

Arquitectura e Innovación, la universidad como campo de desarrollo

Fernando Córdova Canela
José Guerra Ramírez
(Coordinadores)



**Arquitectura e innovación,
la universidad como campo
de desarrollo**

Arquitectura e innovación, la universidad como campo de desarrollo

Fernando Córdova Canela
José Guerra Ramírez
Coordinadores



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

2025

Esta obra fue evaluada mediante un proceso doble-ciego, por lectores designados por el Consejo Editorial del Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño de la Universidad de Guadalajara.

Primera edición, 2025

D.R. © 2025, Universidad de Guadalajara
Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño
Calz. Independencia Norte 5075,
Huentitán El Bajo, 44250 Guadalajara, Jalisco

ISBN: 978-607-581-907-5

Hecho en México
Made in Mexico

Índice

Introducción	7
<i>Fernando Córdova Canela</i>	
Aplicación de una estrategia de monitoreo ambiental y calidad de aire en aulas educativas para determinar condiciones de habitabilidad	15
<i>Hiram Eduardo Urias Barrera</i>	
Innovación en el proceso de proyectación arquitectónica de edificaciones sustentables	67
<i>José Manuel Ochoa de la Torre</i> <i>Irene Marincic Lovriha</i> <i>Cecilia María Galindo Borbón</i>	
Aproximando un esquema conceptual para el desarrollo de nuevas ciudades y vivienda centrado en la vida rural para el acceso justo al hábitat	119
<i>Fernando Córdova Canela</i>	

Diseño de fachadas contra el calentamiento global.
Exploración de estrategias locales de adaptación y
mitigación en el diseño de las envolventes a través de
experiencias de tesis proyectuales 167

Alejandro Prieto Hoces

Una revisión sobre la Integración de nuevas tecnologías
en la envolvente arquitectónica para lograr los objetivos
del edificio sostenible en zonas áridas extremas 211

José Guerra Ramírez

Introducción

*Fernando Córdova Canela*¹

Con la presente obra se pretende exponer casos de éxito de investigación y vinculación desde dos países latinoamericanos que ejemplifican en buena medida la complejidad y la riqueza del quehacer universitario en Chile y México. En ese sentido, la premisa inicial es articular las visiones que tienen los colaboradores del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (LNVCS) y del Centro de Investigación de Arquitectura, Energía y Sustentabilidad (CIAES) de la Universidad Católica del Norte. Así, el documento tiene como objetivo mostrar la diversidad de conocimientos, capacidades y productos que constituyen una parte de su capital de conocimiento, y que de manera orgánica construye la relación entre la categoría de innovación y la disciplina arquitectónica, tomando a la Universidad como epicentro que detona y promueve dicha relación.

En lo particular, en el documento se busca explorar la relación de la innovación con la disciplina arquitectónica a través de casos particulares de investigación de incidencia, que dan como resultado el desarrollo de conceptualizaciones y modelos teóricos o de prototipos y/o pilotos que son inferidos desde la investigación y que tienen el potencial de ser escalados en proyectos, procesos de maduración tecnológica, y en

¹ Universidad de Guadalajara, México. fernando.cordova@academicos.udg.mx

prospectivas y retos teóricos y prácticos asociados al hábitat sustentable en ambos países, y que constituyen aportaciones de los grupos de investigación que comparten intereses y temas similares en Chile y México. Esto deriva en una muestra del trabajo de investigación que actualmente se realiza en ambos países.

La estructura de la obra, por tanto, se organiza desde experiencias concretas, que van desde: 1) los procesos de resiliencia asociados a los lineamientos para el mejoramiento de la infraestructura educativa a propósito de la pandemia de covid-19, en el capítulo titulado “Aplicación de una estrategia de monitoreo ambiental y calidad de aire en aulas educativas para determinar condiciones de habitabilidad”; 2) el desarrollo de nuevas propuestas edilicias que incorporen de manera detallada y profunda a través del diseño participativo nuevas tecnologías de gestión ambiental racional del agua y la energía, asociado a la generación de nuevos programas académicos, que se desarrollan en el capítulo titulado “Innovación en el proceso de proyectación arquitectónica de edificaciones sustentables”; 3) la conceptualización de estrategias de gestión urbano-territorial para minimizar los impactos negativos en entornos rurales de megaproyectos ferroviarios, tema que se aborda en el capítulo “Aproximando un esquema conceptual para el desarrollo de nuevas ciudades y vivienda, centrado en la vida rural para el acceso justo al hábitat”; 4) la discusión teórica asociada al uso de la construcción social del hábitat como concepto central necesario en una modalidad de investigación para la incidencia en arquitectura, que se desarrolla en el capítulo “Diseño de fachadas contra el calentamiento global”; 5) la integración de dispositivos de control y captación en fachadas como estrategia de sostenibilidad para edificios en zonas de climas áridos extremos, cuyas ideas se exponen en el capítulo “Arquitectura e innovación, su contexto, práctica y conceptualización en vivienda y construcción sustentable en México y Chile. Una revisión sobre la integración de nuevas tecnologías en la envolvente arquitectónica para lograr los objetivos del edificio sostenible en zonas áridas extremas”.

Las experiencias que se describen se distinguen a nivel nacional por diferentes enfoques de interés y desarrollo temático, en el caso mexicano por la discusión multiescalar de las diferentes conceptualizaciones y aplicaciones de la sustentabilidad entre territorio, ciudad y edificio, mientras que en el caso chileno se pone énfasis en maduración de dispositivos tecnológicos que reconfiguren el desempeño energético de la edificación; en ambos casos las experiencias dan cuenta de cómo los equipos de investigación son consecuentes con los enfoques emergentes y de largo aliento que se desarrollan tanto desde el LNVCS como el CIAES, el primero que se diversifica y fortalece a nivel nacional, y el segundo cómo profundiza su liderazgo regionalmente a nivel subnacional.

El LNVCS actualmente se enfoca en esta relación entre investigación para la incidencia desde una perspectiva multiescalar, que prioriza el desarrollo de un equipo que se articula en discusiones simultáneas entre las conceptualizaciones respecto al territorio, la maduración tecnológica, el diseño participativo y la investigación aplicada en edificios, construyendo una alternativa de generación de conocimiento con un enfoque epistémico basado en la complejidad a través del proceso de investigación incidencia de la vivienda y el hábitat en nuestro país.

El CIAES desarrolla consistentemente una línea de trabajo asociada a la transformación del desempeño energético de los edificios en la región norte de Chile, para lo cual tiene una infraestructura tecnológica y de investigación robusta que se constituye como un nicho de innovación, a través de proyectos de investigación y de apropiación social del conocimiento, y que constituyen una alternativa singular en Chile tanto en la práctica de la disciplina arquitectónica como en la generación de nuevo conocimiento y de tecnologías producto de la investigación en arquitectura.

El presente libro parte de un enfoque integral y multidisciplinario, que es indispensable para abordar los complejos desafíos del hábitat en el siglo XXI; en ese sentido, los temas abordados en los capítulos, que incluyen la redefinición de la relación entre la vida rural y el desarrollo, la implementación de un diseño bioclimático informado por datos y

simulaciones, la exploración de tecnologías de enfriamiento amigables con el medio ambiente, y la adopción de metodologías de trabajo colaborativas como el BIM y el diseño participativo, vienen a constituirse como elementos cruciales para la construcción de ciudades y viviendas que sean sostenibles, justas y que prioricen el bienestar de sus habitantes, partiendo siempre de la puesta al centro de lo local y las comunidades. Puede entonces la obra constituirse en principio como un marco analítico inicial que expone la manera en que la investigación que concurre al LNVCS y al CIAES pone énfasis en la co-creación y la integración de saberes locales con el conocimiento científico y tecnológico, en el uso de plataformas colaborativas aplicadas a la construcción, en la aplicación del bioclimatismo y las tecnologías sostenibles, que dan lugar a una alternativa para repensar y transformar el hábitat en México y Chile en principio.

La originalidad de esta propuesta editorial radica en la integración holística y sinérgica de enfoques de investigación que dan cuenta de la experiencia y resultados que actualmente se desarrollan en ambos países: la revalorización de la vida rural como base para un hábitat justo; la aplicación rigurosa del diseño bioclimático informado por datos; la adopción de tecnologías sostenibles de vanguardia en la edificación; y por último la visibilización de la importancia de los procesos de co-creación y co-gestión con la comunidad, que involucran aplicaciones de plataformas digitales tales como el BIM.

La obra parte de la transición de los sistemas sociotécnicos asociados al hábitat como su trasfondo teórico-conceptual. En ese sentido una primera aproximación de la naturaleza de un sistema sociotécnico puede ser la que ofrece *Svennevik (2022)* citando a *Smith et al. (2010)*, en términos de que los sistemas sociotécnicos se refieren a funciones sociales que cubren necesidades básicas tales como la energía, la alimentación, el agua y el saneamiento, la movilidad y la vivienda, por citar algunas. Las transiciones por su parte serán la manera en que un conjunto de nuevas prácticas sociales aparece, se estabilizan y permiten que las prácticas anteriores desaparezcan (*Svennevik, 2022*).

Por lo que la transición de sistemas sociotécnicos en este trabajo, ateniéndonos a las definiciones anteriores planteadas, se traduce en la manera en que los resultados de investigación en las experiencias universitarias contribuyen a la conceptualización y desarrollo de conocimiento necesario para la aparición de nuevas prácticas sociales asociadas a funciones sociales tales como la vivienda y la energía, principalmente.

De la misma forma se considera como clave el concepto de innovación, en particular la innovación tecnológica y social, que a lo largo del trabajo se entiende como un facilitador de los procesos de transición (Kivimaa *et al.*, 2021); sin embargo, las experiencias y aproximaciones teóricas aquí planteadas pueden ser referidas no en términos disruptivos, sino en un sentido de reconfiguración, el cual se orienta a soluciones de problemas locales que permiten detonar ajustes y realineamientos que erosionan progresivamente regímenes² en los cuales compiten varios nichos de innovación (Kivimaa *et al.*, 2021).

Las experiencias universitarias que aquí se exponen se constituyen más como un conjunto de búsquedas para soluciones locales que desde su circunstancia situada, pretenden contribuir a reconfigurar los regímenes nacionales, constituyéndose por sus resultados teórico-conceptuales y prácticos, en nichos de innovación que progresivamente van construyendo, competitiva y/o colaborativamente un proceso propio de transición sociotécnica en vivienda y energía para México y Chile.

La disciplina arquitectónica implica en esta obra la visión de la arquitectura desde un marco epistémico complejo del hábitat, por lo que se considera al hábitat desde dos perspectivas complementarias, la primera respecto a lo que Echeverría (2011) define como *trama relacional* entre seres, espacios y tiempos, y que implica:

“[...] la construcción simbólica, material, funcional y social del espacio, desde las distintas formas del habitar, como campo de encuentro entre

2 Nos referimos a régimen como el lugar donde se establecen prácticas y reglas asociadas que estabilizan a un sistema sociotécnico, y a los nichos como los lugares donde se desarrollan en particular las innovaciones radicales (Geels, 2011).

lo social, la socialidad y la individualidad (sociedad, etnias e individuos)” (Echeverría, 2011: 1).

Y, por otro lado, el hábitat como sistema complejo, desde una perspectiva meta-teórica (Córdova, 2022), refiriendo a criterios lógicos (forma lógica), semánticos (significado y estatuto de verdad), epistemológicos (construcción y alcances del conocimiento), metodológicos (meta-reglas del método), ontológicos (naturaleza de los referentes), axiológicos (conceptos y juicios de valor) y éticos (estándares morales en humanidades, ciencia y tecnología para nuestro caso).

Desde este enfoque el hábitat se explica como la interacción de los seres, espacios y tiempo en sistemas políticos, culturales, económicos, socioecológicos y sociotécnicos (Córdova, 2022), lo cual da la oportunidad de nuevos estándares de generación, aplicación y apropiación de conocimiento desde un enfoque multiactoral que produce resultados transdisciplinarios, dando lugar a nuevas clases de objetos de estudio, por ejemplo objetos socio-eco-tecnológico-culturales, lo que implica retos inéditos en términos de explicación, clasificación y de diseño de procesos y artefactos.

Por lo que los trabajos desarrollados dan cuenta de la construcción de nuevas clases de objetos de estudio desde la arquitectura, apelando, por un lado, a la conceptualización del hábitat como un sistema complejo y, por otro, a las tramas relacionales que permiten el encuentro de lo social, de la socialidad y de la individualidad desde diferentes formas de hábitat y de construir simbólica, material, funcional y socialmente el espacio.

Esperamos que el o la lector(a) de esta obra obtenga una referencia de la riqueza y dinamismo de la investigación con enfoque de incidencia y la contribución hacia la construcción de un proceso propio de transición de los sistemas sociotécnicos que confluyen al hábitat desde las experiencias del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables en México y del Centro de Investigación en Arquitectura, Energía y Sustentabilidad de Chile, como nichos de innovación nacional y subnacional en México y Chile, respectivamente.

Referencias bibliográficas

- Córdova Canela, F. (2022). *Incidencia: Aproximaciones. Presentación PPT*. Guadalajara, Jalisco: Universidad de Guadalajara.
- Echeverría Ramírez, M. C. (2011). *Hábitat del habitar, como territorio étnica, grupal y socialmente significado*. Consultado: 30 septiembre de 2023 en <https://construccionsocialdelhabitat.files.wordpress.com/2011/04/hc3a1bitat-del-habitar.pdf>
- Geels, F. W. (2011). The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24-40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- Kivimaa, P., *et al.* (2021). Moving beyond disruptive innovation: A review of disruption in sustainability transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 3, 110-126. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.12.001>
- Svennevik, E. M. C. (2022). Practices in transitions: Review, reflections, and research directions for a Practice Innovation System (PIS) approach. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 44, 163-184. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2022.06.006>

Aplicación de una estrategia de monitoreo ambiental y calidad de aire en aulas educativas para determinar condiciones de habitabilidad

*Hiram Eduardo Urías Barrera*¹

Resumen

En el marco de la nueva normalidad tras la pandemia de covid-19, es imperante tratar de adaptarse a los nuevos preceptos que conlleva el desarrollar las actividades cotidianas; en este sentido, una de las mayores preocupaciones que se tiene es la que atañe al desarrollo de actividades en el nivel de educación superior; por lo tanto se visualizó la pertinencia del desarrollo de un proyecto de monitoreo ambiental y de calidad de aire, el cual se enfocara en realizar mediciones estacionales de variables ambientales en diversas aulas con características específicas, del Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, de la Universidad de Guadalajara, para dar un seguimiento de las condiciones de habitabilidad de las mismas. Para tal efecto se diseñó una estrategia

¹ Universidad de Guadalajara, México. hiram.urias@academicos.udg.mx

de monitoreo continuo, en fases horarias y días representativos de los periodos de sensación térmica y estacionales regionales, con lo que se obtuvieron datos cuantitativos y cualitativos para la realización de análisis descriptivos, los cuales coadyuvaron a determinar diagnósticos del estado actual de las aulas y gestar con ello información sobre el riesgo ambiental en los mismos; esto con el objetivo de identificar las condiciones de habitabilidad inadecuadas derivadas de una mala calidad ambiental y de aire que pueden propiciar la transmisión de enfermedades respiratorias (i. e. SARS-CoV-2, influenza, gripes, etc.) por un lado, además de afectar los procesos cognitivos entre la comunidad estudiantil del Centro Universitario, como lo son las capacidades aritméticas, verbales, de razonamiento y de concentración, por otro; para tal efecto se estableció el desarrollo de una investigación transversal descriptiva, caracterizada por la toma de muestras con instrumentación ambiental en nueve aulas del CU a lo largo de un ciclo completo (un año). Los resultados demuestran que las particularidades de diseño de las aulas y su relación con otros factores propician un ambiente insalubre que puede generar detrimento en las condiciones de bienestar general de los estudiantes; por otro lado, el trabajo posibilita de manera prospectiva el desarrollo, entre otras cosas, de una serie de criterios que se encaminen a establecer lineamientos de adecuaciones ambientales de los espacios educativos, la oportunidad de estructuración de normativas de diseño ambiental para futuras construcciones de infraestructura institucional y a generar un cambio de paradigma a través de datos e información, de una reconversión en aspectos tales como el desarrollo institucional de infraestructura y programas educativos que se encaminen a un plan de gestión sustentable en la Universidad de Guadalajara.

Introducción

La calidad ambiental y del aire en espacios interiores es un aspecto muy importante para la salud y el bienestar de las personas que habitan o trabajan en ellos, ya que estas características determinan la manera ade-

cuada de realización de actividades en dichas áreas. La calidad del aire interior y ambiente adecuado se refiere a la cantidad de los contaminantes presentes en el aire dentro de un edificio, así como a la conjunción de características higrotérmicas de los espacios que generan condiciones adecuadas de habitabilidad espacial.

Los contaminantes del aire que se encuentran en espacios confinados tienen dos orígenes principales, los cuales pueden ser externos o internos. Dentro de los mismos se tiene el CO, CO₂, material particulado (PM's por sus siglas en inglés), otros que provienen de actividades humanas y sustancias de uso diario, además de los provenientes de los procesos de sistemas de climatización artificial (Environmental Protection Agency [EPA], 2023; Scientific Committee on Health and Environmental Risks [SCHER], 2007).

Por lo tanto es posible determinar que los niveles que sobrepasen los permitidos de este tipo de sustancias pueden provocar efectos negativos en la salud de los usuarios y, por ende, contribuir en la morbilidad de los mismos al provocar en ellos molestias y malestares como: irritación de los ojos y vías respiratorias, cefaleas, agotamiento crónico y problemas respiratorios, alergias y enfermedades respiratorias crónicas, así como un aumento en los niveles de contagios en enfermedades estacionales o en estados de pandemia (Hui, Azhar, Kim, Memish, Oh & Zumla, 2018); pero además de lo anterior, espacios insalubres pueden afectar procesos cognitivos, lo que genera un detrimento en la productividad intelectual de los ocupantes al afectar procesos como: funciones aritméticas, de comprensión verbal y capacidad cognitiva (Kuramochi, Tsurumi & Ishibashi, 2023).

Por lo tanto se puede plantear que debido a la necesidad de mejora, conocer y diagnosticar la calidad del aire interior es imperante desarrollar estrategias y medidas que coadyuven a optimizar los niveles de salubridad de los espacios habitados, pero además comenzar a postular medidas básicas como mantener una buena ventilación, limpiar regularmente, reducir la cantidad de contaminantes en el aire, y evitar el uso de pro-

ductos químicos tóxicos (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE 62.1], 2013).

Al igual que la calidad de aire, existe otro condicionante para determinar la habitabilidad de los espacios, éste es el confort térmico. El confort térmico es una característica fundamental, ya que afecta directamente la calidad de vida de las personas que habitan o utilizan los mismos. Un ambiente térmico adecuado, que proporciona condiciones óptimas, más allá de permitir el desarrollo de actividades en los espacios, genera un impacto en las personas en su salud y el bienestar.

Entendiendo al confort térmico como un estado psicofisiológico de comodidad térmica que experimentan las personas en un ambiente determinado, ya sea interior o exterior. Esta sensación se ve afectada por factores como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire y la radiación térmica. Cuando estos factores están dentro de los rangos adecuados para las personas que se encuentran en el espacio, se crea un ambiente cómodo y saludable que favorece la actividad y el descanso pleno.

En este punto es importante establecer que un ambiente térmico inadecuado puede generar malestar físico, afectar la concentración y el rendimiento, y aumentar el riesgo de enfermedades y afecciones relacionadas con la exposición a temperaturas extremas (Kuramochi *et.al.*, 2023).

Por lo tanto, se puede comenzar a discernir que estas dos condiciones en el espacio (un ambiente térmico adecuado y una calidad de aire óptima) son parte integral que puede afectar aspectos como la morbilidad y la eficiencia de los ocupantes de las edificaciones; al entender esto, se puede establecer la pertinencia de generar y desarrollar estrategias y metodologías para determinar los peligros que conlleva el contar con condiciones inadecuadas (OSHA, 2012).

En consecuencia, se puede determinar que es pertinente conocer y establecer, a través de procesos de investigación, las condiciones óptimas para proporcionar ambientes interiores salubres que mitiguen o inhiban estas afectaciones y los mismos promuevan una mejora en la salud y el

bienestar de las personas que lo habitan o trabajan en él. Lo anterior se enmarca en el desarrollo de nuevas estrategias de diseño y proyección de los espacios al implementar la realización de cambios en los paradigmas en la arquitectura, los cuales estén en tenor a generar condiciones de habitabilidad ambiental adecuadas. Para lograr un ambiente interior adecuado (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ANSI/ASHRAE-55-2017], 2017), se pueden tomar las siguientes medidas:

- i. Ventilación adecuada:* que permita la renovación del aire interior y la eliminación de contaminantes.
- ii. Control de la humedad:* mantener un rango adecuado (entre el 40 y el 60%).
- iii. Temperatura de bulbo seco:* mantener una TBS óptima (entre los 20° C y los 25° C) para mejorar las condiciones de habitabilidad térmica interiores.
- iv. Iluminación adecuada:* una buena iluminación natural o artificial puede mejorar la productividad, el estado de ánimo y la salud visual.
- v. Acústica adecuada:* puede reducir el estrés, mejorar la concentración y evitar la interferencia en el trabajo.
- vi. Mantenimiento adecuado:* mantener el espacio limpio y en buen estado puede mejorar la calidad del aire interior y reducir la acumulación de contaminantes.

Con lo anterior es posible gestar procesos que coadyuven al mejoramiento de la habitabilidad y condiciones adecuadas de los espacios interiores, en especial los educativos, al establecer la importancia en el desarrollo de las actividades educativas de manera segura y eficiente, sin deterioro cognitivo ni resultados negativos para la salud (Torres, 2022).

Por lo tanto, es importante tener en cuenta que un ambiente interior adecuado puede ser beneficioso para la salud y el bienestar de las personas, y puede mejorar la calidad de vida en general. Por lo tanto,

es importante tomar medidas para asegurar que los espacios interiores donde los tiempos de permanencia son extensos, sean lo más saludables y cómodos posible.

Peligros de una mala calidad de aire en espacios interiores

En este punto es pertinente enfatizar la necesidad de contar con información que coadyuve a conocer y diagnosticar las condiciones de habitabilidad de las edificaciones, por lo que es aquí donde se refuerza la importancia de mejorar la calidad del aire y las condiciones microclimáticas en espacios, ya que éstas pueden aumentar el riesgo de afectación de la salud en lugares concurridos como oficinas, escuelas, hospitales y medios de transporte público. Esto a considerar que los ambientes interiores pueden contener contaminantes que pueden llegar a ser nocivos o dañinos (como se mencionó anteriormente), tales como partículas, gases y microorganismos que pueden afectar negativamente a las personas, de ahí la importancia de generar investigaciones diagnósticas descriptivas de la habitabilidad de los espacios en estas dos consideraciones.

Con base en lo anterior, es imperante mencionar que el contagio de enfermedades respiratorias, incluida en ellas la covid-19, puede ocurrir a través de la inhalación de partículas de saliva, (gotículas) o aerosoles los cuales pueden tener una carga viral o bacteriana. Éstas pueden ser expulsadas al hablar, toser o estornudar, y pueden permanecer en el aire durante horas, especialmente en espacios cerrados con mala ventilación y en condiciones ambientales inadecuadas (Maddalena, Mendell, Eliseeva, Chan, Sullivan, Russell, Satish & Fisk, 2015).

Por lo tanto, es pertinente generar acciones que coadyuven a prevenir la propagación de enfermedades respiratorias y efectos adversos de saturación de partículas nocivas en espacios interiores, y esto se puede obtener al mantener una buena calidad del aire interior (Allen, MacNaughton, Laurent, Flanigan, Eitland & Spengler, 2015; Maddalena, 2015), lo que implica el contar con una ventilación, humedad y la temperatura

adecuadas en los espacios interiores, con lo que también disminuyen las concentraciones de otras partículas nocivas.

Además de los riesgos de las afectaciones a la salud por enfermedades respiratorias, es también importante establecer que, como se ha demostrado en estudios pertinentes, una mala calidad de aire tiene efectos negativos en procesos cognitivos de los usuarios que se encuentran en espacios confinados; en este sentido, es preciso mencionar que uno de los contaminantes que más afectan en este aspecto es el dióxido de carbono (CO₂), gas que en ambientes cerrados con mala ventilación puede acumularse y alcanzar niveles peligrosos para la salud (Bloch-Salisbury, Lansing & Shea, 2003).

En este contexto es determinante establecer que la exposición prolongada a niveles elevados de CO₂ puede tener efectos adversos en las actividades de eficiencia y eficacia de las personas, ya que este compuesto interfiere en la capacidad del encéfalo para desarrollar acciones como el procesamiento de información y toma de decisiones, además del razonamiento matemático (Bloch-Salisbury *et al.*, 2003; Cao, Li, Zhang & Pang, 2022; Fothergill, Hedges & Morrison, 1991; Laurent, 2021). Algunos de los posibles efectos del CO₂ en los procesos cognitivos son los siguientes:

- i. Disminución del rendimiento cognitivo, incluyendo la memoria, enfoque o atención, y la capacidad reactiva de los usuarios, lo que genera una disminución en su capacidad para realizar tareas complejas.
- ii. Aumentar la fatiga mental, lo que disminuye la capacidad para realizar tareas cognitivas complejas, que es problema en actividades que requieren una atención sostenida y una toma de decisiones.
- iii. Afectación del estado de ánimo, aumento de la irritabilidad y el malestar general.

Grosso modo, estudios desarrollados por instituciones tanto gubernamentales como no gubernamentales han establecido recomendaciones donde indican cuáles son los niveles recomendables de CO₂ para man-

tener condiciones salubres en espacios cerrados o interiores que pueden coadyuvar a la mejora del rendimiento cognitivo de los usuarios; esto reforzado por estudios como los de Allen *et al.* (2016), que menciona que es necesario mantener los niveles por debajo de las 600 ppm, lo cual puede obtenerse a través de lineamientos de diseño y estrategias adecuadas para el desarrollo de edificaciones (Allen *et al.*, 2015; Laurent, 2021).

Por otro lado, se ha demostrado a través de trabajos similares al antes mencionado, que el fomentar condiciones y características de ambientes interiores adecuados, se puede afectar el bienestar de los usuarios de los espacios de manera positiva, pero también el no tener espacios salubres ambientalmente puede generar problemáticas de salud; es a partir de lo anterior que a raíz de la pandemia de SARS-CoV-2 se ha puesto de manifiesto la importancia de generar investigación que determine cuáles son las condiciones de riesgo en espacios interiores confinados y evitar los efectos adversos tanto a la salud como la eficiencia de los usuarios en relación con las actividades que realizan en los mismos (Scully, 2019).

Esto también tiene una gran afectación en toda la población, pero en este punto se puede comenzar a centrar en la población estudiantil universitaria, pues se investigó sobre el problema que se presentó en la pandemia con los contagios masivos y la transmisión del SARS-CoV-2 como un problema de salud pública de máxima importancia, donde se comenzó a inferir que en la propagación de ésta y de otras enfermedades puede reducirse bajo condiciones ambientales y de calidad de aire adecuadas (Salamanca-Fernández, Rodríguez-Barranco y Sánchez, 2021).

Por otro lado, ha sido prioritario establecer desde bases científicas, en lo que compete a las condiciones de habitabilidad, cuáles son las características que potencian la transmisión de los diversos tipos de enfermedades, principalmente de las vías respiratorias en espacios interiores arquitectónicos, pues es esencial el conocer cuáles son las condiciones inadecuadas que pueden exacerbar el desarrollo y transmisión de virus y otras afectaciones relacionadas, pero también como éstas mismas pueden afectar de otras maneras al bienestar humano (World Health Organization [WHO], 2020; Yu, 2020).

Es en este punto donde se puede comenzar a relacionar que coexisten un sinnúmero de características arquitectónicas y de espacios que no generan condiciones de ambientes salubres (habitables), lo que puede llegar a fomentar las consecuencias negativas en los usuarios y que potencializan los efectos de las enfermedades mismas, lo que se vio reflejado en las tasas de propagación en los últimos tres años del SARS-CoV-2 (Center for Disease Control and Prevention [CDC], 2021); esto se puede relacionar con una mala circulación de aire e iluminación de los espacios, lo que aumenta el tiempo de permanencia de los virus y otro tipo de patógenos en el ambiente, por la nula o deficiente renovación del ambiente interior.

En resumen, se ha establecido que la exposición frecuente a aerosoles en áreas confinadas aumenta el riesgo de transmisión de enfermedades como el SARS-CoV-2 y otro tipo de patógenos respiratorios (Hui *et al.*, 2018). Actualmente, con base en estudios realizados durante la pandemia, se ha demostrado una correlación entre el aumento de infecciones de enfermedades respiratorias en espacios cerrados y la mala ventilación, lo que también expone un aumento de condiciones ambientales inadecuadas, apuntando a espacios inhabitables (humedad, suspensión en el ambiente, aumento de material particulado en el ambiente, así como baja temperatura), lo que aumenta el riesgo de afectar la morbilidad, aumenta la incidencia de enfermedades respiratorias, y en otro caso afecta los procesos cognitivos, creando un ambiente insalubre en los espacios interiores por el aumento de material particulado (Carazo Fernández, 2013).

Respecto a lo mencionado anteriormente, es imperante señalar que los niveles altos de dióxido de carbono (CO_2) en el ambiente pueden tener también correlación con afectaciones en la propagación y permanencia del SARS-CoV-2 en el ambiente, pero también puede generar efectos negativos en el rendimiento cognitivo humano. El dióxido de carbono es un gas que se produce naturalmente en la respiración humana y en la combustión de combustibles fósiles, y su concentración en la atmósfera ha aumentado significativamente en las últimas décadas debido a la actividad humana, y que, como se mencionaba antes, puede

generar disminución del desempeño escolar y de la actividad mental en altas concentraciones.

En este sentido, la investigación de Allen, MacNaughton, Satish, Santanam, Vallarino y Spengler (2016), determinó que la buena calidad ambiental en espacios interiores es fundamental para nuestro bienestar general debido a la cantidad de tiempo que pasamos en ellos, y esto se refleja en cómo los mismos afectan de manera positiva o negativa en nuestra salud. Lo cual determina que existen factores en los ambientes interiores y de trabajo donde incluyen medidas ambientales, como la humedad; factores de construcción, como la tasa de ventilación; factores del espacio de trabajo, como la presencia de materiales emisores de productos químicos; y factores personales, como el estrés laboral, las alergias y el sexo que determinan la afectación que tienen una mala condición.

Asimismo, otros trabajos realizados en aulas de educación superior han examinado el efecto de la exposición al CO₂ en el rendimiento cognitivo en un grupo de estudiantes universitarios en una habitación con una concentración de CO₂ de 600 partes por millón (ppm) y otro grupo en una habitación con una concentración de CO₂ de 1,000 ppm (Satish, 2012), los cuales han encontrado una clara correlación existente entre el detrimento del rendimiento de los sujetos de estudio en relación con procesos aritméticos, de concentración, memorización, entre otros.

Es a partir de lo anterior que los esfuerzos de los investigadores se centran en el estudio de la posible relación entre el elevado número de contagios de enfermedades respiratorias (i. e. gripes, influenza, covid-19), por condiciones ambientales inadecuadas y la contaminación, pero a su vez el tener condiciones adecuadas para el desarrollo cognitivo óptimo en estudiantes; con todo esto se prioriza el desarrollo de estrategias para generar normativas y recomendaciones para la nueva normalidad y un cambio de paradigma en la manera de diseñar y construir edificios educativos encaminados y focalizados en mejorar las condiciones de habitabilidad en ellos.

Con ello se establece una acción alineada a los preceptos establecidos por organizaciones internacionales como la Organización Mundial de

la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), la cual menciona que una de las cuestiones más preocupantes durante la pandemia, fue el alcance de la propagación y transmisión del SARS-CoV-2 en las escuelas, pero también de otro tipo de enfermedades estacionales que afectan las vías respiratorias. La misma organización menciona que en los niveles superiores y universitarios existe una mayor probabilidad de afectación de este tipo de enfermedades entre el personal estudiantil y académico (WHO, 2020), lo cual se intensifica con la afectación que tienen este tipo de espacios en detrimento de los procesos educativos eficientes en los alumnos.

Esto se robustece con aspectos como los riesgos de brotes cuando la alta tasa de transmisión que se ha observado en escuelas y que se ha reforzado por estudios desarrollados en países como Israel, Estados Unidos, Inglaterra y otros han demostrado que es necesario contar con condiciones adecuadas en las instituciones educativas para tener medidas de seguridad fuertes para tratar de detener la transmisión de este tipo de enfermedades, y eso se puede establecer por el desarrollo de monitoreos continuos de la calidad ambiental en los espacios educativos. Por lo tanto, a través de estos preceptos la WHO menciona que cuando hay una transmisión comunitaria, las medidas preventivas y de protección en las áreas educativas son aún más importantes; sin dejar de lado que la misma organización ya ha determinado que el cierre prolongado de las instituciones educativas, como es el caso de las universidades, puede afectar la equidad, la educación, la salud y el desarrollo pleno de los estudiantes, lo cual alienta a desarrollar planes seguros de regreso a clases que cuenten con los datos necesarios para toma de decisiones en la generación de planes institucionales para tal efecto.

Por otro lado, se establece en el mismo nivel de importancia, puesto que se ha demostrado que el aumento en las concentraciones de CO₂ en interiores afecta en el desempeño de la toma de decisiones en usuarios expuestos a condiciones insalubres de calidad de aire, afectando de manera directa el rendimiento en la toma de decisiones y estados de concentración y enfoque.

Por lo tanto, la Universidad de Guadalajara y el Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño extienden esta preocupación y han determinado establecer una estrategia de monitoreo ambiental y de calidad de aire en los espacios educativos, los cuales se encaminen a mejorar la calidad ambiental de los espacios educativos, con lo cual se determinen medidas para evitar los contagios de enfermedades respiratorias y, a su vez, mejorar el rendimiento de los estudiantes.

Esta estrategia se desarrolló a lo largo de un año completo, mayo de 2022 a mayo de 2023, para los intervalos de monitoreo entre cada uno de los meses se seleccionó a partir de dos condicionantes principales, periodos de sensación térmica y estacionalidad anual de la ciudad de Guadalajara; para realizarla se estableció la selección de una muestra de aulas tipo, dentro de las cuales se seleccionaron un total de nueve diferentes, que estaban agrupadas por sus características físico-espaciales; por otro lado, se establecieron horarios de monitoreo dentro de las aulas, los cuales correspondían al periodo de mayor ocupación estudiantil de las mismas.

Los datos de los monitoreos se capturaron en bases de datos, donde se analizaron los mismos con el objetivo de generar un estudio descriptivo de las condiciones actuales de las aulas educativas del CUAAD; los resultados dan luz sobre la deficiencia en los diseños del edificio, lo cual impide la generación de condiciones de habitabilidad adecuadas en los espacios; además, se comenzaron a visualizar otros factores que intervienen en la generación de ambientes insalubres en el interior. El trabajo presentado establece un parteaguas que puede incidir en un cambio de paradigma en la manera de proyección de espacios educativos institucionales, encaminados a la generación de condiciones que permitan un bienestar de los estudiantes en tenor a disminuir la afectación de los aspectos de morbilidad en ellos, pero por otro lado encaminado a no afectar en los aspectos de los procesos educativos cognitivos en los estudiantes, buscando con ello acercarse a un proceso de sustentabilidad de la infraestructura institucional (Allen *et al.*, 2015; Jacobs, Ahonen, Dixon, Dorevitch, Breyse, Smith, Evens, Dobrez, Isaacson, Murphy, Conroy & Levavi, 2015).

Antecedentes

Para el desarrollo de este trabajo se tomó como premisa principal, la preocupación de las autoridades universitarias, la cual pretendía determinar las condiciones adecuadas para que la comunidad estudiantil pueda contar con condiciones adecuadas que no propaguen enfermedades respiratorias (i. e. covid-19, gripes, influencias, etc.), pero también el conocer las condiciones adecuadas para el desarrollo pleno cognitivo de los estudiantes, esto como consecuencia de la nueva normalidad que postpandemia de SARS-CoV-2 y la calidad ambiental de los espacios confinados; por lo cual se están centrando acciones en la generación de trabajos que contribuyan a los esfuerzos de conocer las características ambientales y de calidad de aire actuales de los espacios educativos, para con ello realizar recomendaciones para que los alumnos, personal académico y administrativo tengan condiciones adecuadas para desarrollar las actividades escolares que competen a su formación.

Desde que se establecieron las medidas de aislamiento, se puntualizó en la necesidad de mantener la continuidad de las actividades de aprendizajes, lo que ha impuesto desafíos que la universidad y demás instituciones educativas han abordado mediante diferentes alternativas y soluciones en relación con los calendarios escolares y las formas de implementación de las materias formativas de cada una de las instituciones, por medios no presenciales y con diversas formas de adaptación, priorización y ajuste (Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura-Comisión Económica para América Latina y el Caribe [UNESCO-CEPAL], 2020).

Así, el reabrir las escuelas durante el proceso de pandemia fue un proceso complejo y paulatino que requirió un procedimiento logístico y de toma de decisiones importantes por parte de las autoridades educativas, por lo que los Estados comenzaron a buscar alternativas para cuidar la integridad de los usuarios. En este sentido es importante mencionar que se comenzaron a generar estudios que permitieran conocer la relación que existía entre malas condiciones ambientales y de calidad de aire

con los efectos de propagación de enfermedades virales; por otro lado, se comenzó a fomentar el estudio que existe en relación con la calidad de aire interior y sus efectos en procesos de eficiencia cognitiva, que si bien comenzaron a desarrollarse a partir de la última década del siglo pasado, a raíz de la pandemia de SARS-CoV-2 iniciada en el año 2021, han tomado gran relevancia en el estudio de la relación de la habitabilidad de los espacios y sus efectos en la morbilidad y mortalidad, en especial el de materiales particulados y otras sustancias como el CO₂ (Kaji, Belli, McCormack, Matsui, Williams, Paulin, Putcha, Peng, Diette, Breyse y Hansel, 2014).

Con la vuelta a una “nueva normalidad” —como se ha mencionado— y al tomar en consideración la experiencia que nos dejó la pandemia, los espacios educativos son uno de los polos a donde se deben dirigir estudios encaminados a determinar aspectos de las condiciones ambientales; para que primero no sucedan, se estableció la pertinencia de generar investigaciones que se dirijan a mitigar los efectos ambientales adversos en la transmisión de enfermedades respiratorias, pero además, como se mencionó anteriormente, que mejoren los procesos cognitivos de los alumnos a través de mejores condiciones de calidad de aire interior (Jhun, Gaffin, Coull, Huffaker, Petty, Sheehan, Baxi, Lai, Kang, Wolfson, Gold, Koutrakis & Phipatanakul, 2017).

Por tales motivos fue prioritario enfocar los esfuerzos desde la trinchera universitaria para combatir y los estragos educativos que se plantean después de la pandemia y la eficiencia educativa de los alumnos, por lo que se dirigieron los recursos y capacidades para generar procesos de educación a distancia, disminución de los niveles de segregación y desigualdad educativa universitaria y actualmente conocer las condiciones de las instalaciones para promover un mejoramiento de las características de la calidad de aire y ambiental de las aulas educativas para cuidar el bienestar de los estudiantes.

Para tal efecto, es necesario desarrollar un estudio de monitoreo sobre las condiciones ambientales y de calidad de aire adecuadas, en aulas

y espacios educativos, que permitan establecer a través de un estudio de monitoreo recomendaciones y acciones que conlleven a gestionar actividades pertinentes encaminadas a conocer los aspectos de calidad espacial y de interiores de los espacios educativos, lo cual permitirá a la Universidad de Guadalajara y el Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño establecer acciones pertinentes para cuidar la salud de los estudiantes, académicos y administrativos; y por otro lado, con base en estos estudios y la obtención de datos puntuales, que se encamine al mejoramiento del marco normativo y de adecuación institucional, para generar edificación resiliente, sustentable, encaminada a mejorar el bienestar de los ocupantes.

En consecuencia, y a través de investigaciones realizadas en diversas instituciones académicas y en diferentes países (tablas 1 y 2), se establece la relevancia del monitoreo y estudio de las condiciones ambientales y de calidad de aire, en donde se fundamenta la importancia de llevar a cabo una estrategia propia universitaria para tener datos fiables que permitan auxiliar en la toma de decisiones en lo que compete a la disminución de los efectos de contagio de enfermedades respiratorias.

Tabla 1. Investigaciones sobre la relación de transmisión de enfermedades respiratorias y variables ambientales temperatura y humedad

<i>Autor</i>	<i>Resultados</i>	<i>Conclusión</i>
Brassey (2020)	Probabilidad de contribución: la temperatura y la humedad contribuyan con un máximo del 18% a la variación en la transmisión.	Correlación positiva de la TBS con la propagación de las tasas de infección, mientras que se correlaciona negativamente con la humedad.
Wang (2020)	Asumiendo un aumento de 30 grados y 25% en la temperatura y la humedad relativa del invierno al verano en el hemisferio norte, se espera disminución en la tasa de contagios.	La temperatura y la humedad relativa tienen una fuerte influencia en los valores de R con una fuerte significación estadística.

<p>Wang (2020)</p>	<p>En el grupo de temperatura más alta, cada aumento de 1° C en la temperatura mínima en el modelo 1, el total de casos confirmados disminuyó en 0.068.</p>	<p>El estudio concluye que la temperatura tiene un impacto significativo en la transmisión de covid-19. Puede haber una relación dosis-respuesta no lineal entre los dos, lo que indica que hay una mejor temperatura que contribuye a su transmisión y que la baja temperatura es beneficiosa para la transmisión del virus.</p>
<p>Tobías (2020)</p>	<p>La tasa de incidencia de casos de covid-19 diagnosticados positivamente osciló entre 0 y 60% y la temperatura máxima diaria entre 12.2° C y 22.8° C.</p>	<p>Un aumento promedio de 1° C de la temperatura máxima disminuyó la tasa de incidencia en -7,5% el mismo día.</p>
<p>Holtman (2020)</p>	<p>La asociación observada indica un 76% adicional de un día por cada 10 grados adicionales de temperatura promedio ($b = 0.76$, $SE = 0.34$, $p = 0.02$).</p>	<p>Las bajas temperaturas ambientales están asociadas con una propagación más rápida de covid-19 en la fase temprana de la enfermedad endémica.</p>
<p>Gunthe (2020)</p>	<p>El número de casos acumulados era más alto para un índice UV de 2.5 y disminuyó gradualmente desde un índice UV de 3.5. Para las áreas donde el índice UV fue superior a 5, el número de casos infectados confirmados disminuyó aún más.</p>	<p>Concluye que hay un rango óptimo de temperatura e índice UV que afecta fuertemente la propagación y supervivencia del virus.</p>
<p>Meo (2020)</p>	<p>Los resultados globales revelaron una correlación inversa significativa entre la humedad y el número de casos ($r=-0.134$, $p < 0.001$) y muertes ($r=-0.126$, $p < 0.001$).</p>	<p>El aumento de la humedad relativa se asoció con una disminución en el número de casos y muertes diarias; sin embargo, un aumento de la temperatura se asoció con un aumento en el número de casos y muertes diarias debido a la pandemia de covid-19 en los países europeos.</p>

Fuente: Salamanca-Fernández, Rodríguez Barranco y Sánchez (2021).

