

Análisis de factibilidad de bio adaptación del Metabolismo Arquitectónico: del Edificio Máquina al Ser Autótrofo

José Miguel Carranco Muñoz (*)
Jessica Paola Sánchez Moreano (**)

Resumen: El modelo inmobiliario contemporáneo se ancla a una dinámica termodinámica lineal y extractiva, donde el entorno construido opera exclusivamente como un consumidor pasivo de recursos y emisor activo de polución. Ante el inminente agotamiento de este paradigma mecanicista, resulta imperativo trascender la noción estática del “Edificio Máquina” hacia estrategias de bio-adaptación. Este estudio examina la viabilidad técnica y conceptual de la Arquitectura Autótrofa: un metabolismo arquitectónico autosuficiente que busca transformar las edificaciones en sistemas activos, capaces de sintetizar biomasa y participar productivamente en los ciclos urbanos de materia y energía. Se aplicó un enfoque analítico cimentado en la Ecología Funcional, integrando un relevamiento in-situ no destructivo en diversos pisos climáticos y sistematizando los registros espaciales bajo los estándares de interoperabilidad. La aptitud de los especímenes se determinó evaluando sus rasgos funcionales clave, tabulados según el tesoro de la base de datos global TRY, permitiendo traducir el comportamiento biológico en requerimientos prestacionales de ingeniería. Como resultado, se identificaron y catalogaron 17 géneros de organismos autótrofos pioneros (líquenes, musgos, microalgas y cianobacterias) con excepcional resiliencia física. El cruce de variables determinó que la bio-integración estructural exige el desarrollo de morteros bio-receptivos con porosidad abierta optimizada para retener agua capilar y facilitar el anclaje de rizoides, estableciendo parámetros para biofachadas y materiales autorreparables. Se concluye que la integración de organismos autótrofos en las envolventes arquitectónicas es técnica y biológicamente factible, instaurando un ciclo de vida circular y desmineralizado que redefine los componentes constructivos como infraestructuras regenerativas vivas.

Palabras clave: arquitectura autótrofa – metabolismo arquitectónico – sustratos bio-receptivos – bio-adaptación – economía circular – ecología funcional

[Resúmenes en inglés y portugués en la página 76 y 77]

(*) (**) Ver CV de José Miguel Carranco Muñoz y Jessica Paola Sánchez Moreano en página 77

Introducción

Los modos de habitar del ser humano han cambiado y evolucionado a medida que el intelecto y el desarrollo tecnológico lo han permitido. A medida que evolucionó la humanidad, pasamos de vivir en refugios naturales como cuevas y cavernas, pasando por el desarrollo de envoltentes por medio del uso de fibras y membranas naturales como las que se aplican en las yurtas y otros diversos refugios de civilizaciones nómadas, hasta llegar a nuestros días donde mucha de la población se concentra en edificios de alta implicación tecnológica, de mucha mayor densidad constructiva y de gran escala. De la misma forma el consumo de recursos y el impacto ambiental generado sobre el entorno natural es proporcional tanto a la cantidad de habitantes como a la dimensión de los asentamientos humanos, siendo las grandes metrópolis los nodos de concentración de mayor uso de recursos naturales.

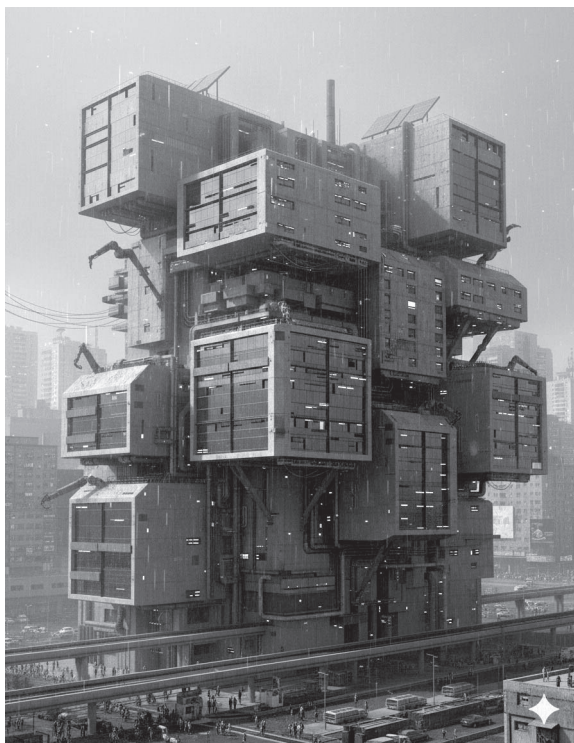


Figura 1. La máquina de habitar.

Nota. Imagen generada mediante el modelo de inteligencia artificial Gemini, 2026.

Un punto histórico primordial en esta evolución de las formas de habitar, las revoluciones industriales que marcaron una evolución técnica y tecnológica acompañada también de grandes cambios sociales (Eren et al., 2025). Esto incide directamente en los modelos de desarrollo y crecimiento económico generando la transición hacia la denominada “máquina de habitar”, definida como un modelo orientado a la eficiencia mediante la industrialización y estandarización del espacio, pero condicionado por una alta demanda energética y una saturación de los sistemas de redes (Banham, 2020). Esta concepción, consolidada a inicios del siglo XX, priorizó la explotación de recursos no renovables sobre la integración ecosistémica.

El concepto de Le Corbusier, *une machine-à-habiter*, definió originalmente la vivienda como una herramienta de precisión orientada a la eficiencia operativa, de ahí que se desarrollen incluso conceptos funcionales como las “ciudades dormitorio”, que se puede entender como un asentamiento urbano de carácter principalmente residencial que carece de una dinámica económica propia destinada a emplear a su población económicamente activa y que normalmente están subordinadas a una metrópolis o a un nodo industrial cercano, hacia el cual se dirigen diariamente sus habitantes por motivos laborales y productivos (Mumford, 2014). Estos modelos e ideas materializadas desde el siglo XX, buscó además que además de promover la eficiencia y la productividad, se buscaba generar condiciones de habitabilidad más adecuadas para el ser humano. No obstante, la institucionalización de la Bauhaus y el Estilo Internacional —promovidos por figuras como Gropius y Mies van der Rohe— terminaron por imponer una estética de acero y cristal que, en gran medida, omitió las variables biológicas y climáticas del entorno. De acuerdo con Banham, al revisar la obra de Le Corbusier, si bien la casa fue concebida como una máquina para vivir, su lógica de producción industrial negó sistemáticamente el ciclo vital de la materia, priorizando un aislamiento mecánico sobre la integración termodinámica (Banham, 2020).

