusión y divulgación.

En marzo del 2023 el H. Consejo Universitario de la UANL le otorga el nombramiento de Profesor Ordinario por la Facultad de Ciencias Biológicas.

En febrero de 2024 forma parte del Cuerpo Académico en Formación "Ciencia Experimental de la UANL"; además, en julio de ese mismo año, recibe la distinción de Investigador Nivel I, por parte del SNII para el periodo 2025-2029.

Aldo Rodrigo González Luna

Doctor en Ciencias con acentuación en Manejo y Administración de Recursos Vegetales, cuenta con una licenciatura en Químico Bacteriólogo Parasitólogo por la Universidad Autónoma de Nuevo León y realizó estancias de investigación en el área de Proteínas Vegetales en el Instituto de la Grasa, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en la ciudad de Sevilla, España.

En el ámbito docente es Profesor de Tiempo Completo de la Facultad de Ciencias Biológicas (UANL), para las cátedras de Botánica, Fisiología Vegetal, Fitopatología y Diagnóstico y Control de Enfermedades Vegetales.

Ha fungido como Director de tesis y Asesor en investigaciones académicas relacionadas con el papel de las proteínas vegetales obtenidas a partir de recursos subutilizados con potencial agroalimentario, con el objetivo de generar información que demuestre el papel de estas proteínas impulsando su consideración como una alternativa para ser empleados en la elaboración de alimentos funcionales, los cuales puedan ser utilizados en nutrición especializada.

Recientemente ha comenzado con estudios sobre la importancia actual de la entomofagia, buscando emplear técnicas que permitan obtener beneficios adicionales sobre estos recursos con la finalidad de reducir el impacto actual de la huella de carbono.

Raymundo Alejandro Pérez Hernández

Químico Bacteriólogo Parasitólogo y Doctor en Ciencias con acentuación en Química de Productos Naturales por la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Actualmente se desempeña como profesor investigador en el Departamento de Química de la Facultad de Ciencias Biológicas de la misma institución.

Su trabajo de investigación se enfoca en la biotecnología de productos naturales, área en la que ha publicado diversos trabajos en revistas científicas indexadas y arbitradas, además de participar como inventor en dos desarrollos tecnológicos patentados.

Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores Nivel 1 y cuenta con reconocimiento al Perfil Deseable PRODEP.

David Mizael Ortiz Martínez

Con una formación como Químico Bacteriólogo Parasitólogo en la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, realizó sus estudios de posgrado en la misma dependencia, obteniendo el título de Doctor en Ciencias con acentuación en Química de Productos Naturales.

Desde el 2016 es profesor de tiempo completo en la FCB, UANL y funge como presidente de la Academia de Química a partir del año 2021. En el 2024 se integra al Cuerpo Académico en formación "Ciencia Experimental".

Además de sus actividades académicas, ha participado en diversos proyectos de investigación que han derivado en la publicación de artículos científicos, capítulos de libro, exposición en congresos, talleres y otorgamiento de una patente.

Durante su desempeño profesional ha dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado, en la Facultad de Ciencias Biológicas y Facultad de Odontología de UANL.

Joel Horacio Elizondo Luévano

Profesor de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Es Químico Bacteriólogo Parasitólogo con maestría en Microbiología y doctorados en Química de Productos Naturales y en Enfermedades Tropicales, ambos con mención internacional y distinción Summa Cum Laude.

Su investigación se enfoca en la evaluación biológica de productos naturales y compuestos bioactivos con potencial antioxidante, antimicrobiano, antiinflamatorio y citotóxico, así como en el desarrollo de micro- y nano-partículas para mejorar su biodisponibilidad.

Es autor de más de 60 artículos científicos publicados en revistas arbitradas e indexadas.

Participa activamente en la formación de recursos humanos y en proyectos multidisciplinarios relacionados con microbiología, nanotecnología y farmacología experimental

Michel Stéphane Heya

Doctor en Ciencias con orientación en Biotecnología por el Instituto de Biotecnología de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Su trabajo de investigación se enfoca en el estudio de compuestos naturales, el desarrollo de alternativas terapéuticas basadas en ingredientes bioactivos y el diseño de nanomedicinas para mejorar la biodisponibilidad y eficacia farmacológica.

Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI-Candidato), autor de artículos científicos en revistas internacionales indexadas y editor del libro *Natural Alternatives and Nanotechnology Applied to the One Health Approach* publicado por Springer Nature.

Actualmente se desempeña como profesor e investigador en la Facultad de Salud Pública y Nutrición, de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

José Manuel Mendoza Rangel

Profesor-Investigador Titular de Tiempo Completo y Exclusivo de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León desde 2010.

Ingeniero Civil por la Universidad Veracruzana, con Maestría en Metalurgia y Ciencias de los Materiales por el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y un Master en Innovación en las Técnicas, los Sistemas y Materiales de Construcción (CEMCO 2007) en el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (Madrid, España).

Doctor en Ciencias con Especialidad en Física Aplicada por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida (2009), realizando un posdoctorado de 2009 a 2010. Actualmente es Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación y Lider del Cuerpo Académico Consolidado de "Tecnología del Concreto".

Presidente de la Asociación Latinoamericana de Patología, Control de Calidad y Recuperación de la Construcción - Internacional. Editor Ejecutivo fundador de la Revista ALCONPAT. Miembro del American Concrete Institute desde 2011, miembro del International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures desde 2021, es Secretario de RILEM Latam, miembro y Presidente de la International Concrete Repair Institute, México (ICRI-México) desde 2024. Dirige y co-dirige tesis de posgrado en diversos programas. Autor y co-autor de trabajos científicos publicados en revistas indizadas en el SCI y el JCR con arbitraje estricto, capítulos de libro y en congresos de prestigio nacional e internacional en donde también ha presentado conferencias magistrales.

Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores **Nivel II** y cuenta con el **Reconocimiento a Perfil Deseable** para Profesores de T. C. de **PRODEP**.

Recibió el **premio de investigación UANL 2020** en el área de Ingeniería y Tecnología. También recibió el **premio de "Miembro Fellow 2021"** de **Alconpat Internacional**.

Jorge Humberto Díaz Aguilera

Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Maestro en Ciencias en Metalurgia e Ingeniería de Materiales por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y Doctor en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción por la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Con experiencia en Diseño Eficiente de Economía Circular y la valorización de residuos industriales para materiales de construcción, así como en el desarrollo de impresión 3D de Vivienda Digna, Asequible y Sostenible (ViDAS).

Actualmente Coordina el Grupo de Investigación de Economía Circular para la Construcción Sustentable (GIDECON) y Coordinador de Innovación de Materiales del Centro de Investigación e Innovación de Materiales de la Construcción (CIIMAC) de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL.

Tiene incidencia en áreas como el desarrollo de proyectos de construcción con residuos de construcción y demolición, inspecciones de patologías del concreto, la certificación en el manejo y aprovechamiento integral de residuos industriales conforme a convenios con Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Nuevo León y la NAE-SMA-008-2022, así como la generación de capacitaciones especializadas para la industria.