Tabla 2. Investigaciones sobre la relación de transmisión de enfermedades respiratorias y calidad de aire

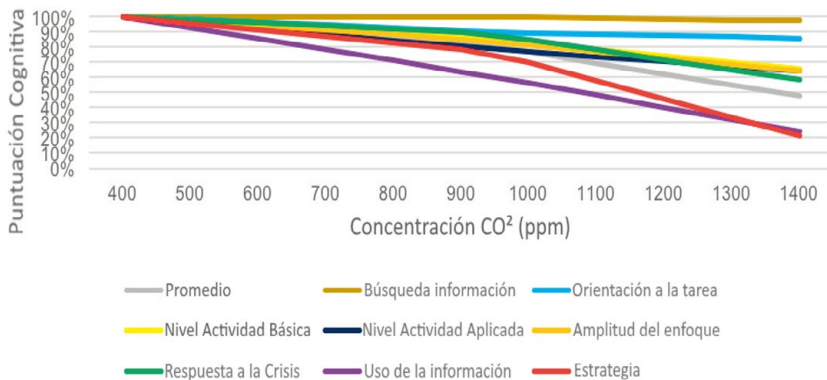
<i>Autor</i>	<i>Resultados</i>	<i>Conclusión</i>
Martelleti (2020)	Las regiones estudiadas cuentan con una alta cantidad de material particulado PM 10 y PM 2.5 y fueron las más afectadas por enfermedades respiratorias como el covid-19.	El virus del SARS y otras enfermedades respiratorias como la EPOC (enfermedad pulmonar obstructiva crónica) encuentran un “territorio” fértil en las partículas contaminantes del aire y, en una relación lineal, sobreviven más tiempo y se vuelven más agresivas en un sistema inmunológico ya agravado por estas sustancias nocivas.
Ogen (2020)	Analizó los decesos al comienzo de la pandemia de covid-19 al 19 de marzo de 2020. El 83% de todas las muertes ocurrieron en regiones donde la concentración máxima de agentes tóxicos se encontraba muy por encima de lo establecido por las normas.	La exposición crónica a partículas nocivas y ambientes insalubres podría contribuir de manera importante a las altas tasas de mortalidad por covid-19 y la propagación de otras enfermedades respiratorias.
Conticini (2020)	Una exposición prolongada a la contaminación del aire conduce a un estímulo inflamatorio crónico.	Un sujeto que vive en un área con altos niveles de contaminantes es propenso a desarrollar afecciones respiratorias crónicas y es vulnerable para cualquier agente infeccioso.

Fuente: Salamanca-Fernández, Rodríguez Barranco y Sánchez (2021).

Por otro lado, el estudio de Allen *et al.* (2016) concluye que, bajo condiciones de calidad de aire inadecuadas, esto es, con concentraciones altas de dióxido de carbono (CO₂), procesos cognitivos y mentales se

ven afectados; esto implica que en espacios donde se realizan actividades como procesamiento de información y datos, éstos se ven disminuidos por condiciones insalubres en los mismos (figura 1) (Allen, 2016; Cao, 2022; Satish, 2012).

Figura 1. Concentración de CO₂ y efectos en procesos cognitivos



Fuente: Allen et al. (2016).

Por medio de lo anterior se determina que en medida de lo posible es necesario llevar a cabo el desarrollo de un monitoreo de variables ambientales y de calidad de aire, lo cual permita determinar las condiciones inadecuadas en los espacios interiores que puedan tener efectos adversos en la comunidad estudiantil; para lo cual y basado en los diversos estudios que se han desarrollado, se tomarán en cuenta las siguientes: temperatura de bulbo seco (TBS), humedad relativa (HR), radiación solar (RS), mientras que en el aspecto de la calidad de aire se monitoreará la cantidad de partículas de CO₂. Con la realización del monitoreo se podrá desarrollar un análisis comparativo descriptivo para efectuar un diagnóstico a través para determinar si existen condiciones adecuadas para el desarrollo de actividades presenciales en aulas y espacios administrativos.

Tabla 3. Investigaciones sobre la relación entre procesos cognitivos y mala calidad de aire

<i>Autor</i>	<i>Resultados</i>	<i>Conclusión</i>
Allen et al. (2016)	Encontró que existe una correlación alta entre las malas condiciones de CO ₂ (superiores a 600 ppm) en espacios interiores y una baja significativa en el rendimiento cognitivo y eficiencia de los trabajadores.	Las funciones cognitivas de las personas que se encuentran en espacios en condiciones de habitabilidad óptimas (edificaciones sustentables/verdes) fueron significativamente mejores que en las condiciones de construcción convencionales en todos los niveles de pruebas cognitivas.
Jacob (2015)	Realizó estudios correlacionales entre las condiciones de habitabilidad de la vivienda con adecuaciones sustentables y bioclimáticas, y encontró que las relaciones entre salud y bienestar mejoran en comparación con viviendas tradicionales.	Estableció que existe una relación directa entre las condiciones de habitabilidad adecuadas y la salud, bienestar y procesos mentales de los individuos.
Morganti (2022)	Estableció la pertinencia de un ambiente interior de calidad para mejorar la salud física y mental, además de procesos cognitivos de los estudiantes en el confinamiento.	Las viviendas y espacios interiores que no generan condiciones adecuadas de habitabilidad afectan de manera significativa el bienestar físico y mental de las personas.
Wyon (2004)	Se encontró que con una buena tasa de ventilación en edificios y con adecuaciones que lo encaminen a la sustentabilidad, mejoran la productividad de los empleados en comparación con aquellos que se encuentran expuestos a altas tasas de CO ₂ en espacios interiores.	El rendimiento de los usuarios en edificios convencionales se ve afectado negativamente, ya que en ellos no existe una renovación de aire continua, con lo que afecta diversos procesos en los usuarios.
Zhang (2017)	Demostró que con altas concentraciones de CO ₂ en espacios interiores (experimento controlado), intensificaba efectos y síntomas en la salud de los sujetos (dolor de cabeza, fatiga, somnolencia y dificultad para pensar con claridad).	Concentraciones que se establecen como insalubres de CO ₂ y otro tipo de biofuentes, pueden producir efectos negativos en los ocupantes.

Fuente: Allen et al. (2016).

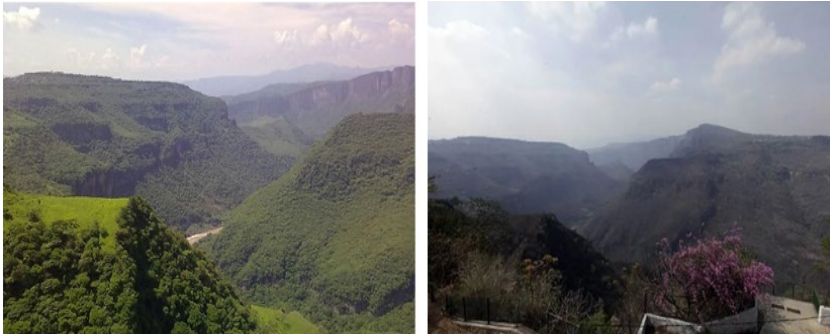
Por todo lo descrito, se establece que el desarrollo de esta estrategia de monitoreo es imperante, ya que con ella se podrá tener una base fiable y robusta para determinar, con conocimiento de causa, un sistema de medidas precautorias que encaminen todos los esfuerzos institucionales para generar acciones de cuidado para la población estudiantil, académicos y administrativos, con lo cual se podrá evitar la propagación del virus SARS-CoV-2 y otras enfermedades virales, además de establecer nuevas líneas de acción para mejorar el rendimiento escolar y procesos cognitivos de los estudiantes. Para efectos prácticos y de evidencia, el trabajo desarrollado se centra principalmente en las concentraciones del dióxido de carbono en el espacio interior de las aulas, esto, como ya lo hemos mencionado y con base en la evidencia presentada anteriormente en las tablas de estudios analizados, este contaminante tiende a: i) prolongar la vida de organismos patógenos y virales en el ambiente, y ii) afectar directamente el desempeño y eficiencia de los estudiantes.

Descripción de la zona del estudio

El Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño (CUAAD) se encuentra situado en San Miguel de Huentitán, que es una localidad conurbada al norte-noreste del área metropolitana de la ciudad de Guadalajara (AMG); esta comunidad colinda con los municipios de Zapotlanejo por el este, Ixtlahuacán del Río al norte y Zapopan por el oeste, y responde administrativamente al municipio de Guadalajara.

El CUAAD tiene un emplazamiento particular, ya que el mismo se localiza al final de la Calzada Independencia, una de las vías principales de la ciudad de Guadalajara; por otro lado, el CU colinda al este con el parque natural el Mirador, el cual es un parque público urbano, y al norte es limítrofe con un área natural protegida denominada Barranca de Huentitán, la cual es un cañón natural por el cual corre uno de los ríos principales de México, el Lerma-Santiago, al que a su vez confluyen una diversidad de ríos secundarios y arroyos de la región (figura 2).

Figura 2. Barranca de Huentitán



Fuente: Diario *Milenio*, consultado en mayo de 2023.

Los edificios principales, en los cuales se llevaron a cabo los monitoreos, son una construcción cuya primera etapa se comenzó en 1968, al constituir el proyecto dos alas curvas encontradas, una al norte y otra al sur, con un claro estilo brutalista; por otro lado, el conjunto se corona con una torre administrativa de nueve niveles, donde se encontraban coordinaciones, departamentos y cubículos administrativos (figura 3).

A lo largo de su historia se han estado desarrollando cambios significativos en la infraestructura, la más evidente fue la remodelación de la torre administrativa, la cual de tener un estilo *ad hoc* al diseño brutalista original, se reformó con una estética contemporánea con grandes ventanales y materiales como láminas y paneles ligeros en sus recubrimientos; por otro lado, las aulas han tenido intervenciones en sus diseños originales, en el sentido de colocar ventanales con cristales esmerilados (opacos) con la colocación de elementos abatibles en la parte superior.

Figura 3. Centro de Arquitectura de Arte, Arquitectura y Diseño, sede Huentitán



Fuente: Universidad de Guadalajara, consultado en mayo de 2023.

Materiales y métodos

Para el desarrollo general de la estrategia de monitoreo ambiental, se realizaron acciones que fueron encaminadas a generar insumos necesarios para establecer y determinar las condiciones de habitabilidad ambiental y calidad de aire adecuadas donde los usuarios no tengan afectaciones a la salud; en este ámbito se establecieron procesos pertinentes como: diseño de investigación, determinación de temporalidad del estudio, selección de instrumentos y variables por analizar, caracterización de áreas para analizar y análisis y diagnóstico de datos.

i) Diseño de la investigación.

El diseño de la investigación parte de la existencia de diferencias en cómo seleccionar el sitio o la cantidad de sitios para la recolección de datos, las temporadas de análisis, el tiempo requerido al día, los lugares para la toma de muestras, etc. En este sentido, se utilizó la información establecida por las normativas internacionales que rigen las características para el desarrollo de estudios encaminados a determinar condiciones óptimas de habitabilidad y calidad de aire (tabla 4).

Tabla 4. Características para el diseño de investigación

<i>Tema</i>	ASHRAE 55	ASHRAE manual	ISO 7726	ISO 7730	ISO 17772-1
Tipo de instrumentos		x	x		
Rango de medición, precisión, tiempo de respuesta			x		
Determinación de la temperatura media radiante		x	x		
Evaluación de condiciones ambientales					
Índices de confort térmico	x	x		x	
Requerimientos para el confort térmico	x	x		x	x
Calidad de aire	x	x	x	x	x

Fuente: elaboración propia, 2019.

Con lo anterior se determinaron las características de instrumentación, tipos de variables, protocolos de toma de datos e información y procedimientos de análisis de datos. Por lo que fue necesario tomar en cuenta que la evaluación de condiciones ambientales y de calidad de aire

están con base en correlaciones descriptivas entre las variables, lo que marca una tendencia a un diseño *no experimental*. En consecuencia, la concepción del diseño de la investigación como característica principal es que debe de ser practica y concreta, por lo que se plantea además que debe de ser transversal, a lo largo de un ciclo completo de tiempo.

Esto nos determina que las actividades a realizar se enmarcan en la programación de periodos cortos de tiempo para la recopilación de información con aplicaciones en un lapso de un año, en donde se contempló el desarrollo de varias observaciones de toma de datos en espacios o aulas específicas; por otro lado, este tipo de caracterización establece y engloba que se debe de contar con un número de variables limitado y pero relevante para el estudio; asimismo, esto también limita al tipo de instrumentos que se utilizarán, ya que los mismos deberían de contar con características y condiciones específicas para el estudio.

Por lo tanto, la particularidad del trabajo desarrollado consiste en la pertinencia de alinear sus preceptos en lo estipulado para estudios de confort térmico y medición de variables meteorológicas, con características de un diseño no experimental y un estudio de campo del tipo transversal para poder correlacionar las condiciones de las variables climáticas, calidad de aire, con las condiciones óptimas para áreas seguras en la nueva normalidad.

ii) Determinación de temporadas de estudio.

Para establecer las temporadas de medición se realizó un análisis de termopreferendum o temperatura neutral para la ciudad de Guadalajara, si bien el trabajo no se enmarcó en el estudio de confort térmico, el desarrollo de esto coadyuvó a decidir de manera concreta los periodos en los cuales se podrían generar los muestreos en el ciclo de estudio; los periodos establecidos se determinaron a través del análisis de bioclima con el modelo de la ANSI ASHRAE 55 (2012) (Ecuación 1) desarrollado para edificios ventilados naturalmente y con características de climas templados, que se adecua a las características climáticas de la región de

Guadalajara, y que además se encuentra dentro de las normas internacionales de edificación sustentable.

$$T_n = 0.31 T_m + 17.8 \text{ Ecuación 1}$$

Donde:

T_n = temperatura neutra

T_m = temperatura media mensual

La ciudad de Guadalajara cuenta con un clima templado, con inviernos secos y veranos cálidos (Cwa), con temperatura media anual de 20.98° C, temperaturas medias máximas mensuales de 34.2° C y mínimas de 10.4° C (Sistema Meteorológico Nacional [SMN], 2023). Los datos utilizados, en consecuencia, para la generación del termopreferendum, se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Guadalajara: datos climatológicos

<i>Mes</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
Temp. máx.	24.1	26.1	28.4	30.7	31.9	30.0	27.1	27.0	26.7	26.7	26.0	24.4
Temp. med.	17.3	18.8	20.8	23.2	24.7	23.8	21.9	21.8	21.7	21.1	19.4	17.8
Temp. mín.	10.4	11.5	13.1	15.6	17.4	17.5	16.6	16.6	16.6	15.4	12.8	11.1

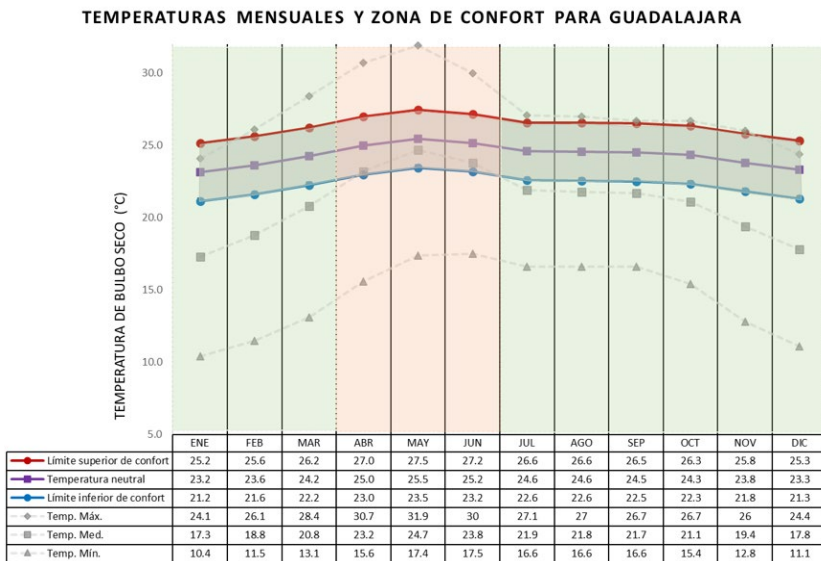
Fuente: Sistema Meteorológico Nacional, 2023.

Es a partir del análisis de los datos arrojados por las normales climáticas, con las que se determinaron las temperaturas de neutralidad anuales y rangos de confort, generados a partir de lo estipulado por la normativa, y que se establece en $\pm 2^\circ \text{C}$ (ANSI/ASHRAE 55, 2017; Auliciems y Szokolay, 1997); con esto y la ecuación 1 se estimará el termopreferendum preliminar de la ciudad de Guadalajara y con ello esta-

blecer los días representativos para realizar el monitoreo ambiental en los espacios educativos.

En este sentido, y buscando una complementación al desarrollo del termopreferendum, se generó una comparativa en donde se extrapola esto con las estaciones del año; con lo anterior se determinaron bases descriptivas y justificativas que coadyuvaron a enriquecer los análisis y la selección de periodos de recolección de datos y monitoreo.

Figura 4. Termopreferendum de Guadalajara para determinar periodos de estudio



Fuente: elaboración propia (2023).

Con lo anterior se estableció la existencia de dos periodos de sensación térmica; el primero un periodo cálido: abril, mayo y junio; un periodo templado: enero, febrero, marzo, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre (figura 4). Se seleccionaron dos semanas representativas en cada mes (primera y última semana), el estudio se llevó a

cabo a lo largo de todo un año, mayo de 2022-mayo 2023. Por otro lado, la selección de horarios en los que se generó la toma de datos con un intervalo de tiempo que se extendía de las 8:00 a las 16:00 h, esto determinado por un análisis de uso y ocupación estudiantil de las aulas de los espacios educativos, ya que en estos periodos es donde existe una máxima ocupación de aulas y un 75% de población estudiantil en el CU.

iii) Selección de instrumentación y variables ambientales

Para seleccionar las variables meteorológicas en el estudio, se tomaron en cuenta aquellas que intervienen en el establecimiento de condiciones de habitabilidad adecuadas en espacios interiores; además se examinaron estudios sobre la influencia del ambiente térmico, calidad de aire en la incidencia de enfermedades respiratorias y en la afectación de procesos cognitivos en usuarios de espacios interiores, y por otro lado, alinear las decisiones a lo estipulado en las normatividades de confort térmico y calidad interior de aire, como lo son la ISO 7730, ISO 7726, ISO 17772-1 y ANSI ASHRAE 55, esto al procurar que los datos del muestreo estén entre los de calidad I y II.

Las variables del ambiente térmico seleccionadas para el trabajo presentado fueron: temperatura de bulbo seco (TBS), humedad relativa (HR), para determinar condiciones ambientales interiores y dióxido de carbono (CO₂, ppm) entre otras (reforzadas por estudios mencionados en las tablas 1. 2 y 3). La TBS y la HR fueron registradas mediante un registrador de temperatura y humedad relativa para interiores y exteriores de comunicación vía Bluetooth, Onset HoBo MX2301A (figura 5b), el cual cuenta con una precisión de $\pm 0.25^\circ \text{C}$ de -40 a 0°C y $\pm 0.2^\circ \text{C}$ de 0 a 70°C con rango de medición de -40 a 70°C , y para la humedad relativa $\pm 2.5\%$ del 10 al 90% (típico) hasta un máximo de $\pm 3.5\%$, con un error típico de 5% en rangos mayores de 90% y menores de 10%.

Por otro lado, para las mediciones y registros de ppm de CO₂ se llevaron a cabo con un equipo de monitoreo de calidad de aire interior ExTech CO240 (figura 5a). Este equipo de monitoreo ambiental cuenta

con una resolución de \pm (75 ppm + 5% de la lectura) 0 a 2,000 ppm; la selección, la distribución y la operación del equipo de medición se realizó con base en la ISO 7726 (1998) y la ANSI/ASHRAE 55 (2017), respectivamente, lo que permite clasificar a la base de datos obtenida como clase I de acuerdo con Brager y de Dear (1998).

Figura 5. Instrumentación para la toma de datos de calidad de aire y variables ambientales



a. Monitoreo de calidad de aire interior
ExTech CO240;

b. Onset HoBo
MX2301A.

Fuente: elaboración propia.

iv) Selección de áreas a analizar.

Para poder seleccionar los espacios donde se llevaron a cabo las mediciones ambientales, fue necesario establecer la relación de los espacios con los usuarios que realizan las actividades educativas y administrativas en ellos. Con lo cual se realizaron fichas para clasificación (tabla 6), las cuales contaban con las características deseables para la investigación; esto a manera de criterios estipulados por medio de las características espaciales y formales de los espacios a analizar, y se complementará con las tablas de ponderación con las herramientas para el análisis del

espacio construido, lo cual determinará de manera objetiva cómo se seleccionarán las zonas a diagnosticar en el CU.

Tabla 6. Grupo de criterios para el análisis preliminar para la selección de aulas a monitorear

<i>Grupo</i>	<i>Objetivo principal de grupo de estudio</i>
Información general	Características y datos que identifiquen y muestren las características principales del caso analizado, Aulas en el CU
Uso	Esta información servirá como referencia para conocer el número de usuarios y periodos de uso
Espacios	Permitió establecer la capacidad de servicio del espacio y el estado de las instalaciones (al momento de realizar el inventario) lo que puede influir en la densidad de uso.
Actividades	Permitió identificar las actividades y su nivel de intensidad, la frecuencia de estas y los grupos de edades a nivel general que las desarrollaban.
Usuarios	Establecer características propias del usuario como: posibles periodos de uso, niveles de intensidad por actividad.

Fuente: elaboración propia, 2019.

Con base en lo anterior se desarrollaron lineamientos de selección de los espacios y tablas de identificación de los lugares con potencial para realizar los trabajos de monitoreo ambiental. Para ello se partió del hecho de que el Centro Universitario cuenta con un total de 109 aulas; en los edificios principales, para cada una de ellas se desarrolló un análisis y caracterización espacial, con lo que se determinó la existencia de ocho tipos de aulas diferentes, de las cuales se seleccionaron aquellas que fueran representativas como muestra. Lo anterior se puede observar en la tabla 7, donde se genera la descripción de cada una de ellas.

Tabla 7. Caracterización formal de las aulas educativas del Centro Universitario

Aulas	Ventanas		Puerta	A/c	Dirección
	Frete	Trasera			
1 al 6	Dos corredizas superiores opacas 1.2 m de altura	Pared	Sólida con ventanilla estática	No	De norte a sur
	Pared de 2 paneles 2.1 m, opacos				
	Una sobre la puerta 1.2 m altura estática				
	protección tipo louver				
7 al 14	Tres corredizas superiores opacas 1.2 m de altura	Pared	Sólida con ventanilla estática	Ventilador	De norte a sur
	Pared de 6 paneles 2.1 m, opacos				
	Una sobre la puerta 1.2 m altura estática				
	protección tipo louver				
56 al 63	Tres corredizas superiores mitad de altura			Ventilador	De sur a norte
	Una estática mitad de altura				
	Una sobre la puerta 1.2 m altura estática				
55 a	Cuatro corredizas superiores mitad de altura	Pared	Sólida con ventanilla estática	No	De sur a norte
55 b	Una sobre la puerta 1.2 m altura estática				
55 c					
64	Pared	Tres corredizas 1.2 m opacas, (pélicula negra)	Sólida con ventanilla estática	No	De sur a norte
		Seis estáticas superiores (pélicula negra)			

Aplicación de una estrategia de monitoreo ambiental y calidad de aire en aulas educativas para determinar condiciones de habitabilidad.

15 al 25	Tres corredizas superiores opacas 1.2 m de altura			No	De norte a sur
27 al 29	Pared de 6 paneles 2.1 m, opacos		Sólida con ventanilla estática		
32 al 34	Una sobre la puerta 1.2 m altura estática				
38 al 41	Protección tipo louver				
44					
45					
52					
	Dos corredizas superiores opacas 1.2 m de altura	Dos corredizas superiores 1.2 m de altura	Sólida con ventanilla estática	Sí	De norte a sur
30	Pared de 2 paneles 2.1 m, opacos				
<i>Aulas</i>	<i>Ventanas</i>		<i>Puerta</i>	<i>A/c</i>	<i>Dirección</i>
	<i>Frete</i>	<i>Trasera</i>			
31	Una sobre la puerta 1.2 m altura estática				
	Protección tipo louver				
65	Cuatro superiores estáticas	Dos corredizas 1 m	Doble, marco de aluminio y 3 acrílicos c/u	Sí	De sur a norte
76	Seis estáticas 70 cm	Cuatro superiores estáticas 70 cm			
70 al 75	Una corrediza	Dos corredizas 50 cm de altura	Sólida con ventanilla estática	No	De sur a norte
	Una estática	Ocho ventanas estáticas			
67	Dos celosías 1 m de altura	Dos corredizas 1 m		No	De sur a norte
69	Tres estáticas 1 m de altura	Cuatro superiores estáticas 70 cm			
82					
84					

<i>Aulas</i>	<i>Ventanas</i>		<i>Puerta</i>	<i>A/c</i>	<i>Dirección</i>
	<i>Frente</i>	<i>Trasera</i>			
68	Tres celosías 1 m de altura	Dos corredizas 1 m	Sólida con ventanilla estática	No	De sur a norte
81	Dos estáticas 1 m de altura	Cuatro superiores estáticas 70 cm			
83					
66	Dos celosías 1 m de altura	Dos corredizas 1 m	Sólida con ventanilla estática	No	De sur a norte
	Dos estáticas 1 m de altura	Cuatro superiores estáticas 70 cm			
78 al 80	Una corrediza	Dos corredizas 50 cm de altura	Sólida con ventanilla estática	No	De sur a norte
77*		Ocho ventanas estáticas			
42, 43	Dos corredizas superiores opacas 1.2 m de altura	Dos corredizas superiores 1.2 m de altura	Sólida con ventanilla estática	No	De norte a sur
46 al 51	Pared de 2 paneles 2.1 m, opacos				
53 a, b,c	Una sobre la puerta 1.2 m altura, estática				
54	Protección tipo louver				
55	Dos corredizas superiores opacas 1.2 m de altura			No	De norte a sur
	Pared de 2 paneles 2.1 m, opacos	Seis corredizas superiores 1.2 m de altura	Tres puertas sólidas con ventanilla estática		
	Una sobre la puerta 1.2 m altura, estática				
	Protección tipo luover				
1t al 3t	Dos estáticas	Pared	Tres ventanas opacas	Ventilador	Este a oeste
7t al 10t	Tres corredizas superiores opacas 1.2 m de altura	Pared	Sólida con ventanilla estática	Ventilador	Este a oeste

Aulas	Ventanas		Puerta	A/c	Dirección
	Frente	Trasera			
12t al 15t	Pared de 6 paneles 2.1 m, opacos				
	Una sobre la puerta 1.2 m altura estática				
11t	Dos corredizas superiores opacas 1.2 m de altura	Pared	Sólida con ventanilla estática	Ventilador	Este a oeste
	Pared de 3 paneles 2.1 m, opacos				
	Una sobre la puerta 1.2 m altura estática				
4t	Dos corredizas superiores 50 cm de altura	Pared	Sólida con ventanilla estática	Sí	Oeste a este

Fuente: elaboración propia, 2023.

Los espacios que se seleccionaron fueron aulas de clase, laboratorios y talleres del Centro Universitario, los cuales corresponden a la muestra base de los diferentes tipos de espacios caracterizados (figura 6). El mobiliario utilizado en las aulas está conformado por butacas con paleta o mesa y sillas; el sensor remoto OnSet HOB0 MX2301A que se utilizó para la toma de datos de TBS y HR, se dispuso al centro del espacio sujetado en la estructura del plafón.

Por su parte, las mediciones de CO₂ se llevaron a cabo en puntos específicos dentro de espacios determinados a través de la selección del análisis óptimo de registro, el cual se determinó a través de un muestreo de ventilación realizado con un anemómetro ExTech AN10, con lo que se obtuvieron 12 puntos de medición de cada aula seleccionada, donde el resultado fue la obtención de media de velocidad de aire de 0.02 m/s, esto coadyuvó a la elección del punto espacial donde llevar a cabo el muestreo, el cual se retomó a partir de la medición con el menor valor recabado (0 m/ en todos los espacios).

Figura 6. Características generales de las aulas monitoreadas del Centro Universitario.



Fuente: elaboración propia.

v) Análisis y diagnóstico.

Respecto al desarrollo de los diagnósticos y análisis de los datos, se utilizarán métodos comparativos, cualitativos y cuantitativos descriptivos de las variables ambientales y de calidad de aire adecuados e implicación en la generación de condiciones inadecuadas de habitabilidad de los espacios.

Esto permitió establecer si las condiciones de habitabilidad ambiental general en los espacios monitoreados son adecuados para prevenir la propagación de enfermedades respiratorias y generar condiciones

que no afecten procesos cognitivos en los estudiantes universitarios; el proceso se establecerá con base en el análisis de las bases de datos donde se puntualizan tres variables importantes para el propósito del trabajo: dióxido de carbono (CO_2), temperatura de bulbo seco (TBS) y humedad relativa (HR).

En el análisis diagnóstico realizado se estableció la descripción de las condiciones interiores de las aulas analizadas; al determinar qué condiciones adecuadas de ppm de CO_2 se encuentran en un rango de 400 a 600, al establecer qué mediciones superiores a los 600 ppm, se considera como un ambiente medianamente insalubre (Allen, 2016; Berenguer Subils, 2000), estableciendo las necesidades de ventilación a partir de las 800 ppm; por otro lado, determinado en estudios donde se relacionaba la insalubridad del aire en espacios interiores y los efectos en los procesos cognitivos, establecen que a partir de los 650 ppm se comienza a generar una disminución de los mismos en los usuarios de los espacios.

En cuanto a las condiciones higrotérmicas, se establece la necesidad de mantener las condiciones óptimas de TBS oscilando entre la temperatura neutral y los límites superiores e inferiores de confort, determinado anteriormente en el termopreferendum, con una HR que varíe entre 35 a 60% (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE 55-2017], 2017).

Resultados

Los resultados obtenidos de los periodos de monitoreos realizados se encuentran estructurados en muestras que se recopilieron durante todo un año de monitoreo en dos periodos (tablas 8 y 9), con intervalos mensuales; los días representativos de cada monitoreo se encuentran en la última semana de cada mes y la primera del siguiente; esta programación de toma de datos nos permitió estimar de manera puntual en los días representativos de cada mes, ya que es en este intervalo cuando se generan cambios estacionales y de periodos de sensación térmica.

Tabla 8. Periodos de estudio seleccionados a partir de análisis de termopreferendum

Primer periodo de análisis - 2022								
<i>Mes</i>	<i>Mayo</i>	<i>Jun.</i>	<i>Jul.</i>	<i>Ag.</i>	<i>Sep.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Dic.</i>
intervalo monitoreo	23 a 31	Periodo inactivo		Periodo inactivo	1 a 4	3 a 7	1 a 4	1 a 7
	periodo inactivo			15 a 29	20 a 30	24 a 31	21 a 30	Periodo inactivo
Segundo periodo de análisis - 2023								
<i>Mes</i>	<i>Enero</i>	<i>Febrero</i>	<i>Marzo</i>	<i>Abril</i>	<i>Mayo</i>			
intervalo monitoreo	Periodo inactivo	1 a 10	1 a 10.	Periodo inactivo	1 a 10			
	23 a 31	20 a 28	27 a 31	20 a 28				

Fuente: elaboración propia.

Se realizaron un total de 2,981 mediciones ambientales y de calidad de aire en la muestra de nueve aulas seleccionadas en el Centro Universitario, los resultados de éstas dan muestra de condiciones insalubres de calidad de aire en los espacios en los cuales se dio el seguimiento para el levantamiento de los datos, esto quiere decir que se encontraban por arriba de los 600 ppm de CO₂.

Si se determina el diagnóstico descriptivo por periodo de monitoreo, se puede visualizar que existió un aumento de las condiciones adversas de habitabilidad en cuanto a calidad de aire en las aulas; se observa que al inicio de los monitoreos en mayo de 2022 y agosto de 2022 se obtuvieron entre 20 y 31% de mediciones en las aulas, las cuales excedían los límites establecidos por las normativas para determinar un ambiente salubre, que en concordancia con estudios sobre el efecto de este compuesto en los procesos cognitivos, afectan a los alumnos en las actividades educativas.

Tabla 9. Resultados obtenidos de monitoreo ambiental y calidad de aire mayo-agosto

<i>Salones</i>	<i>may-ago</i>		<i>CO₂ ppm</i>			<i>Variables ambientales</i>	
	<i># monitoreos</i>	<i>Media</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>TBS (° C)</i>	<i>HR (%)</i>	
9	18	625	945	284	23.7	67	
18	25	506	888	281	23.4	69	
33	25	472	845	271	23.1	69	
53a	22	493	897	267	23.8	65	
58	30	532	1004	278	23.9	67	
70	37	378	720	231	22.6	71	
81	27	382	770	255	24.3	63	
2t	23	712	1498	349	24.4	66	
14t	25	661	1119	366	24.4	66	
total	362						
>600 ppm	71						
%>600 ppm	31%						

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en los meses subsecuentes se registró un aumento exponencial en la cantidad de monitoreos, con cifras que superaban los 600 ppm de CO₂, en las aulas, donde se puntualizan las observaciones del mes de septiembre de 2022, donde se obtuvo un aumento a 45% de monitoreos superiores a los límites establecidos y determinados en este estudio; por otro lado, el mes de octubre de 2022 continuó con esta alza de porcentaje, al obtener en éste un 55%; para noviembre y diciembre de 2022 se mantenía en 55 a 59% de monitoreos con partículas de CO₂ elevadas en el ambiente interior de las aulas.

Tabla 10. Resultados obtenidos de monitoreo ambiental y calidad de aire septiembre-diciembre

<i>a)</i>		<i>septiembre</i>			<i>CO₂ ppm</i>		<i>Variables ambientales</i>	
<i>Salones</i>	<i># monitoreos</i>	<i>Media</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>TBS (° C)</i>	<i>HR (%)</i>		
9	13	634	841	426	23.3	56		
18	20	624	846	464	23.4	56		
33	22	569	880	446	23.2	56		
53a	21	580	964	403	23.7	53		
58	17	666	991	490	24.6	54		
70	28	559	929	400	23.2	55		
81	21	562	909	413	24.6	51		
2t	20	794	1,475	477	25.5	52		
14t	17	559	723	446	25.5	52		
total	179							
>600 ppm	81							
%>600 ppm	45%							

<i>b)</i>		<i>octubre</i>			<i>CO₂ ppm</i>		<i>Variables ambientales</i>	
<i>Salones</i>	<i># monitoreos</i>	<i>Media</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>TBS (° C)</i>	<i>HR (%)</i>		
9	25	695	1291	445	22.7	59		
18	31	671	1502	430	22.6	58		
33	40	629	1501	420	22.6	57		
53a	24	580	855	432	22.9	56		
58	25	824	1577	501	23.7	56		
70	52	570	1036	376	22.8	56		
81	33	626	1004	426	24.1	52		
2t	26	897	1770	416	24.8	52		
14t	29	740	1362	445	24.8	52		
total	179							
>600 ppm	81							
%>600 ppm	45%							

<i>c)</i>	<i>nov-dic</i>	<i>CO₂ ppm</i>			<i>Variables ambientales</i>	
		<i>Media</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>TBS (° C)</i>	<i>HR (%)</i>
<i>Salones</i>	<i># monitoreos</i>					
9	14	639	1367	373	22.1	44
18	18	599	1053	411	21.8	43
33	15	611	781	365	21.7	43
53a	10	743	1928	446	22.5	40
58	12	990	1784	436	23.4	41
70	18	579	896	387	22.5	40
81	19	572	822	344	23.8	37
2t	16	712	1073	377	24.3	40
14t	14	637	814	483	24.7	40
total	307					
>600 ppm	81					
%>600 ppm	60%					

Fuente: elaboración propia, 2023.

Para enero de 2023 se obtuvo el porcentaje máximo de monitoreos con valores por arriba de los 600 ppm de CO₂, llegando a alcanzar un total de 66%; por otro lado, a partir del mes de febrero de 2023 se comenzó a ver una disminución en observaciones con condiciones de calidad de aire adversas, ya que el porcentaje de incidencias con estas características se estableció en 53%; lo mismo se visualizó en el periodo comprendido en marzo de 2023, cuando este valor disminuyó hasta 36% y para el mes de abril y mayo de 2023 el número de observaciones realizadas en la aulas con cifras superiores a las establecidas (600 ppm) fue de 30%.

Tabla 11. Resultados obtenidos de monitoreo ambiental y calidad de aire, enero-mayo

<i>a)</i>	<i>enero</i>		<i>CO₂ ppm</i>			<i>Variables ambientales</i>	
	<i>Salones</i>	<i># monitoreos</i>	<i>Media</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>TBS (° C)</i>	<i>HR (%)</i>
9		30	854	1638	478	21.1	44
18		38	666	1501	417	20.6	40
33		40	898	2767	476	20.5	41
53a		39	752	1227	440	21.1	39
58		41	1032	2199	456	21.9	41
70		43	685	1402	550	22	37
81		43	648	1222	417	22.2	36
2t		47	846	1493	445	23.1	38
14t		44	738	1505	541	23.1	38
total		365					
>600 ppm		242					
%>600 ppm		66%					

<i>b)</i>	<i>septiembre</i>		<i>CO₂ ppm</i>			<i>Variables ambientales</i>	
	<i>Salones</i>	<i># monitoreos</i>	<i>Media</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>TBS (° C)</i>	<i>HR (%)</i>
9		32	747	1686	422	22	41
18		30	656	1470	430	21.7	38
33		37	655	1489	610	21.9	37
53a		26	678	1661	402	22.5	36
58		33	928	2138	444	23.1	38
70		52	587	964	423	23.2	34
81		53	573	905	428	23.8	33
2t		57	721	1821	414	24.1	36
14t		55	713	1890	430	24.1	36
total		375					
>600 ppm		199					
%>600 ppm		53%					

<i>c)</i>	<i>septiembre</i>		<i>CO₂ ppm</i>			<i>Variables ambientales</i>	
	<i>Salones</i>	<i># monitoreos</i>	<i>Media</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>TBS (° C)</i>	<i>HR (%)</i>
9	64	615	1470	379	23.5	29	
18	87	524	971	379	24.3	26	
33	78	524	972	433	24.2	26	
53a	82	557	1269	386	24.8	25	
58	72	697	2006	389	25	26	
70	106	496	815	384	24.6	25	
81	102	495	1229	378	25.6	23	
2t	105	732	1569	398	25.8	26	
14t	83	724	1856	415	25.8	26	
total	779						
>600 ppm	282						
%>600 ppm	36%						

<i>d)</i>	<i>septiembre</i>		<i>CO₂ ppm</i>			<i>Variables ambientales</i>	
	<i>Salones</i>	<i># monitoreos</i>	<i>Media</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>TBS (° C)</i>	<i>HR (%)</i>
9	26	581	964	367	24.9	25	
18	25	468	559	373	26.4	20	
33	30	454	618	385	25.6	21	
53a	29	507	818	360	26.4	20	
58	27	655	1224	377	25.9	23	
70	36	469	710	374	26.4	20	
81	47	451	615	351	26.7	19	
2t	48	584	1264	369	25.4	23	
14t	31	729	1341	406	27	23	
total	299						
>600 ppm	91						
%>600 ppm	30%						

Fuente: elaboración propia (2023).

Cabe destacar que si bien existieron condiciones medias por arriba de los valores estipulados en todas las temporadas de monitoreo, puntualmente se obtuvieron valores preocupantes, sobre todo en los intervalos de noviembre a marzo, cuando se alcanzaron valores máximos de 2,767 ppm de CO₂ (enero de 2023, véase tabla 11a), 2,138 ppm (febrero 2023, véase tabla 11b), 2,006 ppm (marzo de 2023, tabla 11c) y 1,978 ppm (noviembre-diciembre 2022, tabla 10c); en estos casos se tenían condiciones de habitabilidad en el aula inadecuadas para que los alumnos llevaran a cabo las actividades de manera óptima y de forma segura.

Por otro lado, en cuanto a las condiciones higrotérmicas dentro de las aulas, donde se estableció que los valores adecuados (ANSI/ASHRAE 55-2017, 2017; ISO 17772-1, 2017; ISO 7730, 2006) oscilaron de manera normal en el interior, manteniendo las aulas en general una temperatura entre los 21 a los 25° C, alcanzando los 26° C y una humedad relativa monitoreada en un rango de los 19 a los 71% a lo largo de la temporada de estudio y toma de muestras. En este sentido, se puede establecer que tanto la temperatura como la humedad relativa fueron adecuadas para generar condiciones apropiadas de habitabilidad térmica en las aulas de la muestra en el Centro Universitario, aunque existieron algunos meses (marzo y abril) en los cuales las condiciones de HR se encontraron por debajo de las adecuadas (tablas 10c y 10d).

Discusión

Es determinante en este sentido enfatizar la relevancia de este estudio descriptivo en las aulas del Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, que ha puesto de manifiesto la necesidad de establecer de manera puntual las condiciones en las cuales se están llevando a cabo las actividades y procesos educativos de la comunidad estudiantil. Es en este sentido que se puede determinar, a través de la fundamentación antes descrita, que las aulas analizadas a través de las estrategias de monitoreo no proporcionan las características de habitabilidad adecuadas para un óptimo rendimiento de los usuarios de las mismas; asimismo, estas con-

diciones pueden posibilitar la afectación de la morbilidad de los mismos, ya que estudios realizados durante la pandemia de SARS-CoV-2 pudieron demostrar, de manera parcial, que el contar con valores elevados de CO₂ y una valoración higrotérmica inadecuada pueden contribuir no sólo a un aumento de contagios de covid-19, sino de otras enfermedades respiratorias (Jhun *et al.*, 2017; Kaji *et al.*, 2014).