Hacia finales de la década de 1960, la disciplina arquitectónica integró conceptos provenientes de la Cibernética (Wiener, 2019) y la Teoría General de Sistemas (von Bertalanffy, 1968/2015). En este punto, el edificio dejó de ser percibido como un objeto estático para ser comprendido como un nodo de flujos. En la misma década, aparece el movimiento Metabolista en la *World Design Conference* de Tokio, cuya premisa fundamental sostuvo que las ciudades y edificios no debían ser entidades estáticas, sino sistemas dinámicos capaces de crecer, perecer y regenerarse mediante procesos análogos a los biológicos (Lin, 2010). En este contexto, Kenzo Tange introdujo la noción de megaestructura como un eje cívico —ejemplificado en su plan para la bahía de Tokio— cuyo funcionamiento emulaba una columna vertebral a la que se anclaban unidades habitacionales móviles. En esta misma lógica podemos mencionar otros ejemplos relevantes, por ejemplo, Kisho Kurokawa, que en 1977 desarrolló el concepto de “capsularidad”, proponiendo células habitacionales intercambiables y autónomas que desafiaban la rigidez tectónica tradicional, un concepto que ha trascendido incluso hasta nuestros días (Trudelle, A., & Zhang, F., 2020).

Desde la perspectiva de bioadaptación, la crítica contemporánea sostiene que la “máqui-

na” corbusiana (Le Corbusier., 1923), es por definición, heterótrofa, es decir que su funcionamiento exige y demanda el consumo de recursos externos y genera desechos sin poseer mecanismos de autorregulación interna. Bajo la premisa funcionalista de que “la forma sigue a la función”, la alteración de los requerimientos programáticos derivaba en la obsolescencia técnica del objeto arquitectónico, obligando a su demolición al final la vida útil, generando un ciclo de vida incompleto, puesto que se edifica, se usa y se desecha, pero el desecho perdura, en muchos casos si bien se pueden reciclar o reutilizar algunos de sus componentes, el manejo y disposición de los escombros sigue siendo a día de hoy uno de los mayores problemas ambientales que enfrentamos. Esta dinámica evidentemente representa un comportamiento opuesto al de los sistemas vivos, los cuales exhiben resiliencia y plasticidad funcional, con un ciclo de vida cerrado: nacer, crecer, desarrollarse, morir: convertirse en biomasa o biodegradarse.

Christopher Alexander (1964), en su obra *Notes on the Synthesis of Form*, propuso que el diseño debe responder a subsistemas interconectados, estableciendo los fundamentos de lo que actualmente se denomina arquitectura paramétrica, biofílica e incluso con referencia a la temática biocomputacional (Menges, 2017). Esta visión aspira a que la arquitectura alcance un estado de **homeostasis** o equilibrio dinámico, emulando la definición de organismo vivo propuesta por von Bertalanffy (1968/2015), donde la materia fluye constantemente a través de un sistema que mantiene su estructura.

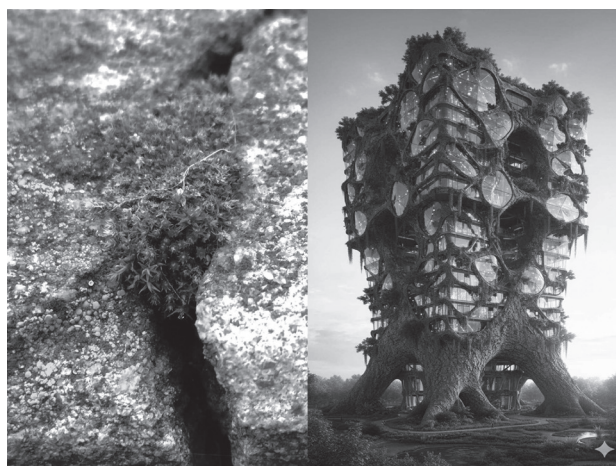


Figura 2. Similitud de musgo de familia Byrum con modelo de propuesta de arquitectura autótrofa. **Nota.** Imagen de la derecha fue generada mediante el modelo de inteligencia artificial Gemini, 2026.

Un organismo autótrofo se define como aquel capaz de sintetizar su propio alimento a partir de sustancias inorgánicas simples, como el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O), es decir la base la cadena trófica (Chapin III et al., 2011). En consecuencia, frente a este legado histórico racional y funcionalista, se formula la propuesta conceptual de un modelo con capacidad de bioadaptación, autorregulación y consumo eficiente de recursos, a la que hemos definido como la Arquitectura autótrofa. Este concepto se inspira en el metabolismo y características biológicas de organismos capaces de sintetizar su propio alimento a partir de sustancias inorgánicas y fuentes de energía externa como la radiación solar, que en muchos casos son los habitantes más humildes del planeta. Esta investigación engloba y teoriza el modelo de una arquitectura evolucionada, que plantea la creación de sistemas constructivos y de instalaciones en edificaciones que sostengan su propio metabolismo energético y material, incluso se plantea la idea de los “seres arquitectónicos”. El objetivo del presente estudio es precisamente analizar la factibilidad conceptual, tecnológica y científica de esta propuesta de bioadaptación mediante la identificación de especies biológicas y tecnologías emergentes que faciliten dicha transición metabólica.

Con este enfoque, se determinó que la edificación debe dejar de funcionar con elevada carga de consumo de energía no renovable y de combustibles fósiles, mediante la captura activa hiper eficiente de energía. A diferencia de la “máquina” cerrada, la propuesta concibe la edificación como un sistema abierto que intercambia materia y energía con su entorno de manera continua. En consecuencia, los elementos tectónicos tradicionales —como los muros— son reinterpretados como membranas o “pieles” inteligentes encargadas de regular intercambios térmicos, hídricos y químicos. Habría que mencionar que tal como pasó con las revoluciones industriales, la potencial aplicación de este concepto edificatorio implicaría también un cambio en el concepto de habitar y principalmente de las demandas de recursos en las acciones vitales.

Métodos

La presente investigación es de carácter multidisciplinario, abarca temáticas teóricas conceptuales y de investigación en campo, por ello se definió que es fundamental establecer ejes de estudio a partir de factores tecnológicos como la biofabricación y el análisis del comportamiento de organismos autótrofos, específicamente líquenes, musgos, microalgas y cianobacterias. Con este enfoque se busca que los datos recolectados apunten de manera científica y técnica la propuesta de viabilidad de un metabolismo arquitectónico dual, capaz de producir biomasa útil y generar energía limpia de forma concomitante (Pérez-Gómez & Aranda, 2022).