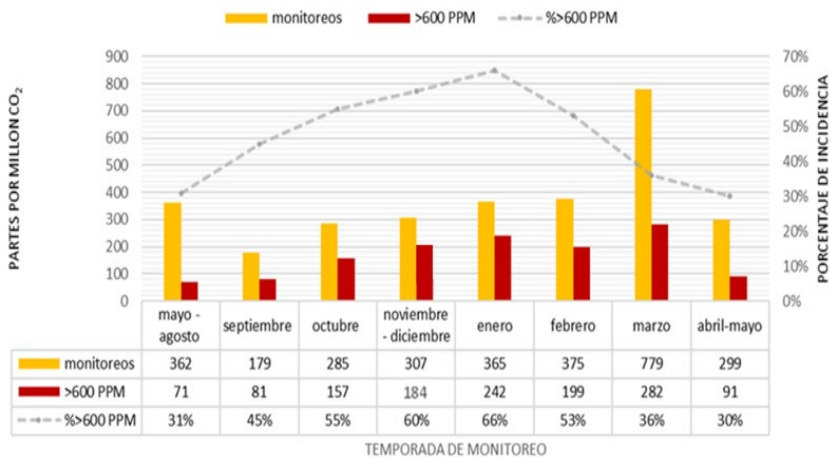
En este punto es necesario establecer que a través de este trabajo se ha podido determinar y diagnosticar en una primera etapa, una serie de deficiencias espaciales, provocadas por un diseño inadecuado; el primer factor que queda expuesto es la deficiencia de una ventilación adecuada, la cual es necesaria para la renovación del aire viciado en el interior; esto se debe a características propias de los espacios, las cuales inhiben la eficiencia de la ventilación cruzada, dentro de las cuales podemos nombrar: i) mal diseño y localización de ventanas; ii) colocación de elementos exteriores (louvers metálicos fijos) que impiden el flujo del aire en el interior; iii) colocación de una película opaca que impide la entrada de iluminación difusa al interior del espacio; estas condiciones exacerban y afectan de manera directa la habitabilidad de los espacios estudiados.

Por otro lado un segundo factor, del cual se puede establecer que una parte determinante que afecta al aumento de las concentraciones de CO₂ en el interior de las aulas estudiadas es la intensidad y ocupación de las aulas analizadas, esto puede ser un factor significativo que llevó a la obtención de valores elevados, puesto que de media, los espacios educativos del CU cuentan con una cantidad de 25 estudiantes; si bien esto puede detonar el aumento drástico de las partículas estudiadas, combinado con el punto anterior el cual puntualizaba el mal diseño de ventilación en la mayoría de los espacios, conlleva a fomentar aulas insalubres donde —basados en los trabajos de Allen (2016), Cao (2022) y Satish (2012)— pueden generar una disminución considerable en los procesos cognitivos de los estudiantes que se encuentren desarrollando actividades propias de aprendizaje, razonamiento y toma de decisiones.

Asimismo, un tercer factor determinante es, si se analiza el conjunto de datos y que sin tomarlo en cuenta al comienzo de la investigación, que

puede afectar directamente al aumento o la disminución de las partículas de CO₂ en espacios interiores, es la estacionalidad anual; esto se puede vislumbrar con el aumento gradual de las incidencias de valores que podrían considerarse inadecuados para procesos cognitivos y que pueden tener afectaciones en la morbilidad en cuestiones respiratorias de los usuarios. A lo largo de este trabajo se pudo observar un aumento de hasta 100% de monitoreos que comenzaron a superar los valores establecidos como permisibles para no afectar a los estudiantes en sus actividades diarias (figura 7).

Figura 7. Relación entre monitoreo e incidencia de condiciones insalubres en las aulas



Fuente: elaboración propia.

Lo anterior se puede explicar por el efecto de inversión térmica que sucede en las ciudades y que es retroalimentada por el efecto de la isla de calor urbana; esto implica que la mayoría de los gases no se puedan disipar a las capas altas de la atmósfera y los mismos se sitúen por debajo de los 20 m, afectando de esta manera a los espacios interiores. Esto, en combinación con la mala ventilación y una alta ocupación del espacio, empeoran las condiciones de las aulas educativas.

Como cuarto factor que puede estar detonando esta problemática en estos espacios —el cual es también externo a cuestiones de infraestructura—, es el índice de vegetación de los espacios circundantes (el Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, sede Huentitán, en donde se llevó a cabo el estudio se encuentra al borde de la barranca nombrada como la localidad y por la cual corre el río Santiago, en la cual se encuentra un bosque bajo característico de la región); en este punto se cuenta con una hipótesis la cual se estructura a partir de que en los periodos de monitoreo que coincidieron con las temporadas de primavera y verano, que son consecuentes con la época de lluvias en la región y donde comienzan los procesos de florecimiento y reverdecimiento de la vegetación, se obtuvieron mediciones con menos incidencia en cuanto a índices de CO₂.

Conclusiones

Lo anterior es una base de partida importante para generar un diagnóstico viable con el cual se determine que, en las condiciones actuales del centro la mayoría de los espacios educativos, a través de las características espaciales de las aulas en las que se imparte la enseñanza de la arquitectura y otras carreras afines, no generan condiciones de habitabilidad adecuadas y que en la mayoría de los casos y en conjunción con diversos factores (sobrecapacidad de los espacios por parte de los estudiantes, aspectos estacionales anuales, etc.) antes descritos, pueden detonar procesos que afecten las capacidades cognitivas de los estudiantes universitarios, y además que, como parte de la nueva normalidad tras el largo periodo de pandemia, puede afectar en los aspectos de salud física y mental de la comunidad estudiantil (Morganti, 2022).

Por lo tanto, es imperante poner sobre la agenda el desarrollo de una nueva concepción de diseño en espacios educativos que se encamine a fomentar paradigmas de: i) adecuación de aulas y edificios ya existentes para mejorar las condiciones de habitabilidad; ii) la conformación de nuevas directrices de proyección arquitectónica encaminadas a utilizar

procesos alternativos que coadyuven de manera directa al mejoramiento de las condiciones de habitabilidad y que disminuyan los riesgos de disminución en los procesos cognitivos educativos y de salud de los alumnos, y iii) el fomento, desde la comunidad universitaria en general, a través de lo antes descrito, de la sustentabilidad y cambios de paradigma en los procesos educativos.

Esto implica el replanteamiento de las normativas actuales de diseño de la Universidad de Guadalajara, con lo cual se puede potenciar, como se mencionó, la generación de paradigmas encaminados en dos líneas principales: i) cuidado del bienestar y salud de la comunidad universitaria, y ii) aspectos de sustentabilidad (MacNaughton, Spengler, Vallarino, Santanam, Satish & Allen, 2016). Lo anterior se puede reforzar en el desarrollo de edificios con base en lo diagnosticado anteriormente, que cuenten con:

- i. Optimización de la ventilación (mejorar el diseño de las ventanas y aperturas).
- ii. Control de la humedad (mejorar la ventilación y la radiación en interiores).
- iii. Optimización de temperatura (mejorar los elementos de protección, colores y materiales).
- iv. Optimización de la iluminación (buscando diseños adecuados en ventanas).

Todo esto se puede lograr al generar diseños que se encaminen en la línea del bioclimatismo y sustentabilidad, utilizando técnicas que se alineen con estos principios, y la reformulación del uso de la vegetación (derivado de una de las hipótesis surgidas de esta investigación); en otras palabras, retomar los aspectos biofílicos de nuevo en la proyección arquitectónica, siempre estableciendo que la pertinencia de los resultados de este estudio no puede extrapolarse o generalizarse, pues lo que se encontró en esta investigación es reflejo de las condiciones específicas de la localidad y del Centro Universitario, con lo que se exhorta al lector e investigadores a generar este tipo de trabajos y así diagnosticar y determinar las condiciones propias de sus entornos.

Aspectos prospectivos

Por otro lado se prevé la necesidad, a manera prospectiva y a raíz del desarrollo de este trabajo, de dar una continuidad del mismo al establecer la pertinencia de llevar a cabo estos puntos descritos con antelación a través del desarrollo de un pilotaje dentro del Centro Universitario, el cual se encuentre conceptualizado mediante procesos alternativos de adecuaciones espaciales que se encaminen al desarrollo de espacios bio-climáticos y sustentables, donde se combinen estrategias de ventilación, climatización pasivas e iluminación optimizada con una incorporación de estrategias de vegetación interior para contrastar y establecer la eficiencia y eficacia de lo que aquí se menciona.

Es imperante establecer, a manera de conclusión, que es necesaria la iniciativa y el desarrollo de este tipo de investigaciones, donde se relacionen no sólo procesos metodológicos y de análisis descriptivos de las condiciones de habitabilidad de los espacios interiores, en este caso las aulas educativas, sino también aquellos que encaminen a contrastar y validar procesos alternativos de diseño. Pero en otro ámbito, el desarrollar estudios que relacionen de manera directa los efectos de las decisiones de diseño en aspectos tales como la salud y el bienestar de los usuarios de los espacios, que a manera de refuerzo reformulen los paradigmas de proyección y construcción para incidir en cambios institucionales que fortalezcan los aspectos normativos hacia una nueva visión institucional en relación con la generación de infraestructura adecuada, sustentable y más humana para la comunidad universitaria.

Referencias bibliográficas

- Allen, J. G., MacNaughton, P., Laurent, J. G., Flanigan, S. S., Eitland, E. S., & Spengler, J. D. (2015). Green buildings and health. *Current Environmental Health Reports*, 2(3), 250-258. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40572-015-0063-y>
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). Associations of cognitive function scores

- with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environ. Health Perspect*, 124, 805-812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2013). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta: ASHRAE.
- . (2017). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: ASHRAE.
- Auliciems, A., & Szokolay, S. (1997). *Thermal comfort*. Plea: Passive and Low Energy Architecture International/University of Queensland Printery.
- Berenguer Subils, M., & Bernal Domínguez, F. (2000). *NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior* (p. 9). Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España/Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-1d08b22e1074
- Bloch-Salisbury, E., Lansing R., & Shea, S. A. (2003). Acute changes in carbon dioxide levels alter the electroencephalogram without affecting cognitive function. *Psychophysiology*, 37(4), 418-426. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3740418>
- Cao, X., Li, P., Zhang, J., & Pang, L. (2022). Associations of Human Cognitive Abilities with Elevated Carbon Dioxide Concentrations in an Enclosed Chamber. *Atmospher*, 13(6), 891. <https://doi.org/10.3390/atmos13060891>
- Carazo Fernández, L., Fernández Álvarez, R., González-Barcala, F. J., & Rodríguez Portal, J. A. (2013). Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Archivos de Bronconeumología*, 49(1), 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.04.005>
- Center for Disease Control and Prevention (CDCP). (2021). *Scientific Brief: SARS-CoV-2 and Potential Airborne Transmission*. <<https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/more/scientific-brief-sars-cov-2.html>>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2023). *Introducción a la calidad del aire interior*. Recuperado el 17 de marzo de 2023 de: <https://espanol.epa.gov/cai/introduccion-la-calidad-del-aire-interior>

- Fothergill, D., & Hedges, D., & Morrison, J. (1991). Effects of CO₂ and N₂ partial pressures on cognitive and psychomotor performance. *Undersea Biomedical Research*, 18, 1-19.
- Hui, D. S., Azhar, E. I., Kim, Y. J., Memish, Z. A., Oh, M. D., & Zumla A. (2018). Middle East respiratory syndrome coronavirus: Risk factors and determinants of primary, household, and nosocomial transmission. *Lancet Infect Diseases* 18, 217-227. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(18\)30127-0](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(18)30127-0)
- International Organization for Standardization (IOS). (1998). *Iso 7726 Ergonomics of the thermal environment – instruments for measuring physical quantities*. Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization.
- . *Iso 17772-1 Energy performance of buildings —Indoor environmental quality— Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings*. Suiza: International Organization for Standardization.
- . (2006). *Iso 7730 Ergonomics of the thermal environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. Suiza: International Organization for Standardization.
- Jacobs, D. E., Ahonen, E., Dixon, S. L., Dorevitch, S., Breyse, J., Smith, J., Evens, A., Dobrez, D., Isaacson, M., Murphy, C., Conroy, L. & Levavi, P. (2015). Moving into green healthy housing. *Journal of Public Health Management and Practice*, 21(4), 345-354. <https://doi.org/10.1097/phh.0000000000000047>
- Jhun, I., Gaffin, J. M., Coull, B. A., Huffaker, M. F., Petty, C. R., Sheehan, W. J., Baxi, S. N., Lai, P. S., Kang, C. M., Wolfson, J. M., Gold, D. R., Koutrakis, P. & Phipatanakul, W. (2017). School Environmental Intervention to Reduce Particulate Pollutant Exposures for Children with Asthma. *J Allergy Clin Immunol Pract*, 5(1), 154-159. <https://doi.org/10.1016/j.jaip.2016.07.018>
- Kaji, D. A., Belli, A. J., McCormack, M. C., Matsui, E. C., Williams, D. L., Paulin, L., Putcha, N., Peng, R. D., Diette, G. B., Breyse, P. N. & Hansel, N. N. (2014). Indoor pollutant exposure is associated with heightened respiratory symptoms in atopic compared

- to non-atopic individuals with COPD. *BMC Pulmonary Medicine*, 14(147). <https://doi.org/10.1186/1471-2466-14-147d>
- Kuramochi, H., Tsurumi, R., & Ishibashi, Y. (2023). Meta-Analysis of the Effect of Ventilation on Intellectual Productivity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 28(8), 55-76. <https://doi.org/10.3390/ijerph20085576>
- Laurent, J. G. C., MacNaughton, P., Jones, E., Young, A. S., Bliss, M., Flanagan, S., Vallarino, J., Chen, L. J., Cao, X., & Allen, J. G. (2021). Associations between Acute Exposures to PM2.5 and Carbon Dioxide Indoors and Cognitive Function in Office Workers: A Multicountry Longitudinal Prospective Observational Study. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1bd8>
- MacNaughton, P., Spengler, J., Vallarino, J., Santanam, S., Satish, U., & Allen, J. (2016). Environmental Perceptions and Health before and after Relocation to a Green Building. *Building and Environment*, 104, 138-144. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.011>
- Maddalena, R., Mendell, M. J., Eliseeva, K., Chan, W. R., Sullivan, D. P., Russell, M., Satish, U., & Fisk, W. J. (2015). Effects of ventilation rate per person and per floor area on perceived air quality, sick building syndrome symptoms, and decision-making. *Indoor Air*, 25(4), 362-370. <https://doi.org/10.1111/ina.12149>
- Morganti, A., Brambilla, A., Aguglia, A., Amerio, A., Miletto, N., Parodi, N., Porcelli, C., Odone, A., Costanza, A., Signorelli, C., Serafini, G., Amore, M., & Capolongo, S. (2022). Effect of Housing Quality on the Mental Health of University Students during the Covid-19 Lockdown. *International Journal Environmental Research Public Health*, 19(5), 2918. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052918>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura-Comisión Económica para América Latina y el Caribe (UNESCO-CEPAL). (2020). *La educación en tiempos de la pandemia de covid-19*.
- OSHA, O. S. a. H. A. (2012). *Sampling and Analytical Methods: Carbon Dioxide in Workplace Atmospheres*. <http://www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id172/id172.html>

- Salamanca-Fernández, E., Rodríguez-Barranco, M., & Sánchez, M. J. (2021). Influencia de la temperatura ambiental y la contaminación en la transmisión del SARS-CoV-2. *Revista Española de Salud Pública*, 95.
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12). <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER). (2007). *Risk assessment on indoor air quality*.
- Scully, R. R., Basner, M., Nasrini, J., Lam, C. W., Hermosillo, E., Gur, R. C., Moore, T., Alexander, D. J., Satish, U., & Ryder, V. E. (2019). Effects of acute exposures to carbon dioxide on decision making and cognition in astronaut-like subjects. *NPJ Microgravity*. <https://doi.org/10.1038/s41526-019-0071-6>
- Sistema Meteorológico Nacional (SMN). (2023). *Normales climatológicas para el estado de Jalisco, Ciudad de Guadalajara*. Comisión Nacional del Agua Recuperado el 27 de abril de 2023 de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=jalisco>
- Torres, G., Mourad, M., & Leheste, J. R. (2022). Indoor Air Pollution and Decision-Making Behavior: An Interdisciplinary Review. *Cureus*, 14(6). <https://doi.org/10.7759/cureus.26247>
- World Health Organization (WHO). (2020). *Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (Covid-19)*. Disponible en: <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/who-china-joint-mission-on-covid19-final-report.pdf>
- Yu, P., Zhu, J., Zhang, Z., & Han, Y. (2020). A Familial Cluster of Infection Associated with the 2019 Novel Coronavirus Indicating Possible Person-to-Person Transmission During the Incubation Period. *J Infect Dis.*, 221(11). 1757-1761. <https://doi.org/10.1093/infdis/jiaa077>

Innovación en el proceso de proyectorión arquitectónica de edificaciones sustentables

*José Manuel Ochoa de la Torre*¹
*Irene Marincic Lovriha*²
*Cecilia María Galindo Borbón*³

Resumen

A través de un estudio de caso, en este capítulo se presenta el proceso de proyectación innovadora de un edificio educativo, utilizando un método que combina técnicas cualitativas y cuantitativas de manera adecuada, así como tecnologías digitales y robóticas emergentes, con la participación activa de los usuarios. Se describen opciones metodológicas y tecnológicas avanzadas que pueden aplicarse en diferentes etapas del proceso de diseño, comenzando desde la fase de estudios preliminares, donde se identifican las expectativas y necesidades de los usuarios, así como en el análisis de las variables ambientales y el contexto físico, hasta la modelación y simulación del proyecto.

1 Universidad de Sonora, México. josemanuel.ochoa@unison.mx

2 Universidad de Sonora, México. irene.marincic@unison.mx

3 Universidad de Sonora, México. cecilia.galindo@unison.mx

A lo largo de todo el proceso se utilizan herramientas como el diseño participativo, plataformas para realizar estudios de opinión en línea, *charretes* de diseño, vehículos aéreos no tripulados para la teledetección, modelado y fabricación digital, así como la realidad aumentada. Además, se emplea la tecnología BIM (*Building Information Modeling*) como plataforma integradora del proceso.

También se plantea la evaluación postconstrucción mediante la recopilación y análisis de múltiples variables, medidas a través de sensores incorporados a la estructura, así como la interacción constante con el usuario. Esto permite evaluar el resultado final y garantizar la retroalimentación para futuros proyectos.

En el presente trabajo se describe la intervención del equipo del Laboratorio de Energía, Medio Ambiente y Arquitectura de la Universidad de Sonora en la primera etapa del proyecto, que abarca los estudios preliminares y el anteproyecto arquitectónico. Además, se proporciona una descripción del proceso del proyecto ejecutivo y, finalmente, se ilustran algunas etapas del proceso de construcción del edificio, el cual ya está realizado a la fecha de esta publicación.

Introducción

El proceso usual de diseño arquitectónico, con sus diferentes etapas de análisis de la información, programación, diseño y construcción, parece suficiente para que el arquitecto pueda desarrollar un proyecto que satisfaga al usuario o grupo de usuarios que lo solicitan, sobre todo para proyectos de cierta escala, como podría ser una casa habitación familiar, donde el proyectista conoce y está en contacto con los usuarios, quienes generan la necesidad del proyecto. En este caso se pueden conocer con cierta profundidad sus deseos y necesidades, ya sean psicológicas, funcionales, características proxémicas, incluso hábitos y costumbres personales, logrando con esto un proyecto muy aproximado a lo que requieren los usuarios, que también son sus clientes.

Sin embargo, en grandes proyectos como pueden ser edificios corporativos o los desarrollos habitacionales masivos, donde el cliente (quien genera la necesidad del proyecto) no está ligado con el usuario directo (las personas que lo habitarán), las decisiones sobre el programa arquitectónico, las características físicas y ambientales del proyecto se pueden llegar a tomar, principalmente, con base en criterios financieros y técnicos, suponiendo lo que los usuarios finales necesitan.

En algunos casos se generan edificaciones que requieren de múltiples adaptaciones y concesiones por parte de los usuarios para ser habitadas, y en otros, edificaciones disfuncionales que terminan por ser abandonadas por los usuarios finales.

Un ejemplo de lo anterior es el de los desarrollos habitacionales que se construyeron en las primeras dos décadas del siglo XXI en todo México, que en muchos casos acabaron abandonados por los usuarios debido a las deficientes condiciones de habitabilidad y ubicación alejados de los centros de trabajo e infraestructura urbana, así como por falta de seguridad, entre otros factores (Maycotte Pansza & Sánchez Flores, 2009; Coneval, 2018). La cifra de viviendas abandonadas o deshabitadas era tan alarmante que rondaba el 14% de las viviendas construidas en el país, que en 2010 se acercaba a los cinco millones de unidades, según datos del INEGI (Altamirano, 2019).

Otros aspectos, que generalmente no se toman en cuenta con profundidad en el proceso de diseño, son las preexistencias ambientales, que pueden ser de orden climático, geográfico, biológico y tecnológico (Serra Florensa & Coch Roura, 1995); así como las necesidades bioclimáticas de los usuarios, por ejemplo: confort termohigrométrico, niveles de iluminación, acústica y eficiencia energética, entre otras. El conocimiento de las preexistencias y las necesidades como punto de partida para la proyectación condicionan el nivel de habitabilidad de los desarrollos habitacionales y las edificaciones en general (Ochoa de la Torre & Marincic Lovriha, 2016).

En este capítulo se presenta un proceso innovador de proyectación, en el que se destacan las múltiples posibilidades que ofrece la tecnología en cada una de sus etapas. Se ilustra mediante el estudio de caso de un edificio educativo que, además, funciona como prototipo demostrativo bioclimático. En este proyecto se emplea un método que integra de forma equilibrada técnicas cualitativas y cuantitativas, así como tecnologías digitales y robóticas emergentes. Un aspecto fundamental es la participación activa de los usuarios a lo largo del proceso. Asimismo, se exponen diversas opciones metodológicas y tecnológicas de vanguardia para las distintas fases del diseño.

Durante el desarrollo del proyecto se utilizaron herramientas como el diseño participativo, plataformas en línea para estudios de opinión, *charettes* de diseño, vehículos aéreos no tripulados para teledetección, modelado del proyecto y fabricación digital, además de la representación mediante realidad aumentada. Todo ello se integró a través de la tecnología BIM (*Building Information Modeling*), que fungió como plataforma central del proceso.

Por último, se plantea una evaluación postconstrucción basada en la recopilación y análisis de múltiples variables, obtenidas tanto a través de sensores incorporados en la estructura como mediante el seguimiento de la interacción constante con los usuarios. Esta información permitirá evaluar el desempeño final del edificio en condiciones reales de uso y proporcionando la retroalimentación necesaria para futuros proyectos.

Antecedentes y estudio de caso

En 2018 los grupos de investigación del Laboratorio de Energía, Medio Ambiente y Arquitectura (LEMA) de la Universidad de Sonora (UNISON) y del Lawrence Berkeley National Laboratory (LNBL) fueron invitados por el grupo Energía en Edificaciones del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a participar en el proyecto “Edificios demostrativos de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo en el Instituto de Energías Renovables de

la UNAM”, financiado por el entonces Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México⁴ (CONACYT), la UNAM y el Gobierno del Estado de Morelos en México.

El objetivo de dicho proyecto era diseñar, construir y evaluar un edificio educativo para licenciatura, que fuese ejemplo de diseño bio-climático y del empleo de sistemas de acondicionamiento ambiental pasivos y de bajo consumo de energía, para el clima cálido subhúmedo de Temixco, Morelos, México.

El proyecto se desarrollaría en un terreno adyacente al Instituto (IER) aportado por el Gobierno del Estado de Morelos, lo que permitiría la ampliación de su infraestructura educativa y de investigación. La intervención del LEMA en la primera etapa consistió en la coordinación y realización del anteproyecto arquitectónico y proyecto ejecutivo del plan maestro (PM) del desarrollo del conjunto de la ampliación del IER, el cual contempla la construcción de dos edificios y un auditorio con sala de exhibiciones, así como el anteproyecto arquitectónico del primer edificio de docencia (E1). Éste debería contar con aulas, laboratorios y servicios, cuyo diseño y evaluación está contemplado en el proyecto de investigación. Posteriormente se realizaría la supervisión y asesoría del proyecto ejecutivo del edificio E1, así como su integración con el plan maestro.

El proyecto, planteado para desarrollarse en cuatro años, contemplaba otras tres etapas, que consisten en la supervisión de la construcción del edificio E1, diseño e instalación de los sistemas de acondicionamiento ambiental, así como el monitoreo y evaluación del edificio y los sistemas en funcionamiento.

En el presente trabajo se describe la intervención del LEMA en la primera etapa del proyecto, ya concluida a la fecha de elaboración de este capítulo, así como la descripción del proceso del proyecto ejecutivo y se ilustran algunas etapas del proceso de la construcción del edificio, el cual está ya concluido a la fecha de esta publicación.

4 Actualmente la institución se denomina Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Proceso metodológico

En un sentido muy amplio, el diseño arquitectónico se podría definir como una actividad que se enfoca en la creación de espacios habitables para el ser humano, sean éstos exteriores o interiores. Se supone que, en la mayoría de los casos, un profesional del diseño arquitectónico, es decir un arquitecto, es quien debería estar a cargo del proceso de diseño y la materialización de éstos. Sin embargo, cuando un proyecto alcanza un cierto grado de complejidad, el proceso de diseño se vuelve un trabajo interdisciplinario, donde confluyen con la arquitectura las ciencias sociales, ingeniería, ergonomía, física y tantas disciplinas como lo requiera el proyecto, a fin de cumplir con las exigencias proyectuales que demanda su estado de habitabilidad. Aun cuando la naturaleza de este proyecto pondera las exigencias ambientales, se le ha dado gran importancia a la participación de los usuarios a lo largo de todo su desarrollo.

La metodología aquí descrita está fundamentada en las experiencias de investigación llevadas a cabo por el equipo del LEMA, con énfasis en la aplicación a proyectos reales desarrollados en la práctica profesional de la arquitectura, que representan la consolidación de la metodología de diseño desarrollada en el LEMA a lo largo de los años, denominada “diseño bioclimático integrado” o DBI (Ochoa de la Torre, 2025).

Participar en este proyecto desde la concepción del programa arquitectónico hasta la supervisión de la construcción y la evaluación del edificio en uso, permite aprovechar al máximo el potencial de las estrategias bioclimáticas y los sistemas de acondicionamiento ambiental propuestos. Esto se traduce en mejoras en la eficiencia energética y el confort ambiental para los usuarios del edificio.

No obstante, un edificio no sólo debe ser eficiente energéticamente y confortable, sino también funcional, seguro y estéticamente agradable. Estas cinco características sólo se pueden lograr si todos los actores involucrados trabajan de manera conjunta e integral durante el proceso de diseño.

Se parte de cuatro premisas fundamentales: la participación del usuario en todo el proceso, la adecuación al medio ambiente, el diseño sustentable

y el uso de tecnología de punta aplicada al proyecto y construcción. En la figura 1 se muestra de manera esquemática este proceso.

Se inicia con la etapa de estudios preliminares, en la que se identifican las expectativas y necesidades de los usuarios, así como se efectúa el análisis de las variables ambientales y el contexto físico.

Partiendo de un programa de necesidades planteado por los directivos del IER, se desarrolla una estrategia participativa a través de entrevistas con actores clave, grupos focales con los distintos tipos de usuarios y un cuestionario en línea para conocer ciertas preferencias de diseño, así como una presentación plenaria a la comunidad del instituto.

Simultáneamente a este proceso, se hace un levantamiento del contexto físico del sitio a través de ortofotografías tridimensionales tomadas con un vehículo aéreo no tripulado o dron, que más tarde se complementará con un estudio topográfico convencional. Asimismo, se hace un análisis de toda la normatividad y reglamentación aplicable al proyecto. Toda esta información sirvió para obtener el primer programa arquitectónico, con el cual se inicia la segunda etapa.

En la segunda etapa se definen las estrategias de diseño, que dan forma al proyecto. Con este fin se constituye un grupo de trabajo compuesto por expertos en diferentes disciplinas, como diseño arquitectónico, estructuras, sistemas constructivos, diseño bioclimático, costos, informática, etc., con el fin de que aporten ideas para la realización del proyecto, en un principio como “lluvia de ideas”. A este proceso se le denomina *charrette*. Después de la primera sesión, que incluyó a todos los integrantes del grupo de trabajo e invitados, se llevaron a cabo “mini *charrettes*” de forma periódica, para retroalimentar y darle seguimiento al desarrollo del proyecto. Cabe destacar que el grupo de trabajo del IER, además de ser los futuros usuarios, participaron como expertos, por lo que tuvieron un doble papel en el proyecto.

La tercera etapa, como se muestra en la figura 1, consistió en el desarrollo del proyecto arquitectónico, cuyo objetivo final fue un anteproyecto detallado que contuviese todos los elementos indispensables característicos del edificio para facilitar la elaboración del proyecto ejecutivo.

Esta etapa se inició con la utilización de una plataforma BIM (*Building Information Modeling*) específicamente con Autodesk Revit,⁵ la cual nos permitió integrar de manera eficiente el trabajo y las contribuciones de las distintas instituciones y especialidades que participaron el proyecto.

La cuarta etapa corresponde al proyecto ejecutivo, que incluye a todos los planos y documentos necesarios para la construcción del edificio, que fue desarrollada por un despacho o estudio de arquitectura independiente, supervisado por los grupos de trabajo del IER y LEMA, cuidando que se respetaran, en la medida de lo posible, los objetivos de diseño y los requerimientos del proyecto de investigación.

La quinta etapa del proceso corresponde a la construcción del edificio, en la cual se supervisaría no solamente la observancia del proyecto arquitectónico, sino también la del proyecto de investigación. Incluiría todos los sistemas de control climático especiales y los sistemas de monitoreo, los cuales forman parte integral del edificio.

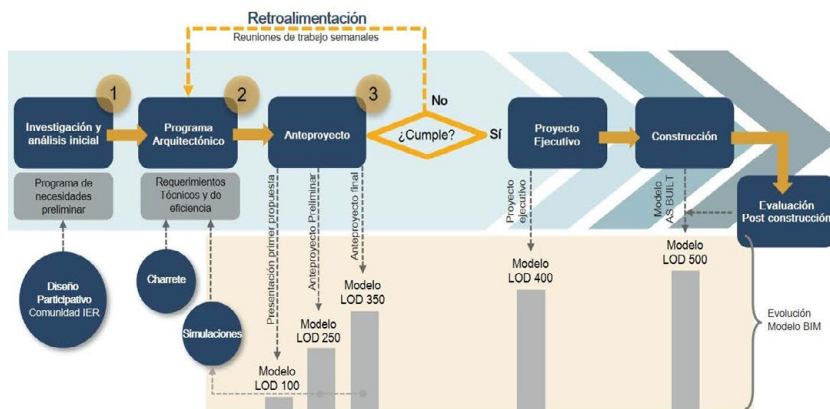
Por último, en la sexta etapa se plantea la evaluación postconstrucción mediante la recopilación y análisis de múltiples variables, medidas mediante sensores incorporados a la estructura, así como con datos de la interacción constante con el usuario, lo que permitiría evaluar el resultado final y la retroalimentación para futuros proyectos.

¿Por qué es innovador el diseño bioclimático integrado? Esta metodología de diseño se distingue por su enfoque integral y participativo, que va más allá de la simple creación de espacios habitables. El análisis detallado del clima y de las preexistencias ambientales permite definir las necesidades bioclimáticas, las estrategias de diseño y las soluciones técnicas enfocadas en el confort ambiental y el uso eficiente de la energía. Al involucrar a los usuarios desde la concepción del programa arquitectónico y durante todo el proceso, se garantiza que el edificio responda a sus necesidades y expectativas reales. La combinación de métodos de investigación cualitativos y cuantitativos, como entrevistas, grupos focales y encuestas en línea, permite obtener una comprensión profunda de

5 <https://www.autodesk.mx/products/revit/overview>

las preferencias de los usuarios. Además, el uso de tecnología de punta, como drones para el levantamiento del sitio y herramientas informáticas para el diseño y la simulación ambiental, optimiza el proceso y permite explorar diversas soluciones de manera eficiente. La participación de expertos de diversas disciplinas enriquece el proyecto y asegura que se consideren todos los aspectos relevantes, desde la eficiencia energética y el confort ambiental, hasta la funcionalidad y la estética.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de diseño en todas sus etapas



Fuente: elaboración propia.

Del primer contacto al proyecto arquitectónico, estudio de caso: edificio educativo bioclimático

Innovación en la investigación de las necesidades del usuario y la programación

En este apartado se describen las actividades correspondientes a las dos primeras etapas del proyecto, que abarcan la fase de estudios preliminares y la programación arquitectónica.

Diseño participativo y los usuarios directos

El diseño participativo se podría entender como un proceso en el que de manera colectiva usuarios y diseñadores definen necesidades y hacen propuestas, basadas en el desarrollo de sus actividades cotidianas, sobre un proyecto en particular.

Un proyecto obtenido mediante este proceso permite entender de manera más eficiente las necesidades y aspiraciones de los usuarios, basándose en sus vivencias, cultura y bagaje empírico, se reconocen sus aportaciones a la solución del proyecto, lo que les permite apropiarse de éste desde el inicio del proceso.

En el caso estudiado que se describe a continuación, el proceso se caracteriza por un equilibrio en la relación comunidad de usuarios y arquitectos, siendo ésta más o menos simétrica y simbólica a la vez, donde cada actor hace aportaciones que contribuyen a la concepción, diseño, edificación y desempeño del edificio resultante.

El proceso de diseño participativo se lleva a cabo en dos etapas, que incluyen diversas actividades. Asimismo, de forma paralela, durante todo el proceso de desarrollo del proyecto se lleva a cabo una dinámica de acompañamiento con reuniones periódicas donde se involucran tanto usuarios directos, como expertos en distintas áreas de desarrollo del proyecto, así como los participantes del proyecto de investigación.

Primera etapa del proceso de diseño participativo

Como parte de la primera etapa, en colaboración con la comunidad del instituto, se identifican sus necesidades y expectativas. Las primeras se traducen en requerimientos espaciales, y las segundas en la identificación de elementos que estructuran un concepto de diseño. Con dicha información se plantea el programa de necesidades tanto para el plan maestro como para el edificio E1, que corresponde a la Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables (LIER).

Para la recopilación de la información se llevan a cabo dos tipos de actividades: una sesión plenaria con la comunidad y sesiones trabajo con grupos focales.

La sesión plenaria es el primer acercamiento a la comunidad del IER, y consiste en una sesión llevada a cabo en el auditorio principal del Instituto donde se convocó a toda la comunidad para informarle sobre el proceso y los objetivos del trabajo de intervención, así como un espacio de tiempo para exponer preguntas y sugerencias generales, de los cuales se hace un registro detallado para posteriormente clasificar la información. En la tabla 1 se presenta el detalle de las actividades y los objetivos específicos del ejercicio. La segunda actividad corresponde a las entrevistas de los distintos grupos de usuarios, para el caso de estudio del edificio 1 (E1) y plan maestro (PM) de la ampliación del IER, se definieron los siguientes grupos de usuarios: a) directivos del Instituto; b) equipo administrativo; c) profesores; d) alumnos; e) personal de mantenimiento e intendencia, y f) investigadores participantes en el proyecto de investigación. A éstos les llamamos grupos focales. El trabajo con cada grupo focal es un espacio para el diálogo directo, donde también se desarrollan dinámicas previamente estructuradas, las cuales se enfocan en la identificación de las necesidades, expectativas y contribuciones de los usuarios. En la tabla 2 se describen las etapas de cada sesión, las indicaciones de las dinámicas de trabajo, los objetivos y cómo se clasificó la información recopilada.

Tabla 1. Actividades de la sesión plenaria

<i>Etapas de la actividad</i>	<i>Indicaciones</i>	<i>Objetivos específicos del ejercicio</i>	<i>Forma de clasificación de la información</i>
Introducción	Presentación del proyecto y descripción de los objetivos específicos de la visita.	Informar a la comunidad IER sobre las actividades y su forma de participación.	Análisis de las notas registradas durante el diálogo. Recopilación de puntos relevantes.
Plan de trabajo	Breve explicación de dinámica de trabajo del diseño participativo.		
	Descripción de las actividades durante la visita.	Escuchar ideas e inquietudes en general.	
Identificación de necesidades	Espacio abierto para preguntas y sugerencias de la comunidad.		

Fuente: elaboración propia.

Durante las sesiones se solicitó a los participantes elaborar un croquis indicando el recorrido cotidiano por las instalaciones del instituto. Con esta actividad se identifican los espacios más utilizados, así como las rutas de los usuarios, y se toma nota sobre los comentarios acerca de los espacios que se consideran útiles, las áreas de oportunidad y los nuevos requerimientos espaciales.

Tabla 2. Descripción de las actividades desarrolladas en los grupos focales

<i>Etapa de la actividad</i>	<i>Indicaciones</i>	<i>Objetivos específicos del ejercicio</i>	<i>Forma de clasificación de la información</i>
Introducción	Presentación de objetivos específicos y breve explicación de la forma de trabajo.	Presentar a los asistentes el proceso de la entrevista.	Presentación.
Identificación de necesidades	Instrucciones. Elabora un croquis de tu recorrido cotidiano por las instalaciones del IER.	Identificar los espacios más utilizados o en su caso, necesidad de nuevos espacios.	Análisis de las notas registradas durante la sesión.
	Nombra las zonas o espacios que consideras necesarias para realizar tus actividades.	Identificar casos de éxito en el uso de los espacios del edificio actual.	Lista de los espacios identificados durante la sesión.
	Apóyate en las imágenes proyectadas para complementar la información.	Identificar áreas de oportunidad en el uso de los espacios del edificio actual.	Incluir problemáticas de los actuales y/o nuevos requerimientos.
Identificación de expectativas	¿Cómo te gustaría que se vieran los espacios del IER? De las imágenes proyectadas, señala con una X las que representen tus preferencias de diseño.	Identificar expectativas de los diferentes ambientes del nuevo edificio.	Mediante el número de las imágenes más seleccionadas, definir los conceptos de diseño.
Intercambio de ideas	Escuchar diversidad de propuestas.	Escuchar ideas e inquietudes en general.	Registro de notas.
	Espacio para diálogo abierto.		

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3 se representan ejemplos de los recorridos señalados por algunos de los grupos que participaron, donde es posible apreciar zonas de concentración de actividad, recorridos naturales, entre otras. Esta información resulta útil para determinar el partido arquitectónico, el cual es el primer acercamiento a la distribución funcional definitiva de los espacios de acuerdo con su importancia de conectividad.

Tabla 3. Recorridos cotidianos en el instituto, según el tipo de usuario

<i>Tipos de usuarios</i>		
<i>Administrativos</i>	<i>Profesores</i>	<i>Alumnos</i>
		

Fuente: Informe técnico E1 (Huelsz *et. al.*, 2020).

En el tema de identificación de expectativas, con cada grupo se realiza la proyección de fotografías de distintos ambientes de otros proyectos similares, con la intención de que el participante señale las que son de su preferencia y, según sus respuestas, se identifican las características formales de diseño.

A partir de la información recopilada y analizada en esta primera etapa, es posible identificar necesidades, incluyendo características ambientales, espaciales y de instalaciones especiales por cada espacio identificado, y

plantearlo en forma de programa de necesidades. Además, es un esbozo general del concepto de diseño del proyecto.

Con toda la información recopilada durante este proceso, con el programa inicial de necesidades generado por los directivos del centro, así como con una investigación documental realizada por el grupo de diseño, se genera el primer programa arquitectónico para la realización del anteproyecto preliminar.

Segunda etapa del proceso de diseño participativo

Una vez elaborado el anteproyecto preliminar, se realiza una segunda visita al Instituto con el objetivo de presentar la propuesta a la comunidad y obtener retroalimentación e información más precisa para las siguientes etapas del desarrollo del proyecto.

Como primera actividad, se realiza una presentación plenaria de los avances del proyecto, donde se detalló información sobre la propuesta. Los asistentes, conformados por todos los grupos de usuarios, expusieron sus opiniones, dudas e inquietudes sobre la propuesta y se hizo un registro de dicha información. En la figura 2 se aprecian diversos momentos de la presentación plenaria en el auditorio principal de IER.

Como segunda actividad, se tuvieron sesiones con distintos grupos específicos de usuarios, principalmente con responsables de área, profesores encargados de laboratorios y especialistas, así como con el grupo participante en el proyecto de investigación. En estas reuniones y con base en la propuesta de anteproyecto, se discutieron temas sobre funcionalidad en espacios como comedor y cocina; administración y aulas; criterios generales de instalaciones hidráulicas, eléctricas, voz y datos, sensores de monitoreo y sistemas de enfriamiento; así como requerimientos especiales en azotea del edificio, que estaba planteada como un laboratorio a cielo abierto para demostraciones de equipos de energías renovables y un techo verde. En la figura 3 se aprecian aspectos de las citadas reuniones.

Con la información obtenida durante esta visita se definió el programa arquitectónico final, así como requerimientos de necesidades de mobiliario, instalaciones especiales, funcionamiento de los espacios y ambientales, lo que permitió hacer ajustes pertinentes al anteproyecto arquitectónico, para llevarlo a un nivel mayor de definición.

Figura 2. Presentación del anteproyecto arquitectónico preliminar ante la comunidad



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Imágenes de las reuniones con grupos focales en la segunda etapa del diseño participativo



Fuente: elaboración propia.

Sesiones continuas

Durante todo el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo reuniones periódicas con el grupo de investigadores participantes en el proyecto de investigación, así como con actores clave, como usuarios generales y encargados de mantenimiento, así como expertos en temas constructivos, de instalaciones y en sistemas especiales. Esta serie de reuniones apoyaron en la definición de variables muy específicas, aportando información útil, además de las cuestiones proyectuales arquitectónicas.

Plataforma para estudios de opinión en línea

Como una actividad paralela a la primera etapa del proceso participativo, se realizó una encuesta en línea dirigida a toda la comunidad del Instituto.

La plataforma es un espacio virtual de comunicación que alimenta el proceso de diseño participativo, ofrece un vínculo más con los usuarios y puede tener mayor alcance en la recopilación de información, dado su carácter de permanencia, aun cuando la visita física al sitio haya concluido. Por otro lado, permite al usuario tener mayor intimidad y tiempo de reflexión que en una sesión presencial.

En este ejercicio se utilizó la herramienta gratuita de *Google Forms*.⁶ A través de esta plataforma se aplicó una encuesta, donde se solicita la identificación del tipo de usuario según su grupo focal y se le pide su respuesta a preguntas referentes a sus necesidades. También se presentan fotografías e imágenes sobre diversos espacios en proyectos similares para solicitar su opinión, y finalmente hay un espacio abierto para comentarios.