El estudio se desarrolló mediante una metodología mixta estructurada en dos ejes fundamentales: el análisis del estado del arte y el estudio de campo multirregional. En la primera fase, se realizó una revisión sistemática de literatura especializada para determinar la exis-

tencia de una catalogación oficial bajo la categoría de arquitectura autótrofa. Este proceso implicó la transposición de conceptos técnicos provenientes de la microbiología y la botánica hacia los campos de la biomimética y la biofilia, permitiendo identificar cómo los principios de autosuficiencia biológica pueden ser asimilados por la teoría arquitectónica contemporánea (Pawlyn, 2019).

Paralelamente, se evaluaron innovaciones vigentes en biofabricación, rehabilitación energética y reciclaje de materiales para contrastar la viabilidad de los modelos teóricos con las tecnologías de construcción actuales. El análisis se centró en identificar sistemas en vías de desarrollo que superen la rigidez funcionalista, priorizando aquellos que integran componentes vivos en la envolvente edilicia. Esta revisión permitió comprender que, si bien la tecnología de soporte existe, la catalogación de “autotrofia arquitectónica” requiere un marco normativo y técnico que vincule la eficiencia energética con la producción primaria de biomasa (Armstrong, 2020; Menges, 2017).

En el segundo eje, correspondiente al análisis de campo, se examinó el comportamiento de organismos autótrofos como componentes primarios de la cadena trófica con potencial de generar relaciones ecológicas en entornos urbanos. Para establecer la pertinencia del planteamiento, se identificaron algunos géneros de estos organismos con alta presencia en diversos biomas, tales como líquenes, musgos, cianobacterias y algas. Estos organismos fueron seleccionados por su capacidad demostrada para colonizar sustratos inertes —hormigón, piedra y mampostería—, lo que sugiere una compatibilidad intrínseca con la infraestructura convencional (Pérez-Gómez & Aranda, 2022).

La investigación se realizó en el territorio ecuatoriano debido a su alta biodiversidad y variabilidad de pisos climáticos, donde se realizaron observaciones aleatorias en las cuatro regiones del país: Costa (Santo Domingo y Manabí), Sierra (Pichincha, Tungurahua, Imbabura y Chimborazo), Amazonía (Napo y Pastaza) e Insular (Galápagos). A pesar de las marcadas diferencias en parámetros como incidencia de la radiación solar, humedad relativa y altitud, se hallaron similitudes morfológicas y funcionales significativas en los géneros identificados (Mora et al., 2021). Este hallazgo reforzó la hipótesis de que ciertos organismos autótrofos poseen la resiliencia necesaria para actuar como agentes metabólicos en diversos contextos geográficos, fundamentando la viabilidad de una arquitectura bioadaptada a escala nacional.

Dado que este trabajo es un estudio preliminar, la identificación de los organismos autótrofos se realizó mediante consulta de protocolos de índole no destructivo, principalmente estrategias de observación in-situ y la valoración de rasgos funcionales, con base en referencias bibliográficas y bases de datos botánicas (Bungartz, F. et al. 2013; Calatayud, V. et al. 2011). Con estos criterios, se plantea un procedimiento que se alinea con la taxonomía clásica y con el análisis de potencial biotecnológico para la adaptación arquitectónica. Los datos recogidos se tabularon en fichas de identificación de rasgos, estructuradas con referencia en las bases de datos TRY (Katge, J. et al. 2020). Esto permitió transformar de mane-

ra más comprensible las observaciones descriptivas cualitativas en categorías funcionales, facilitando la comparación directa entre el comportamiento biológico de los organismos observados y las necesidades funcionales del metabolismo arquitectónico.

Resultados

Los resultados del análisis de los tres ejes planteados sostienen la idea conceptual de vincular la forma arquitectónica con la función metabólica, de modo que las geometrías, envolventes y estructuras tengan la capacidad de adaptarse a principios biológicos para propiciar una interacción funcional con los flujos vitales del programa. Los resultados a continuación se muestran a partir del estado del arte y análisis de tecnologías:



Figura 3. Ejemplos de aplicaciones de bio fabricación: BIQ House en Hamburgo, Alemania.

Nota. Adaptado de “SolarLeaf”, de Arup, s.f. (<https://www.arup.com/projects/solarleaf/>).

Estado del Arte y Tecnologías Metabólicas

La revisión de literatura permitió identificar hitos tecnológicos que fundamentan la viabilidad de la arquitectura autótrofa. En primer lugar, se analizaron las **bio-fachadas con microalgas**, destacando proyectos como el *BIQ House* en Hamburgo (anteriormente referenciado en prototipos europeos), donde se verificó la capacidad de los biorreactores para transformar la radiación solar en biomasa y energía térmica. Este sistema funcionó simul-

táneamente como una barrera de control solar dinámico, optimizando la demanda energética del edificio mediante procesos fotosintéticos activos (Pérez-Gómez & Aranda, 2022).



Figura 4. The Growing Pavilion, Eindhoven.

Nota. Adaptado de “Micelio en la arquitectura”, de Punto Sustentable, 2023 (<https://www.puntosustentable.com/2023/07/14/micelio-en-la-arquitectura/>).

En cuanto a la autonomía y la resistencia material, se examinaron conceptos como materiales de resistencia significativa, pero que tengan características de gran resistencia, con módulos de plasticidad y vida útil que les permita perdurar en el tiempo. Específicamente el estudio se enfocó en aquellos con características de memoria y con propiedades auto reparables conocidos también como *self healing materials*. Entre los ejemplos más notables se puede mencionar los **morteros autorreparables** descubiertos en ruinas y monumentos de la antigua Roma, donde varios investigadores confirmaron que el uso de cal permite una reacción química con el CO₂ ambiental, sellando microfisuras de forma natural. Actualmente, esta propiedad se ha tecnificado mediante el desarrollo de materiales *self-healing* que incorporan bacterias del género *Bacillus*, las cuales mineralizan carbonato de calcio para restaurar la integridad estructural del hormigón sin intervención externa (Jonkers, 2011; Menges, 2017).

En cuanto al ámbito de captura y producción de energía, el estudio identificó avances en materiales fotónicos y fotovoltaicos integrados, que permiten la producción de energía incluso en condiciones de baja radiación. Podemos mencionar que varias instituciones a nivel mundial actualmente trabajan en el desarrollo y perfeccionamiento de esta clase de sistemas, podemos mencionar por ejemplo la Asociación Española de la Industria de Semiconductores – AESEMI.

Complementariamente, se verificó la eficacia de superficies tratadas con Dióxido de Titanio (TiO_2) para la fotocatalisis de óxidos de nitrógeno y la inhibición bacteriana. Se determinó que procesos como la carbonatación pasiva del hormigón, tradicionalmente vistos como patologías, pueden ser reinterpretados como mecanismos de secuestro de carbono si se diseñan membranas arquitectónicas con la porosidad adecuada (Folli et al., 2012).

Gestión de Recursos y Biofabricación

La investigación evaluó sistemas de agua autosuficientes, donde la integración de biorreactores anaerobios permitió la transformación de aguas negras en biogás para consumo interno. Este enfoque se alineó con los principios de las *Passive House* y edificios de energía positiva, los cuales no solo redujeron su huella hídrica y energética, sino que generaron un superávit de recursos mediante estrategias de reciclaje y captura de humedad ambiental en climas propicios (Pawlyn, 2019).

En el ámbito de la biofabricación, se observó una transición desde el uso de materias primas inertes hacia materiales de base biológica (*bio-based*). Destacaron las innovaciones con micelios de hongos y aislantes de fibras orgánicas, que ofrecen alternativas de baja energía incorporada. Asimismo, se identificó a la biohidrometalurgia (Jerez, C. A., 2017), como una solución de vanguardia para la recuperación de metales de residuos electrónicos mediante procesos de biolixiviación, permitiendo un ciclo de vida circular y desmineralizado de los componentes arquitectónicos (Adetunji, A. I., et al 2023).

Hallazgos de la Observación de Campo

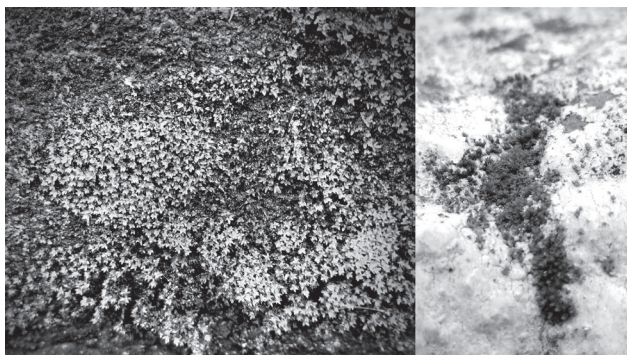


Figura 5. Musgo género *Syntrichia*, Tena, Napo / Musgo género *Syntrichia*, Quito, Pichincha. **Nota.** Tomada por autores, 2026.

El trabajo de campo en las cuatro regiones del Ecuador (Costa, Sierra, Amazonía e Insular) permitió catalogar diversas especies autótrofas con capacidad de colonizar sustratos duros, una de las más comunes y más abundantes en diversos contextos es el género de musgos *Syntrichia* que tal como se muestra en la *Imagen 4*, puede crecer sin mayor diferencia en entornos completamente diferentes como la amazonia y la sierra andina. Se observó que la presencia de musgos y líquenes en estructuras de hormigón son indicadores de una alta bioreceptividad. A pesar de las variaciones altitudinales y climáticas entre localidades como Tena, Quito y Galápagos, se registraron similitudes taxonómicas en los géneros identificados, lo que permitió priorizar organismos específicos para el diseño de fachadas vivas adaptadas al contexto ecuatoriano (Pérez-Gómez & Aranda, 2022).

Identificación y catalogación de especies candidatas

En concordancia con el planteamiento teórico propuesto, el estudio de campo permitió la identificación de candidatos biológicos con aptitud para la colonización de superficies extensas y sustratos inertes. El proceso de selección priorizó organismos que demostraron posibilidades de crecimiento y diseminación en materiales de construcción convencionales —tales como piedra, hormigón, gravas y cerámicos— bajo condiciones climáticas heterogéneas. Esta capacidad de colonización en medios de baja disponibilidad de nutrientes es fundamental para garantizar que la arquitectura bio-receptiva no dependa de sistemas de soporte vital externos, emulando la autonomía de los ecosistemas primarios (Pawlyn, 2019).

Los datos primarios se obtienen inicialmente mediante fotografías de alta resolución y georreferenciación en los sitios de observación. Para buscar rigurosidad científica de los registros visuales, toma como referencia a protocolos validados por Di Cecco et al. (2021), que demuestran estadísticamente la utilidad de plataformas como iNaturalist para identificación de biodiversidad. Cada observación fue documentada asegurando que los metadatos garanticen la trazabilidad espacial y temporal necesaria para el análisis de bioadaptación. Dado que al tratarse de especies algo difíciles de caracterizar a simple vista como musgos pequeños y algas filamentosas y ya que la microscopía de campo no fue posible de realizar, la identificación se limita al nivel de género, evitando asignaciones a nivel de especie que carecieran de verificación molecular o microscópica avanzada. Los musgos fueron clasificados preliminarmente por los patrones de crecimiento.

A partir de los criterios de exclusión e inclusión establecidos, se identificaron diferentes géneros y consorcios biológicos, estos se recopilaron en la matriz de catálogo que se describe en la *Tabla 1*. En función de los géneros de los organismos identificados y de los contextos en las cuales se alojan, se establecieron criterios para determinar el potencial de aplicación física y conceptual coherente con la propuesta de arquitectura autótrofa. Los hallazgos se organizaron sistemáticamente según su localización geográfica y zona biocli-

mática, permitiendo proyectar su implicación técnica en diferentes ámbitos de la edificación como envolventes, aislamientos, entre otros, buscando que estos organismos, al ser bio integrados puedan ser útiles como agentes metabólicos capaces de regular funciones primarias relacionadas con el confort y condiciones de habitabilidad como sería el intercambio de gases, adaptación de propiedades físicas como densidad o inercia térmica de los componentes estructurales (Armstrong, 2020; Pérez-Gómez & Aranda, 2022).

Tabla 1. Localización geográfica, condiciones climáticas y especies identificadas.
Nota. Elaborada por autores, 2026.