En la identificación de necesidades, aproximadamente la mitad de las personas que contestaron la encuesta opinan que la relación entre el espacio público y las instalaciones del Instituto no son adecuadas, pudiendo implicar con esto problemas de accesibilidad peatonal para ciclistas y deficiencia en la relación con el transporte público, entre otros. Para la identificación de expectativas, las características de diseño más señaladas fueron: materiales aparentes, integración del exterior con el interior e integración de vegetación en el edificio. Por cuestiones de derechos de autor no exponemos ejemplos de las imágenes presentadas, ya que en su mayoría fueron enlaces a bancos de imágenes en internet.

El *Charrete* y los expertos disciplinarios

Además del objetivo arquitectónico de proveer de un edificio adecuado para desarrollar las actividades de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables (LIER), coexiste el objetivo del proyecto de investigación de desarrollar y materializar un edificio que sea ejemplo de diseño bioclimático y empleo de sistemas de acondicionamiento pasivos y de bajo consumo de energía.

El diseño de un edificio sustentable se puede lograr con mayor facilidad a través de un proceso de diseño integral, mediante una estrategia multidisciplinaria que integre eficazmente todos los aspectos del análisis de sitio, diseño arquitectónico, construcción, operación y mantenimiento, para minimizar el consumo de recursos y el impacto ambiental del

6 <https://www.google.com/forms/about/>

edificio, al mismo tiempo que se mejoran el confort, la salud, y la productividad de sus ocupantes.

El diseño sustentable es más efectivo cuando se aplica desde las primeras etapas de diseño. Esta filosofía debe mantenerse a lo largo de todo el proceso de diseño y construcción. Los pasos previos para un diseño sustentable y de alto rendimiento de un edificio son:

- Establecer objetivos y premisas de diseño sustentable desde el inicio del proceso.
- Formar un equipo de trabajo integrado e interdisciplinario.
- Generar estrategias de diseño que permitan lograr los objetivos del proyecto.

La mejor manera de lograr estos pasos previos es a través de un “*charrete*”. Un *charrete* es un taller intensivo en el que se reúnen distintos actores y expertos para abordar una temática de diseño en particular. Este mecanismo inicia el proceso de diálogo entre los miembros del equipo del proyecto, los usuarios del edificio y el personal de gestión del proyecto y otros expertos que se consideren necesarios. Un debate guiado permite al equipo proponer soluciones que satisfagan las demandas de los usuarios del edificio, así como el concepto de sustentabilidad en el diseño de éste. Para cuando concluye el *Charrete*, los participantes deben haber identificado objetivos de desempeño que satisfagan las necesidades del programa (Lennertz, Lutzenhiser, & Failor, 2008).

Para concretar el objetivo de investigación, se organizó un *charrete* siguiendo la metodología propuesta por Lindsey *et al.* (Lindsey, Todd, Hayter & Ellis, 2003).

En el taller para el diseño del edificio que se describe, participaron expertos en el área de ventilación natural, enfriamiento radiativo, sistemas de bajo consumo de energía, diseño arquitectónico y bioclimático, simulaciones, construcción sustentable, administración y gestión, y desarrollo de proyectos BIM, entre otros. Mediante este equipo multidisciplinario se establecieron los criterios para el diseño integral de la propuesta, considerándose aspectos como: características del sitio, diseño del edificio,

materiales, sistemas constructivos, tipos de usuario y sus actividades, operación y mantenimiento, impacto ambiental, etc. Con la realización del *Charrete* se logró visualizar una perspectiva general del proyecto, así como la definición de sus prioridades, y delimitó los primeros pasos para alcanzar el objetivo de sustentabilidad mediante el diseño bioclimático. En la figura 4 se muestran los asistentes al *Charrete*.

Figura 4. Asistentes al *Charrete* llevado a cabo en la Unison



Fuente: Informe técnico E1 (Huelsz *et al.*, 2020).

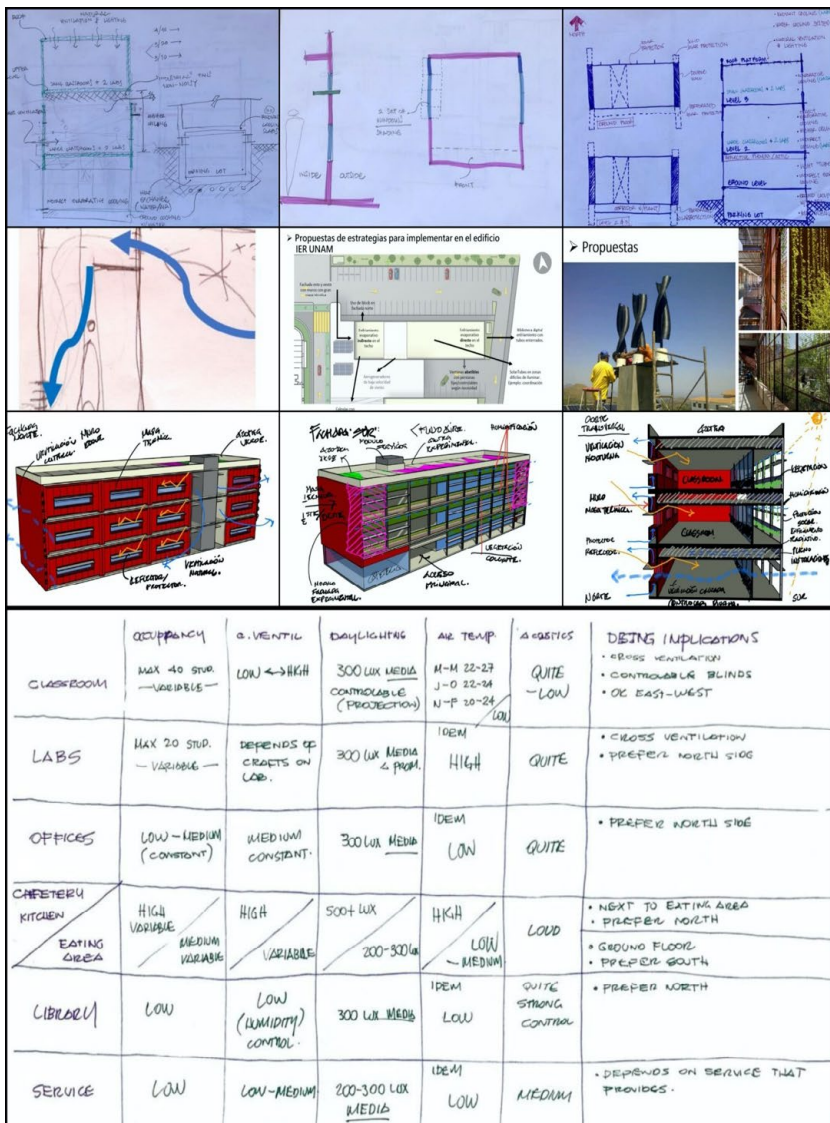
En la primera parte del taller los expertos presentaron una diversidad de estrategias relacionadas con su campo de experticia. Posteriormente se formaron al azar grupos de trabajo para generar propuestas de integración, aplicando las estrategias, para entonces abrir la discusión sobre la aplicabilidad de éstas. En la tabla 4 se muestran algunos ejemplos de croquis y bocetos generados en la actividad por grupos. Todo el proceso tuvo una duración de tres días. Cada grupo se enfocó en aspectos

diferentes del diseño del edificio, como son: forma de la envolvente, distribución interior, estructura general, parámetros de diseño por cada tipo de espacio, sistemas de ventilación e iluminación natural y de acondicionamiento ambiental de bajo consumo.

El resultado del *Charrete* se resumió en una tabla que integra las estrategias y soluciones que caracterizarían el diseño bioclimático del edificio, como las necesidades de ventilación, iluminación, temperatura y acústica; algunas consideraciones de diseño respecto al espacio; y las posibles estrategias para sistemas de enfriamiento de bajo consumo energético, iluminación natural, materiales y sistemas constructivos, así como las consideraciones generales para la envolvente y forma general del edificio.

Las estrategias resultantes de la discusión grupal se integraron en el primer anteproyecto para ser evaluadas y analizar si se integran definitivamente en la propuesta.

Tabla 4. Ejemplos de propuestas de estrategias de diseño para el edificio E1, generadas por los grupos de trabajo



Fuente: elaboración propia a partir del Informe técnico E1 (Huelsz et. al., 2020).

Innovación en el análisis del sitio

El análisis de sitio es un aspecto del proceso de diseño que debe realizarse con profundidad de manera cuantitativa, para generar la base de las necesidades ambientales y estrategias de diseño. Las preexistencias ambientales y otros factores que definen el ambiente del sitio donde se ubicará una edificación, pueden ser de orden climático, geográfico, biológico y tecnológico, y abarcan las siguientes variables (Serra Florensa & Coch Roura, 2019):

a) Climáticas:

- Radiación solar.
- Temperatura del aire.
- Humedad relativa del aire.
- Vientos (velocidad y dirección).
- Composición y pureza del aire.
- Precipitación pluvial.
- Sonido (acústica del lugar).
- Luminancia de la bóveda celeste.

b) Geográficas:

- Latitud y longitud.
- Hidrografía.
- Relación tierra-agua.
- Topografía, altura absoluta y relativa del terreno.
- Morfología del entorno próximo y del terreno.

c) Biológicas:

- Flora nativa e introducida.
- Fauna nociva.

d) Tecnológicas:

- Redes municipales.
- Redes de telecomunicaciones.
- Infraestructura urbana.
- Industria.

Desgraciadamente el análisis de las variables no siempre se lleva a cabo rigurosamente en todos los aspectos, siendo las climáticas las que menos se consideran, salvo que sea obligatorio por alguna norma específica o necesidad apremiante. Las otras variables generalmente se toman en cuenta de manera regular, de acuerdo con la normatividad vigente.

Análisis del clima y necesidades bioclimáticas

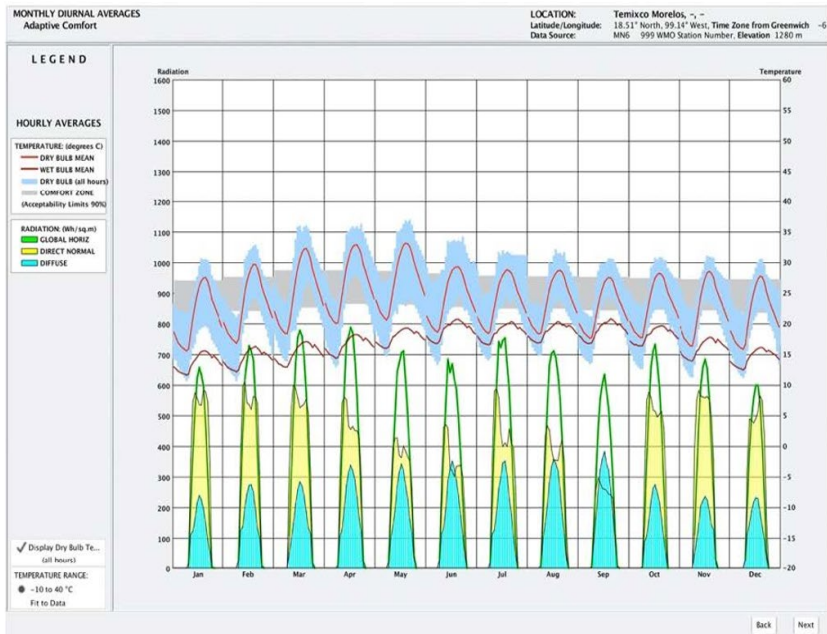
La propuesta que aquí se hace incluye el análisis detallado del clima, combinando archivos climáticos tipo TMY (*typical meteorological year*) (Lawrie & Drury, 2019), los cuales contienen los parámetros meteorológicos horarios de una localidad específica por un periodo de un año. Para que esta información sea válida estadísticamente se utiliza una base de datos de al menos 12 años, lo que permitiría tener una base confiable de información para realizar simulaciones térmicas y energéticas de edificaciones, así como el análisis detallado del clima para la localidad en cuestión.

Aunque se han propuesto otros tipos de formato como el del año meteorológico extraordinario XMY (*extreme meteorological year*), que considera un rango más amplio de las condiciones climáticas a las que estaría sometido un edificio en la realidad, actualmente está en desarrollo, por lo que los TMY siguen siendo el formato más confiable en este momento (Crawley & Lawrie, 2019).

El análisis del clima se puede realizar con la herramienta Climate Consultant 6.0 (Milne, 2016), la cual muestra una variedad de representaciones gráficas de los parámetros climáticos de cada localidad, que ayudan a visualizar patrones y detalles sutiles del clima que se perderían en las tablas numéricas. Las combinaciones de parámetros climáticos en cada instante, principalmente temperatura y humedad del ambiente, es lo que da una idea de las estrategias de climatización natural que es posible utilizar para acercarse a las condiciones de confort térmico. Asimismo, se asume que la sensación de confort en el interior de las edificaciones varía según las condiciones exteriores, lo que permite plantear estrategias y

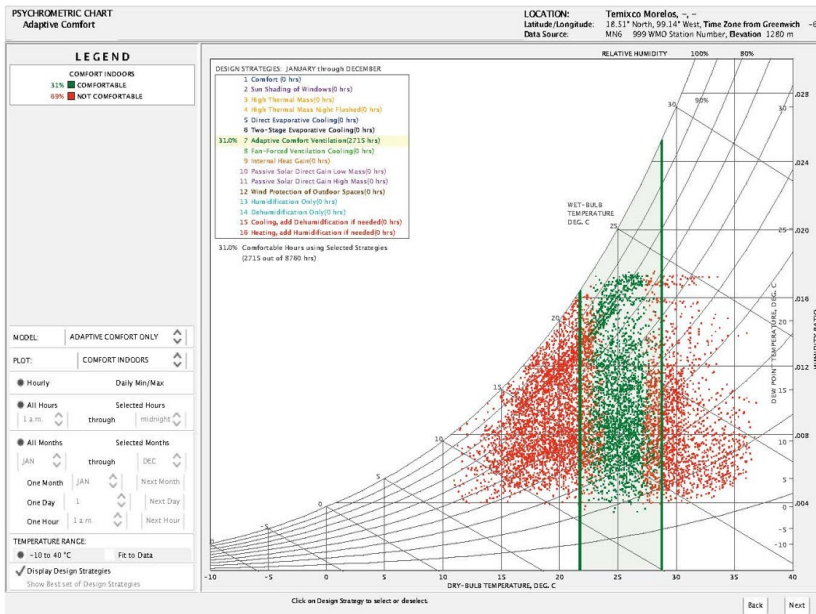
hacer ciertas suposiciones sobre el diseño de edificios. En las figuras 5 y 6 se muestran las variables climáticas horarias promedio mensuales y las estrategias bioclimáticas en el diagrama psicrométrico respectivamente, como parte del análisis del clima.

Figura 5. Promedios horarios mensuales de temperaturas de bulbo seco y húmedo, radiación solar difusa, directa y global, así como la zona de confort, como lo muestra la interfaz Climate Consultant 6.0



Fuente: Milne, 2016.

Figura 6. Estrategias de diseño bioclimático en el diagrama psicrométrico, como lo muestra la interfaz del Climate Consultant 6.0



Fuente: Milne, 2016.

Topografía y ortofotografía con vehículos aéreos no tripulados

Otro aspecto que se propone como innovador es la utilización de vehículos aéreos no tripulados (VANT) o drones, como se le llaman generalmente, para la planimetría y topografía del sitio donde se realizará el proyecto. En el caso del proyecto que se describe, se hace el reconocimiento del nuevo terreno, su relación con las instalaciones existentes y las características generales del sitio con un dron DJI Mavic Pro,⁷ el cual tiene una cámara con un sensor CMOS de 1/2.3", 12.35 millones de píxeles efectivos. Con la aplicación DroneDeploy⁸ se obtiene una ortofotografía

7 <https://www.dji.com/mx/mavic/info>

8 <https://www.dronedeploy.com/solutions/construction/>

como la que se puede ver en la figura 7. También se obtiene un plano de elevaciones como el de la figura 8, que sirvió de base para un plano topográfico preliminar como el de la figura 9. Cabe destacar que, cuando se tienen estaciones georreferenciadas en el terreno, es posible hacer un levantamiento topográfico muy preciso; sin embargo, para este proyecto ya se tenía contemplado un levantamiento topográfico tradicional, por lo que no se implementó la técnica completa.

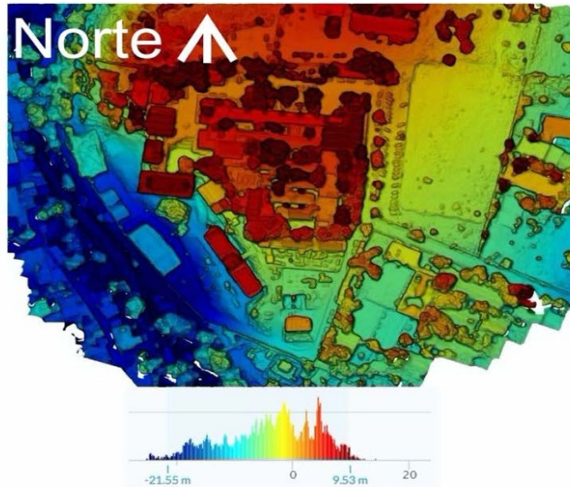
Además de las imágenes anteriores, se obtuvo un modelo tridimensional del cual se muestran algunas vistas en la figura 10. Estas imágenes son el precedente del proceso del proyecto a través del tiempo, ya que se planea registrar desde el terreno baldío, proyecto arquitectónico, construcción y el proceso de ocupación.

Figura 7. Ortofotografía del IER y del noreste del terreno, donde se ubicará el nuevo proyecto, captada por el dron



Fuente: elaboración propia a partir del Informe técnico E1 (Huelsz et al., 2020).

Figura 8. Planta de las elevaciones del terreno actual y la zona que corresponde al nuevo proyecto. La parte más alta es el área original de Instituto y resaltan las copas de los árboles que sobrepasan el nivel de los edificios existentes



Fuente: elaboración propia a partir del Informe técnico E1 (Huelsz et al., 2020).

Figura 9. Niveles topográficos preliminares obtenidos con el dron a partir de la ortofotografía y la nube de puntos



Fuente: elaboración propia a partir del Informe técnico E1 (Huelsz et al., 2020).

Figura 10. Vistas del conjunto en 3D de las instalaciones actuales y el nuevo terreno, generados con nubes de puntos obtenidos de las fotografías del dron



Fuente: elaboración propia a partir del Informe técnico E1 (Huelsz et al., 2020).

Innovación en el proceso iterativo diseño-evaluación del proyecto

La simulación es un modo de evaluación y es una forma de acercarse a la realidad a través de la modelación matemática (o no) de un sistema, con el objetivo de analizar cómo cambia su estado al manipular ciertas variables, predecir esos cambios y controlarlos. Una simulación nos permite conocer el futuro o futuros posibles sobre situaciones que en la realidad serían imposibles de realizar, muy costosas o imprácticas. La palabra clave en simulación es *modelo*. En términos simples, el modelo de un sistema real es una representación abstracta de las propiedades de los entes que lo componen y de la forma en que éstos se relacionan entre sí (Pugnaroni, 2008).

En el ámbito de la arquitectura y la ingeniería se utilizan tanto modelos matemáticos como físicos. Estos últimos son construcciones a escala reducida y simplificada, de edificios y otras obras, como puentes o presas, incluso espacios urbanos. Dependiendo de la complejidad del modelo, en ocasiones se construye la totalidad o sólo una parte de éste.

Los modelos físicos de edificios pueden servir para la simulación de múltiples parámetros y propósitos, como viento (túneles de viento), soleamiento (heliódón), iluminación (cielo artificial), movimientos sísmicos (mesa vibratoria), entre otros. Los modelos matemáticos sirven para simular los mismos fenómenos que afectan un edificio, pero resuelven matemáticamente las ecuaciones que definen el comportamiento del modelo, a través de programas computacionales. Es frecuente que en el proceso de diseño de un edificio se utilicen tanto modelos físicos como matemáticos.

Una de las características más innovadoras del proceso de diseño propuesto son las simulaciones detalladas del desempeño térmico y energético de un edificio, así como de los dispositivos de control solar (sombreado), iluminación natural, ventilación natural y otras estrategias de diseño bioclimático.

En el proceso de diseño “tradicional” no es común que se lleven a cabo estudios detallados de este tipo. Generalmente, cuando se hacen, es de forma superficial, atendiendo a los requerimientos mínimos obligatorios que exigen las normas técnicas de los reglamentos de construcción municipal, que no son rigurosos ni exhaustivos en aspectos de confort ambiental, ni eficiencia energética, pero que sí lo son en otros, como cálculo estructural, de instalaciones eléctricas, hidráulicas y sanitarias, así como riesgos y protección civil, sobre todo en las zonas sísmicas donde se ubica el proyecto.

Asimismo, se llevaron a cabo el diseño y la simulación de diferentes sistemas de acondicionamiento ambiental de bajo consumo energético, como enfriamiento evaporativo, enfriamiento radiativo, enfriamiento nocturno y enfriamiento por tubos enterrados. Éstos son sistemas experimentales innovadores que forman parte del proyecto de investigación, cuyo objetivo es evaluarlos de forma aplicada, bajo condiciones de funcionamiento reales, y demostrar su viabilidad.

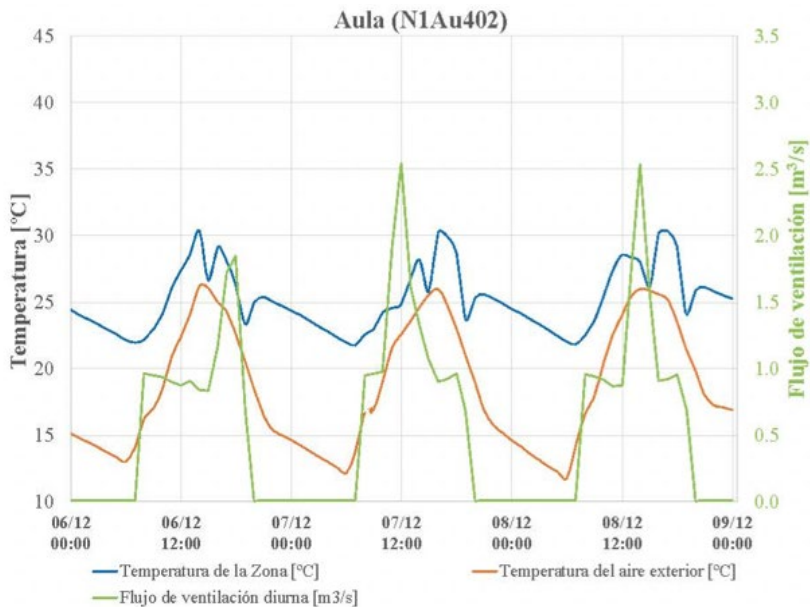
Otro de los puntos importantes de este proceso, es que la interacción con los investigadores y especialistas de las diversas ingenierías se llevó a cabo desde las etapas preliminares, en un principio a través del *Charrette* y posteriormente a lo largo del desarrollo del anteproyecto, en los diferentes grados de definición de éste, de acuerdo con el nivel de desarrollo BIM (LOD 100, 200 y 350), como se aprecia en la figura 1. Al integrar todas las estrategias y sistemas especiales desde el inicio del proyecto, se asegura la máxima eficiencia y relación costo-beneficio de éstos.

Simulaciones térmicas y energéticas

La simulación térmica de un edificio consiste en evaluar su comportamiento, en un periodo de tiempo dado, frente a las variaciones del clima exterior. En el caso de las simulaciones energéticas, lo que se evaluaría es la energía que se requiere para mantener los parámetros de confort ambiental adecuados para la habitabilidad del edificio, ante las mismas variaciones climáticas.

Como se mencionó anteriormente, en el caso de estudio se realizó la simulación del desempeño térmico del edificio E1 con el programa EnergyPlus⁹ y la interfase OpenStudio.¹⁰ Se eligieron estos programas debido a que en casos previos realizados por el equipo de trabajo se obtuvieron resultados confiables, además de la experiencia en el manejo del *software*, ya que es un programa especializado y complejo de utilizar.

Figura 11. Ejemplo de los resultados de una simulación térmica



Fuente: Informe técnico E1 (Huelsz *et. al.*, 2020).

Un procedimiento habitual es iniciar con un caso base, considerando el edificio ventilado naturalmente, sin estrategias aplicadas (figura 11); posteriormente se hacen simulaciones con las estrategias y sistemas integrados para analizar su comportamiento (como oscilación de la

9 <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0>

10 <https://www.openstudio.net/>

temperatura interior, flujo de aire y consumo de energía por acondicionamiento ambiental) y, en su caso, se optimiza su diseño.

Otros estudios de evaluación llevados a cabo fueron realizados en el túnel de viento de capa límite atmosférica del Laboratorio de Estructuras y Materiales de Alta Tecnología (LemAT) de la UNAM, donde se efectuaron mediciones para obtener los coeficientes de presión en un modelo a escala del E1. Los resultados servirán para validar las simulaciones de dinámica de fluidos que se hagan en la etapa 2 del proyecto de investigación; también serán utilizados para las simulaciones térmicas del E1 en la etapa 2, así como para las recomendaciones de diseño para los edificios E2 y E3 que se formulen en la etapa 4.

Simulación de protecciones solares e iluminación natural

El control del soleamiento en las edificaciones es una de las principales estrategias de diseño sustentable, ya que incide tanto sobre las ganancias de calor, como sobre el confort visual en el interior de los edificios.

Nuestra propuesta es que, además de cumplir con la normatividad vigente en el diseño lumínico de cualquier espacio, es necesario hacer un estudio que considere las necesidades de acuerdo con las actividades que se realizarán en el mismo, tomando en cuenta el confort o bienestar lumínico con eficiencia energética.

En espacios educativos, como salones de clase y laboratorios, es de suma importancia el confort visual. Uno de los aspectos más importantes es impedir, en la medida de lo posible, la entrada de radiación solar directa al interior, ya que aumenta excesivamente el contraste, provocando deslumbramiento. Por otro lado, de acuerdo con el clima del sitio, existe la necesidad de sombreado prácticamente todo el año ya que el aporte de calor de la radiación solar es importante, sobre todo en primavera, que es la temporada más cálida en la zona.

El diseño de los elementos de protección solar se puede realizar de forma manual con la ayuda de gráficas solares o bien a través de herra-

mientas específicas como el SolarTool¹¹ u otras plataformas gratuitas.¹² En nuestro caso se calcularon y diseñaron las protecciones solares para las ventanas de las fachadas norte y sur, considerando que la mayor parte del año no entrará la radiación solar directa, resultando en parteluces verticales de 30 cm de profundidad para ambas fachadas, cubriendo la altura total de los vanos con una separación de 55 y 110 cm, dependiendo de la modulación de las ventanas. En algunas secciones de la fachada sur que no estaban protegidas por el alero del pasillo principal, se agregaron protecciones horizontales. Las fachadas este y oeste son ciegas, protegidas además por pantallas ventiladas integradas por módulos fotovoltaicos.

En la figura 12 se aprecia un ejemplo de la máscara de sombra empleada para el diseño de la protección solar de un aula en el pasillo de la fachada sur, diseñada con SolarTool.

Posteriormente se realizó la simulación por computadora de la distribución de la iluminación interior, para obtener así el factor de iluminación natural en los días de diseño más críticos del año. La simulación se llevó a cabo con el EnergyPlus¹³ y la interfaz DesignBuilder.¹⁴ El modelo virtual para evaluar se exportó desde el BIM, utilizando el *plugin* de Design Builder instalado en Autodesk Revit.¹⁵ En la figura 13 se presentan los ejemplos de la salida gráfica del programa de simulación, representando la distribución del factor de iluminación natural en un aula tipo.

11 Autodesk Inc. (2008). SolarTool v2.20.

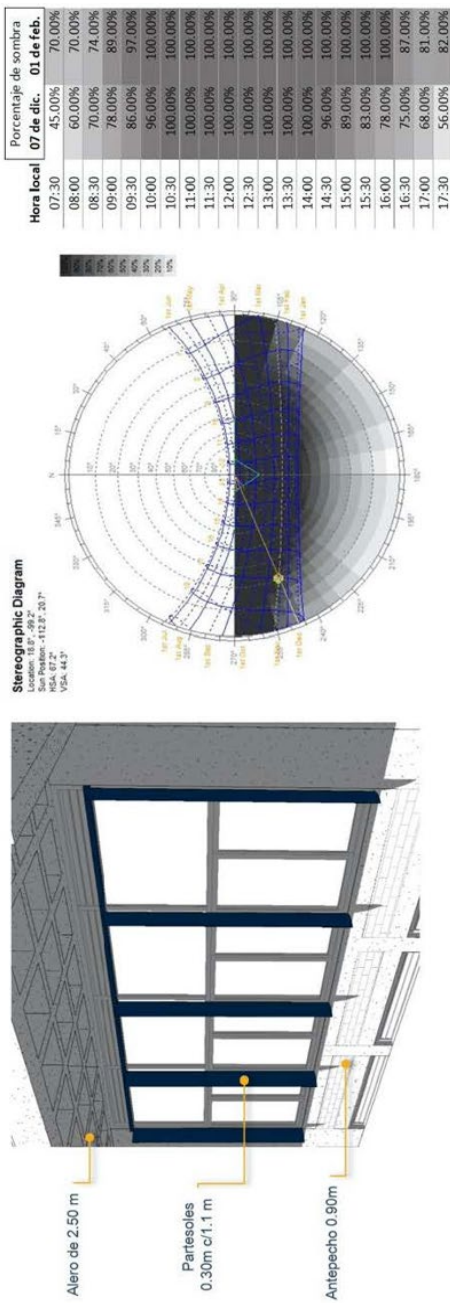
12 <https://andrewmarsh.com/>

13 <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0>

14 <https://www.designbuilder-lat.com/>

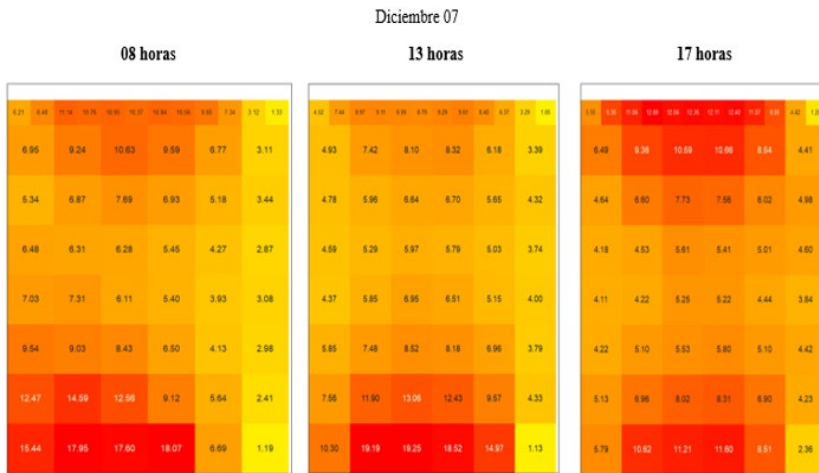
15 <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>

Figura 12. Ejemplo de la máscara de sombra para el diseño de la protección solar de un aula en el pasillo de la fachada sur



Fuente: elaboración propia con Solar Tool.

Figura 13. Ejemplos de la salida gráfica del programa de simulación, representando la distribución del factor de iluminación natural en un aula tipo



Fuente: elaboración propia a partir del Informe técnico E1 (Huelsz et al., 2020).

Cuando los resultados de la simulación fueron satisfactorios, se construyó un modelo físico o maqueta a escala 1:20, con características físicas muy similares a las utilizadas en la simulación lumínica.

Del modelo BIM se generaron los planos para la maqueta: la envolvente del aula se corta en una cortadora CNC Laser y las protecciones solares se fabrican en una impresora 3D de tipo aditivo. Como resultado se tiene un modelo a escala de alta precisión (figura 14b), el cual se instrumenta con una serie de luxómetros colocados en una malla de análisis con 42 puntos de medición a la altura del plano de trabajo definido para aulas, los cuales se conectan al sistema de adquisición de datos o *datalogger* (figura 14a).

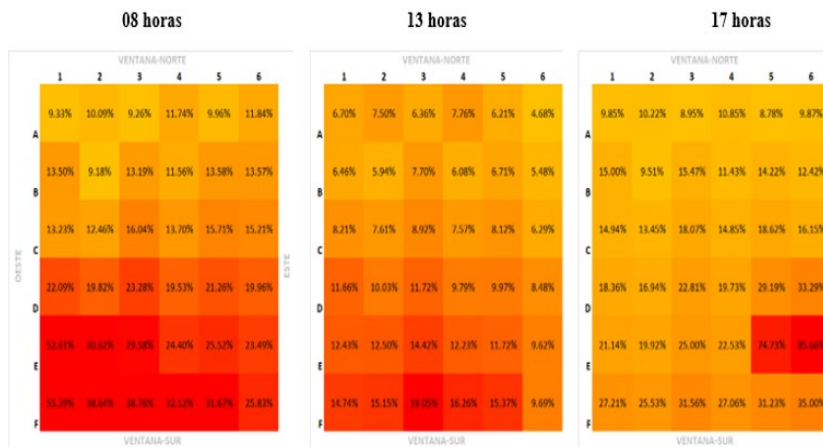
Figura 14. a) Retícula de análisis para el modelo a escala y el simulador (izq.); b) vista interior del modelo a escala, donde se aprecian los materiales con las reflectancias similares a las de la simulación numérica (der.)



Fuente: elaboración propia.

Este modelo a escala se probó en un heliodón programable modelo *Orange Heliodon* de la marca BetaNit,¹⁶ donde se probaron los mismos días de diseño de la simulación y se obtuvieron mediciones de la distribución del factor de iluminación natural dentro de la maqueta, para corroborar y en su caso ajustar el diseño (figura 15).

Figura 15. Distribución del factor de iluminación natural, resultado de las mediciones en el modelo a escala



Fuente: elaboración propia a partir del Informe técnico E1 (Huelsz *et al.*, 2020).

Con este procedimiento se obtuvo el diseño lumínico y de protecciones solares más confiable, cuyos parámetros sirvieron de base para las especificaciones del proyecto ejecutivo. Se espera, una vez construido, realizar la evaluación del edificio mediante la recopilación y análisis de las variables lumínicas, medidas con sensores incorporados a la estructura, así como con datos de la interacción constante con el usuario, lo que permite evaluar el resultado final y asegurar la retroalimentación para futuros proyectos, así como una posible incidencia en la normatividad correspondiente.

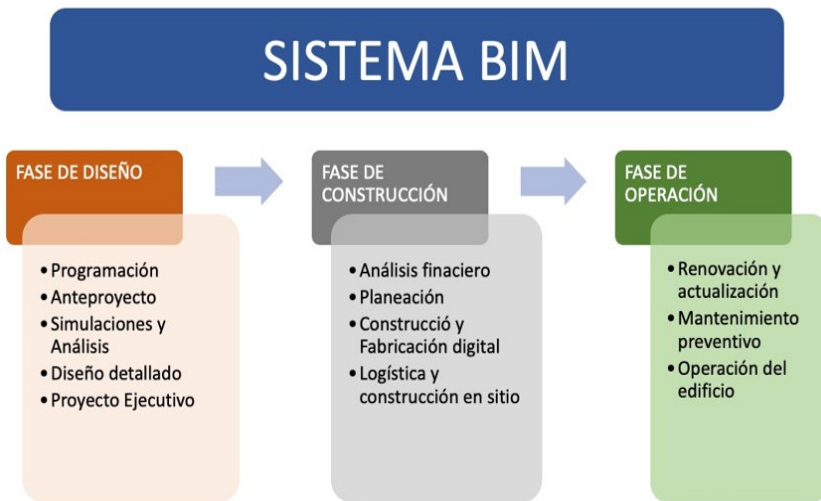
¹⁶ <https://www.betanit.com/orange/>

El BIM como plataforma integradora del proceso

En un proyecto desarrollado con BIM (*building information modeling*), que en español se traduce como *modelo de preconstrucción virtual*, se aplica una metodología de trabajo que se desarrolla en una plataforma digital colaborativa, con el objetivo de integrar la información del proyecto para su gestión.

El BIM es más que un *software* para modelar e incorporar información útil, va más allá de los datos geométricos que tradicionalmente se venían utilizando en los modelos constructivos. El BIM abarca procesos y métodos de coordinación entre los distintos agentes que operan en un proceso de diseño. Su desarrollo futuro está encaminado a estar dotado de características que faciliten el paso de la simulación a la realidad (figura 16), integrando los procesos de diseño, construcción y operación del proyecto.

Figura 16. Esquema de interacción del sistema BIM con las diferentes etapas de la vida útil de una edificación



Fuente: elaboración propia.

Los proyectos BIM tienen una escala de medición del avance del proyecto, denominada “LOD” (*level of development*, por sus siglas en inglés), que describe el nivel de desarrollo del proyecto (Reyes, Cordeiro & Candelario, 2016). Esta escala determina el grado de detalle que tiene el modelo según un nivel LOD determinado; de manera sintética, dichos niveles serían:

- LOD 100 – Diseño conceptual.
- LOD 200 – Modelado general con diseño esquemático.
- LOD 300 – Modelado preciso y diseño detallado.
- LOD 350 – Mayor detalle arquitectónico, constructivo y estructural.
- LOD 400 – Documentación de construcción, fabricación y montaje.
- LOD 500 – Modelo con máximo nivel de detalle, correspondiente al edificio ya construido.

Dada la complejidad del proyecto, no solamente visto como proyecto arquitectónico-constructivo, sino como proyecto de investigación e innovación, aunado a que los equipos de trabajo estaban en sedes distantes e internacionales, se definió que la plataforma BIM, específicamente la proporcionada por el *software* Autodesk Revit (Autodesk Inc., 2020), era la más adecuada para la realización del proyecto. Otro factor de decisión fue que los equipos encargados de la ejecución y coordinación de los proyectos arquitectónicos y constructivos tenían experiencia previa en esta plataforma. A continuación presentamos los niveles LOD que se alcanzaron en el proyecto del E1.

Propuesta LOD 100. Éste es el nivel básico, en donde se desarrollaron elementos conceptuales y características de forma, tamaño y ubicación aproximada (figura 17). En esta fase se inicia la segunda ronda de diseño participativo, en donde se presenta la propuesta de anteproyecto preliminar a la comunidad, que incluye:

- Arquitectura y criterios básicos de instalaciones especiales.
- Las estrategias de ventilación, iluminación, temperatura y acústica, previamente propuestas en la actividad del *Charrete*, sin evaluaciones ni simulaciones.

- Se proponen materiales y acabados en general.
- El mobiliario y espacios interiores están parcialmente definidos.
- Estructura del edificio sujeta a cambios debido a cálculo estructural.
- Propuesta del funcionamiento general de la azotea demostrativa.

Figura 17. Visualización del proyecto, LOD 100



Fuente: elaboración propia a partir del modelo BIM.

Propuesta LOD 200. Aporta una visión general con información de magnitudes aproximadas, tamaño, forma, localización y orientación (figura 18). El uso que se da es simplemente incrementar la capacidad de análisis, y las mediciones son aproximadas. Para llegar a este nivel de desarrollo se incluyen las observaciones y requerimientos específicos generados de la segunda ronda de diseño participativo y se generan los planos y documentos con especificaciones y dimensiones a detalle. Con esta información se comenzaron cálculos estructurales y simulaciones correspondientes. Paralelamente, se continúan las revisiones generales con el equipo interdisciplinario de trabajo. Las principales consideraciones del modelo en esta etapa de anteproyecto son:

- Arquitectura a nivel de detalle más específico para grado de documentación técnica.
- Criterios de instalaciones especiales se definen con mayor detalle.
- Los materiales y acabados en general se desarrollan con más detalle y especificaciones, según resultados de simulaciones.
- El mobiliario y espacios interiores se definen con detalle y ubicación precisa, según requerimientos especiales e información de proveedores.
- Adecuación de detalles arquitectónicos a los requerimientos estructurales.
- Ajuste de diseño de ventanas acorde con los análisis del estudio de sombras, iluminación, ventilación y oferta de proveedores.
- Azotea demostrativa se desarrolla con mayor detalle, incluidos los intercambiadores de viento y resto de elementos técnicos, según requerimientos de los usuarios.

Figura 18. Visualización del modelo, LOD 200

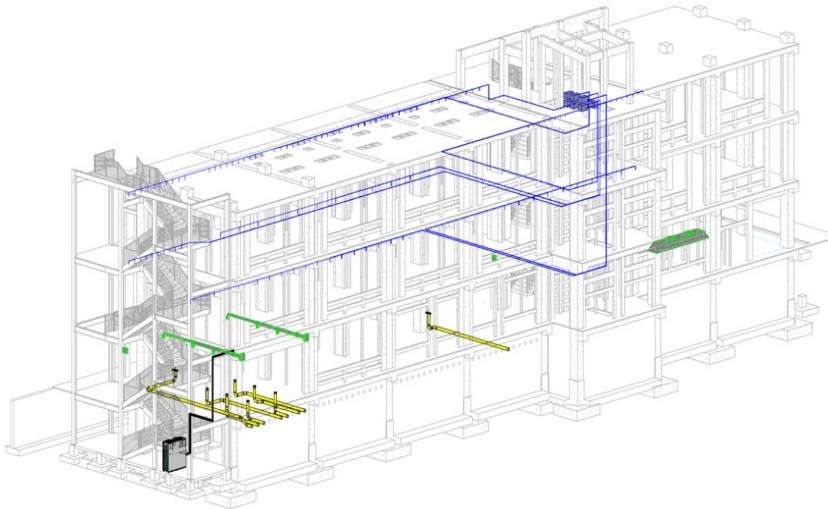


Fuente: elaboración propia a partir del modelo BIM.

Propuesta LOD 350. Aporta información y geometría precisa, pendiente de algún detalle constructivo y aporta medidas más precisas que en caso de LOD 200, con un nivel de detalle externo importante pero no completo. Especifica de forma precisa las características del proyecto en relación con el tamaño, forma y ubicación respecto al conjunto del proyecto, incluyendo la detección de interferencias entre distintos elementos estructurales, arquitectónicos e instalaciones (figura 19). Se precisan de forma definitiva los planos arquitectónicos, se genera avance de los planos constructivos y se desarrolla la integración total de los criterios estructurales. Se continúa con las revisiones generales con el equipo interdisciplinario de trabajo. En relación con los criterios de las instalaciones y sistemas especiales, se presenta el esquema básico de éstas con el objetivo de definir rutas y dimensiones. Los sistemas especiales son:

- Anteproyecto de sistema evaporativo.
- Anteproyecto de sistema de tubos enterrados.
- Anteproyecto de sistema de ventilación y extractores.
- Anteproyecto de sistemas de protección solar acoplado a estructura, ventanas y ventilas automáticas.