PROVINCIA	LOCALIDAD	REGIÓN	CONDICIONES CLIMÁTICAS	ESPECIE IDENTIFICADA / CONSORCIO
Napo	Tena, Misahuallí	Amazonía	Ambiente cálido húmedo tropical / Amazónico perenne	<i>Klebsormidium</i> / <i>Cianobacterias</i> , <i>Syntrichia</i> , <i>Leucobryum glaucum</i>
Pastaza	Puyo	Amazonía	Ambiente cálido húmedo tropical / Amazónico perenne	<i>Klebsormidium</i> / <i>Cianobacterias</i> , <i>Syntrichia</i> , <i>Leucobryum glaucum</i>
Pichincha	Quito	Sierra	Clima de altitud, temperatura variable entre frío húmedo y calor seco con alta radiación solar	<i>Syntrichia</i> , <i>Candelariella</i> , posible <i>Sphagnum</i> / <i>Callitriche</i>
Tungurahua	Ambato	Sierra	Clima de altitud, temperatura variable entre frío húmedo y calor seco con alta radiación solar	<i>Syntrichia</i> , <i>Candelariella</i> , posible <i>Sphagnum</i> / <i>Callitriche</i>
Chimborazo	Riobamba	Sierra	Clima de altitud, temperatura variable entre frío húmedo y calor seco con alta radiación solar	<i>Syntrichia</i> , <i>Candelariella</i> , posible <i>Sphagnum</i> / <i>Callitriche</i>
Imbabura	Ibarra	Sierra	Clima de altitud, temperatura variable entre frío húmedo y calor seco con alta radiación solar	<i>Syntrichia</i> , <i>Candelariella</i> , posible <i>Sphagnum</i> / <i>Callitriche</i>
Tungurahua	Baños	Sierra	Zona de Transición (Andes/ Amazonía). Temperatura variable de templado a cálido, alta humedad	Consortios de líquenes / algas / microalgas / musgos: <i>Chrysothrix</i> , <i>Psilolechia</i> , <i>Lepraria</i>
Galápagos	Isabela	Insular	Costero / Insular. Alta humedad y salinidad	<i>Aspicilia</i> / <i>Diploschistes</i> , <i>Hydropunctaria</i> / <i>Ulva Lactuca</i>
Manabí	Cojimíes	Costa	Costero. Alta humedad y salinidad	<i>Aspicilia</i> / <i>Diploschistes</i> , <i>Hydropunctaria</i> / <i>Ulva Lactuca</i>

Discusión

Al ser una investigación multidisciplinaria que abarca diversas temáticas y formas de abordar los datos recolectados, se ha segmentado la evaluación y análisis de los hallazgos de acuerdo a la pertinencia de los ejes definidos inicialmente.

Como primer punto se abordan los resultados de la temática biológica, iniciando el análisis de la evidencia de campo, que corroboró que los líquenes son los organismos más resilientes, con presencia documentada en todos los pisos climáticos del Ecuador, seguidos por las microalgas (ver Tabla 2). Esta ubicuidad sugiere que la rugosidad y la porosidad del sustrato no son solo características estéticas, sino parámetros críticos para el soporte físico estructural. Para facilitar el crecimiento de colonias como *Candelariella* o *Flavoplaca citrina*, y el desarrollo de rizoides en musgos como *Syntrichia*, se requiere una capa exterior de sustrato o mortero con alta porosidad capaz de atrapar esporas y retener agua en la micro-superficie (Sanmartín, P. et al., 2021; Armstrong, 2020).

Tabla 2. Roles funcionales y especies identificadas en la arquitectura autótrofa.
 Nota. Elaborada por autores, 2026.

ORGANISMO	ROL EN LA ARQUITECTURA AUTÓTROFA	ESPECIE IDENTIFICADA
Biofilm / Algas	Biomasa inicial, fijación de CO ₂ , humedad. Capa primaria de colonización, alta eficiencia fotosintética y capacidad para retener agua.	<i>Klebsormidium</i> sp., <i>Apatococcus</i> / <i>Desmococcus</i> , Cianobacterias epilíticas, <i>Ulva lactuca</i> (alga verde).
Musgos	Aislamiento térmico, retención de agua, filtración de aire. Crean una capa densa que modula la temperatura y la humedad de la fachada.	<i>Syntrichia</i> , <i>Leucobryum glaucum</i> , <i>Sphagnum</i> .
Líquenes	Bioindicadores, protección, intemperización biológica. Suelen colonizar superficies menos estables o con condiciones extremas, protegiendo o alterando lentamente el sustrato.	<i>Aspicilia</i> , <i>Diploschistes</i> , <i>Chrysothrix</i> , <i>Psilolechia</i> sp., <i>Flavoplaca citrina</i> .

En el ámbito de la producción del sistema, la transición hacia una arquitectura autótrofa demanda una transición energética simbiótica. A diferencia del modelo de Le Corbusier, donde el aislamiento era puramente mecánico, el sistema propuesto plantea un muro compuesto: una capa bio-activa exterior para el metabolismo hídrico y una capa interior aislante que protege el núcleo estructural.

En cuanto a cada aspecto específico analizado y propuesto se expone lo siguiente:

Viabilidad y plazo de aplicación: Si bien la arquitectura plenamente autótrofa se proyecta como una meta a mediano y largo plazo, la viabilidad de edificios semi-autótrofos es una realidad técnica actual. El avance hacia un metabolismo arquitectónico completo dependerá de la maduración de tecnologías como la fotosíntesis artificial y la integración sistémica de biomateriales activos.

Desafíos en Procesos Biológicos y Tecnológicos: Se identifica que la principal restricción para la implementación masiva de estos sistemas radica en la ausencia de protocolos estandarizados para el cultivo y reproducción a gran escala de organismos específicos. A pesar de la existencia de precursores tecnológicos, aún se carece de biorreactores integrados con la madurez necesaria para sostener un metabolismo edilicio total. Sin embargo, la brecha entre la experimentación biotecnológica y la aplicación arquitectónica representa una oportunidad crítica para el desarrollo de nuevos protocolos de fabricación que superen las limitaciones de los materiales convencionales (Armstrong, 2020).

Validación mediante el Estudio de Campo: El análisis multirregional en Ecuador validó la factibilidad biológica del concepto, demostrando que los líquenes, las microalgas y los musgos poseen una resiliencia excepcional en condiciones climáticas heterogéneas (González et al., 2017). Esta capacidad de adaptación funcional en diversos pisos climáticos confirma que el uso de estos organismos como agentes metabólicos es técnica y biológicamente viable para el contexto latinoamericano (Huera-Lucero et al., 2020).

Componentes Clave de un Sistema Arquitectónico Autótrofo

A partir de los hallazgos mencionados, se definieron los componentes operativos que integran el modelo de autotrofia arquitectónica, estructurados bajo una lógica de metabolismo circular. Cabe mencionar que, para intentar generar la traducción de los datos biológicos de los organismos estudiados hacia estrategias constructivas o de bio adaptación, se pensó más allá de la taxonomía simple en el concepto de Ecología Funcional (McGill et al.2019). Se analizaron criterios cualitativos para evaluar parámetros como la adaptabilidad, resistencia a la desecación, resistencia a excesos de radiación solar y capacidad colonizadora de los especímenes.

Captura de Energía y Fijación de Carbono

Se analizaron dos mecanismos que los organismos autótrofos para la obtención de energía:

- **Fotosíntesis:** Proceso que utiliza la radiación solar para transformar materia inorgánica en orgánica. El estudio identificó el potencial de integración de plantas, algas y cianobacterias en fachadas reactivas (Armstrong, 2020).
- **Quimiosíntesis:** Aprovechamiento de energía derivada de reacciones químicas de compuestos inorgánicos (bacterias nitrificantes y sulfobacterias), lo cual abre posibilidades para materiales cementicios autorreparables o bioluminiscentes.

La investigación determinó que la captura energética debe trascender los sistemas fotovoltaicos convencionales hacia el uso de paneles de ultra-alta eficiencia y películas fotovoltaicas orgánicas (OPV). Se observó que los organismos autótrofos, particularmente las microalgas, presentan el mayor potencial de eficiencia fotosintética al procesar materia inorgánica, lo que permite proyectar revestimientos fotobiológicos activos (Armstrong, 2020). Complementariamente, se propuso la integración de principios fotocatalíticos mediante el uso de nanodióxido de titanio (TiO₂) para la mineralización de CO₂.

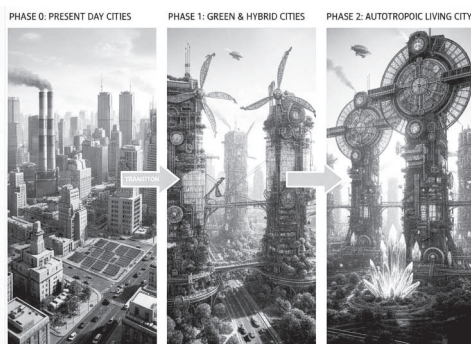


Figura 6. Referencias visuales de posibilidades de evolución del consumo energético desde el modelo actual hacia un modelo futurista que contempla la adaptación de Arquitectura Autótrofa.

Nota. Imagen generada mediante el modelo de inteligencia artificial Gemini, 2026

Metabolismo Hídrico y Ciclos de Nutrientes



Figura 7. Referencias visuales de posibilidades de aplicación de Arquitectura Autótrofa.
Nota. Imagen generada mediante el modelo de inteligencia artificial Gemini, 2026.

El sistema propuesto reconoció la eficiencia de los organismos catalogados en la gestión de recursos hídricos, específicamente en la captación de humedad atmosférica y retención de líquidos. Se planteó que las envolventes no solo operen como límites físicos del elemento construido, sino como reservorios metabólicos que faciliten el reciclaje total de aguas grises y negras mediante biorreactores integrados. Este enfoque permitiría un alivianamiento de la carga de flujos en los sistemas operativos tradicionales, reduciendo la dependencia de infraestructuras externas de saneamiento y almacenamiento convencional (Pawlyn, 2019). Los ciclos se cierran mediante el uso de digestores aerobios y anaerobios que transforman residuos orgánicos en sustratos arquitectónicos aptos para el mantenimiento de las colonias de microalgas y líquenes.

Autorreparación y Memoria Biológica

En cuanto a la integridad estructural, se examinó el potencial del biocemento microbiano y materiales basados en bacterias encapsuladas con capacidad de autoensamblaje ante estímulos ambientales. El análisis de algunos organismos reveló una notable capacidad de intemperación biológica y fijación en sustratos sintéticos, lo que fundamenta el desarrollo de materiales inteligentes con “memoria biológica”. Estos componentes serían capaces de reconfigurarse y reparar patologías constructivas de forma autónoma, sin recurrir a inteligencia externa. Se identificaron, además, comportamientos fototrópicos en ciertas especies de hongos y líquenes, cuya respuesta a la radiación solar permitiría diseñar elementos constructivos dinámicos que reaccionan cinéticamente a las condiciones del entorno (Menges, 2017; Armstrong, 2020).

Tabla 3. Zonas bioclimáticas, condiciones dominantes y especies sugeridas.
Nota. Elaborada por autores, 2026.

ZONA BIOCLIMÁTICA	CONDICIONES DOMINANTES	ESPECIES SUGERIDAS PARA ESTUDIO DE APLICACIÓN
Húmedo Tropical / Amazónico (Tena, Misahuallí, Pastaza)	Alta humedad, lluvias intensas, temperaturas cálidas.	<i>Klebsormidium</i> , Cianobacterias, Musgo <i>Syntrichia</i> y <i>Leucobryum glaucum</i> .
Sierra / Altitud (Quito, Latacunga, Ambato)	Variación térmica, alta radiación UV, menor humedad atmosférica.	Líquenes como <i>Candelariella</i> , <i>Flavoplaca citrina</i> , Musgo <i>Syntrichia</i> .
Costero / Insular (Galápagos, Cojimíes)	Salinidad, alta exposición solar, vientos fuertes.	Líquenes del género <i>Aspicilia</i> o <i>Diploschistes</i> , líquenes acuáticos y algas tolerantes a la sal.

Finalmente cabe mencionar que la versatilidad de los elementos analizados y de los organismos vivos permiten visualizar potenciales aplicaciones y analogías con los elementos tecnológicos también estudiados en el espectro amplio de esta investigación. *Ver tabla 3.*

Conclusiones

A partir del estudio de otras catalogaciones relacionadas en el campo de la biomemética y la biofilia, se concluye que el concepto propuesto de Arquitectura Autótrofa es una idea original, que no se ha desarrollado o acuñado como propuesta o desarrollo tecnológico actual y que, con base en los resultados y el análisis de datos, se establece que es factible generar la fusión simbiótica entre la edificación y el organismo vivo.

El estudio concluyó que el tránsito hacia una era de “seres arquitectónicos” que conformarían el concepto amplio de la arquitectura autótrofa, no es únicamente un desafío técnico, sino un imperativo conceptual y político. La transición requiere una alineación entre las políticas de inversión en I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación) y la práctica proyectual. Al desplazar el enfoque desde la “máquina” hacia el “organismo”, la arquitectura puede constituirse como un ente relacional que no solo habita el ecosistema, sino que contribuye activamente a su regeneración y equilibrio termodinámico.