Figura 19. Ejemplo de visualización del proyecto con detección de interferencias entre estructura e instalaciones LOD 350



Fuente: elaboración propia a partir del modelo BIM.

Propuesta LOD 400. Contiene el detalle necesario para la fabricación y construcción de los diversos elementos del proyecto con gráficos claros y descripciones detalladas, el nivel de mediciones es exacto (figura 20). Con la información de este modelo es posible realizar análisis de costos y presupuestos, simulaciones detalladas de los diferentes elementos bioclimáticos y de acondicionamiento ambiental. Los elementos del edificio se modelan como ensamblajes específicos, con fabricación completa, ensamblaje e información detallada, además de cantidad, tamaño, forma, ubicación y orientación precisos. Los elementos no geométricos se pueden integrar con elementos del modelo LOD 350.

En este punto es posible generar toda la documentación del proyecto ejecutivo para realizar los trámites legales de licencia de construcción, licitaciones de obra y realizar la construcción del edificio. El proyecto ejecutivo lo realizó un despacho o estudio de arquitectura profesional, externo al grupo de trabajo, debido a las implicaciones y responsabili-

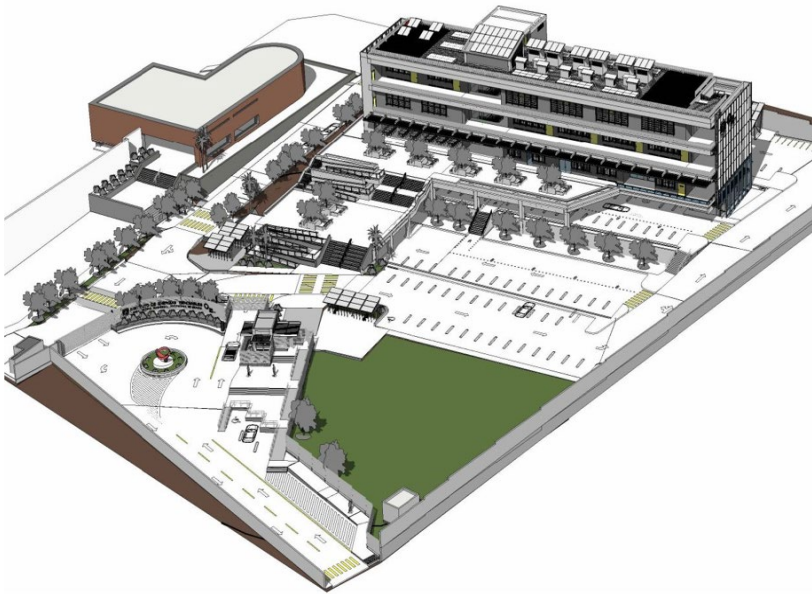
dades legales que generaba. Sin embargo, el equipo del LEMA continuó con la realización del proyecto ejecutivo del plan maestro, que incluyó las interconexiones con el conjunto existente del IER, una nueva plaza de acceso más funcional, así como todas las vialidades, estacionamientos y áreas de servicio requeridas para el edificio E1 y el futuro crecimiento del instituto. En la figura 21 se aprecia una vista general del conjunto de nivel LOD 400 o proyecto ejecutivo.

Figura 20. Vista de la fachada sur del proyecto ejecutivo (arriba) y azotea con laboratorio didáctico (abajo) en LOD 400



Fuente: elaboración propia a partir del modelo BIM.

Figura 21. Vista general del proyecto ejecutivo del conjunto en nivel LOD 400



Fuente: elaboración propia a partir del modelo BIM.

Modelo LOD 500. Éste es el último nivel de detalle, donde se representan todos los elementos del edificio ya construido, lo más parecidos a los reales. Son precisos en tamaño, forma, ubicación, cantidad y orientación, tal y como se construyeron. El modelo es adecuado para el mantenimiento y operación del edificio.

En lo referente al proyecto de investigación, el modelo LOD 500 será útil para el desarrollo de la última etapa, ya que permitirá el seguimiento de los sistemas de monitoreo del desempeño del edificio y de los sistemas experimentales de acondicionamiento ambiental, así como de la interacción con los usuarios a lo largo de la vida del edificio.

El proceso de construcción lo lleva a cabo la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM, y a la fecha de la realización de este documento, estaba casi totalmente concluido. En las siguientes imágenes

(figura 22) se aprecian algunos aspectos del proceso y avance en la construcción; asimismo, podemos ver algunas de las modificaciones y adecuaciones que sufrió el proyecto a la hora de la construcción. Como primera etapa sólo se construyeron dos niveles de los tres planteados originalmente en el proyecto, así como la plaza de acceso y el estacionamiento subterráneo. En una segunda etapa se propone la construcción del tercer nivel del E1, la azotea con laboratorios educativos al aire libre y el resto del conjunto, incluyendo la plaza de acceso.

Una vez terminada la etapa de construcción del edificio, se procedería a realizar el modelo LOD 500, que incluiría todos los cambios y adecuaciones hechos durante la obra, y obtener el modelo tal y como se construyó (*as build*).

Figura 22. Vistas del avance en la construcción del edificio E1, de izquierda a derecha: a) fachada sur, b) vista este de la azotea; c) vista noroeste; d) vista noreste



Fuente: archivo personal de Francisco Javier Rojas Menéndez, 2023.

Reflexión final y conclusiones

La experiencia de desarrollar proyectos de forma participativa nos ha mostrado que tiene enormes ventajas, al propiciar el sentimiento de pertenencia y credibilidad de la comunidad que habitará el futuro edificio, así como una mayor diversidad de ideas y perspectivas para su realización.

Sin embargo, también existen algunos obstáculos para su aplicación; por ejemplo: el proceso es mucho más largo de lo habitual. Si bien este punto no es tan importante cuando el proyecto se realiza desde el ámbito académico o gubernamental, habría que replantear cómo hacerlo rentable para un despacho o estudio de diseño profesional, así como tomarlo en cuenta para la programación del proceso.

Asimismo, algunos miembros del equipo/comunidad pueden no tener conocimientos o experiencia en temas técnicos, tanto constructivos como de diseño, lo que puede llevar a situaciones en las que sea difícil tener en cuenta su opinión; por ejemplo, al acatar normas y reglamentos de construcción o bien que se llegue a soluciones que técnica o funcionalmente no sean las más adecuadas, pero que se tomaron por consenso. Este tipo de situaciones nos lleva a plantear dónde situar la línea en la que terminan las voliciones de los usuarios y empieza la responsabilidad de los “expertos” técnicos, a quienes finalmente se les responsabilizará de todos los errores, sin importar quién haya tomado la decisión.

Un aspecto clave de este proceso seguido por el equipo de diseño es, lo que tal vez represente una de sus responsabilidades más importantes, lograr que a los usuarios les quede muy claro el cómo y el porqué de todas las decisiones y soluciones que se están plasmando en el proyecto. La representación del proyecto en planos, incluso en modelos tridimensionales, es muy abstracta, por lo que sin ciertos conocimientos básicos de geometría, nomenclatura, simbología y lenguaje técnico, es difícil de interpretar para la mayoría de las personas.

Otro punto importante de este proceso es la plataforma digital, que permite la interacción del diseño arquitectónico con la visualización del proyecto y su evaluación en tiempo real, así como con el presupuesto, el

control de obra y hasta la operación del edificio, y, por lo tanto, la posibilidad de controlar digitalmente cada decisión de diseño y planeación, poder compartirlo con el resto del equipo de trabajo y con los usuarios.

El dinamismo en este tipo de interacción no tiene precedentes en décadas anteriores y sin duda provoca un re-pensar del proceso de diseño. Son cambios altamente beneficiosos, pero que requieren por parte de los equipos de trabajo de diseño arquitectónico y asociados tecnológicos una reorganización de sus funciones y operatividad, que incluyan interacciones tecnológicas a las que cualquier empresa o contratista asociado al equipo principal de diseño pueda tener acceso y hacer así más dinámico el proceso de diseño.

La aplicación del BIM en este proyecto no estuvo exenta de obstáculos; sin embargo, hay optimismo en que se irán solventando conforme avance el desarrollo de esta tecnología.

Uno de los primeros obstáculos fue el conocimiento y capacitación desigual entre los miembros del proyecto que estarían encargados directamente de la coordinación y operación del sistema, por lo que fue necesario un curso de actualización para los miembros del equipo involucrados, así como la contratación de personal experto, dado que la curva de aprendizaje es lenta. Otros requisitos que se tuvieron que homologar fueron el equipo de cómputo de alto rendimiento y el acceso permanente a almacenamiento en la nube del modelo maestro. La reticencia de los especialistas como los de cálculo estructural e instalaciones, para integrar sus proyectos a la plataforma BIM, también ha sido un obstáculo para su plena aplicación. Esto se ha observado no sólo en el presente proyecto, sino también en experiencias anteriores.

No sólo es necesario capacitarse para estar a la altura de las circunstancias y de las innovaciones en cuanto al proceso de diseño, sino que es necesario proveerse del equipamiento necesario en cuanto a redes, *software* y recursos humanos capacitados para un nuevo tipo de proceso. Éste es un nuevo reto que trasciende las actividades estrictamente arquitectónicas y constructivas, que implica una diversificación de recursos y capacitación para el equipo de generación de proyectos.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo del proyecto Conacyt-Sener FSE-2017-01-291600 y del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables. Asimismo, agradecemos la participación de los grupos de trabajo y la comunidad del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, del Laboratorio de Energía y Medio Ambiente de la Unison y del Lawrence Berkeley National Laboratory.

Referencias bibliográficas

- Altamirano, C. (2019, 14 de marzo). *Cinco millones de casas abandonadas muestran el fracaso de la estrategia para dar vivienda a los más pobres*. Obtenido de Animal Político: <https://www.animalpolitico.com/2019/03/vivienda-interes-social-fracaso-pobreza-desigualdad/>
- Autodesk Inc. (2020, 20 de octubre). *Autodesk.mx*. Obtenido de REVIT Software BIM multidisciplinario para diseños coordinados de mayor calidad: <https://www.autodesk.mx/products/revit/overview?pl-c=RVT&term=1-year&support=advanced&quantity=1>
- Castañeda Nolasco, G., González García, E., & Carpy Chávez, M. d. (2019). Diseño participativo de vivienda en Mascota, Jalisco. En: J. M. Ochoa de la Torre, *Vivienda y comunidades sustentables en México* (pp. 81-94). Hermosillo: Pearson Educación de México.
- Coneval. (2018). *Estudio diagnóstico del derecho a la vivienda digna y decorosa 2018*. Ciudad de México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval).
- Crawley, D. B., & Lawrie, L. K. (2019). *Should We Be Using Just 'Typical' Weather Data in Building Performance Simulation?* Proceedings of the 16th IBPSA Conference Sep. 2-4, 2019 (pp. 4801-4808). Roma: IBPSA. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210594>
- García Ruiz, D. E., & Ochoa de la Torre, J. M. (2019). El futuro de la vivienda sustentable en México a través de la planeación sistémica y la investigación científica. En: J. M. Ochoa de la Torre, *Vivienda*

- y comunidades sustentables en México (pp. 161-174). Ciudad de México: Pearson Educación de México.
- Google LLC. (2020, 15 de octubre). *Formularios de Google: Crea y analiza encuestas de forma gratuita*. Obtenido de [www.google.com: https://www.google.com/forms/about/](http://www.google.com/forms/about/)
- Huelsz, G., et al. (2020). *Informe técnico de la etapa I: Proyecto Edificios demostrativos de diseño bioclimático en clima cálido subhúmedo en el Instituto de Energías Renovables UNAM*. Temixco.
- Lawrie, L. K., & Drury, B. C. (2019). *Development of Global Typical Meteorological Years*. Recuperado en octubre de 2020, de Climate. OneBuilding.Org: <http://climate.onebuilding.org/default.html>
- Lennertz, B., Lutzenhiser, A., & Failor, T. (2008). An Introduction to Charrettes. *Planning Commissioners Journal*, 71, 1-3, verano.
- Lindsey, G., Todd, J. A., Hayter, S. J., & Ellis, P. G. (2003). *A handbook for planning and conducting charrettes for high-performance projects*, NREL/BK-710-33425. Washington, DC: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Maycotte Pansza, E., & Sánchez Flores, E. (2009). *Ciudades dispersas, viviendas abandonadas: La política de vivienda y su impacto territorial y social en las ciudades mexicanas*. International Conference Virtual City and Territory. “5th International Conference Virtual City and Territory, Barcelona, 2, 3 and 4 June 2009” (pp. 599-610). Barcelona: Centre de Política de Sòl i Valoracions.
- Milne, M. (2016, abril 1). *Climate Consultant 6.0*. UCLA Energy Design Group. <https://www.sbse.org/resources/climate-consultant>
- Ochoa de la Torre, J. M. (2025). *Diseño bioclimático integrado. Experiencias proyectuales del Laboratorio de Energía, Medioambiente y Arquitectura*. Qartuppi, Universidad de Sonora. <https://doi.org/10.29410/qtp.25.02>
- Ochoa de la Torre, J. M., & Marincic Lovriha, I. (2016). La habitabilidad de la vivienda económica en México: Análisis para el clima cálido seco. En: C. Rueda Velázquez, *Apuntes de la vivienda mínima en México* (pp. 149-163). Guadalajara, México: Universidad de Guadalajara.

- Pugnaroni, L. A. (2008, junio-julio). Los simuladores. El papel de la simulación en la ciencia. *Ciencia Hoy*, 18(105), 27-34.
- Reyes, A. M., Cordero, P., & Candelario, A. (2016). *BIM Diseño y gestión de la construcción*. Madrid: Ediciones Anaya.
- Serra Florensa, R., & Coch Roura, H. (2019). *Arquitectura y energía natural*. (2ª edición). Universitat Politècnica de Catalunya/Iniciativa Digital Politècnica. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498807912>

Aproximando un esquema conceptual para el desarrollo de nuevas ciudades y vivienda, centrado en la vida rural para el acceso justo al hábitat

*Fernando Córdova Canela*¹

Introducción

El presente trabajo deriva de la investigación que el autor realizó durante 2020 en el entorno del Grupo Técnico convocado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, como parte de los trabajos de investigación derivados de la sede Universidad de Guadalajara del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables, que a la luz de los profundos cambios que se esperaban a propósito del megaproyecto insignia de la administración federal 2018-2024 conocido como el Tren Maya, se anticipaba como detonador de impactos ambientales, sociales y de gestión urbana en el territorio y en las ciudades de la península de Yucatán.

¹ Universidad de Guadalajara, México. fernando.cordova@academicos.udg.mx

En ese sentido los alcances que se plantea el trabajo se relacionan con cuáles podrían ser las principales características de las alternativas de incidencia que con un carácter sistémico y en la medida de lo posible minimicen, mitiguen o de plano eviten la pérdida de la vida rural en los asentamientos humanos rurales y aseguren el acceso justo al hábitat, y que podrían dentro de sus rasgos conceptuales relacionarse con los territorios impactados por el Tren Maya, por lo que se plantea analizar la relación existente entre líneas teóricas y casos ejemplares contemporáneos que a nuestro parecer son ineludibles por su actualidad y que ofrecen interesantes lecciones, en un abordaje como el que se pretende hacer en el megaproyecto del Tren Maya: el derecho a la vivienda y a la ciudad y su importancia para construcción del bien común; la relación entre vida rural y desarrollo desde el caso de la República Popular China; dos experiencias internacionales y una nacional en el desarrollo de ciudades y viviendas rurales nuevas que ilustran la complejidad y los resultados diferenciados de tres enfoques de abordaje del hábitat y la vida rural; y por último, las reflexiones finales de la primera aproximación a un esquema conceptual para el desarrollo de nuevas ciudades y vivienda, centrado en la vida rural para el acceso justo al hábitat que podría ser relacionado con el impacto en el hábitat del Tren Maya.

Una de las principales preguntas asociadas al hábitat que se plantean en torno al megaproyecto denominado Tren Maya es cuál será el impacto inmediato que tendrá en los asentamientos humanos rurales,² sistemas urbano-rurales³ y comunidades rurales, y si existe alguna alternativa conceptual que permita a las comunidades afectadas implantar instrumentos que les permitan conservar y fortalecer la vida rural para el acceso

2 De acuerdo con la definición dada por la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano en su artículo 3 numeral IV de “[...] conglomerado demográfico, con el conjunto de sus sistemas de convivencia, en un área físicamente localizada, considerando dentro de la misma los elementos naturales y las obras materiales que lo integran”, para este caso en entornos rurales.

3 De acuerdo con la definición emitida por la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano en su artículo 3 numeral XXXV “[...] unidades espaciales básicas del ordenamiento territorial, que agrupan a áreas no urbanizadas, centros urbanos y asentamientos rurales vinculados funcionalmente”.

justo al hábitat, es decir, ¿existe alguna alternativa a lo que parece un proceso de conversión de comunidades y centros de población con un marcado arraigo a la vida rural, a centros de población con patrones de desarrollo urbano-habitacional dominante en el país y Latinoamérica?

Partimos de un contexto en el cual el fenómeno urbano en México y en América Latina ha tenido una serie de particularidades que hacen que los patrones del desarrollo urbano-habitacional se expresen principalmente en la concentración espacial (Cuervo, 2004; CEPAL, 2017; Rodríguez y González, 2017), la profundización de las desigualdades ínter e intraterritoriales (Bárcena y Prado, 2016; Jordán *et al.*, 2017), el sostenimiento de déficits relacionados con la provisión como el acceso a la vivienda por la concentración del financiamiento público para nueva vivienda preferentemente para población derechohabiente (Coulomb y Schteingart, 2006), y que en su conjunto éstas puedan considerarse un estilo de desarrollo que bien podría denominarse periférico (Jaramillo, 2008; Jordán *et al.*, 2017; CEPAL, 2017). Esto resulta en una cada vez mayor dificultad para transitar hacia condiciones económicas, sociales y ambientales más incluyentes para el acceso justo al hábitat.

Por lo que la primera tarea que se propone en el documento es hacer una primera exploración acerca de los alcances conceptuales del derecho a la vivienda y a la ciudad en su relación con el bien común, para a partir de ahí ir construyendo a partir de las reflexiones producto de las experiencias internacionales una propuesta propia que pueda incorporarse al proceso de construcción de la nueva realidad producto de la ejecución y operación del Tren Maya. Todo lo anterior, sustentado en un enfoque metodológico que a continuación será expuesto.

Aproximando una estrategia metodológica: la búsqueda de alternativas desde la contrastación

La propuesta metodológica está concebida en tres fases en el documento: la primera se enfoca en una propuesta de un marco ético y conceptual; la segunda está relacionada con la exploración crítica aplicando casos

comparativos y el análisis sistemático que da como resultado una matriz de síntesis entre las dos técnicas usadas; para por último proponer un esquema conceptual desde una perspectiva sistémica que concluye en una guía inicial para la acción.

En la primera fase se plantea el marco ético y conceptual, que es en esencia el fundamento ético y el marco analítico inicial que guiará la narrativa del documento en dos vías:

- Una primera aproximación al anclaje normativo que orienta el discurso, que está relacionado con el derecho a la ciudad y a la vivienda, que adicionalmente adopta una postura ética, relacionándose con el bien común y el acceso justo al hábitat.
- La propuesta inicial de un marco analítico a partir de los dos conceptos centrales del trabajo, en este caso: vida rural articulada en las dimensiones de ecología, producción y habitar; y vivienda adecuada, que retoma los estándares de la Organización de las Naciones Unidas.

Una vez planteado el fundamento ético y el marco analítico inicial, se usan dos técnicas para explorar la complejidad de la problematización de la vida rural y la vivienda adecuada desde una perspectiva ética de acceso justo al hábitat y bien común, con el fin de extraer de ahí elementos relevantes para construir una propuesta para la acción, esto mediante la comparativa de casos y el análisis sistemático de los casos, para proponer dos matrices que sintetizan el resultado de las dos técnicas empleadas. La descripción sintética del proceso es como sigue:

- Se seleccionaron tres experiencias singulares en el sur global que representan lógicas de intervención distintas en la vida rural, en la vivienda y en el desarrollo territorial, la primera que expone al modelo modernizador y estatal de China, lo que fue una de las mayores apuestas contemporáneas en Latinoamérica para reconfigurar la vida rural, el territorio y la vivienda a través de las llamadas ciudades rurales sustentables en México, y el enfoque basado en conocimiento científico-tecnológico desde la

Universidad a partir con una base ecológica y aparentemente colaborativa de la denominada BuraNest en Etiopía. Tres enfoques contrastantes que permitieron observar un amplio espectro de insuficiencias e impactos en el territorio, la preservación de la vida rural y la posibilidad de alcanzar el estándar de la vivienda adecuada.

- La aplicación de un análisis sistemático mediante una codificación interpretativa de contenidos que facilitara el proceso de análisis de cada caso, identificando y agrupando nuevos campos relevantes para el análisis, en términos de la legislación, vida rural, gestión y la forma de financiamiento, lo que hizo posible una comparativa más profunda.
- Los resultados del análisis se sintetizaron en las *tablas 1 y 2* con el fin de visibilizar los impactos y las insuficiencias que presentan los casos para satisfacer plenamente los derechos a la vivienda y a la ciudad, además de sus impactos en la vida rural.

En esta fase es muy importante aclarar la manera en que se eligieron los casos de estudio; su elección partió de la siguiente pregunta: frente al modelo de desarrollo dominante que amenaza a las comunidades rurales impactadas por el Tren Maya, ¿qué alternativas conceptuales existen para conservar y fortalecer la vida rural y garantizar el acceso justo al hábitat? Para responder esto, se propusieron en principio dos criterios: el primero está relacionado con su búsqueda en experiencias de países del sur global;⁴ el segundo respecto al interés personal del investigador, en el cual se plantean tres enfoques contrastantes, por lo que en ningún momento se busca la similitud en el análisis. Los casos están: uno vinculado al modelo modernizador en donde el Estado reconfigura la vida rural, el territorio y los asentamientos desde la perspectiva espacio material, otro que es contemporáneo en Latinoamérica y que evidencia

4 Es decir aquellos países que se enfocan en el desarrollo socioeconómico, y sobre todo, tienen una visión crítica del orden mundial liderado por Occidente (Sun, 2024).

un vacío teórico-conceptual significativo en la definición de la relación entre vida rural, la vivienda y el territorio, y una última experiencia que en apariencia es colaborativa y está pensada hacia lo local, pero que tiene una problemática que no llega a superar, es decir, es una iniciativa vertical que desde la cofradía de los científicos y tecnólogos universitarios es diseñada y cuyo fin es la eficiencia y que es transferida a una comunidad.

Si bien se acepta que existen diferencias relevantes en las esferas culturales, históricas, ambientales, económicas y sociales de los tres casos, su elección se centra más en la idea de que toda intervención que parta de un enfoque vertical, con rasgos tecnocráticos,⁵ supone impactos significativos en el acceso justo al hábitat y la preservación de la vida rural de las comunidades a través de la vivienda. El contraste así expuesto representa una oportunidad para la reflexión y el aprendizaje, pero también ofrece la oportunidad de generar una vía alternativa para la intervención pública de la vivienda en territorios cuya principal característica sea la vida rural.

La última fase del trabajo representa una propuesta construida sistemáticamente que ofrece al final una guía inicial para la acción, y que constituye en última instancia una aportación a la discusión teórica con enfoque de incidencia para articular eficazmente a la vida rural con la vivienda adecuada y el territorio; esto implicó:

- La construcción de una alternativa nueva a partir de las lecciones aprendidas del análisis de casos, que dio como resultado un esquema conceptual que se ejemplifica en el esquema 2 y la tabla 3, sugiriendo campos analíticos que generan resonancia

5 Y ahí interpretamos el rol tecnocracia desde dos perspectivas, la primera relacionada con la idea de Hui (2024) en el sentido de que existe una correlación entre el monopolio del conocimiento técnico por parte de los técnicos, y el manejo del Estado por parte de los tecnócratas, y por otro, por la tesis de Habermas (1986) de que la evolución del sistema social es determinada por el progreso científico y técnico, por lo que puede inferirse que una de las consecuencias de esto sea que en las sociedades modernas la voluntad política ha perdido la formación democrática en las cuestiones prácticas, sustituyéndolas en su lugar por equipos de técnicos que administran la toma de decisiones que influyen de manera práctica en la vida cotidiana.

en la relación de los conceptos centrales tratados en el trabajo, en términos legislativos, de humanidades, ciencia y tecnología, de vida rural, y en la co-gestión y financiamiento.

- El desarrollo de una primera aproximación a una guía para la acción compleja, entendida más como un camino inicial de acciones de incidencia que detone la discusión y la negociación, focalizando en la noción de que toda solución territorial que implique a la vida rural y a la vivienda adecuada, en principio debe partir de la co-creación local.

Alcances conceptuales del derecho a la vivienda y el derecho a la ciudad respecto al bien común

De acuerdo con la Plataforma Global para el Derecho a la Ciudad (2020), el derecho a la ciudad es “[...] el derecho de todos los habitantes a habitar, utilizar, ocupar, transformar, gobernar y disfrutar las ciudades, pueblos y asentamientos urbanos justos, inclusivos, seguros, sostenibles y democráticos, definidos como *bienes comunes* para una vida digna, que debe compartirse y pertenecer a todos los miembros de la comunidad”; tal como se expone en el esquema 1, en ese sentido la ciudad es un bien común, que bien podría ser considerada desde esta perspectiva como el límite o bien interface entre las esferas pública y privada, traducándose esto no sólo en un asunto de interés público, aun cuando se reconoce en la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (2016) en su artículo 4 numeral I, sino de la esfera de lo que nos es común, y con esto lo que nos permite es constituir una comunidad, lo cual constituye en una primera premisa significativa, el derecho a la ciudad es requisito de la construcción de lo común y de la comunidad.

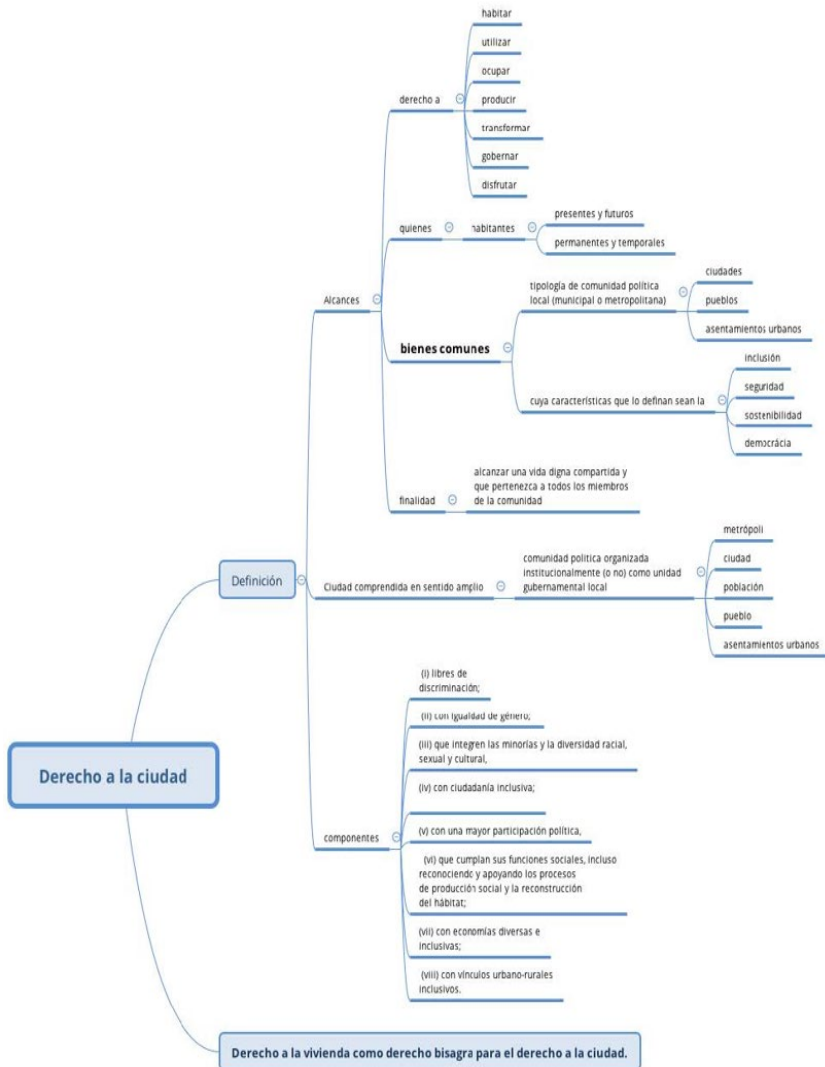
Cuando nos referimos a comunidad, rescatamos la concepción de Blokland (2017), en la que la comunidad es en principio una práctica cultural, y como categoría teórica puede conceptualizarse como un sistema de relaciones entrelazadas entre miembros cuyo pensamiento

es relacional, y que da lugar a prácticas mediante las cuales expresamos posiciones, experiencias y narrativas de pertenencia compartidas, lo que significa que también se trazan límites para identificar con quiénes se comparte y con quiénes no, por lo que las distinciones sociales surgen de las comparaciones constantes entre el nosotros y el ellos, por lo que la comunidad bien podría ser considerada como una práctica cultural que puede asociarse a la ciudad.

Otro aspecto importante es que el término de ciudad tiene un sentido amplio, en el cual caben desde lo que puede ser considerado como una metrópolis, pasando por pueblos o asentamientos que estén constituidos como comunidades políticas y que en la mayoría de los casos, aunque no necesariamente, formen una unidad administrativo-política de carácter gubernamental, como puede ser un municipio por ejemplo (Plataforma Global para el Derecho a la Ciudad, 2020), por lo que el derecho a la ciudad es constitutivo de todo asentamiento humano, pues a través del mismo se construye lo común y la comunidad. Es importante aquí insistir en que la práctica cultural en la que se basa la comunidad y en las narrativas y relaciones entrelazadas entre sus miembros, es que se constituiría también la visión con la cual construimos el territorio.⁶

6 Aquí recuperamos la noción de territorio propuesta por Giménez (2001), como el “[...] *espacio apropiado* por un grupo social para asegurar su reproducción y la satisfacción de sus necesidades vitales, que pueden ser materiales o simbólicas”.

Esquema 1. Descripción general del derecho a la ciudad de acuerdo con la Agenda del Derecho a la Ciudad promovida por la Plataforma Global para el Derecho a la Ciudad (2020)



Adicionalmente es necesario observar que el derecho a la ciudad implica componentes aún en proceso de desarrollo conceptual de acuerdo con nuestra realidad compleja, y a esto hay que sumar los derechos vinculantes a escala humana, tales como el derecho a la vivienda, pues cuando hablamos de vivienda debemos considerar su multidimensionalidad que la hace tanto una necesidad básica, un bien económico, un elemento fundamental del entorno urbano, del ordenamiento del territorio y de la construcción de la ciudad, como un elemento que impacta al medio ambiente facilitando el acceso y aprovechamiento de recursos del territorio tales como agua, la energía y el suelo (Galiana Saura, 2018). Adicionalmente la vivienda tiene conexión tanto con la protección y eficacia de los derechos civiles y políticos, tales como el derecho a la vida, honor, intimidad, participación política, por citar algunos (Galiana Saura, 2018), y constituye un precedente indispensable para la eficacia y garantía de los derechos sociales, económicos y culturales; por citar algunos: derecho al agua, a la salud, a la educación y a un medio ambiente adecuado y saludable (Galiana Saura, 2018), es decir podría considerarse como un derecho puente sin el que no puede garantizarse por ejemplo el derecho al agua o el mismo derecho a la ciudad.

Desde una perspectiva amplia, puede considerarse a la vivienda como uno de los principales determinantes del bienestar material y de la calidad de vida para las personas, que por agregación impacta a las ciudades y a las comunidades que las integran, contribuyendo, entre otros fenómenos, a la exclusión social, al consumo irracional de recursos del territorio, a la exposición a amenazas ambientales y a la precarización de las condiciones de vida de las personas. Por tanto, una de las principales preocupaciones a nivel global ha sido definir cuáles son aquellos criterios irreductibles que permiten entonces considerar que una vivienda es inclusiva, sostenible y adecuada.

En ese sentido, la Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos (OHCHR, 2009: 4) establece que para que una vivienda sea adecuada debe tener mínimamente los siguientes criterios:

1. Certeza en la tenencia jurídica de la vivienda, es decir tener derecho a la propiedad.
2. Servicios e infraestructura que le permitan tener acceso al agua, al saneamiento, a la energía, a la conservación de alimentos y a la disposición adecuada de residuos.
3. Coste asequible, que no ponga en riesgo por su pago y/o mantenimiento otros derechos humanos de los habitantes.
4. Condiciones adecuadas de habitabilidad en términos de espacio suficiente para desarrollar sus actividades, seguridad física y estructural, protección a la intemperie y promoción de la salud ambiental.
5. Que considere las necesidades de los grupos más desfavorecidos y marginados, garantizando su acceso.
6. Una ubicación adecuada que permita el acceso a equipamiento urbano y fuentes de empleo, minimizando también su exposición a áreas contaminadas o que representan un riesgo a la seguridad de sus habitantes.
7. Que sus tipologías y la morfología urbana que produzca respeten la identidad cultural de sus habitantes.

Adicionalmente, ONU Hábitat (2019) propone que una vivienda representa una de las interfases que vinculan a la naturaleza con la sociedad, e identifica principalmente dichas interacciones en la manera en que contribuye al uso y consumo de recursos presentes en el territorio, en este caso suelo, agua, energía y materiales, teniendo un impacto por agregación más evidente en las ciudades, por su participación en los procesos de agotamiento de fuentes de abastecimiento de agua, de generación de aguas residuales y gases efecto invernadero, de uso de energía eléctrica y combustibles producidos por fuentes no renovables, de disminución de la calidad del aire e impermeabilización del suelo. De la misma manera, la vivienda está expuesta a desastres por interacción con fenómenos naturales tales como eventos hidrometeorológicos extremos, sismos y aquéllos asociados con el cambio climático, por lo

que la vivienda tiene una compleja relación con la sustentabilidad, la cual es recuperada como uno de los principales temas que deben ser incorporados en una política de vivienda sostenible.

En un sentido más amplio, ONU Hábitat (2019) expone que la sostenibilidad de la vivienda se explica también en su relación con las actividades económicas que detona la producción de vivienda por sí misma y a su vez por las actividades económicas a las que está ligada territorialmente, a las prácticas residenciales amigables y sensibles a las condicionantes territoriales y a sus recursos, a su integración adecuada a la ciudad y a los asentamientos rurales, al tejido social y cultural que construye comunidades, y a su contribución a la reducción de la pobreza.

Una vivienda sostenible es una vivienda incluyente en tanto que es asequible y es resultado de la aplicación del principio de no discriminación, este último de acuerdo con la Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos (2009: 11), se identifica que no se aplica cuando existen: instrumentos de política pública discriminatorios, desarrollo excluyente, falta de seguridad en la tenencia, falta de acceso al crédito, exclusión de los beneficios de la vivienda, participación limitada en la adopción de decisiones, falta de protección contra prácticas discriminatorias aplicadas por agentes privados.

Adicionalmente es preciso identificar grupos específicos que enfrentan dificultades mayores para ejercer su derecho a la vivienda (OHCHR, 2009: 17-31), ya sea por características personales, por la discriminación o los prejuicios o por la combinación de estos factores; entre dichos grupos es necesario enfatizar el acceso y la aplicación del principio de no discriminación. Los grupos referidos (OHCHR, 2009: 17) son las mujeres, los niños, los habitantes de tugurios, las personas sin hogar, las personas con discapacidad, los pueblos originarios o indígenas, las personas desplazadas y los migrantes.

En suma, a partir de la exposición respecto a los alcances conceptuales tanto del derecho a la ciudad como a la vivienda, una primera reflexión que bien podría resumirse en las siguientes proposiciones: 1) el derecho a la vivienda es un derecho puente sin el cual no es posible

acceder al derecho a la ciudad; 2) el derecho a la ciudad es un requisito mediante el cual se construye lo común y la comunidad; 3) la ciudad, entendida en su acepción amplia, es el lugar en donde se concreta cotidianamente el bien común; 4) el bien común a través de los derechos a la ciudad y la vivienda y la comunidad misma deberían ser elementos orientadores a partir de los cuales se construye y gestiona el territorio y consecuentemente el hábitat. Una primera consecuencia que podría inferirse de lo anterior es que tanto el derecho a la vivienda como a la ciudad deberían ser dos componentes esenciales en la construcción y gestión de territorio, y como se expondrá más adelante, en el aseguramiento del acceso justo al hábitat.

Vida rural y desarrollo: experiencia de la República Popular de China

Un primer acercamiento al concepto de vida rural desde la perspectiva del presente trabajo lo proponen Zhao & Zhang (2017), debido a que logran caracterizar los principales aspectos de la vida rural a través de tres ejes constitutivos:

1. Ecología rural, que tendría como fin la conservación y/o mejora de ecosistemas.
2. Producción rural, que está relacionada con el ingreso y empleo no agrícola, así como con la producción agrícola.
3. Habitar rural, que implica el modo de vida campesino y las formas de gobierno comunitario, así como sus vinculaciones con estructuras de gobernanza más amplias territorialmente.

La vida rural se articularía entonces mediante la relación íntima entre los ecosistemas, la forma de producción y el habitar, aquí podríamos proponer una primera interpretación asociada a la propuesta de Zhao & Zhang (2017); en ese sentido, el modo de vida campesino y su forma de gobierno comunitario articulan una forma de producción que estaría relacionada con las actividades primarias principalmente (aun cuando

en algunos casos coexistirían con actividades secundarias) que buscan en conjunto una relación de conservación y/o mejoramiento de los ecosistemas rurales.

No obstante, la experiencia internacional en el caso de la República Popular de China (Zhao & Zhang, 2017) reporta que quizá la mayor apuesta en la actualidad para mejorar las condiciones de bienestar y de calidad de vida en el medio rural es precisamente optar por la reestructuración de la vida rural, de modo que dicha reestructuración sea un proceso de acoplamiento y coordinación que involucre varios elementos de desarrollo rural, en el cual los recursos humanos, de suelo y de capital se complementen y restrinjan mutuamente, a la vez que generen impactos sociales, económicos y ambientales en la manera de habitar, en la producción y el ambiente rurales. Desde esta perspectiva, el flujo de capital es el principal instrumento para promover interacciones diversificadas entre la población y el suelo, generando efectos indirectos en la sociedad y ambiente rurales, esto se traduce en lo que podríamos denominar como una “vida rural orientada al desarrollo” en la que la idea principal es mejorar las condiciones de bienestar material, de calidad de vida, la productividad y la gobernanza, esto implica entre otras acciones:

1. La demolición y reconstrucción de los asentamientos rurales a fin de reubicar el emplazamiento de las viviendas, lo que transformará los tiempos de comunicación entre vivienda y áreas de cultivo y el impacto en la forma de trabajo y de producción agrícola de los campesinos.
2. El mejoramiento de la infraestructura urbana y acceso a nuevos recursos “verdes”, lo cual se constituya como un incentivo para los campesinos para abandonar sus hábitos anteriores (por ejemplo, la adopción del uso de biogás en lugar de quemar leña), y con esto mejorar la calidad de vida y su gestión ambiental.
3. Nuevo equipamiento urbano, que incluye equipamiento de educación, salud y de servicios administrativos, haciendo accesibles nuevos servicios urbanos.

4. La disposición de infraestructura industrial, lo cual constituye un cambio drástico en cuando a las capacidades productivas y la productividad, integrando recursos humanos, suelo y capital, de tal forma que se impacta el empleo e ingreso de los campesinos, cambiando la estructura de empleo, consumo, uso de suelo y producción agrícola en áreas rurales.
5. La mejora de suelo, lo cual puede cambiar la escala de la gestión del suelo agrícola, y con esto incrementar la producción agrícola, pasando del autoconsumo a la producción orientada al mercado.
6. La participación ciudadana y los mecanismos de comunicación y transparencia desarrollados mediante proyectos proveen beneficios para la gobernanza rural, fortaleciendo las capacidades de gestión y administración de las instancias gubernamentales (Zhao & Zhang, 2017).

La reestructuración de la vida rural puede observarse en una política nacional de la República Popular de China denominada “nuevo paisaje rural socialista”, cuyo fin es la modernización y mejoramiento de las condiciones materiales en entornos rurales, y que partiendo de la idea de la gestión del flujo de capital para reestructurar el habitar, la producción y la relación con los ecosistemas como apuntaron Zhao & Zhang (2017), se basó en una reforma fiscal que permitió la supresión de casi todas las tarifas fiscales rurales, para convertir al sistema fiscal chino en un sistema que transfiere recursos directamente desde el gobierno central a los gobiernos locales, en lugar de que estos últimos inviertan de sus propios recursos en la provisión de servicios y bienes públicos, promoviendo con esto que la inversión se aplique en el desarrollo de ellos mismos (Ahlers & Schubert, 2009).

Dicha política tiene dos alcances significativos (Ahlers & Schubert, 2009): por un lado implica la gestión de recursos para construcción y mantenimiento en la infraestructura y servicios públicos, y por otro, tiene un enfoque estratégico de largo aliento el cual se relaciona con

el desarrollo de una nueva sociedad rural que se pretende que cuente con mejores condiciones de bienestar, las cuales incluyen mejoras en la educación, salud pública, asistencia y previsión social, y medidas para mejorar el ingreso rural; en ese sentido, tiene una perspectiva multidimensional del desarrollo rural:

1. Producción agrícola orientada hacia un rango limitado de cultivos o al monocultivo, que aseguren una productividad aumentada, mediada por medios tecnológicos modernos.
2. Creación de cooperativas agrícolas.
3. El desarrollo de las llamadas industrias rurales ambientalmente sustentables de pequeña escala.
4. Motivación a los habitantes a relocalizarse en “nuevas villas”.
5. Promoción vigorosa del ecoturismo.
6. Desarrollo de un estándar de desarrollo municipal con un enfoque “verde”, denominado “Modelo nacional de municipios ecológicos”.
7. Establecimiento de los llamados centros o estaciones de servicios en cada población y caseríos.
8. Administración pública local orientada al servicio que incluya funcionarios públicos cualificados en áreas tales como trabajo de asistencia rural, de desarrollo industrial, de estabilidad social y mediación (Ahlers & Schubert, 2009).

Adicionalmente, el “nuevo paisaje rural socialista” identifica líneas estratégicas necesarias para el desarrollo rural (Ahlers & Schubert, 2009): la primera relacionada con la consideración de la economía social radicada en comunidades a través de cooperativas y su posible vinculación con instrumentos tales como la generación de industrias rurales locales con enfoque ambientalmente sustentable, así como con actividades de ecoturismo; segunda, el desarrollo de una infraestructura física y tecnológica que permita gestionar la administración pública a nivel local con funcionarios orientados al servicio y con una cualificación que promueva el desarrollo económico, social, y la cultura de la paz; tercera, la propues-

ta de un estándar de desarrollo municipal, el cual permite establecer la orientación de las metas de desarrollo social, económico y ambiental, así como las características técnicas y de gestión territorial a nivel municipal de manera que son identificables indicadores de desempeño mínimo.