En cuanto a la catalogación de los organismos identificados, se concluye que los líquenes son los organismos más comunes con presencia en todos los pisos climáticos, las algas les seguían en segundo lugar y los musgos solo en ambientes con mucha humedad. Se concluye que estos organismos son eficientes y funcionales en casi cualquier condición climática y de temperatura, pueden adaptarse de manera mucho más aplicada que otros organismos.

Finalmente, como resultado de la revisión de bibliografía y del estado del arte, se determina que la principal limitante actual no son únicamente las limitaciones de tecnología para bio fabricación o la viabilidad biológica, sino la carencia de protocolos para la reproducción a gran escala de estos organismos y la falta de madurez en los procesos de integración de y aplicación de desarrollos similares en gran escala o en contextos urbanos amplios.

Recomendaciones

A la luz de los hallazgos y las limitaciones identificadas en esta investigación, se proponen las siguientes líneas de acción para futuros desarrollos en el campo de la arquitectura autótrofa:

Se recomienda perfeccionar el protocolo de identificación ya no solo a nivel de género sino de especie y familia de los organismos autótrofos, con prácticas de laboratorio más rigurosas y de nivel mucho más específico.

Se recomienda llevar la investigación teórica a la práctica mediante la construcción de prototipos experimentales a escala real, con el propósito firme de la integración de bio-reactores de fachada y paneles bio-receptivos en edificios existentes. La monitorización *in situ* de estos prototipos permitirá validar el comportamiento térmico y la resiliencia de los organismos en contextos urbanos reales, como Quito o Ambato, proporcionando datos empíricos sobre el ahorro energético frente a sistemas convencionales.

Se recomienda la difusión de proyectos e investigaciones que planteen la colaboración interdisciplinaria entre arquitectos, biotecnólogos y microbiólogos es esencial para transformar la “bio-adaptación” de un concepto artesanal a un sistema constructivo industrializable y normado por códigos como la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

Finalmente, se recomienda a las instituciones académicas y gubernamentales incentivar la inversión en I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación) enfocada al desarrollo de componentes vivos para la edificación. Es necesario integrar estos conceptos en los currículos de las facultades de arquitectura para formar profesionales capaces de diseñar desde una lógica ecosistémica.

Declaración de uso de IA: Para el presente trabajo se utilizó herramientas de IA dentro de las normas éticas académicas en tareas puntuales de soporte como corrección de estilo, ayuda en la traducción del abstract, tabulación de algunos datos y la generación de imágenes referenciales de los conceptos visuales.

Referencias bibliográficas

- Adetunji, A. I., Oberholster, P. J., & Erasmus, M. (2023). Bioleaching of metals from e-waste using microorganisms: A review. *Minerals*, 13(6), 828. <https://doi.org/10.3390/min13060828>
- Alexander, C. (1964). *Notes on the synthesis of form*. Harvard University Press.
- Armstrong, R. (2020). *Designing for the Soft City: Bio-digital architectures and marine environments*. Bloomsbury Visual Arts.
- Arup. (s.f.). *SolarLeaf* [Fotografía]. <https://www.arup.com/projects/solarleaf/>
- Asociación Española de la Industria de Semiconductores. (s.f.). *AESEMI: Asociación Española de la Industria de Semiconductores*. <https://aesemi.org/>
- Banham, R. (2020). *La arquitectura del entorno bien climatizado* (2.ª ed.). Ediciones Infinito.
- Bungartz, F., Yáñez, A., Nugra, F., & Ziemmeck, F. (2013). *Guía rápida de líquenes de las Islas Galápagos* (Versión 3). Fundación Charles Darwin. <https://www.darwinfoundation.org/>
- Calatayud, V., Corrales, J. M., & Hernández, S. (2011). *Guía de los líquenes del Parque Nacional de Monfragüe*. Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones.
- Chapin III, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011). *Principles of terrestrial ecosystem ecology* (2.ª ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>
- Duarte, M. A., Oliveira, R. D., & Lima, F. R. S. (2022). Fotobiorreactores de algas integrados em fachadas prediais: Uma revisão da literatura para guiar trabalhos futuros. En *Anais do 19º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. ANTAC.
- Folli, A., Pade, C., Hansen, T. B., De Marco, T., & Macphee, D. E. (2012). TiO₂ photocatalysis in cementitious systems: Insights into self-cleaning and depollution chemistry. *Cement and Concrete Research*, 42(4), 539-548. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.006>
- Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dolfini, D., Eaffu, S., Cartabia, M., & Savino, E. (2019). Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: A review. *Sustainability*, 11(1), 281. <https://doi.org/10.3390/su11010281>
- González, Y., Aragón, G., Benítez, A., & Prieto, M. (2017). Changes in soil cryptogamic communities in tropical Ecuadorean páramos. *Community Ecology*, 18(1), 11-20. <https://doi.org/10.1556/168.2017.18.1.2>
- Google. (2026). *Gemini* [Modelo de IA generativa]. <https://gemini.google.com/>
- Eren, İ., Dutoğlu, T., & Aktuğlu Aktan, E. Ö. (2025). The evolution of dwelling: A systematic review of turning points, thematic trends and spatial transformations. *Planlama*, 35(3), 467-481. <https://doi.org/10.14744/planlama.2025.03710>
- Huera-Lucero, T., Labrador-Moreno, J., Blanco-Salas, J., & Ruiz-Téllez, T. (2020). A framework to incorporate biological soil quality indicators into assessing the sustainability of territories in the Ecuadorian Amazon. *Sustainability*, 12(7), 3007. <https://doi.org/10.3390/su12073007>
- Jerez, C. A. (2017). Biomining of metals: How to access and exploit natural resource sustainably. *Microbial Biotechnology*, 10(5), 1191-1193. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12792>
- Johnson, D. B. (2018). The evolution, current status, and future prospects of using biotechnologies in the mineral extraction and metal recovery sectors. *Minerals*, 8(8), 343.