El desarrollo rural tiene cinco ejes en los cuales organizar sus indicadores de impacto y evaluación (Ahlers & Schubert, 2009), relacionados con el desarrollo económico, de infraestructura básica de villas y caseríos, asistencia y previsión social en asentamientos, desarrollo de política democrática, y otros. De los indicadores que podrían ser incluidos y ampliados en los mencionados ejes, consideramos los siguientes: cultura y tradiciones; desarrollo de economía social y solidaria, que incluye generación y puesta en servicio de cooperativas de producción, generación de instrumentos de asistencia técnica y de desarrollo de capacidades productivas, disponibilidad de infraestructura física y tecnológica para aprovechamiento sustentable de recursos territoriales; asistencia y previsión social en villas y caseríos, que incluye servicios educativos, servicios de salud, incremento en el ingreso neto de hogares en situación de pobreza; democracia y cultura de la paz, que incluye estabilidad social y solidaridad; gestión socioambiental; espacio construido rural, que incluye vivienda, infraestructura, movilidad, espacio público, equipamiento y servicios de villas y caseríos, así como la gestión incluyente y sustentable del suelo.

Una última observación asociada a la promoción del ecoturismo es que llevaría a la tercerización de los entornos rurales, esto podría también constituir un elemento que contribuya a la destrucción de la vida rural, reforzando la transformación de las actividades productivas del sector primario hacia lo que han denominado Hirschman y Holbrook (citados por Mitchell, 2013) como los “lugares de consumo hedónico”, es decir, lugares que proveen un alivio temporal de la vida urbana a la vez de ser una oportunidad para los consumidores para mejorar su bienestar subjetivo. En ese sentido el paisaje rural se convierte en espacio de consumo de los habitantes urbanos, en donde la vida rural se convierte en sí misma en un objeto de consumo que articula de manera ordenada

el patrimonio material, natural e inmaterial, a fin de ofrecerlo como un producto que puede ser comercializado y consumido (Mitchell, 2013).

Concluyendo, el “nuevo paisaje rural socialista” se presenta como una política nacional de reestructuración de la vida rural novedosa, en general manifiesta un modelo de desarrollo que varía poco de las experiencias históricas europeas y de los países industrializados del este asiático para superar la pobreza rural (Ahlers & Schubert, 2009), debido a que se centra en la especialización de la producción agrícola, la estratificación social y el incremento de la urbanización (Ahlers & Schubert, 2009). La pretensión de alcanzar una “vida rural orientada al desarrollo” como alternativa a la vida rural en donde el modo de vida y gobernanza articulan la producción para conservar o mejorar los ecosistemas, es en sí misma una propuesta que introduce a la vida urbana y a la industrialización como componentes de una nueva forma de habitar que, de origen, es muy controvertida respecto a cuando menos dos derechos a los que ya nos hemos referido: el primero, el derecho a la vivienda, y segundo el derecho a la ciudad, dado que destruyen el modo de vida originario, sus formas de producción, de relacionarse con los ecosistemas y quizá las relaciones sociales en las cuales se articula la comunidad debido a la estratificación social que promueve; sin embargo, el acceso a equipamiento, movilidad, infraestructura, servicios y la mejora del entorno construido y de la administración pública son aspectos que no deberían pasar inadvertidos en una propuesta que previera la mejor calidad de vida asociada a la vida rural.

Vivienda y ciudades rurales: tres experiencias contemporáneas en la República Popular de China, México y Etiopía

Tres casos contemporáneos son dignos de resaltar cuando tratamos acerca de nuevos asentamientos rurales y sus respectivos programas de vivienda, el primero vinculado a la República Popular de China como resultado de la aplicación del “nuevo paisaje rural socialista”, el segundo

relacionado con las llamadas “ciudades rurales sustentables” en México, y el tercero producto de la colaboración entre NesTown Group, la Universidad de Adís Abeba y ETH Zúrich en la comunidad rural piloto BURANest en Etiopia.

Una de las principales razones por la que se impulsa en China la modernización de los asentamientos rurales es que dicha acción permitirá estimular la demanda doméstica, la cual ha sido una de las prioridades que ha tenido China desde la crisis financiera de 1997 (Looney, 2015), la cual enfatizó su dependencia de las exportaciones. La modernización incluye la regulación del entorno rural construido, la cual deriva del mandato de proteger la superficie cultivable (Looney, 2015); no obstante, existe evidencia de que los gobiernos locales exhiben una conducta predatoria respecto al uso de suelo que descansa en la acumulación de suelo como su principal fuente de ingresos, expropiando suelo para el desarrollo de vivienda nueva (Looney, 2015). De esta manera los pobladores de los asentamientos rurales han sido forzados a construir vivienda vertical moderna, la cual ocupa menos suelo y maximiza su utilización, en detrimento de la vivienda tradicional, beneficiando con esto el desarrollo de nuevos usos en los asentamientos rurales con la nueva superficie “liberada” de suelo, además de promover la creación de oportunidades de renta, tanto con la nueva vivienda como con los usos nuevos generados (Looney, 2015), por lo que tiene un efecto reforzante para promover la vida residencial basada en modelos urbanos como alternativa al “atraso rural”, el cual tiene una clara orientación de diseño racional del orden social (Looney, 2015).

La construcción de nuevas comunidades rurales ha facilitado la concentración de vivienda y servicios en villas cuidadosamente planeadas, teniendo como una de sus principales intenciones cultivar la lealtad política de los beneficiarios (Looney, 2015). No obstante, es debido a la preponderancia en el desarrollo de vivienda nueva que se observa un aumento en la vivienda abandonada (Looney, 2015), dicho fenómeno ocurre a propósito del regreso de migrantes urbanos a sus lugares de origen en los asentamientos rurales, a fin de aprovechar la construcción

de vivienda nueva, aun cuando los no migrantes han mejorado su posición social a través de la construcción de vivienda nueva, ésta queda inconclusa en la mayoría de los casos debido a la falta de financiamiento (Looney, 2015); adicionalmente se ha enfatizado con el desarrollo de vivienda nueva y en el consumo el aumento de deuda en comunidades rurales (Looney, 2015), además de que las relocalizaciones en nuevos asentamientos rurales significan grandes retos en términos de gobernanza, de desarrollo económico, social y de adecuación cultural, que incluyen su capacitación para su inserción en actividades no-agrícolas y subsidios que apoyen en el pago de la vivienda nueva (Looney, 2015).

Del mismo modo existen conflictos con la gestión del suelo (Li, 2014) que no toma en consideración la protección del patrimonio natural y cultural, poniendo un énfasis excesivo en tipologías edilicias y sistemas constructivos cuyas tecnologías no incorporan las formas de construir, materiales y lógica de ocupación y utilización del suelo presentes ya en las regiones. Aquí el “nuevo paisaje rural socialista”, de acuerdo con Li (2014), no reconoció en general la configuración socioespacial, cultural y ambiental asociada a las villas o caseríos en términos de: las formas de utilización y ocupación del suelo prevalecientes; los rasgos regionales de las tipologías edilicias y morfología urbana; la desvinculación con el entorno ambiental del asentamiento; la desconexión con el contexto mediante el cambio de las actividades productivas, modo de vida y comunicaciones.

El modelo propuesto por la República Popular de China reporta elementos interesantes para la reflexión, debido a que por un lado la integración de la renovación de asentamientos rurales con otras políticas tales como los mejoramientos de vivienda o la reubicación de asentamientos en pobreza ha conseguido cambios radicales en asentamientos rurales remotos y periurbanos, generando satisfacción entre la población rural en algunos lugares, por lo que la implantación de dichas estrategias no necesariamente representan impactos negativos por su aplicación (Looney, 2015); por otro lado, se ha detonado un fenómeno de vivienda abandonada en asentamientos rurales, se han exacerbado los procesos de especulación de suelo, se han estandarizado las tipologías edilicias y la

morfología urbana, desvinculándose de su entorno cultural y ambiental, y se ha promovido una vida residencial orientada a modelos urbanos, con lo que se destruye el modo de vida campesina y en última instancia la vida rural.

Por otra parte, las “ciudades rurales sustentables” (CRS) constituyen una de las iniciativas más sonadas y significativas en los últimos 20 años en nuestro país, surgen inicialmente en el contexto de la situación de emergencia producto de un derrumbe y una inundación en el ejido Juan Grijalva en el municipio de Ostucán, Chiapas, en el año 2007 (Arévalo Peña, 2016; Ruiz López, 2016), lo cual derivó en la Ley de Ciudades Rurales Sustentables. Este mismo instrumento legislativo, en su artículo segundo identifica conceptualmente como un problema central de desarrollo regional la relación dispersión-marginación, el cual tiene que ser abordado desde la mejora de servicios, la generación de oportunidades de desarrollo económico y social, desde la participación ciudadana y colaboración de sociedad civil organizada; por lo que de nuevo de manera similar a lo propuesto por el “nuevo paisaje rural socialista”, identifica como elemento clave para el desarrollo la relocalización de la población rural y la generación de condiciones económicas y sociales que la incorporen en los procesos de desarrollo regional mediante las economías producidas por la aglomeración poblacional.

La Ley de CRS distingue tres tipologías de zonas rurales, las cuales son susceptibles de ser integradas al Programa de Ciudades Rurales Sustentables: las que deben revitalizarse, que tienen como característica su baja densidad poblacional, dedicación elevada a actividades agrarias, bajos niveles de renta, y aislamiento geográfico; las que denomina como intermedias, cuya densidad poblacional va de baja a media, que se ha diversificado entre actividades primarias, secundarias y terciarias, pero que aún conserva bajos niveles de renta y que es distante de grandes núcleos urbanos; y las periurbanas, cuya densidad poblacional se identifica como “creciente”, que ha tercerizado su actividad económica, con renta de niveles medios a altos y que se ubica en las periferias de las áreas urbanas o densamente pobladas.

En total se construyeron cuatro CRS: Nuevo Juan Grijalva en 2009, Santiago del Pinar en 2011, y por último Ixhuatán y Jaltenango en 2012, cada CRS tuvo diferentes coyunturas que impulsaron su desarrollo (Mingüer Cestelos, 2016): la solución de la reubicación producto de una inundación en el caso de Nuevo Juan Grijalva; Santiago del Pinar ubicada en los altos de Chiapas con un alto porcentaje de población indígena y que fue producto de la negociación entre el Gobierno del estado de Chiapas y organizaciones campesinas para su construcción; Ixhuatán, desarrollado en un municipio con un grado medio de marginación pero con un emplazamiento estratégico cercano a la zona del levantamiento zapatista; y Jaltenango, cercana al área natural El Triunfo y cuya finalidad era reubicar a las comunidades fuera de la reserva; en todos los casos su finalidad original era concentrar la población rural dispersa, y pueden ser consideradas dentro de la tipología de zonas rurales de revitalización.

Se considera como instrumento de planeación y gestión a los programas estatales de orden ecológico territorial de asentamientos humanos, de suelo y reservas territoriales, de vivienda y de desarrollo sustentable de las ciudades rurales sustentables (Ley de Ciudades Rurales Sustentables para el Estado de Chiapas, 2010); sin embargo, en la práctica sus procesos de desarrollo fueron heterogéneos y al parecer no fueron sistemáticos, además de que originalmente es poco clara su finalidad y los indicadores que permitirían dar seguimiento a su aspiración de ser consideradas como “sustentables”, esto de acuerdo con Mingüer Cestelos (2016), debido a que la sustentabilidad fue internalizada conceptualmente por la interacción acumulativa y abstracta de las dimensiones de la sustentabilidad en los siguientes términos: 1) económicamente mediante las compatibilidades de las actividades económicas con el ordenamiento ecológico y los usos de suelo; 2) desde la perspectiva social, por la generación de economías por aglomeración producto de las reubicaciones y actividades económicas que incentiven el sentido de comunidad, además de acceso a vivienda, equipamiento y servicios urbanos nuevos; 3) desde lo medioambiental, a través de formas de producción y consumo orientadas por una visión de

conservación ecológica y por la reducción de fuentes de contaminación de agua, suelo y aire.

En general las CRS fueron inefectivas, ineficaces e ineficientes (Mingüer Cestelos, 2016); fueron inefectivas por su dependencia total del financiamiento público para sobrevivir, tanto para la operación adecuada del equipamiento y servicios urbanos como para los proyectos productivos, además de que los proyectos de vivienda fueron construidos con materiales y características diferentes a las propuestas originalmente, y de que excluyeron del acceso a la vivienda a quienes no fueran miembros de las comunidades y se dio lugar a procesos inmobiliarios especulativos con la vivienda nueva; ineficaces, por la debilidad de resultados debido a la oposición de los pobladores al manejo presupuestal y a las acciones públicas, en cuanto a los proyectos productivos, al desconocimiento de las necesidades de las comunidades que no necesariamente estaban alineadas a las presiones y competencia del mercado, y a la aceptación parcial de la vivienda en dos CRS (Jaltenango e Ixhuatán); e ineficientes por el nivel de inversión hecha respecto a la calidad constructiva de la vivienda, al periodo de sobrevivencia de los proyectos productivos originales (dos años en Nuevo Juan Grijalva, por ejemplo) y al funcionamiento parcial de equipamiento y servicios urbanos.

En general las CRS representan una experiencia que de manera limitada y parcial logró cumplir con los beneficios propuestos relativos a la economía por aglomeración, la mejora de calidad de vida y la formación de comunidades, además de qué manera similar al caso chino, supone que sustituyendo con una vida residencial orientada a modelos urbanos puede superarse el “atraso rural”; no obstante su declaración como sustentables, no terminó por definir de manera coherente la manera en que alcanzaría dicha aspiración, por lo que sus resultados fueron débiles y de beneficio limitado, además de que llevó a entornos rurales problemas tales como la especulación inmobiliaria asociada a la vivienda, por lo que no podría ser considerada como una experiencia exitosa, pero sí una fuente de información y de prácticas que deberían mejorarse y, en todo caso, reconceptualizarse.

Una experiencia significativa de nuevos asentamientos rurales está representada por la experiencia de BuraNest en el Lago Tana, en la región de Ahmara, Etiopía, en la que se parte de la premisa de que es necesario fortalecer la vida rural a partir del reconocimiento de la forma en que la comunidad desarrolla relaciones con los ecosistemas, la producción agropecuaria y recursos del territorio a través del manejo del paisaje. Es un proyecto piloto producto de la colaboración entre dos instituciones educativas: ETH Zúrich y la Universidad de Adís Abeba y la organización no gubernamental NesTown Group.

Como antecedente a una iniciativa como BuraNest, habría que considerar que Etiopía ha impulsado el desarrollo rural como un asunto de interés constitucional, y que además prevé la transformación urbana basada en la diversidad y autonomía de nodos urbanos individuales (Keeton, 2019), y que el proyecto de nueva ciudad rural fue declarado por el estado regional Ahmara, Etiopía, como el modelo de ciudad Ahmara (NesTown, 2020), distinguiéndose por los siguientes conceptos articuladores (NesTown, 2020): 1) educación, la cual se considera como esencial en la gestión y construcción social de la ciudad, además de que es el lugar donde conocimiento y habilidades se generan; 2) ecología, tomada desde la perspectiva de que la ciudad es usada y cultivada dentro de las reglas propias de los ciclos y sistemas naturales, por lo que el desarrollo de la ciudad se basa en los ciclos naturales y en la circularidad de sus sistemas, constituyéndose como uno de los principales pilares de la sustentabilidad ambiental; 3) facilidad de intercambios, la comunicación e intercambios son factores esenciales para el acceso directo a los mercados, el emprendedurismo y el valor agregado en la producción, siendo recursos indispensables para la generación de iniciativas de economía social solidaria orientadas al aprovechamiento agrícola y de manufactura; 4) gestión energética, debido a que sin energía no puede existir ninguna actividad individual o comunitaria, de producción o reproducción, por lo que implica la disponibilidad de recursos renovables locales y la concentración de la infraestructura urbana y de transporte.

Partiendo de que la realidad en Etiopía dicta que la vida en sus áreas rurales se orienta sobre todo a la práctica de la agricultura de subsistencia, BuraNest asigna un papel central a la agricultura urbana (Keeton, 2019), pero en un sentido en el que se convierte en una actividad que se vincula a una estrategia y acciones orientadas a la promoción de la educación para el contexto a través de la articulación espacial de jardines experimentales e individuales como elemento uno de los elementos centrales de la morfología urbana (Keeton, 2019). Aparejado al reconocimiento de la agricultura urbana como eje articulador, se da gran importancia a la infraestructura y los servicios urbanos como elementos esenciales de bienestar para sus pobladores (Keeton, 2019), además de que se vinculan el equipamiento, espacio público y vivienda a la gestión de agua y energía (Keeton, 2019). El financiamiento fue una co-inversión entre NESTown Group y el Buró de Desarrollo Urbano del Estado Regional Nacional de Ahmara, y la sostenibilidad del proyecto se finca en el desarrollo de cooperativas de producción agrícola y en la transformación de productos madereros a nivel local.

En ese sentido se determinan núcleos que organizan funcional y espacialmente al poblado, los cuales están relacionados con los conceptos articuladores de BuraNest (Keeton, 2019): el educativo, que integra un centro de entrenamiento de habilidades técnicas y de educación para adultos, que está conformado además de las edificaciones correspondientes, por un jardín modelo; el energético, que está constituido por dos talleres de carpintería que trabajan con recursos madereros que obtienen de una plantación administrada por los habitantes; el de intercambios o comercial, que pretende ser un mercado abierto delimitado espacialmente por árboles, y que incluya además una estación de transporte, un banco y locales comerciales, no obstante, aún no ha sido desarrollado; el ecológico, que ofrecerá servicios comunitarios de reciclaje, de salud, un jardín de niños y oficinas de administración pública, además de que aquí se encuentran las tierras comunales en las cuales se cultiva arroz, cereales y vegetales; los sistemas de captación de agua se integran en los

núcleos educativo, energético, ecológico y en las viviendas; adicionalmente es importante resaltar que en la edificación se utiliza un sistema constructivo que aplica de manera masiva la tierra y la madera, ambos recursos disponibles en la localidad.

Cabe aclarar que BuraNest es una iniciativa en este momento en pleno desarrollo, por lo que aún está en construcción, por lo que hasta 2019 sólo cinco edificios, un camino, un puente y un camino trazado habían sido implantados hasta ese momento (Keeton, 2019); no obstante, presenta una serie de barreras que limitan su desarrollo, que pueden ser atribuidas por un lado al contexto social y político en el que se desenvuelve, y por otro a las limitantes propias originadas en premisas articuladas desde un enfoque teórico anclado inicialmente en el metabolismo urbano⁷ de las ciudades y en la noción de la preeminencia del conocimiento científico y de las tradiciones disciplinares⁸ frente al conocimiento de las comunidades para solucionar problemas del hábitat. Las principales barreras a las que se enfrentan son (Keeton, 2019): 1) la existencia de un férreo control del suelo por parte del Estado, lo que limita por ejemplo el pleno dominio de las propiedades, las cuales son otorgadas en comodato; 2) control político y autonomía empañada por problemas étnicos; 3) una gestión complicada del proyecto y de los núcleos del pueblo, debido a que existe una estructura política que los retarda y obstruye innecesariamente; 4) un financiamiento inadecuado para la vivienda, dado que existe un acceso limitado a préstamos y subsidios para la población objetivo; 5) vivienda que no cumple con

7 Tomado desde la perspectiva de que “cada sistema urbano refleja sus propios rasgos que reflejan su contexto socioeconómico y cultural, incluyendo a sus infraestructuras, y que en conjunto determinan la interacción entre el sistema urbano con la naturaleza, particularmente en la manera en que intercambian materia y energía, estableciendo un metabolismo urbano específico” (Ferrão, 2013).

8 Aquí habría que recordar la idea que expone Corona Berkin (2019) en cuanto al abordaje de los problemas sociales hechos por los especialistas disciplinares y científicos, en el sentido de que el conocimiento de los especialistas no es el único ni el más pertinente, debido a que la igualdad discursiva respecto a las comunidades promueve la riqueza de nuevas soluciones y respuestas desde la multiplicidad de las razones expuestas.

las aspiraciones de los habitantes, producto de la existencia de un modelo único de vivienda y de la resistencia de los habitantes a utilizar materiales tales como madera y tierra, los cuales son percibidos como materiales anticuados para los diseños que les proponen los arquitectos responsables del proyecto.

BuraNest termina siendo una iniciativa de frontera frente al desarrollo de nuevas ciudades que internalicen a la vida rural como concepto principal en su planeación e implementación; no obstante, las limitaciones impuestas por su contexto socioeconómico, político y cultural, aunados a las propias que emergen de la visión del especialista y de caracterizar a la vida rural prioritariamente ordenada por las relaciones de intercambio de materia y energía entre asentamiento y naturaleza, nos hacen pensar que si bien se constituye una experiencia conceptualmente diferenciada frente a las CRS y al nuevo paisaje rural socialista, sigue compartiendo tres rasgos relevantes: 1) la noción de que lo rural y sus comunidades son susceptibles de ser intervenidas desde una perspectiva basada en el conocimiento científico y la tradición disciplinar, ignorando o bien minimizando los saberes locales; 2) que el desarrollo de nuevas ciudades rurales constituye un instrumento del Estado para consolidar su capacidad de gobernar y de transformar el territorio, lo cual no necesariamente implica que los saberes, tradición, cultura y forma de vida de las comunidades sean centrales en su concepción; 3) que la vida rural parcialmente o por completo no se enriquece por el derecho a la ciudad y a la vivienda.

Por la complejidad para comparar tres experiencias diferentes en medios, resultados, localización geográfica y antecedentes culturales, se utilizó una estrategia metodológica que parte de la codificación interpretativa de contenidos (Bevir y Blakely, 2018) de las diferentes fuentes consultadas, que se organizan en etapas sucesivas en las que se triangulan conceptos clave, codificación libre, y la agrupación de códigos por temáticas que son comunes, de modo que se logra configurar nuevos subcampos. De esta manera se proponen como resultado de este análisis

los siguientes subcampos, que se permiten articular la comparativa propuesta que aparece en la tabla 1: componentes legislativos, reglamentarios, y regulatorios; características de la vida rural; coordinación y gestión del territorio, la ciudad y la vivienda; financiamiento. Adicionalmente se realizó una revisión transversal de las relaciones interpretadas que podrían establecerse entre los casos ejemplares y los derechos a la ciudad y a la vivienda en la tabla 2.

Tabla 1. Comparativa de experiencias internacionales y principales características

<i>Principales características</i>	<i>Nuevo paisaje rural socialista</i>	<i>Ciudades rurales sustentables</i>	<i>BuraNest</i>
Legislativos y/o reglamentarios y/o regulatorios	Gobierno Central República Popular de China.	Gobierno del Estado de Chiapas	Cogestión entre NESTown Group y el Buró de Desarrollo Urbano del Estado Regional Nacional de Ahmara, con apoyo técnico de la Universidad de Adís Abeba y ETH Zúrich en la comunidad rural piloto BURANest en Etiopía.
	Estimular la demanda doméstica mediante la modernización y mejoramiento de las condiciones materiales en entornos rurales, establecida en una política nacional.	Mejorar mediante el desarrollo regional la relación dispersión-marginación desde la mejora de servicios, la generación de oportunidades de desarrollo económico y social, la participación ciudadana y la colaboración de la sociedad civil organizada, establecida en la Ley de Ciudades Rurales Sustentables para el Estado de Chiapas	Fortalecer la vida rural a partir del reconocimiento de la forma en que la comunidad desarrolla relaciones con los ecosistemas, la producción agropecuaria y recursos del territorio, mediante la transformación urbana basada en la diversidad y autonomía de nodos urbanos individuales, establecida en la Constitución de Etiopía.

<i>Principales características</i>	<i>Nuevo paisaje rural socialista</i>	<i>Ciudades rurales sustentables</i>	<i>BuraNest</i>
Coordinación y gestión del territorio, la ciudad y la vivienda	Desarrollo de vivienda vertical nueva preferentemente o vivienda nueva unifamiliar de características “urbanas”, vía subsidios y financiamiento público.	Vivienda unifamiliar nueva de baja calidad constructiva, entregada directamente a población beneficiaria.	Modelo único de vivienda que utiliza sistemas constructivos basados en materiales tales como tierra y madera, uso de sistemas de captación de agua de lluvia, con financiamiento limitado.
	Villas nuevas con morfología, tipología edilicia, infraestructura, equipamiento y servicios de carácter urbano, con una relación que fomenta la productividad y competitividad del territorio.	Ciudades nuevas, con morfologías y tipologías edilicias heterogéneas asociadas por un lado a equipamiento y servicios urbanos, y por otro a proyectos productivos con escasa sostenibilidad económica.	Articulación morfológica a partir de cuatro ejes funcionales-espaciales: educación, gestión energética, comercio e intercambio y relación con ecosistemas.
Vida rural	Transformación hacia vida urbana por relocalización, modernización y tecnificación del entorno rural.	Desarraigo de vida rural por relocalización y transición hacia vida urbana en convivencia con actividades agrícolas.	Fortalecimiento de vida rural, enriqueciendo sus capacidades productivas y de gestión territorial.
Financiamiento	Público con inversión directa del gobierno central al gobierno de las villas.	Principalmente público de carácter federal y estatal.	Cofinanciamiento entre NESTown Group y el Buró de Desarrollo Urbano del Estado Regional Nacional de Ahmara.

<p>Beneficios</p>	<p>Mejoramiento de la capacidad del Estado para gobernar y de transformar el territorio.</p> <p>Mejoramiento de productividad y competitividad territorial.</p> <p>Modernización productiva y tecnificación del medio rural.</p> <p>Mejoramiento de las condiciones de bienestar material de la población.</p> <p>Acceso a servicios, equipamiento e infraestructura para la población rural.</p>	<p>Mejoramiento de la capacidad del Estado para gobernar y de transformar el territorio.</p> <p>Mejoramiento de las condiciones de bienestar material de la población.</p> <p>Acceso a servicios, equipamiento e infraestructura para la población rural.</p>	
<p>Impactos negativos</p>	<p>Vivienda deshabitada.</p> <p>Especulación del suelo.</p> <p>Clientelismo político. Desconocimiento de la configuración socioespacial, cultural y ambiental asociada a las villas o caseríos en términos de las formas de utilización y ocupación del suelo prevalecientes, rasgos regionales de las tipologías edilicias y morfología urbana, y la desvinculación con el entorno ambiental del asentamiento; la desconexión con el contexto mediante el cambio de las actividades productivas, modo de vida y comunicaciones.</p>	<p>Dependencia total del financiamiento público.</p> <p>Vivienda de baja calidad constructiva.</p> <p>Oposición de los pobladores al manejo presupuestal y a las acciones públicas.</p> <p>Desconocimiento de las necesidades de las comunidades en términos productivos.</p> <p>Funcionamiento parcial de equipamiento y servicios urbanos.</p>	<p>Existencia de un férreo control del suelo por parte del Estado.</p> <p>Problemas étnicos.</p> <p>Estructura política que obstaculiza y retarda desarrollo de ciudad.</p> <p>Financiamiento inadecuado e insuficiente para la vivienda.</p> <p>Vivienda que no satisface aspiraciones de los habitantes.</p>

Tabla 2. Propuesta de posible relación entre derechos a la vivienda y a la ciudad en los casos ejemplares expuestos

<i>Derecho</i>	<i>Componentes</i>	<i>Nuevo paisaje rural socialista</i>	<i>Ciudades rurales sustentables</i>	<i>BuraNest</i>
Vivienda	Certeza en la tenencia jurídica de la vivienda.	Dominio pleno.	Dominio pleno.	Comodato.
	Servicios e infraestructura.	Disponible.	Parcialmente disponibles.	Parcialmente disponibles.
	Coste asequible.	Disponible.	Disponible.	No disponible.
	Condiciones adecuadas de habitabilidad.	Propias de la vivienda vertical masiva.	Propias de la vivienda unifamiliar de baja calidad constructiva.	Propias de la vivienda unifamiliar construida con sistemas constructivos tradicionales y ecotecnologías.
	Accesibilidad.	Dirigida a población rural dispersa y en condiciones de pobreza material.	Dirigida a población rural dispersa y en condiciones de pobreza material, pero restringida sólo a grupos relacionados con una comunidad o expresión política particular.	Dirigida a familias con liquidez financiera que pueden construir sin subsidio o financiamiento público.
	Ubicación adecuada.	Disponibles servicios, equipamiento e infraestructura urbana nueva.	Parcialmente disponible por falta de financiamiento público para operación de equipamiento y servicios urbanos.	Parcialmente disponible por el lento desarrollo del proyecto de ciudad.
	Adecuación cultural.	No disponible debido a que se replantean morfología urbana y tipología edilicia, respecto a la vinculada con la región.	No disponible, con morfología urbana y tipología edilicia que no responde a los presentes en la región.	Disponible parcialmente, debido a que los sistemas constructivos tradicionales no son aceptados por los habitantes.

<i>Derecho</i>	<i>Componentes</i>	<i>Nuevo paisaje rural socialista</i>	<i>Ciudades rurales sustentables</i>	<i>BuraNest</i>
Ciudad	Libre de discriminación.	No disponible debido a que se excluye a quienes conservan vida rural.	No disponible debido a que se excluye a quienes no pertenecen a la comunidad o expresión política común.	No disponible debido a que se excluyen del beneficio de acceso a la vivienda a quienes no pueden financiar su construcción, además de presencia de problemas étnicos.
	Igualdad de género.	Sin información.	Sin información.	Disponible, dado que mujeres se constituyen como las principales promotoras de desarrollo del proyecto y de la comunidad.
	Ciudadanía inclusiva.	Dirigida a población rural dispersa y en condiciones de pobreza material.	Dirigida a población rural dispersa y en condiciones de pobreza material, pero restringida sólo a grupos relacionados con una comunidad o expresión política particular.	Dirigida a familias con liquidez financiera que pueden construir sin subsidio o financiamiento público, además de presencia de problemas étnicos.
	Mayor participación política, con responsabilidades en todos los ámbitos de gobierno y ciudadanos.	Centrada en reforzar el papel del gobierno central en la gestión y ordenamiento del territorio.	Sin información.	Estructura política que obstruye y retarda el desarrollo de la ciudad.
	Cumplimiento de sus funciones sociales, prioritariamente al interés público y social definido colectivamente.	Reforzamiento de papel del gobierno central en la determinación de la agenda pública en materia social orientada a la disminución de conflictos y mejora de condiciones productivas y de bienestar materiales.	Sin información.	Estructura política obstructiva y presencia de problemas étnicos.

<i>Derecho</i>	<i>Componentes</i>	<i>Nuevo paisaje rural socialista</i>	<i>Ciudades rurales sustentables</i>	<i>BuraNest</i>
Ciudad	Espacios y servicios públicos de calidad que contribuyan a construir ciudades seguras y a satisfacer las necesidades de sus habitantes.	Disponibles.	Parcialmente disponibles por falta de inversión pública para su operación y mantenimiento.	Parcialmente disponible por el lento desarrollo del proyecto de ciudad.
	Economías diversas e inclusivas.	No disponibles, debido a que están orientadas al monocultivo tecnificado y actividades de ecoturismo.	No disponible, altamente dependiente de financiamiento público debido a los resultados ineficaces de los proyectos productivos asociados.	Disponible parcialmente, debido a la lenta implantación de estrategias de soberanía alimentaria y de economía circular en las actividades agrícolas.
	Vínculos urbano-rurales inclusivos, que aseguren la soberanía alimentaria, protejan la biodiversidad, los hábitats naturales y los ecosistemas de su entorno.	No disponible debido a la modernización y tecnificación agrícola, aunada a un estilo de vida urbano.	No disponibles, debido al desarraigo de la vida rural por relocalización y transición hacia vida urbana en convivencia con actividades agrícolas.	Fortalecimiento de vida rural, enriqueciendo sus capacidades productivas y de gestión territorial.

Reflexiones finales, aproximando un esquema conceptual de ciudades y vivienda centrado en la vida rural

Una de las principales lecciones que nos brindan las experiencias descritas respecto a su relación con los derechos a la vivienda y a la ciudad, es que ninguna de ellas cumple a cabalidad con su satisfacción, incluyendo aquella que fortalece la vida rural, además de que no es claro cómo la gestión y toma de decisiones coloca en el centro a las comunidades en

un proceso de co-creación de la ciudad y de la vivienda junto con los actores públicos, no gubernamentales y privados.

A partir de aquí pueden sugerirse algunas otras lecciones a considerar en un proceso de desarrollo de ciudades y vivienda centrados en la vida rural que tome en cuenta los derechos a la ciudad y a la vivienda:

1. El financiamiento público representa un importante componente en el corto, mediano y largo plazos, su previsión sólo en el corto plazo o su uso parcial puede convertirse en una de las principales barreras para el desarrollo de la ciudad y de la vivienda.
2. Es deseable contemplar desde el inicio el desarrollo de estructuras organizacionales, disposiciones legales para la toma de decisión, gestión y financiamiento, así como instrumentos de planeación y ordenamiento sostenibles en el largo plazo que permitan y promuevan procesos de co-creación y co-gestión del territorio, de la ciudad y de la vivienda, que involucren a las comunidades de manera justa y horizontal con los sectores público, privado, académico y no-gubernamental.
3. En el caso en el que la academia participa de manera activa con enfoque de incidencia, es deseable que lo haga desde una perspectiva de producción horizontal de conocimiento, donde prevalezca el diálogo de saberes y la posibilidad de aprovechar la diversidad de experiencias y saberes a la par del conocimiento científico y tecnológico.
4. La articulación de los derechos a la ciudad y a la vivienda como esquemas base de discusión abierta y negociación que guíen la toma de decisiones acerca de la dirección que tomará la planeación, ordenamiento y desarrollo de las ciudades y la vivienda.
5. La vida rural no siempre es el centro que articula el desarrollo de la ciudad y la vivienda, y por tanto eso no se traduce en una gestión del territorio y del hábitat que incorpore los saberes y tradiciones producto de la vida rural.

A lo expuesto en la tabla 1 podríamos agregar también el subcampo de humanidades, ciencia y tecnología, de manera tal que una propuesta sistemática de coordinación y gestión territorial, de la ciudad y la vivienda comunitaria basada en la vida rural, tendría que articular cuando menos cinco subsistemas relacionados con los subcampos propuestos, y éstos deberían vincularse con los principios básicos de gestión del territorio para el acceso justo al hábitat,⁹ y a partir de ahí sugerir la orientación de las acciones de incidencia en el territorio, la ciudad y la vivienda basada en la vida rural.

Un esquema conceptual que más allá de ser una prescripción, tendría la intención de ser una guía inicial de acciones de incidencia que detone la discusión y la negociación hacia el desarrollo de soluciones particulares y locales, la propuesta se hace en el esquema 2, en el cual se parte de la noción de que las acciones de incidencia surgen de la interacción de los principios básicos de gestión del territorio para el acceso justo al hábitat (CELS, 2017) con los componentes de lo que proponemos como un sistema de coordinación y gestión territorial de la ciudad y la vivienda comunitario basado en la vida rural. La idea de los subsistemas retoma los ejes estratégicos que fueron inferidos a partir del análisis de las experiencias contemporáneas de vivienda y ciudades rurales, así como de la revisión de los alcances actuales de la vida rural y desarrollo.

La intención principal del esquema conceptual propuesto es identificar los rasgos generales de supondría intervenir no con una sola acción, sino con un conjunto de acciones de incidencia desde una perspectiva de complejidad y sistemática la producción de la ciudad y la vivienda con una orientación hacia el acceso justo al hábitat, lo cual implica una lectura lineal y no lineal de manera que su interpretación sea flexible y compleja, y que se expone extensamente en la tabla 3.

9 Entendido como el resultado de la aplicación de los principios básicos de gestión del territorio constituidos por (CELS, 2017): los derechos a la ciudad y a la vivienda; la solución de déficits que abarcan las condiciones básicas de infraestructura, servicios, equipamientos, y movilidad; la función social de la propiedad inmueble y del suelo; la gestión democrática de la ciudad; y el reparto equitativo de cargas y beneficios.

Esquema 2. Propuesta de interacción conceptual entre la coordinación y gestión territorial de la ciudad y la vivienda, sistema comunitario basado en la vida rural respecto al acceso justo al hábitat

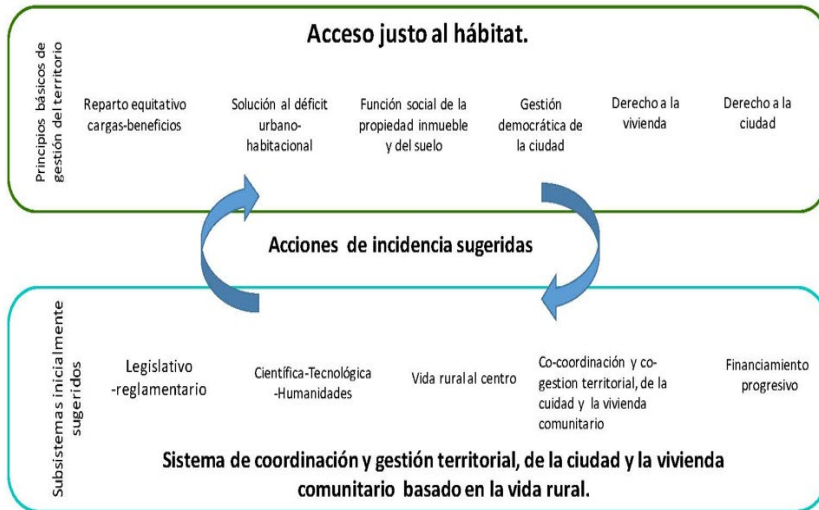


Tabla 3. Sistema de coordinación y gestión territorial, de la ciudad y la vivienda, comunitario basado en la vida rural

<i>Principios básicos de gestión del territorio para el acceso justo al hábitat.</i>	<i>Legislativo, reglamentario y regulatorio</i>	<i>Humanidades, ciencia y tecnología</i>	<i>Vida rural</i>	<i>Co-coordinación y co-gestión comunitaria del territorio, la ciudad y la vivienda</i>	<i>Financiamiento</i>
<p>Reparto equitativo cargas-beneficios en el hábitat</p>	<p>Reforma legislativa para articulación regional de derechos de transferencia para comunidades rurales.</p> <p>Reforma legislativa para captura de plusvalías en polos de desarrollo inmobiliario y/o turístico destinadas a comunidades rurales.</p>	<p>Sistema de innovación de la vivienda adecuada y ciudades, centrado en la vida rural.</p>	<p>Programa regional de creación de cooperativas de vivienda y/o de producción y/o de prestación de servicios para el hábitat, orientadas a vivienda adecuada y ciudades centradas en la vida rural.</p>	<p>Desarrollo de instrumentos de coordinación financiera y operativa simplificados entre federación y comunidad-habitantes.</p> <p>Desarrollo de política regional de suelo para ciudades centradas en la vida rural.</p> <p>Desarrollo del sistema regional de información de suelo para ciudades centradas en la vida rural.</p>	<p>Programa y Fondo Regional de derechos de transferencia para comunidades rurales y/o periurbanas en situación de pobreza o con alta presencia de grupos vulnerables.</p> <p>Programa Regional de captura de plusvalías en polos de desarrollo inmobiliario y/o turístico destinados a comunidades rurales y/o periurbanas en situación de pobreza o con alta presencia de grupos vulnerables.</p>

<i>Principios básicos de gestión del territorio para el acceso justo al hábitat.</i>	<i>Legislativos, reglamentario y regulatorio</i>	<i>Humanidades, ciencia y tecnología</i>	<i>Vida rural</i>	<i>Co-coordinación y co-gestión comunitaria del territorio, la ciudad y la vivienda</i>	<i>Financiamiento</i>
Solución al déficit urbano-habitacional	Reforma legislativa federal, estatal y municipal para desarrollo regional de infraestructura verde, incluyendo comunidades rurales. Articulación de reglas de operación a nivel regional para lotes con servicios, PSVA y mejoramiento urbano.	Sistema de información, monitoreo y seguimiento de la vivienda adecuada, infraestructura verde y ciudades centradas en la vida rural como componente del Sistema de Información Territorial Urbano (PNV 2019-2024).	Programas comunitarios de infraestructura verde, vivienda adecuada y hábitat rural.	Mesas de gestión comunitaria por cada proyecto de intervención y/o incidencia. Desarrollo de inmobiliarias sociales y/o ejidales para incorporación de suelo urbano y rural.	Programa y Fondo Regional de desarrollo de infraestructura verde para comunidades rurales y/o periurbanas en situación de pobreza. Vinculación programática y consolidación de fondos regional de lotes con servicios, PSVA y mejoramiento urbano, para comunidades rurales y/o periurbanas en situación de pobreza o con alta presencia de grupos vulnerables. Programa de inversión comunitaria para infraestructura verde, vivienda adecuada y hábitat rural.