- <https://doi.org/10.3390/min8080343>
- Jonkers, H. M. (2011). Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, 56(1/2), 1-12.
- Kattge, J., Bönsch, G., Díaz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., ... & Wirth, C. (2020). TRY plant trait database-enhanced coverage and open access. *Global Change Biology*, 26(1), 119-188. <https://doi.org/10.1111/gcb.14904>
- Kurokawa, K. (1977). *Metabolism in architecture*. Studio Vista.
- Le Corbusier. (1923). *Vers une architecture*. Crès.
- Lin, Z. (2010). *Kenzo Tange and the Metabolist Movement: Urban utopias of modern Japan*. Routledge.
- McGill, B. J., Enquist, B. J., Weiher, E., & Westoby, M. (2006). Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(4), 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.02.002>
- Menges, A. (2017). *Biomimetic design for architecture: 21st century materials and manufacturing*. Thames & Hudson.
- Mumford, L. (2014). *La ciudad en la historia: Sus orígenes, transformaciones y perspectivas* (3.ª ed.).
- Pawlyn, M. (2019). *Biomimicry in architecture* (2.ª ed.). RIBA Publishing. <https://doi.org/10.4324/9780429346774>
- Pérez-Gómez, R., & Aranda, J. (2022). Sistemas fotobiorreactores en fachadas: Hacia una arquitectura de metabolismo autónomo. *Revista Estoa*, 11(21), 45-62. <https://doi.org/10.18537/est.v011.n021.a04>
- Punto Sustentable. (2023, 14 de julio). *Micelio en la arquitectura*. <https://www.puntosustentable.com/2023/07/14/micelio-en-la-arquitectura/>
- Sanmartín, P., Miller, A. Z., Prieto, B., & Viles, H. A. (2021). Revisiting and reanalysing the concept of bioreceptivity 25 years on. *Science of the Total Environment*, 770, 145314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145314>
- Trudelle, A., & Zhang, F. (2020). The reintroduction of Japanese metabolism to sustainable architecture. En *Imaginable Futures: Design Thinking, and the Scientific Method* (pp. 1183-1192). The Architectural Science Association (ANZAScA).
- Von Bertalanffy, L. (2015). *General system theory: Foundations, development, applications*. George Braziller. (Trabajo original publicado en 1968).
- Wiener, N. (2019). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine* (Reissue). MIT Press.

Abstract: The contemporary real estate model is anchored in a linear and extractive thermodynamic dynamic, where the built environment operates exclusively as a passive consumer of resources and an active emitter of pollution. Faced with the imminent exhaustion of this mechanistic paradigm, it is imperative to transcend the static notion of the “Machine Building” towards bio-adaptation strategies. This study examines the technical and conceptual feasibility of Autotrophic Architecture: a self-sufficient architectural metabolism that seeks to transform buildings into active systems, capable of synthesizing biomass and participating productively in urban cycles of matter and energy. An analytical approach grounded in Functional Ecology was applied, integrating a non-destructive in-situ survey across various altitudinal zones and systematizing spatial records under interoperability standards. The suitability of the specimens was determined by evaluating their key functional traits, tabulated according to the thesaurus of the global TRY database, allowing biological behavior to be translated into engineering performance requirements. As a result, 17 genera of pioneer autotrophic organisms (lichens, mosses, microalgae, and cyanobacteria) with exceptional physical resilience were identified and cataloged. The cross-referencing of variables determined that structural bio-integration requires the development of bio-receptive mortars with optimized open porosity to retain capillary water and facilitate rhizoid anchorage, establishing parameters for biofacades and self-healing materials. It is concluded that the integration of autotrophic organisms into architectural envelopes is technically and biologically feasible, establishing a circular and demineralized life cycle that redefines building components as living regenerative infrastructures.

Keywords: autotrophic architecture – architectural metabolism – bio-receptive substrates – bio-adaptation – circular economy – functional ecology

Resumo: O modelo imobiliário contemporâneo está ancorado em uma dinâmica termodinâmica linear e extrativa, onde o ambiente construído opera exclusivamente como um consumidor passivo de recursos e emissor ativo de poluição. Diante do esgotamento iminente desse paradigma mecanicista, torna-se imperativo transcender a noção estática do “Edifício Máquina” em direção a estratégias de bioadaptação. Este estudo examina a viabilidade técnica e conceitual da Arquitetura Autotrófica: um metabolismo arquitetônico autossuficiente que busca transformar os edifícios em sistemas ativos, capazes de sintetizar biomassa e participar produtivamente dos ciclos urbanos de matéria e energia. Aplicou-se uma abordagem analítica fundamentada na Ecologia Funcional, integrando um levantamento in-situ não destrutivo em diversas zonas altitudinais e sistematizando os registros espaciais sob os padrões de interoperabilidade. A aptidão dos espécimes foi determinada avaliando seus traços funcionais-chave, tabulados de acordo com o tesouro da base de dados global TRY, permitindo traduzir o comportamento biológico em requisitos de desempenho de engenharia. Como resultado, foram identificados e catalogados 17 gêneros de organismos autotróficos pioneiros (líquenes, musgos, microalgas e cianobactérias) com excepcional resiliência física. O cruzamento de variáveis determinou que a biointegração

estrutural exige o desenvolvimento de argamassas biorreceptivas com porosidade aberta otimizada para reter água capilar e facilitar a ancoragem de rizoides, estabelecendo parâmetros para biofachadas e materiais autorreparáveis. Conclui-se que a integração de organismos autotróficos nos envoltórios arquitetônicos é técnica e biologicamente viável, instaurando um ciclo de vida circular e desmineralizado que redefine os componentes construtivos como infraestruturas regenerativas vivas.

Palavras-chave: arquitetura autotrófica – metabolismo arquitetônico – substratos biorreceptivos – bioadaptação – economia circular – ecologia funcional

José Miguel Carranco Muñoz: Docente-investigador en la Universidad Técnica de Ambato. Arquitecto de profesión, con estudios de maestría en la Universidad Politécnica de Cataluña (España). Investigación experimental y académica en caracterización y desarrollo de materiales bio-based, diseño de sistemas constructivos, ciclo de vida e impacto ambiental. Participación en proyectos de investigación aplicada e innovación principalmente enfocados en maderables y lignocelulósicos, proyectos de desarrollo social y urbano entre otros. Experiencia profesional en Arquitectura: construcción, diseño arquitectónico, acondicionamientos y consultorías para desarrollo urbano.

Correo: jm.carranco@uta.edu.ec Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9886-4397>

Jessica Paola Sánchez Moreano: Docente-investigadora en la Universidad Regional Amazónica Ikiam. Con estudios de maestría en la Fujian Agriculture and Forestry University – FAFU (China). Investigación experimental y académica en genómica y fisiología vegetal, interacciones planta-microorganismos, ecofisiología e impacto del cambio climático en sistemas agrícolas. Participación en proyectos sobre regulación génica en banano y cítricos, control biológico y biodiversidad amazónica. Experiencia profesional en Ingeniería Agrícola: diseño e implementación de sistemas de riego, cálculos de requerimientos hídricos y capacitación a agricultores en manejo sostenible de nutrición vegetal, suelo y agua.

Correo: jessica.sanchez@ikiam.edu.ec Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0035-6165>