Aproximando un esquema conceptual para el desarrollo de nuevas ciudades y vivienda centrado en la vida rural para el acceso justo al hábitat

<i>Principios básicos de gestión del territorio para el acceso justo al hábitat.</i>	<i>Legislativo, reglamentario y regulatorio</i>	<i>Humanidades, ciencia y tecnología</i>	<i>Vida rural</i>	<i>Co-coordinación y co-gestión comunitaria del territorio, la ciudad y la vivienda</i>	<i>Financiamiento</i>
<p>Función social de la propiedad inmueble y del suelo</p>	<p>Lineamientos técnicos para la planeación y evaluación regionales, estatales y municipales de la calidad de vida, uso sostenible del territorio y justicia social en vivienda y ciudades centradas en la vida rural.</p>	<p>Criterios e indicadores de calidad de vida, uso sostenible del territorio y justicia social en vivienda y ciudades centradas en la vida rural, a nivel regional, estatal y municipal.</p>	<p>Sistema de planeación y evaluación comunitaria de calidad de vida, uso sostenible del territorio y justicia social en vivienda y ciudades centradas en la vida rural.</p>	<p>Desarrollo de mecanismos comunitarios de gestión y reajuste de usos, parcelamiento y edificación con enfoque socioambiental y de progresividad. Programa regional de tenencia segura para vivienda y ciudades centradas en la vida rural.</p>	<p>Fondo regional de financiamiento para desarrollo de suelo servido con vocación social en ciudades centradas en la vida rural</p>

<i>Principios básicos de gestión del territorio para el acceso justo al hábitat.</i>	<i>Legislativos, reglamentario y regulatorio</i>	<i>Humanidades, ciencia y tecnología</i>	<i>Vida rural</i>	<i>Co-coordinación y co-gestión comunitaria del territorio, la ciudad y la vivienda</i>	<i>Financiamiento</i>
<p>Gestión democrática de la ciudad</p>	<p>Reforma legislativa en marco legal aplicable a asentamientos humanos, ordenamiento territorial y vivienda para el fortalecimiento de mecanismos de coordinación y toma de decisiones local en comunidades orientadas a la vida rural a nivel federal, estatal y municipal</p>	<p>Sistema de innovación de la vivienda adecuada y ciudades, centrado en la vida rural.</p>	<p>Programa regional de creación de cooperativas de vivienda y/o de producción de servicios para el hábitat, orientadas a viviendas adecuadas y ciudades centradas en la vida rural.</p>	<p>Desarrollo de política regional de suelo para ciudades centradas en la vida rural.</p> <p>Desarrollo del sistema regional de información de suelo para ciudades centradas en la vida rural.</p>	<p>Programa y Fondo Regional de derechos de transferencia para comunidades rurales y/o periferias en situación de pobreza o con alta presencia de grupos vulnerables.</p> <p>Programa Regional de captura de plusvalías en polos de desarrollo inmobiliario y/o turístico destinados a comunidades rurales y/o periferias en situación de pobreza o con alta presencia de grupos vulnerables.</p>

Aproximando un esquema conceptual para el desarrollo de nuevas ciudades y vivienda centrado en la vida rural para el acceso justo al hábitat

<i>Principios básicos de gestión del territorio para el acceso justo al hábitat.</i>	<i>Legislativo, reglamentario y regulatorio</i>	<i>Humanidades, ciencia y tecnología</i>	<i>Vida rural</i>	<i>Co-coordinación y co-gestión comunitaria del territorio, la ciudad y la vivienda</i>	<i>Financiamiento</i>
<p>Derecho a la vivienda.</p>	<p>Normas técnicas complementarias de producción social de vivienda asistida (PSVA) y calidad de vivienda adecuada (alcance territorial, urbano, arquitectónico).</p>	<p>Programa regional de investigación-incidencia para vivienda adecuada y ciudades centradas en la vida regional.</p> <p>Desarrollo de propuesta de ordenamiento urbano-territorial desde la perspectiva biocultural.</p> <p>Desarrollo de propuesta de cadena de valor a partir de saberes tradicionales constructivos y de gestión del paisaje.</p>	<p>Criterios e indicadores comunitarios de planeación y evaluación de vivienda adecuada y ciudades centradas en la vida rural.</p> <p>Programa de movilidad sostenible en ciudades centradas en la vida rural.</p>	<p>Sistema regional de denuncia ciudadana de vivienda y el hábitat.</p> <p>Defensoría regional de la vivienda y el hábitat.</p>	<p>Fondo regional de financiamiento de vivienda para grupos vulnerables en ciudades centradas en la vida rural.</p> <p>Fondo de financiamiento para el mejoramiento técnico y escalamiento de saberes tradicionales constructivos y de gestión del paisaje.</p> <p>Fondo de financiamiento de movilidad sostenible en ciudades centradas en la vida rural.</p> <p>Esquema de financiamiento de derechos de transferencia por servicios ecosistémicos y biodiversidad de la vivienda adecuada y ciudades centradas en la vida rural.</p>
<p>Derecho a la ciudad</p>	<p>Reforma legislativa para reconocimiento y operación de instrumentos de ordenamiento y planeación de ciudad y vivienda rurales comunitarios a nivel federal, estatal y municipal.</p> <p>Reforma legislativa de mejora de disciplina urbana para la ciudad y vivienda rurales comunitarios a nivel federal, estatal y municipal.</p>	<p>Desarrollo de esquema de medición y monitoreos de servicios ecosistémicos y biodiversidad de la vivienda adecuada y ciudades centradas en la vida rural.</p> <p>Desarrollo de proyectos de investigación-incidencia en el marco de Pronace dirigido a comunidades pilotos de vivienda adecuada y ciudades centradas en la vida rural.</p>			

Una última reflexión podría dividirse en dos partes. La primera es que aun cuando puede ser muy controvertida la expresión en el hábitat que puede tener la relación desarrollo y vida rural, ésta no es ajena a la tendencia globalizadora, privatizadora y modernizadora que se vive en nuestros tiempos, el esfuerzo constante por la gestión territorial como cosa de interés público, lo que aunado a condiciones de bienestar material de pobreza y precariedad que se viven cotidianamente en las comunidades rurales, hacen que aun con los efectos negativos sobre la vida rural y cultura local, el cambio de las condiciones materiales, la presencia de la administración pública y la incorporación de nuevas actividades económicas representen en algunos casos mejoras diferenciadas en el bienestar material y eventualmente en la calidad de vida de las comunidades; por ejemplo, tener comunidades cuyas viviendas están en condiciones ruinosas debido a que el conocimiento de los sistemas constructivos tradicionales se ha perdido, por lo que la aspiración natural es vivienda de materiales tales como block y concreto, lo que nos lleva a pensar que no es deseable tampoco generalizaciones que idealicen las condiciones existentes de la vida rural y de sus expresiones en el hábitat a cualquier costo, incluyendo aquellas que implican la preservación de condiciones de pobreza y precariedad; en ese sentido, el mayor reto tanto para el diseño como para implantación de políticas públicas con el apoyo del sector de humanidades, ciencia y tecnología, es el desarrollo de alternativas robustas que precisamente sin soslayar las expresiones controversiales y sus beneficios diferenciados como parte de la complejidad misma que compone la gestión del territorio y el hábitat, que puedan proponerse a las comunidades rurales para la preservación de la vida rural a fin de que estén en posibilidades reales de co-coordinar, co-crear y co-gestionar su comunidad y territorio para asegurar su acceso justo al hábitat.

La segunda reflexión es que la relación entre vida rural, desarrollo y hábitat, expresada en la ciudad y la vivienda representa una enorme complejidad para su articulación, además de que siempre estarán latentes riesgos de desviación dentro de una iniciativa de esta naturaleza, debidas probablemente en parte a la orientación modernizadora y basada en un

enfoque mercantilista y de control político, otras por la ineffectividad, ineficacia e ineficiencia de la gestión del proyecto, y otras por omisiones, por el énfasis tanto en la noción de “transferencia vertical” de conocimiento y en lo que eso se traduce en la gestión del territorio, por lo que quizá una primera aproximación conceptual de ciudad y vivienda centrada en la vida rural tendría que centrarse en la co-coordinación y co-gestión del territorio y del hábitat con la comunidad, en un profundo cambio en el ámbito legislativo, reglamentario y regulatorio en los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal), en instrumentos de financiamiento adecuados, a la participación activa de la comunidad de humanidades, ciencia y tecnología, además de un énfasis en dar claridad a que el fin último es centrar la producción del hábitat alrededor de la vida rural.

De las reflexiones anteriormente expuestas se desprenden una serie de oportunidades y posibles aportaciones de conocimiento que el presente trabajo puede hacer. Una primera aportación es la guía de acción propuesta; no obstante, otra es la identificación de la imposición de una visión externa sobre la comunidad, la dependencia financiera y la incapacidad para generar un desarrollo endógeno y culturalmente pertinente como elementos presentes en las experiencias analizadas de China, México y Etiopía, y a partir de la inferencia de que se hace necesario proponer alternativas robustas que permitan a las comunidades rurales co-coordinar, co-crear y co-gestionar su comunidad y territorio para asegurar su acceso justo al hábitat; de ahí se deducen en principio las siguientes proposiciones de manera contingente:

1. La vida rural se estructura en la relación entre los ecosistemas naturales, las formas de producción y el modo de vida campesino, enfocando con esto uno de los objetivos de la política de desarrollo territorial, que no sería sólo aspirar a que el Estado asegure la provisión de una vivienda adecuada en entornos rurales, sino que el fortalecimiento de toda la estructura de relaciones que hacen posible la vida rural debería ser sustantivo en una intervención territorial, tal como la que se plantea en el documento.

2. Los saberes locales constituyen un sistema de conocimiento (episteme) válido, completo y con derecho a gobernar su propio territorio, es decir las formas de organización, la tradición constructiva y la gestión del paisaje se convierten en el fundamento de la planificación, liderando la propia comunidad su proceso, y donde el rol del académico y del técnico es de facilitación y traducción.
3. Es posible conceptualizar las intervenciones en el territorio por parte del Estado ya no como proyectos con un inicio y con un final concreto, sino como espacios de experimentación dinámicos que propicien el aprendizaje continuo y la generación horizontal de conocimiento, dando lugar y oportunidad para la experimentación, el monitoreo y ajuste constante; donde las métricas de evaluación de resultados atienden a los fines de las comunidades en términos de democracia, preservación ambiental y cultural, así como al bien común y el acceso justo al hábitat. Los hallazgos sugieren estrategias que permitan dinámicamente el desarrollo de ajustes de expectativas y resultados esperados entre las comunidades y los actores públicos, en un ciclo permanente de acción-reflexión-acción.

Partiendo de las proposiciones inicialmente deducidas, se proyectan algunas áreas de oportunidad para desarrollar futuros trabajos que pueden irse madurando:

- El desarrollo de un marco metodológico para las intervenciones públicas que busquen preservar y fortalecer la vida rural a través de la vivienda adecuada en el territorio, lo cual implica también desarrollar nuevos indicadores que midan la resiliencia de dichas intervenciones, proponiendo la inclusión de los saberes y formas de organización comunitarios, su diversidad económica y los saberes en el manejo de los ecosistemas.
- La búsqueda de un modelo de planificación desde la soberanía epistémica de las comunidades, que supone la creación de métodos para que las comunidades articulen, sistematicen y defiendan

su conocimiento y prácticas en el territorio, generando con esto sus propios planes y normas que luego puedan dialogar horizontalmente con el marco legal estatal, esto implica a su vez una conceptualización y rediseño del marco jurídico y normativo de la planeación para el desarrollo territorial en nuestro país; no obstante, esto permite el anhelo democrático de hacer realidad el derecho a “gobernar y transformar” sus propios territorios y comunidades.

- Una última área de oportunidad la constituye un enfoque metodológico adaptativo y evolutivo para el diseño e implantación de políticas públicas, transformando al Estado en un socio de aprendizaje en un proceso a largo plazo, aumentando drásticamente las posibilidades de sostenibilidad y apropiación comunitaria.

Referencias bibliográficas

- Ahlers, A. L., & Schubert, G. (2009). “Building a New Socialist Countryside” Only a Political Slogan? *Journal of Current Chinese Affairs*, 38(4), 35-62.
- Arévalo Peña, M. L. (2016.) La reubicación como proceso de desterritorialización. *Política y Cultura*, 45, 153-180.
- Bevir, M., y Blakely, J. (2018). *Interpretive Social Science: An Anti-Naturalist Approach*. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press.
- Brokland, T. (2017). *Community as Urban Practice*. Cambridge, Reino Unido: Polity Press.
- Cámara de Diputados. (2020). Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. *Diario Oficial de la Federación*. Consultada el 31 de agosto de 2020, disponible en <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgahotdu.htm>
- Centro de Estudios Legales y Sociales (CELS). (2017). *Ley de Acceso Justo al Hábitat: Guía para su aplicación*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Centro de Estudios Legales y Sociales.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2017). *Panorama del desarrollo territorial en América Latina y el Caribe*,

2017. *Agendas globales de desarrollo y planificación multinivel*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Corona Berkin, S. (2019). *Producción horizontal del conocimiento*. Alemania: Bielefeld University Press.
- Coulomb, R. (2014): Las políticas de vivienda en los estados latinoamericanos. En: Ramírez y Pradilla (comps.), *Teorías sobre la ciudad en América Latina* (pp. 451-494). México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Coulomb, R., y Schteingart, M. (Ed.). (2006). *Entre el Estado y el mercado. La vivienda en el México de hoy*. México: Porrúa.
- Cuervo, L. M. (2004). Desarrollo económico y primacía urbana en América Latina. Una visión histórico-comparativa. En: Torres, A. C. (Comp.), *El rostro urbano de América Latina*. (O rostro urbano da América).
- Ferrão, P., & Fernández, J. E. (2013). *Sustainable Urban Metabolism*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Galiana Saura, Á. (2018). La naturaleza jurídica del derecho subjetivo a la vivienda. En: Muñiz Espada, E., Nasarre Aznar, S., Rivas Nieto, E., & Urquizu Cavallé, Á. (Eds.), *Reformando las tenencias de la vivienda. Un hogar para tod@s*. (1ª edición, pp. 33-52). Valencia, España: Tirant lo Blanch.
- Giménez, G. (2011). Cultura, territorio y migraciones. Aproximaciones teóricas. *Alteridades*, 11(22), julio-diciembre, pp. 5-14.
- Habermas, J. (1986). *Ciencia y técnica como ideología*. Madrid: Tecnos.
- Hui, Y. (2024). *Machine and sovereignty: For a planetary thinking*. Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
- Jaramillo, S. (2008). Reflexiones sobre la “informalidad” fundiaria como peculiaridad de los mercados del suelo en las ciudades de América Latina. *Territorios*, 18.
- Jordán, R., Riffo Pérez, L., y Prado, A. (2017). *Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe: Dinámicas y desafíos para el cambio estructural*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Keeton, R. (2019). Case study: BuraNES^T, Ethiopia. En: Keeton, R. & Provoost, M. (Ed.), *To Build a City in Africa a History and a Manual* (pp. 363-387). Rotterdam, Holanda: Nai010 Publishers.

- Li, C. (2014). The Building of Regional Landscape in New Countryside Construction. *Applied Mechanics and Materials*, vols. 584-586, pp. 595-600.
- Looney, K. E. (2015). China's Campaign to Build a New Socialist Countryside: Village Modernization, Peasant Councils, and the Ganzhou Model of Rural Development. *The China Quarterly*, 224, 909-932.
- Mingüer Cestelos, B. C. (2016). Los límites de la sustentabilidad de las ciudades rurales sustentables: El caso de Chiapas. *Sociedad y Ambiente*, año 4, núm. 11, julio-octubre, pp. 122-147.
- Mitchell C., J. A. (2013). Creative destruction or creative enhancement? Understanding the transformation of rural spaces. *Journal of Rural Studies*, 32, 375-387.
- NexTown Group. (2020). *New Ethiopian Sustainable Town*. Sitio web, consultado el 31 de agosto de 2020, disponible en <http://www.nestown.org/>
- ONU Hábitat. (2019). *Temas urbanos: Viviendas y mejoramiento de asentamientos precarios*. Sitio web. Oficina Regional para América Latina y el Caribe: Río de Janeiro, RJ, Brasil. Consultado el 25 de marzo de 2019, disponible en <https://es.unhabitat.org/temas-urbanos/viviendas/>
- Plataforma Global para el Derecho a la Ciudad. (2019). *Agenda del derecho a la ciudad para la implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y la nueva agenda urbana*. Consultada el 31 de agosto de 2020, disponible en https://www.right2city.org/wp-content/uploads/2019/09/A6.1_Agenda-del-derecho-a-la-ciudad.pdf
- Rodríguez, J., y González, D. (2017). Dinámicas demográficas y migratorias, y patrones de urbanización: Continuidades, cambios, perspectivas y desafío. En: Jordán, R., Riffó Pérez, L., y Prado, A. (Coords.), *Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe: Dinámicas y desafíos para el cambio estructural* (pp. 75-115). Santiago de Chile: CEPAL.

- Ruiz López, C. F. (2016). El proyecto Ciudades Rurales Sustentables y el involucramiento de sus habitantes. *Nueva Antropología*, XXIX(85), julio-diciembre, pp. 102-125.
- Sun, Y. (2024). China ¿un país del sur global? *Anuario Internacional CIDOB 2025*. Barcelona: CIDOB Barcelona Centre for International Affairs.
- UN Office of the High Commissioner for Human Rights (OHCHR). (2009, noviembre). *Fact Sheet núm. 21, The Human Right to Adequate Housing. Rev. 1*. Consultado el 31 de agosto de 2020, disponible en <https://www.refworld.org/docid/479477400.html>
- Zhao, Q., y Zhang, Z. (2017). Does China's 'increasing versus decreasing balance' land-restructuring policy restructure rural life? Evidence from Dongfan Village, Shaanxi Province. *Land Use Policy*, 68, 649-659.

Diseño de fachadas contra el calentamiento global

Exploración de estrategias locales de adaptación y mitigación en el diseño de las envolventes a través de experiencias de tesis proyectuales

*Alejandro Prieto Hoces*¹

Resumen

Uno de los efectos más evidentes del calentamiento global es el incremento sostenido de las temperaturas ambientales; situación que es particularmente alarmante en ciudades, pues se generan islas de calor urbanas. Este aumento de temperaturas implica mayores exigencias para la climatización de nuestros edificios, lo que típicamente considera un mayor consumo energético en edificios que dependen totalmente del uso de sistemas de aire-acondicionado (AC) para su operación diaria. Sin embargo, estamos en presencia de un círculo vicioso, ya que los refrigerantes comúnmente utilizados en sistemas de AC tienen un alto

1 Delft University of Technology, Faculty of Architecture and the Built Environment, Department of Architectural Engineering and Technology; Architectural Facades & Products Research Group.

Universidad Diego Portales, Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño, Escuela de Arquitectura.

potencial de calentamiento global, por lo que incrementar su uso es contraproducente. Esta situación plantea la oportunidad de repensar el diseño de nuestros edificios, y particularmente de sus envolventes, de acuerdo con tres principios: a) aplicación de estrategias pasivas y diseño bioclimático para reducir demandas de refrigeración al mínimo; b) uso de energías renovables para suplir demandas que aún existan, y (c) integrar materiales, estrategias y principios de refrigeración alternativos, amigables con el medio ambiente, como sistemas complementarios en el diseño de componentes de fachada integrales. En este capítulo se explora el diseño de fachadas en escenarios de altas temperaturas, considerando especialmente nuevas tecnologías y procesos de refrigeración alternativos, y su potencial desempeño en climas cálidos, buscando reducir las temperaturas en el interior y al exterior de edificios. El capítulo inicia contextualizando el problema y enmarcando diferentes estrategias y tecnologías disponibles en distintos grados de desarrollo; para luego discutir nuevas posibilidades para el diseño de fachadas a partir de una serie de experiencias de tesis en el tema, llevadas a cabo por alumnas y alumnos del Máster de Building Technologies de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Tecnológica de Delft.

Introducción

El calentamiento global es posiblemente el mayor desafío de nuestra era. Existe amplia evidencia de las consecuencias medioambientales asociadas al aumento sostenido de la temperatura de la tierra desde tiempos preindustriales; ya sea considerando problemas directos como el incremento del nivel del mar (sobre 200 mm desde 1880), mayores temperaturas ambientales y olas de calor, el derretimiento de capas polares, y desaparición de especies animales por cambios en sus ecosistemas; y serias consecuencias indirectas tales como escasez de alimentos y una mayor propagación de enfermedades propias de climas tropicales a zonas templadas (USGCRP, 2017).

Uno de los efectos más evidentes del calentamiento global en el entorno construido es el incremento sostenido de las temperaturas ambientales; situación que es particularmente alarmante en grandes ciudades, donde se genera lo que se conoce como islas de calor urbanas, esto es, áreas específicas que registran temperaturas mayores que las de sus alrededores, debido entre otras razones al uso masivo de materiales con alta capacidad de absorción de calor, la alta concentración de personas, presencia de contaminación, y falta de vegetación. El aumento de las temperaturas ambientales ha llegado a límites nunca vistos, actualmente superando la temperatura global registrada en años preindustriales (1880) en sobre un grado Celsius. Esto ha llevado a que esta última década sea la más calurosa en la historia, con 2024 como el año más caluroso alguna vez registrado (Copernicus, 2025). La mayor frecuencia de olas de calor en los meses de verano ha tenido un impacto en la salud de las personas, llegando incluso a considerar víctimas fatales en casos extremos.

Este aumento de temperaturas implica mayores exigencias para la climatización de nuestros edificios, que típicamente ha redundado en un mayor consumo energético en edificios que dependen totalmente del uso de sistemas de aire-acondicionado para su operación diaria. Así, el consumo energético global por refrigeración se ha triplicado en comparación con 1990, y se prevé que esta tendencia seguirá al alza, a partir de proyecciones realizadas hasta el año 2050, con un drástico aumento en países con economías emergentes situados en climas cálidos (OCDE/IEA, 2018). A modo de ejemplo, se espera que las ventas anuales de unidades de aire acondicionado residencial crezcan entre 10 y 15%, pasando de 100 millones en todo el mundo en 2014, a más de 1,600 millones en 2050. Estas proyecciones exigen que se tomen medidas drásticas para minimizar el impacto de la refrigeración en edificios en el consumo energético mundial.

Las iniciativas concebidas para afrontar esta situación se centran en el potencial de ahorro energético de las edificaciones, promoviendo buenas prácticas de diseño y operación (ASHRAE, 2011; CIBSE, 2012), además de fiscalizar el cumplimiento de normativas para reducir la demanda

energética operativa en los edificios (European Commission, 2010). En este sentido, existe un amplio consenso en la aplicación de estrategias de refrigeración pasiva como el primer paso para el diseño de edificios sostenibles, bajo un enfoque bioclimático (Herzog, Krippner & Lang, 2004; Lechner, 2014). Esto es particularmente relevante en el caso de edificios terciarios (oficinas y comercio), debido a la importancia relativa de los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) en su consumo total de energía. Por lo tanto, su diseño debe propiciar una adecuada adaptación al microclima local, considerando su orientación, tamaño y posición de ventanas, el uso de protecciones solares, el control de fuentes de calor internas, y ventilación natural, entre otras estrategias pasivas, antes de incorporar instalaciones y sistemas activos (que requieren energía para funcionar). Sin embargo, en la mayoría de los casos estos sistemas seguirán siendo necesarios para cumplir con los requisitos de confort interiores; particularmente en contextos de clima cálido severo, como ambientes desérticos o tropicales.

Por lo tanto, un segundo paso para el diseño y operación de edificios es el uso de energías renovables para hacer frente a la demanda restante con el fin de cumplir con los requisitos de confort, buscando evitar el uso de combustibles fósiles para la operación de sistemas activos. Sin embargo, el uso de sistemas de aire acondicionado presenta una complicación adicional: los refrigerantes comúnmente utilizados como base del proceso de enfriamiento tienen un alto impacto ambiental. Los hidrofluorocarbonos (HFC), como el comúnmente usado R134a, son sustancias que, si bien no dañan la capa de ozono, tienen un potencial de calentamiento global (GWP) 1,430 veces mayor que el del CO₂ (IPCC/TEAP, 2005). Recientemente se firmó una enmienda al Protocolo de Montreal, acordando eliminar gradualmente estas sustancias durante el periodo 2019-2036 y 2024-2047 en los países desarrollados y en desarrollo, respectivamente (ONU, 2016). Esto representa un hito importante, que busca amortizar el círculo vicioso asociado al uso de aire acondicionado en edificios, ya que para hacer frente a crecientes demandas de refrigeración, recurrimos al uso masivo de refrigerantes

que terminan agravando el problema debido a su potencial impacto en el calentamiento global y el consiguiente aumento de las temperaturas ambientales que esto conlleva, aumentando a su vez las demandas de refrigeración a las que debíamos responder en primer lugar.

Esta situación plantea la oportunidad de repensar el diseño de nuestros edificios, y particularmente de sus envolventes, de acuerdo con tres principios: a) la aplicación de estrategias pasivas y diseño bioclimático para reducir demandas de refrigeración al mínimo; b) el uso de energías renovables para suplir demandas que aún existan, y c) la integración de materiales, estrategias y principios de refrigeración alternativos, amigables con el medio ambiente, como sistemas complementarios en el diseño de componentes de fachada. De esta manera, el diseño de nuestros edificios debe considerar estrategias de adaptación a escenarios de altas temperaturas, que serán cada vez más recurrentes como consecuencia directa del calentamiento global, dejando de lado sistemas y materiales que empeoren la situación; o aún mejor, integrando estrategias que contribuyan activamente a mitigar sus causas. Así, estrategias de adaptación y mitigación deben ser integradas en el diseño de edificios, y particularmente sus envolventes, de modo de ofrecer una solución integral a las demandas de refrigeración crecientes en el entorno construido.

En este capítulo se exploran distintas innovaciones tecnológicas en el diseño de fachadas en escenarios de altas temperaturas, considerando especialmente la integración de sistemas basados en procesos de refrigeración alternativos y su potencial desempeño en climas cálidos. La discusión de nuevas posibilidades tecnológicas para el diseño de fachadas se realiza a partir de una serie de experiencias de tesis en el tema, llevadas a cabo por alumnas y alumnos del Máster de Tecnologías de la Construcción de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Tecnológica de Delft. En el marco de sus proyectos de tesis, se han explorado sistemáticamente tecnologías alternativas para la refrigeración de edificios, en su potencial para ser integradas en sistemas de envolvente, considerando un enfoque integral para el diseño de edificios que logre balancear un adecuado diseño bioclimático junto a la aplicación de tecnologías en etapas tempranas

de desarrollo. Este trabajo se enmarca en las actividades realizadas por el grupo de investigación de fachadas y productos arquitectónicos de la TU Delft, buscando darle visibilidad al desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras para el diseño de fachadas, que permiten acercar a nuestros futuros arquitectos al mundo de las instalaciones y sistemas para un diseño holístico, además de interiorizar a los alumnos y alumnas en las problemáticas sociales y medioambientales asociadas al diseño de soluciones en climas cálidos en toda su complejidad.

El capítulo se estructura en función de tres tecnologías distintas para dar respuesta a demandas de refrigeración en distintos climas, describiendo sus principios básicos y mostrando su potencial de aplicación a partir del trabajo desarrollado en diferentes tesis proyectuales entre 2018 y 2020. El concepto de tesis proyectual considera una investigación exhaustiva de ciertos fenómenos y tecnologías, para informar decisiones de proyecto que resulten en una propuesta de diseño para un concepto de fachada. Si bien estos conceptos se basan en evidencia empírica a partir de una aproximación sistemática al tema de estudio, es importante recalcar que no se presentan como una solución definitiva al problema expuesto. Claramente se requieren esfuerzos multi y transdisciplinarios para enfrentar en toda su complejidad el desafío que supone el calentamiento global en el entorno construido; esfuerzos que superan los alcances de los proyectos de tesis aquí expuestos, por lo que estas exploraciones proyectuales se entienden como experiencias que aportan en el manejo y aplicación de nuevas tecnologías en el diseño de fachadas, en etapas tempranas de desarrollo tecnológico.

Las estrategias y tecnologías exploradas por los alumnos, que se presentan a continuación, corresponden al uso de material desecante junto a refrigeración evaporativa indirecta para hacer frente a las demandas de refrigeración en climas tropicales; el uso de componentes termoeléctricos para el diseño de sistemas de refrigeración de estado sólido, evitando el uso de refrigerantes; y finalmente, a la exploración de principios de biorreceptividad en el diseño de revestimientos exteriores de fachadas, de manera de incrementar la presencia de vegetación en nuestras ciudades,

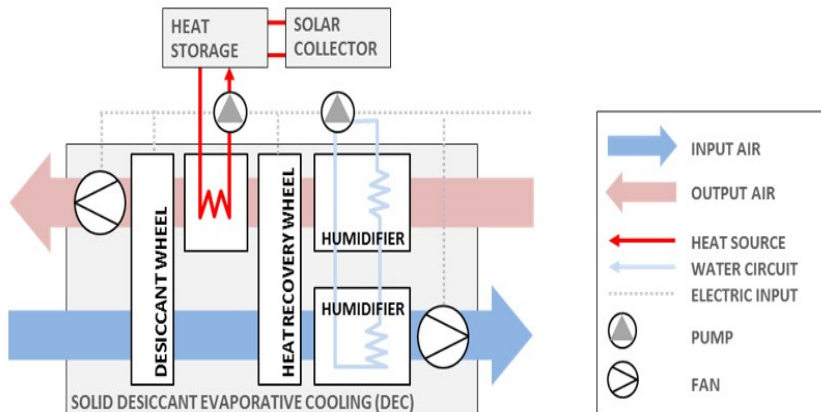
potenciando el crecimiento de briofitas, plantas terrestres no vasculares como musgos y líquenes, de marcado menor mantenimiento en comparación con muros verdes convencionales. En todas las experiencias se comenzó con un estudio acabado de los principios básicos tras las tecnologías y estrategias a integrar, para luego dimensionar los componentes y establecer relaciones para el diseño de un sistema de fachada, para un caso de estudio localizado en un contexto climático determinado, de manera de permitir una aproximación concreta al potencial desempeño de estos sistemas en un contexto real.

Refrigeración desecante- evaporativa: ampliación del potencial refrigerativo del enfriamiento evaporativo en el diseño de fachadas para climas tropicales

Los materiales desecantes son sustancias que se usan para eliminar humedad del aire o de algún otro material. El material desecante más común es la gel de sílice, utilizada ampliamente en embalajes de todo tipo de productos para evitar su deterioro, debido a su bajo costo. El efecto de enfriamiento asociado a estos materiales se logra mediante la combinación de deshumidificación y enfriamiento adiabático de un flujo de aire, antes de entrar al edificio, razón por la cual estas tecnologías se conocen como sistemas de enfriamiento por desecante- evaporativo (DEC). De esta forma, mediante el uso de agentes desecantes se busca en realidad incrementar el efecto refrigerante de sistemas de enfriamiento evaporativo, reduciendo previamente el contenido de humedad del aire entrante. Así, al comienzo de un ciclo típico el aire externo se deshumidifica por contacto directo con un material desecante y luego se enfría mediante enfriadores evaporativos, ya sean indirectos o directos. Los intercambiadores de calor se utilizan comúnmente para pre-enfriar el aire entrante para mejorar la eficiencia del sistema. Dentro de este ciclo es posible utilizar energía solar como fuente de calor para la regeneración

del desecante, proceso obligatorio para extraer el vapor de agua una vez que alcanza su saturación, y así permitir que pueda seguir absorbiendo humedad del aire entrante al sistema (figura 1).

Figura 1. Esquema de funcionamiento sistema desecante- evaporativo sólido



Fuente: Prieto, A. et al (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.141>

Los sistemas de enfriamiento por desecante- evaporativo se basan en procesos de sorción, esto es, la retención de una sustancia por otra cuando están en contacto. Esto considera dos procesos distintos, que definen dos corrientes principales en el desarrollo de estas tecnologías: absorción y adsorción. La primera se refiere a la retención de una sustancia por las moléculas que posee otra, ya sea en estado líquido o gaseoso; proceso que termina con la creación de una solución entre la sustancia inicial y el material absorbente. Por otro lado, adsorción es un fenómeno en el que una sustancia presente en un líquido o gas queda adherida en una sustancia sólida (material adsorbente), formando una capa en la superficie de este último.

Las dos tecnologías principales que se desprenden de estos principios se derivan del uso de desecantes, para ya sea absorber o adsorber la

humedad del aire entrante por medio de agentes desecantes en estado líquido, o materiales desecantes sólidos, respectivamente. Así, tecnologías desecante- evaporativas líquidas utilizan una solución higroscópica, como el cloruro de calcio, que puede aplicarse sobre un elemento portador o rociarse directamente en la corriente de aire entrante; mientras que tecnologías desecante- evaporativas sólidas utilizan un material higroscópico sólido, como gel de silicio, que debe ser aplicado en un lecho o elemento portador, para adsorber la humedad del flujo de aire que ingresa al entrar en contacto con éste y permitir la regeneración del desecante en ciclos sucesivos.

Algunas ventajas de las tecnologías desecantes son la integración de requisitos de ventilación en el sistema, al tratar directamente aire fresco antes de entrar al edificio y el hecho de requerir temperaturas de trabajo más bajas para la regeneración de los componentes en comparación con otras tecnologías, lo que hace que sea posible acoplarlas a paneles solares térmicos como fuente de calor para la regeneración del desecante, configurando lo que se conoce como refrigeración solar. Además, dentro de las tecnologías de refrigeración alternativas, presenta eficiencias potenciales relativamente altas, particularmente en el caso de sistemas desecante- evaporativos líquidos, que han reportado valores de coeficiente de desempeño (comúnmente entendido como COP, siglas en inglés) superiores a 1 (Solair, 2009). Algunas desventajas son la necesidad de una fuente de refrigeración adicional acoplada al sistema (generalmente un sistema de refrigeración evaporativa), y el hecho de que los desecantes líquidos con mayor efectividad son corrosivos (bromuro de litio [LiBr] o cloruro de calcio [CaCl₂]). Actualmente sólo sistemas de enfriamiento con desecantes sólidos están disponibles en el mercado, predominantemente en grandes tamaños para operación centralizada junto a unidades de tratamiento de aire; mientras en paralelo unidades más pequeñas se encuentran en desarrollo para su aplicación descentralizada, además de prototipos incipientes de deshumidificadores desecantes líquidos y sistemas híbridos de tecnologías de compresión de vapor que integran desecantes líquidos para mejorar la eficiencia de bombas de calor en climas húmedos (Prieto *et al.*, 2019).

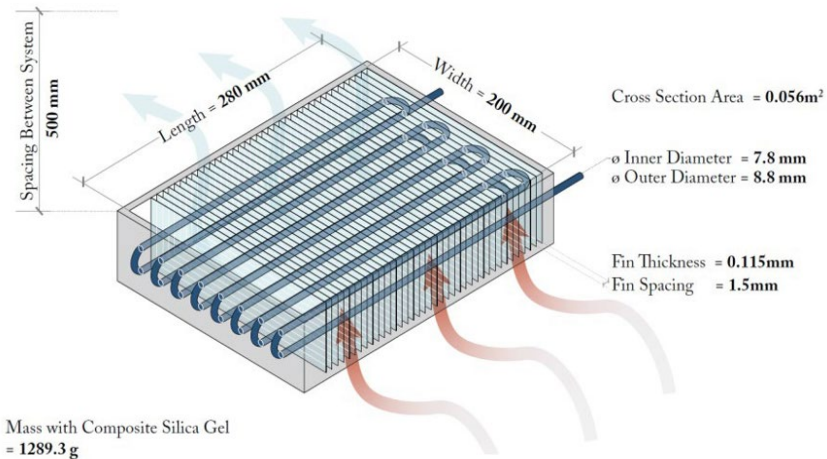
El concepto de fachada explorado en la tesis *Desigrated*, desarrollada por Natchai Suwannapruk, se basó en la integración de una unidad desecante y un refrigerador evaporativo indirecto, dentro de un módulo de fachada prefabricado, para ser aplicado en edificios de oficina en climas cálidos y húmedos (Suwannapruk, 2019; Suwannapruk *et al.*, 2020). El sistema además incorporó paneles solares térmicos y fotovoltaicos como sistemas de protección solar, para apoyar la generación de la energía que requiere el sistema híbrido, con base en fuentes renovables.

Como punto de partida, se realizó una extensa revisión bibliográfica para establecer un panorama comparativo, considerando tecnologías desecantes, sistemas de enfriamiento disponibles y métodos de regeneración de los desecantes, para definir los componentes adecuados y la configuración inicial del sistema de fachada integrado. A partir de esta revisión se optó por utilizar un intercambiador de calor recubierto por gel de sílice y cloruro de litio (LiCl) como el componente principal del sistema desecante, al ser una de las tecnologías de deshumidificación con mayores prestaciones. Al mismo tiempo, se implementó un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto como sistema de refrigeración para reducir la temperatura del aire fresco sin aumentar su contenido de humedad. Los resultados recopilados de experiencias previas realizadas por diversos grupos de investigadores fueron usados para el dimensionamiento y configuración inicial del sistema, que fue concebido para el clima de Bangkok, Tailandia.

El intercambiador de calor recubierto de gel de sílice y cloruro de litio (LiCl) es el componente principal del sistema, siendo necesario para deshumidificar el aire fresco (figura 2) y así reducir las demandas de calor latente que el sistema de enfriamiento evaporativo necesita procesar. La configuración del intercambiador compuesto utilizada en este proyecto se basó en un experimento realizado por Ge *et al.* (2017). Los cálculos realizados para el dimensionamiento del sistema se basaron en una condición de aire de entrada a 30° C y 70% de humedad relativa, similar a la temperatura ambiente promedio de Bangkok de 28° C y 70% de humedad relativa. Con base en esto, se espera que el sistema

completo tenga una capacidad de enfriamiento de 1.25 kW y una tasa de deshumidificación de 3.9 g/kg.

Figura 2. Intercambiador de calor recubierto de un compuesto de gel de sílice y cloruro de litio

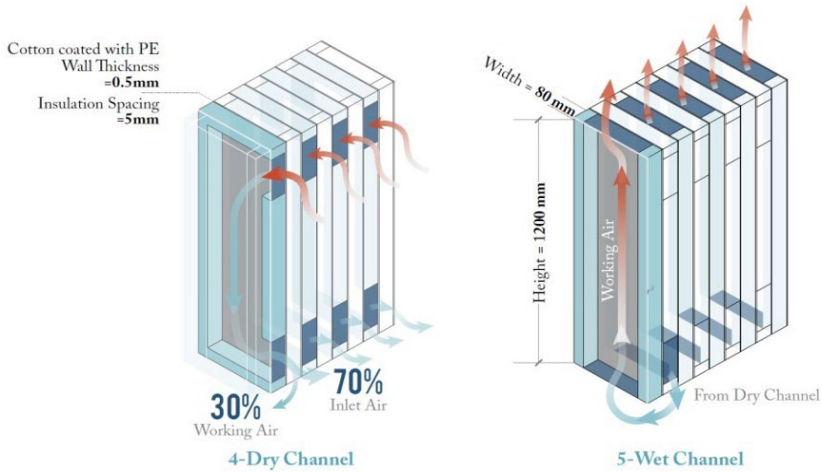


Fuente: Suwannapruk, 2019.

El sistema de refrigeración evaporativo utilizado es un sistema indirecto basado en el ciclo Maisotsenko (ciclo- M), donde el aire seco entra al sistema por un canal seco, a contracorriente de un flujo de agua en el canal húmedo (figura 3). Esta configuración permite una alta transferencia de calor y masa tanto para las corrientes de aire como de agua. El diseño esquemático del sistema y su rendimiento se basaron en un estudio dinámico realizado por Riangvilaikul y Kumar (2010), considerando las condiciones ambientales reales de Bangkok. Para evaluar la eficiencia total del sistema de fachada integrado, además de reducir las variables a considerar en el diseño, se tomó un edificio real en Bangkok como caso base para la intervención. Así, se evaluó el desempeño del sistema propuesto en comparación con los datos de desempeño energético reales obtenidos de reportes de auditoría energética públicos, considerando el

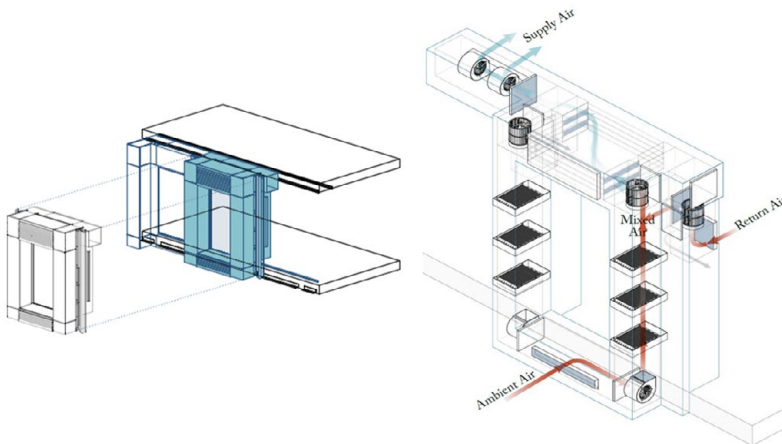
consumo energético de las unidades manejadoras de aire, y el sistema de aire acondicionado central actualmente en operación en el edificio.

Figura 3. Esquema de unidad evaporativa indirecta de ciclo-M



Fuente: Suwannapruk. 2019.

Figura 4. Módulos de fachada propuestos y esquema de funcionamiento módulo de deshumidificación/refrigeración



Fuente: Suwannapruk. 2019.

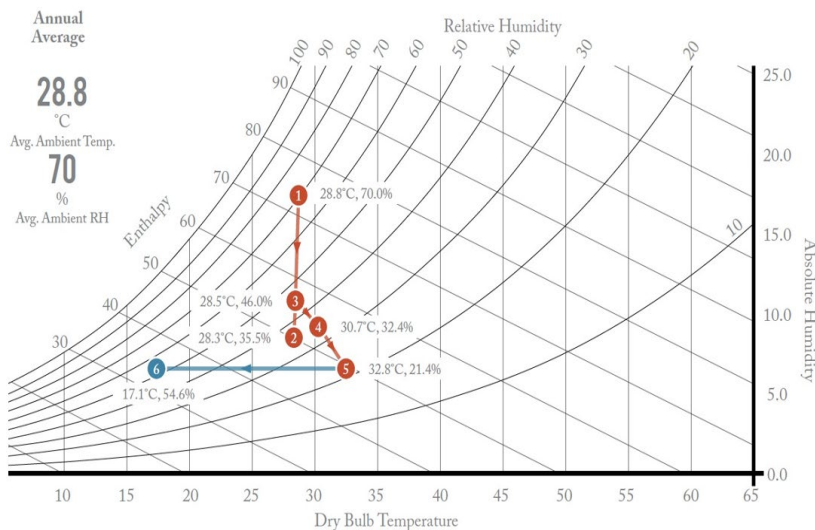
El aire de retorno desde el interior se mezcla con el aire fresco en una cámara especial, en una dosificación de 30/70%. Esta cámara se colocó antes del componente de deshumidificación luego de estudiar su posición óptima dentro del sistema. De esta forma, el aire de retorno (28.3° C y de 8.5 g/kg de humedad absoluta) es mezclado con el aire exterior antes de pasar por los intercambiadores de calor recubiertos de gel de sílice, reduciendo su temperatura y contenido de humedad inicial. Después del proceso de deshumidificación, el aire procesado ingresa al sistema evaporativo antes de ser suministrado al interior. De acuerdo con esto, el sistema es capaz de entregar aire a 17.1° C con un nivel de humedad relativa del 54.6%. El ciclo completo se presenta en el gráfico psicrométrico de la figura 5.

Para evaluar el rendimiento del sistema de fachada propuesto, considerando su operación anual, se realizaron cálculos adicionales basados en datos horarios de las condiciones del aire exterior para un año completo. La evaluación se realizó en dos ciclos de cálculos. El primer ciclo de cálculo es necesario para iniciar el proceso bajo el supuesto de que la habitación no está acondicionada; mientras que en el segundo ciclo se asume que el interior se encuentra en los rangos de confort requeridos al considerar el sistema bajo operación. De acuerdo con los cálculos realizados, el sistema propuesto sería capaz de procesar aire exterior en Bangkok durante un 82.7% de las horas de trabajo en un año tipo. El 17.3% restante se trata de momentos en el año en que la temperatura y la humedad relativa del aire exterior alcanza valores muy altos para poder ser utilizado por el sistema, por lo que se requeriría un sistema de refrigeración de respaldo para estos fines.

La definición del número de módulos necesarios para satisfacer los requerimientos de diseño de un piso tipo se realizó a partir de simulaciones energéticas utilizando el motor de cálculo de EnergyPlus. La simulación mostró que un piso tipo del edificio analizado (piso 19) requiere una capacidad de enfriamiento de diseño de 134.31 kW, con un caudal de 6.51 m³/s. Por otro lado, la temperatura del aire de suministro del sistema propuesto se fijó en 18.9° C, con una relación de humedad de 0.0081 g/g según los cálculos preliminares del sistema.

Luego de rondas de optimización del sistema de ventilación mecánica, incorporando el impacto del aire de retorno en el sistema, la capacidad de refrigeración de diseño se redujo a 84.24 kW y el caudal de diseño a 4.42 m³/s. Teniendo en cuenta el caudal de diseño estimado del sistema propuesto (0.42 m³/s), se necesitan entonces 11 módulos de fachada para cubrir la potencia requerida en el piso analizado.

Figura 5. Ciclo de tratamiento del aire

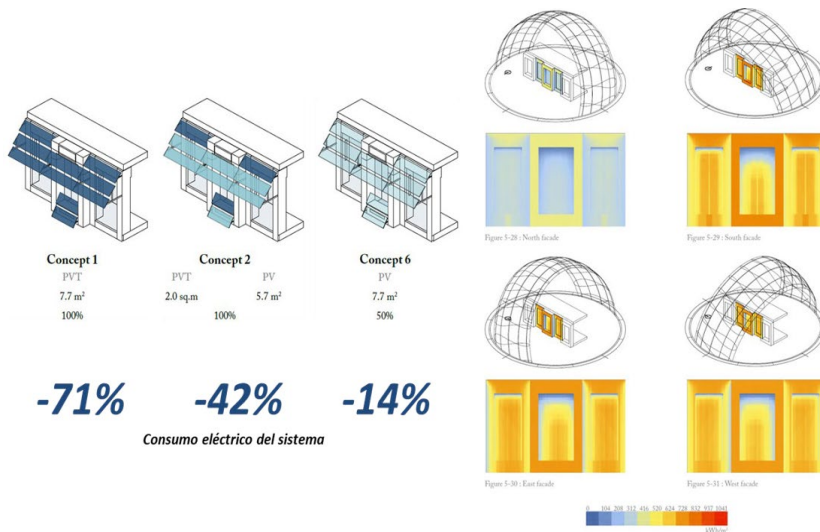


Fuente: Suwannapruk. 2019.

Además de los componentes principales encargados de la deshumidificación y enfriamiento del aire, se exploró el potencial para lograr la autonomía energética o la autosuficiencia del sistema mediante la integración de paneles fotovoltaicos y paneles térmicos (PVT) en el diseño del módulo de fachada. Los elementos PVT se integraron como un sistema de sombreado, generando energía, a la vez que contribuyen a la reducción de las demandas de enfriamiento mediante el uso de estrategias de diseño pasivo. La radiación solar disponible en el sitio se simuló con Ladybug, un complemento de Grasshopper que sirvió como interfaz para Radiance y

EnergyPlus para analizar y mapear datos meteorológicos, para ilustrar la relación entre la orientación de la fachada y la exposición solar. Distintas configuraciones de paneles solares térmicos y celdas fotovoltaicas fueron evaluadas, considerando además diferentes grados de transparencia en su diseño. Los resultados mostraron que teóricamente sería posible amortizar el consumo energético del sistema propuesto mediante la generación de energía renovable en el sitio en rangos que van desde 14 hasta 71% de reducción, teniendo el mayor porcentaje de reducción (71%) la solución que considera sistemas acoplados de fotovoltaicos y paneles térmicos (PVT), y la que contempla menor reducción (14%), una solución que considera solamente el uso de celdas fotovoltaicas integradas en elementos vidriados, obteniendo 50% de transparencia (figura 6). En este caso, la elección del sistema a utilizar debiera considerar no sólo las demandas energéticas, sino también el mantenimiento necesario y la imagen propuesta, bajo una aproximación holística al diseño del edificio.

Figura 6. Estudios de soleamiento y escenarios de integración de paneles PVT en fachadas



Fuente: Suwannapruk, 2019.

Si bien el concepto de fachada propuesto se basa en una serie de supuestos como punto de partida, su desarrollo sistemático y posterior evaluación demuestran que la capacidad de deshumidificación y enfriamiento del sistema híbrido, junto con estrategias de diseño pasivo de sombreado y reducción de superficies acristaladas en fachada, pueden reducir las demandas de enfriamiento del edificio. Además, el sistema permite, al menos teóricamente, un adecuado suministro de aire fresco en climas tropicales bajo una configuración descentralizada (figura 7). No obstante, debido a la eficiencia actual de los componentes del sistema, éste no logró su objetivo inicial, que buscaba eliminar por completo el uso de refrigerantes. El sistema descentralizado aún depende de un sistema de enfriamiento de respaldo para su operación a lo largo del año. Sin embargo, muestra un posible potencial como sistema de transición, abriendo paulatinamente el camino hacia un futuro sostenible.

Figura 7. Módulo de fachada propuesto y posible composición de fachada en el edificio analizado



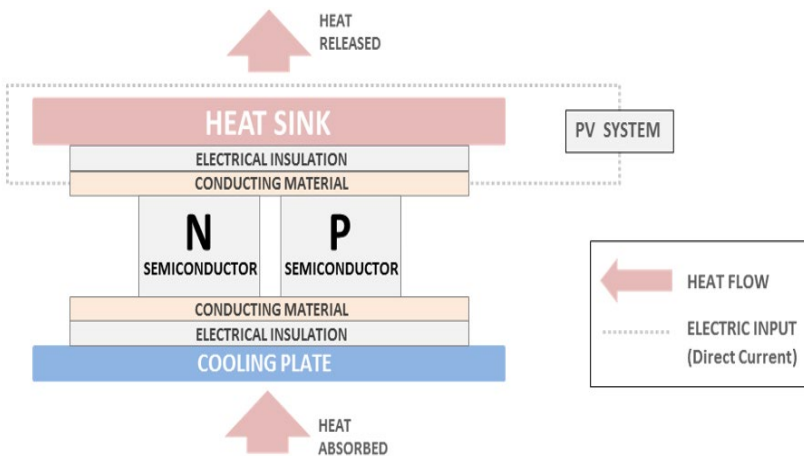
Fuente: Suwannapruk, 2019.

Refrigeración termoeléctrica: refrigeración de estado sólido como estrategia para evitar el uso de refrigerantes en climas semiáridos

La búsqueda de principios de enfriamiento que eviten el uso de refrigerantes ha llevado a la comunidad científica a explorar con mayor interés ciertas tecnologías de refrigeración de estado sólido, como la refrigeración magnética y la refrigeración termoeléctrica. La primera, en etapas tempranas de desarrollo, utiliza campos magnéticos para cambiar la temperatura de ciertos materiales; mientras que la segunda utiliza materiales de baja conductividad térmica y alta conductividad eléctrica para transformar una corriente eléctrica a un diferencial de temperatura, sin utilizar refrigerantes ni ningún tipo de fluido para su operación. En esta sección exploraremos la refrigeración termoeléctrica, en su potencial para ser aplicada para el enfriamiento de edificios en climas semiáridos.

La refrigeración termoeléctrica se basa en el efecto Peltier, que describe el cambio de temperatura en un circuito que consta de dos semiconductores metálicos diferentes, cuando se aplica una corriente continua. La configuración de este circuito ha sido desarrollada en componentes termoeléctricos estándar denominados módulos termoeléctricos, o módulos Peltier. Así, un módulo Peltier se compone de bloques de semiconductores tipo P y tipo N, los que se colocan térmicamente en paralelo entre sí y eléctricamente en serie, y luego se recubren con una placa conductora térmica en cada lado, generalmente de cerámica, evitando la necesidad de un aislante separado. Cuando pasa corriente continua a través de los módulos, la temperatura de un lado disminuye, lo que permite la absorción de calor, mientras que la temperatura del otro lado aumenta, disipando el calor en el ambiente. Es posible operar el módulo en modo refrigeración o calefacción (definiendo qué lado del módulo absorbe o disipa calor), controlando la dirección de la corriente (figura 8).

Figura 8. Esquema de funcionamiento de un módulo termoelectrico para refrigeración



Fuente: Prieto, A. et al (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.141>

Los componentes esenciales de un sistema de enfriamiento termoelectrico son los módulos termoelectricos o módulos Peltier, y disipadores de calor para la absorción/disipación de calor, dispuestos en contacto directo con las placas cerámicas a ambos lados del módulo. Los disipadores de calor son absolutamente necesarios para reducir el diferencial de temperatura entre ambas caras del módulo, apoyando la absorción de calor en la cara fría y disipando el exceso de calor en la cara caliente, evitando el sobrecalentamiento del módulo Peltier y mejorando la eficiencia del sistema. Si bien el rendimiento de estos sistemas es marcadamente inferior al de la climatización convencional por compresión de vapor (con COP menores a 1, en comparación con valores cercanos a 3 para equipos de aire acondicionado convencionales), esta tecnología presenta interesantes ventajas, como el uso de materiales sólidos (sin líquidos ni gases), operación inmediata y estable, y la ausencia de piezas móviles, lo que prácticamente elimina la necesidad de mantenimiento, además de permitir un funcionamiento completamente silencioso en su configuración básica. Además, al requerir corriente continua para su

operación, se pueden integrar de manera directa a paneles fotovoltaicos, sin necesidad de transformadores. Durante los últimos años, se han llevado a cabo numerosas exploraciones experimentales de integración en fachadas con base en prototipos que climatizan directamente el ambiente interior, a través de elementos radiativos; o sistemas que integran la ventilación del edificio, tratando aire fresco a través de intercambiadores de calor (Ibáñez-Puy *et al.*, 2018; Cosnier *et al.*, 2008). No obstante, se trata de prototipos y exploraciones en etapas tempranas de desarrollo. Así, la aplicación comercial de módulos termoeléctricos se ha limitado principalmente a bienes de consumo de pequeño tamaño, como neveras portátiles para acampar, o dispositivos de refrigeración especializados para equipos electrónicos y microprocesadores, o instrumental de laboratorio, donde la precisión y estabilidad de su operación compensa su baja eficiencia.

Además del módulo Peltier base y los materiales que lo componen, los parámetros que afectan mayormente el desempeño de estos sistemas son la intensidad de corriente y voltaje, la tasa de disipación de calor y la diferencia de temperatura entre ambas caras. La mejora del rendimiento del sistema en función de la disipación de calor ha sido explorada por investigadores, evaluando configuraciones de módulos Peltier con diversas estrategias de disipación de calor, que van desde el uso de disipadores de calor básicos, de aluminio extruido, a configuraciones más complejas con convección forzada en cámaras ventiladas. Existe una virtual unanimidad entre los investigadores al observar que una mejor disipación de calor podría ser el catalizador para que un sistema termoeléctrico integrado en componentes de fachada funcione correctamente como alternativa a los sistemas de aire acondicionado.

Partiendo de esa base, Yarai Zenteno exploró el diseño de un sistema termoeléctrico integrado en componentes de fachada, poniendo especial énfasis en la evaluación de estrategias de disipación de calor en la cara caliente del módulo Peltier (Zenteno, 2020). Esto consideró el uso de disipadores de calor de distintas características formales y materiales, el uso de diferentes caudales de ventilación en cámaras ventiladas, y estrategias de almacenamiento de calor. Para el desarrollo del sistema se consideró

un edificio de oficina tipo, representativo de la ciudad de Monterrey, México, como ejemplo de un contexto climático semiárido. Así también, luego de una revisión inicial de distintas experiencias previas, se optó por el desarrollo de un sistema para acondicionamiento de aire, integrando las demandas de ventilación del edificio en el módulo descentralizado.

El desarrollo del concepto de fachada considera un trabajo a dos escalas para hacer frente a las demandas de refrigeración en un clima semiárido: la integración de estrategias pasivas a nivel de edificio, y la evaluación y diseño iterativo a nivel del componente termoeléctrico, que es el foco del trabajo de la tesis. La integración de las estrategias a ambos niveles es lo que determina finalmente el sistema de fachada propuesto, que es evaluado en términos de su desempeño en el caso de estudio.

Para el nivel del edificio se consideraron diversas estrategias de diseño pasivo, seleccionadas a partir de una revisión sistemática de guías de diseño y experiencias en climas áridos y semiáridos, de manera tal de minimizar las demandas de refrigeración lo más posible antes de incorporar componentes mecánicos y refrigeración activa. Las estrategias utilizadas contemplan la disminución de superficies vidriadas del caso base, el uso de vidrios de control solar y/o el uso de protecciones solares, y el uso de ventilación natural, particularmente durante la noche, debido a la alta oscilación de temperaturas propia de estos climas.

Estas estrategias fueron evaluadas mediante el *software* de simulación energitérmica DesignBuilder. Los resultados mostraron un gran impacto al utilizar vidrios de control solar, y particularmente al permitir el uso de ventilación natural como estrategia de enfriamiento, cuando las temperaturas exteriores lo permiten. Se redujo también la relación de superficie ventanas/fachada a un 40%; sin embargo, esto contribuyó menos de lo esperado a la reducción de las demandas de refrigeración, dado que el caso base consideraba ya una relación ventanas/fachada de 60%. Así también, al considerar componentes vidriados de control solar en la intervención, el uso de protecciones solares solamente contribuyó en 1.4% extra en la reducción de las demandas de enfriamiento, por lo que posteriormente se descartó para simplificar la construcción de los módulos de fachada y reducir sus requerimientos de mantenimiento.

Por otro lado, el diseño del componente termoeléctrico para su integración en fachadas, el foco de la investigación consideró una evaluación detallada de los distintos parámetros que tienen un impacto en la disipación de calor del componente termoeléctrico, identificados a partir de experiencias previas disponibles en la literatura especializada. Así, la hipótesis subyacente de la investigación señala que con un diseño adecuado del dispositivo de disipación de calor, es posible optimizar el rendimiento de un módulo termoeléctrico estándar. Si el desarrollo tecnológico futuro permite la creación de módulos Peltier de mayor eficiencia, la configuración obtenida ayudará de todos modos a una operación aún más eficiente. No obstante, el diseño del módulo Peltier mismo escapa a los alcances de esta investigación, que se avoca a explorar el potencial de una configuración constructiva en el desempeño del sistema, utilizando un módulo Peltier estándar, con las limitaciones que eso conlleva.

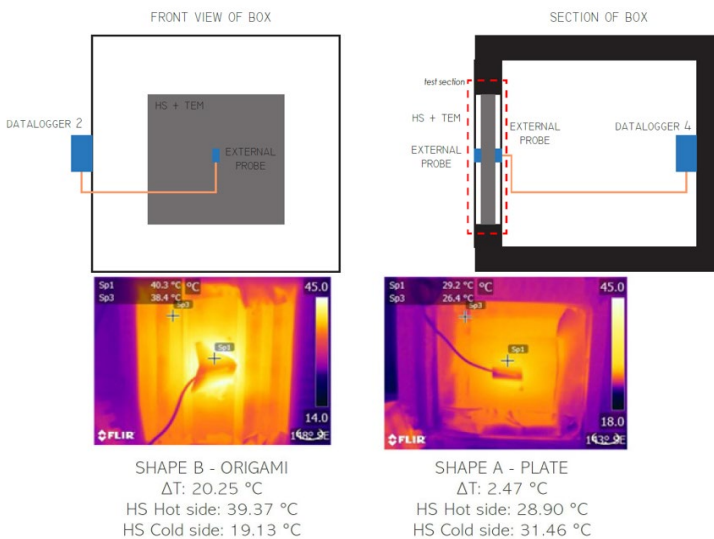
La evaluación se llevó a cabo de manera sistemática, con base en una metodología de diseño escalonada donde los parámetros fueron evaluados en etapas sucesivas, eligiendo el mejor resultado de cada una para continuar a la siguiente. Los parámetros evaluados, que configuran las etapas de la evaluación, fueron: el espesor de la base del elemento disipador, el material del disipador y la forma del disipador, pensando en la posibilidad de que elementos constructivos de fachada puedan eventualmente utilizarse para este fin. Así también se consideró la ventilación del disipador, ya sea mediante convección natural o convección forzada incorporando ventiladores en el componente de fachada.

La evaluación se realizó en forma experimental y con base en simulaciones. Para la evaluación experimental se construyó una caja adiabática, con una cara libre, donde se probó un número limitado de prototipos de configuraciones de acuerdo con los parámetros descritos en el párrafo anterior. Para la evaluación de estos prototipos se realizaron mediciones con sensores de temperatura superficial HOBO y una cámara termográfica (figura 9). Estos experimentos cumplieron un doble propósito, al proveer por un lado un marco para diversas exploraciones iniciales para familiarizarse con los componentes del sistema termoeléctrico en un contexto

real; mientras que por otro lado sirvieron para validar un modelo virtual con base en datos de desempeño reales, que se utilizó como la base de las simulaciones, permitiendo evaluar todos los parámetros identificados en un ambiente controlado.

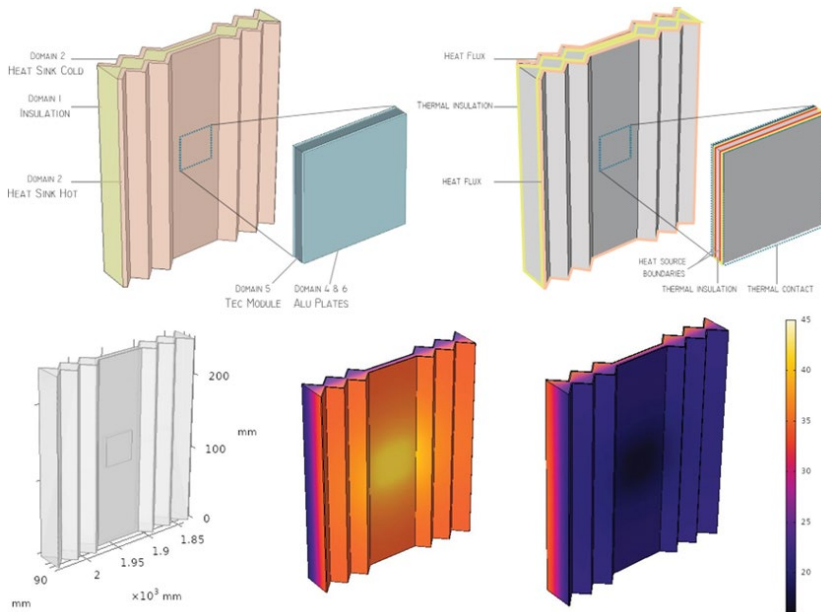
Las simulaciones se realizaron en el *software* de simulación multifísica COMSOL, de acuerdo con la metodología de evaluación escalonada descrita anteriormente. De manera de simplificar el modelo simulado, éste no considera el efecto termoeléctrico, sino que considera el módulo Peltier como una fuente de calor a partir de las temperaturas registradas en los experimentos iniciales con módulos Peltier reales (figura 10). Los resultados de la validación mostraron una buena concordancia entre los experimentos y el modelo, al simular flujos laminares; obteniendo una potencia de refrigeración simulada de 13.88 W del módulo analizado, comparada con la potencia de 13.81 calculada de acuerdo con los valores experimentales (con valores COP de 0.90 y 0.89, respectivamente).

Figura 9. Esquema de la caja adiabática e imágenes termográficas de la evaluación experimental



Fuente: Zenteno, 2020.

Figura 10. Ejemplo de simulaciones realizadas en COMSOL a partir de datos experimentales

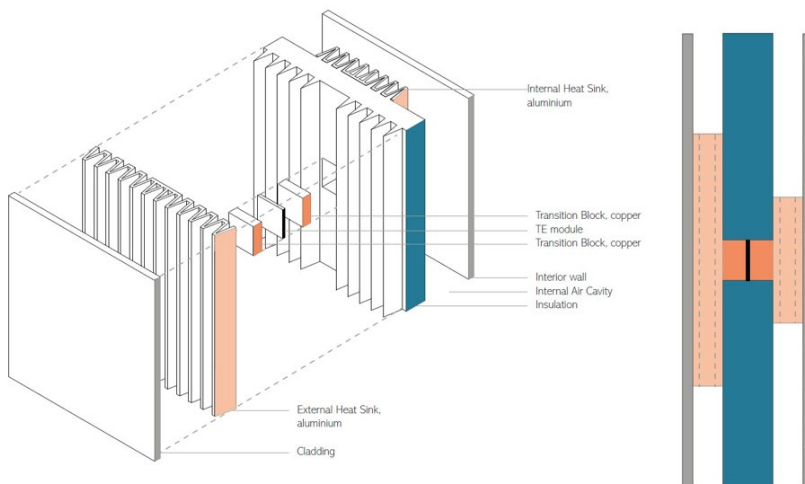


Fuente: Zenteno, 2020.

En cuanto a los parámetros analizados, se obtuvo que un disipador con una base de 5 mm de espesor permite la mayor eficiencia relativa del sistema. Un espesor de 10 mm consideró un mejor desempeño, pero la diferencia no fue tan importante como para justificar el uso del doble del material. Así también, dentro de las formas evaluadas para el disipador, buscando aumentar la superficie de contacto con el aire (funcionando como un intercambiador de calor), se encontró que el uso de canales a partir de una lámina plegada como extensión del disipador de calor (a modo de revestimiento de fachada ondulado), ofrece resultados positivos. Además, se eligió un elemento de cobre para conectar el módulo Peltier con el disipador de aluminio, debido a su mayor conductividad (el disipador mismo funcionaría mejor si fuera de

cobre, pero su mayor valor comparado con el aluminio no compensa los beneficios que conlleva). Finalmente, si bien los resultados mostraron que el uso de convección forzada por medio de ventiladores lleva a una mayor eficiencia en el sistema, se optó por convección natural debido a la mínima diferencia entre ambas (0.01 en el valor del COP del sistema), considerando que el uso de ventiladores conlleva un aumento en el consumo energético del sistema que no se verá compensado por el beneficio que genera. A través de las simulaciones y cálculos térmicos, se encontró que la resistencia térmica ideal para el diseño del disipador de calor en la cara caliente del módulo Peltier debe ser de 0.2 K/W, mientras que el disipador en el lado frío puede ser de 1.0 K/W, siendo este último menos relevante para la operación óptima del sistema. La configuración base del sistema se muestra en la figura 11, considerando los elementos mínimos requeridos para su operación.

Figura 11. Configuración base del sistema termoelectrico a integrar en componentes de fachada



Fuente: Zenteno, 2020.

El sistema de fachada se desarrolló en función de los requerimientos de diseño a ambas escalas (edificio y componente termoeléctrico). Cabe señalar que la evaluación del desempeño del componente termoeléctrico se realizó para un módulo Peltier, por lo que los resultados debieron ser extrapolados, considerando un adecuado dimensionamiento del sistema con base en las demandas de refrigeración de un piso tipo del caso de estudio. La capacidad de enfriamiento de diseño para los meses de verano varía entre 35.5 y 41.3 kW, obtenido a partir de las simulaciones del edificio optimizado con estrategias de diseño pasivo mencionadas anteriormente. Así también, el componente termoeléctrico optimizado presenta una potencia refrigerativa de 11.90 W por módulo termoeléctrico, que responde a un COP de 1.64. Por otro lado, los requisitos mínimos de aire fresco para el piso tipo analizado fueron calculados en 0.87 m³/s, con un caudal másico de 1.04 Kg/s, que corresponde a una carga de ventilación de 12.68 kW.

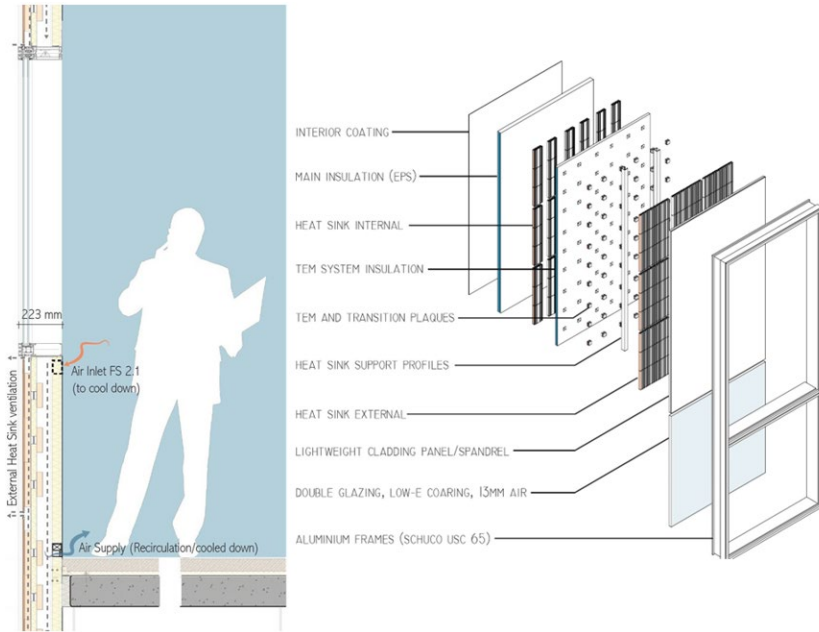
De acuerdo con cálculos de demanda para el piso completo, se estima que se necesitarían alrededor de 1,170 módulos Peltier, distribuidos a lo largo de toda la superficie de envolvente disponible. Considerando solamente las áreas opacas de envolvente, esto significa 14 módulos Peltier por cada 1.5 m de perímetro, lo que se toma como base para el diseño del sistema de fachada. Así también, para el dimensionamiento de los conductos de ventilación en fachada se definió una caída de presión de 0.4 Pa/m, para evitar ruidos molestos por el paso del aire.

El sistema de fachada propuesto es una unidad prefabricada, que comprende dos cámaras de aire, una interior, donde el aire fresco es refrigerado, y una exterior, para reforzar la disipación de calor de la cara caliente del componente termoeléctrico. La primera comprende mayores dimensiones, respondiendo a los requisitos de ventilación mencionados anteriormente, mientras que la cámara exterior hace uso de los canales diseñados como parte del elemento disipador de calor como ductos de ventilación vertical (figura 12).

A partir del concepto base, se definieron tres variaciones modulares para permitir la operación del sistema: un módulo de ingreso de aire fresco (entrada y filtrado de aire exterior), que además contempla la recirculación de aire interior, mezclándose con el aire entrante; módulos sucesivos de refrigeración del aire entrante, y un módulo de suministro de aire refrigerado al ambiente interior. Estos módulos se disponen de forma secuencial a lo largo del perímetro de la planta, conectados en serie para proveer de aire fresco y refrigerado en distintos puntos del espacio de trabajo. El desarrollo del concepto propuesto se basa en un estudio sistemático de las posibilidades tecnológicas asociadas al estado actual de la refrigeración termoeléctrica, sumado a la definición y entendimiento adecuado de los requerimientos de un edificio de oficina en un contexto semiárido.

El grado temprano de desarrollo de los componentes tecnológicos utilizados, en su potencial de aplicación en fachadas, contempla una serie de supuestos a lo largo del proceso, lo que habla del carácter exploratorio del concepto de fachada propuesto. Sin embargo, la investigación permite aseverar al menos una factibilidad teórica en el uso de estos elementos, que es avalada por resultados obtenidos de experiencias similares desarrolladas por otros grupos de investigación (Ibáñez-Puy *et al.*, 2018; Cosnier *et al.*, 2008). No obstante, cabe subrayar el hecho de que la eficiencia obtenida por estos sistemas difícilmente podrá llegar a valores de desempeño comparables con sistemas de aire acondicionado convencionales, por lo que requerirán más energía para hacer frente a una demanda de refrigeración determinada. La diferencia estará en que, al emplear sistemas basados en la refrigeración termoeléctrica, es posible evitar completamente el uso de refrigerantes, además de potencialmente minimizar gastos por conceptos de mantenimiento. Más investigaciones serán necesarias para contar con información suficiente que permita una comparación sin prejuicios entre ambas tecnologías, considerando ventajas y desventajas para su aplicación en el entorno construido, y así establecer guías para su posible aplicación, en los contextos donde su uso sea claramente favorable.

Figura 12. Sistema de fachada propuesto y sus componentes



Fuente: Zenteno, 2020.

Fachadas biorreceptivas: aprovechar el crecimiento natural de musgos y líquenes para el diseño de fachadas verdes de bajo costo

Las experiencias descritas antes buscaron explorar la potencial aplicación de ciertas tecnologías de refrigeración alternativas en el diseño de componentes de fachada multifuncionales, integrando estrategias pasivas e instalaciones descentralizadas como base de los conceptos. Esto, con el fin de reducir las demandas de refrigeración en edificios de oficina en climas cálidos, además de minimizar el uso de refrigerantes con alto potencial de calentamiento global (Global Warming Potential [GWP]). Sin embargo, aunque ciertas tecnologías alternativas, amigables con el medio ambiente, pudieran imponerse frente a sistemas de aire acondicionado

utilizados comúnmente, el principio base tras la refrigeración de nuestros edificios puede terminar de igual modo agravando el problema que se busca resolver: al enfriar el espacio interior, efectivamente bombeamos calor hacia el exterior, esto es, al espacio urbano. Esto contribuye al efecto de isla de calor antes mencionado, aumentando las demandas de refrigeración del espacio interior en el ciclo vicioso que buscamos romper.

Cobra importancia nuevamente, entonces, el adecuado diseño bioclimático de la envolvente, considerando estrategias pasivas para la adaptación del edificio a su entorno climático, de manera de reducir sus demandas de refrigeración antes de pensar en integrar sistemas activos y componentes tecnológicos. Pero, además, es importante explorar estrategias que contribuyan activamente a mejorar las condiciones del espacio urbano, reduciendo las temperaturas ambientales exteriores, antes de preocuparse de enfriar el interior de nuestros edificios. En este aspecto, una de las estrategias más relevantes para reducir las islas de calor urbanas es la inclusión de vegetación en ciudades, lo cual reduce las temperaturas ambientales por evapotranspiración, además de contribuir a la calidad del aire, combatir la pérdida de biodiversidad en zonas urbanas y mejorar la salud mental de sus habitantes.

La mayoría de las ciudades son centros urbanos densos, donde no hay grandes áreas verdes planificadas de antemano, por lo que ha aumentado el interés por el uso de techos y fachadas verdes, de modo de integrar vegetación en superficies construidas ya existentes. Sin embargo, cubiertas y fachadas verdes incurren en costos adicionales en su construcción y mantenimiento, al requerir una estructura secundaria de soporte y sistemas de irrigación, al mismo tiempo que imponen mayores exigencias estructurales a los edificios intervenidos. Considerando esto, en los últimos años ha aumentado el interés de la comunidad científica en la biorreceptividad, como una propiedad que permita aumentar las superficies vegetales en el entorno construido, evitando las desventajas de fachadas y techos verdes actualmente en el mercado.

El concepto de biorreceptividad fue acuñado originalmente por Guillitte (1995), quien lo definió como “la aptitud de un material para

ser colonizado por uno o varios grupos de organismos vivos sin sufrir necesariamente ninguna biodeterioración”. De esta forma, si se aplicara un material con alta biorreceptividad sobre la superficie de un edificio, se podría generar una superficie verde aprovechando el crecimiento natural de ciertos organismos biológicos, o biopelículas (o biofilms) compuestos por bacterias, algas, hongos, líquenes y musgos. Estas biopelículas pueden sobrevivir en prácticamente todas las condiciones ambientales naturales, siempre que el sustrato en el que crezcan sea adecuado; mientras que se ha comprobado que, al igual que las fachadas verdes regulares, pueden afectar la temperatura de la superficie del edificio, absorber ciertos contaminantes del aire y secuestrar carbono (Charoenkit & Yiemwattana, 2017). Todo esto, sin requerir un sistema técnico o mantenimiento adicional, lo que abre la posibilidad de diseñar envolventes para edificios ecológicos con costos reducidos y menor energía embebida.

Ahora, a grandes rasgos lo antes mencionado no reviste una gran novedad. Al contrario, la mayoría de los propietarios de cualquier inmueble han probablemente dedicado considerable tiempo y esfuerzo para remover musgos o crecimiento vegetal espontáneo en sus fachadas, para mantener su imagen y evitar la idea de deterioro del edificio. Sin embargo, la idea tras una potencial aplicación en fachadas se sustenta en entender las variables que explican el crecimiento espontáneo de estos organismos en paramentos verticales, de manera de poder guiar su crecimiento a través de componentes arquitectónicos de fachada especialmente diseñados para este fin. Este objetivo es lo que impulsó los proyectos de tesis de Kazi Fahriba y Max Veeger, quienes exploraron el rol que tienen dos tipos de variables en el diseño de un panel de fachada: variables geométricas y la composición del material, respectivamente. Para ambos proyectos, el punto de partida fue el uso de paneles de concreto como sustrato base, debido a los buenos resultados obtenidos por otros investigadores en el tema (Cruz & Beckett, 2016; Manso *et al.*, 2014), además de las posibilidades de prefabricación a gran escala asociadas al material. Ambas investigaciones fueron desarrolladas prácticamente en su totalidad con base en ensayos experimentales y prototipos, para

lo cual se contó con el apoyo de Byldis, una compañía de ingeniería con sede en los Países Bajos, con amplia experiencia en componentes prefabricados de hormigón para aplicación en fachadas.

La primera etapa en ambas investigaciones consideró un estudio bibliográfico de las experiencias realizadas en el tema, además de un estudio de los organismos biológicos más comúnmente encontrados en ciudades (considerando Rotterdam como el caso de estudio), sus características principales y sus patrones de crecimiento. En función de esto, fue posible identificar los principales aspectos que cumplen un rol en el crecimiento de estos organismos, a considerar en un componente de fachada biorreceptivo. Así, retención de humedad, poca exposición a ráfagas de viento, y radiación solar indirecta, son aspectos para considerar, que se traducen en superficies porosas, de preferencia rugosas, y alta permeabilidad al agua.

A partir de estos requerimientos base, el trabajo de Kazi consistió en explorar el potencial de la articulación geométrica de una superficie para alcanzar estos objetivos. Así, los requerimientos ambientales fueron traducidos en guías de diseño, buscando proteger ciertas zonas de la acción del viento, canalizar el agua y/o retenerla en ciertas áreas de la fachada, generar áreas de sombra, y promover la acumulación de nutrientes en la superficie; de acuerdo con operaciones geométricas a dos escalas: macro y micro. Las operaciones geométricas a escala macro se encargan de proveer sombra, crear espacios protegidos del viento, y conducir el flujo del agua; mientras que las operaciones a escala micro se plantean para mejorar la retención de agua y nutrientes para el crecimiento espontáneo de los organismos.

Seis prototipos fueron desarrollados de acuerdo con las estrategias definidas. Cuatro considerando diferentes combinaciones de operaciones geométricas en ambas escalas, un prototipo que consideró una superficie lisa y uniforme, que fue tomado como caso base de referencia, y un último módulo con una superficie rugosa, sin operaciones geométricas especialmente diseñadas, sino como resultado de un tratamiento superficial del módulo. Dos series de prototipos fueron construidos con base

en moldes desarrollados especialmente, y luego para ser objeto de dos series paralelas de evaluaciones (figura 13).

Figura 13. Prototipos desarrollados para la evaluación de distintas estrategias geométricas



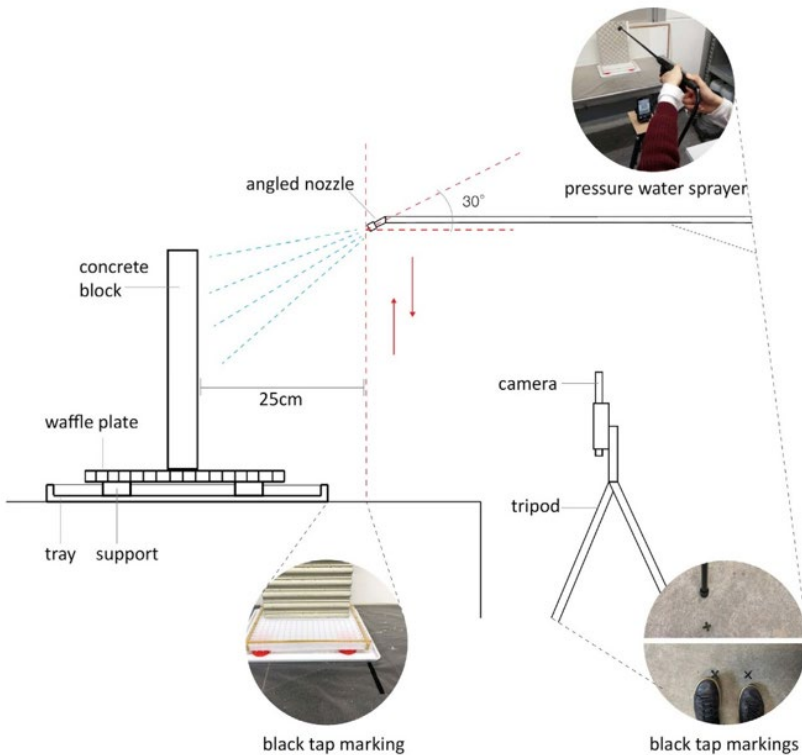
Fuente: Fahriba, 2020.

Por un lado, un grupo de prototipos fue evaluado en función de su capacidad de retener y conducir un flujo de agua, habiendo previamente identificado este aspecto como un punto clave para el crecimiento de organismos. Los módulos fueron previamente preparados, retirando material superficial y reduciendo su contenido de humedad mediante

secado en hornos especiales. Luego, se aplicó agua de color por medio de un rociador, durante 30 segundos, siguiendo una serie de protocolos experimentales previamente definidos (figura 14). Finalmente, el peso, temperatura superficial y humedad relativa en los paneles fueron registrados en intervalos definidos, lo que en conjunto con observaciones *in situ* permitió la comparación sistemática de los paneles. Este proceso se realizó en reiteradas ocasiones para validar la consistencia de los datos obtenidos. Además, como complemento se evaluó el desempeño de diferentes opciones de geometrías en la escala micro en relación con el paso de aire y agua, por medio de simulaciones dinámicas de fluidos (CFD).

Por otro lado, el segundo grupo de paneles fue cubierto con una lechada de musgo preparada especialmente, y se dejó en el invernadero tropical del jardín botánico de la TU Delft, bajo condiciones de temperatura entre 20-24° C y humedad relativa entre el 65 y 85%. Se les aplicó también agua de lluvia de dos a tres veces al día por 12 semanas, manteniendo los paneles en posición horizontal durante las primeras seis, y en posición vertical durante la segunda mitad del periodo experimental. Esta exploración se realizó en paralelo a las pruebas experimentales anteriormente descritas, para dar tiempo al crecimiento de los organismos. En ese sentido, las condiciones óptimas de crecimiento del entorno tropical propiciaron un crecimiento acelerado en comparación con lo que podría suceder en el exterior. Finalmente, los resultados de las exploraciones realizadas en el laboratorio fueron validadas por el registro del crecimiento, obteniendo resultados concordantes entre ambas. Por medio de esta investigación fue posible aseverar que, en efecto, ciertas estrategias geométricas pueden ser utilizadas para orientar el crecimiento de briofitas (plantas terrestres no vasculares) en módulos de fachada, permitiendo una integración armónica de musgos y líquenes en elementos de la envolvente por medio de un adecuado diseño. El panel más promisorio fue seleccionado (panel 2), rediseñado y adaptado como un componente de fachada en la sección final de la tesis (figura 15).

Figura 14. Diseño experimental para la evaluación de conducción y retención de agua en los prototipos

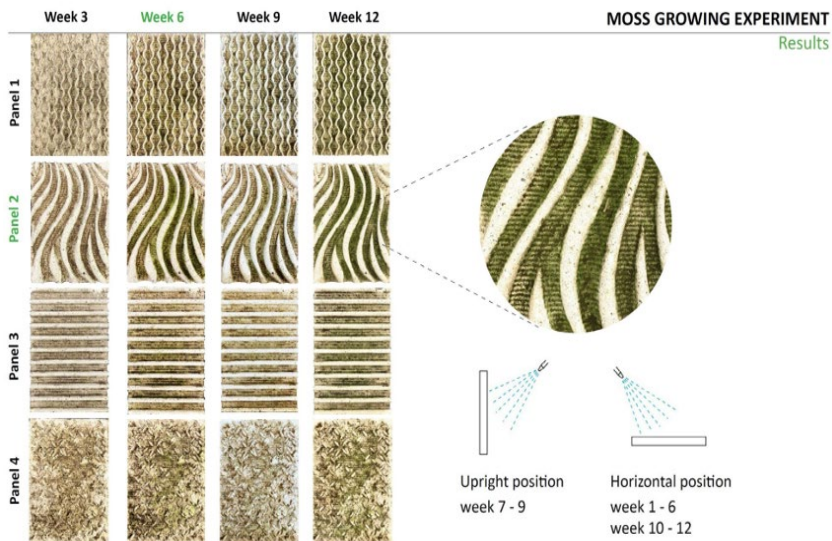


Fuente: Fahriba, 2020.

El trabajo de Max, por el contrario, se enfocó en las características materiales del sustrato base, de manera de explorar el impacto de la composición de la mezcla en el desarrollo de un hormigón biorreceptivo para aplicación en componentes de fachada. A partir de la revisión bibliográfica se encontró que los principales requisitos para el crecimiento biológico parecen ser un pH del sustrato bajo 10, una cierta rugosidad en la superficie para proteger el biofilm de las influencias ambientales, alta capacidad de retención de agua, y la presencia de nutrientes en el sustrato

de absorción, particularmente fósforo. A partir de estos requerimientos, se propusieron 16 composiciones materiales distintas con base en el uso de diferentes agregados, aditivos, tasa de agua vs cemento, y el uso de un retardante superficial (figura 16). Como cemento base, se utilizó cemento de Portland (el cemento más comúnmente utilizado), y cemento de fosfato de magnesio (MPC), ya que su uso reportó resultados positivos en experiencias previas realizadas por otros grupos de investigación. Así, la matriz experimental consideró 32 escenarios distintos a analizar, lo que requirió cuatro muestras de 50 mm x 50 mm por escenario (dos para medir características de la mezcla mediante ensayos destructivos, y otros dos para ensayos de biorreceptividad), es decir, 128 muestras en total, que fueron desmoldadas luego de 24 horas y fueron secadas y endurecidas por 25 días antes del experimento.

Figura 15. Experimento de crecimiento de briofitas en los prototipos, en el invernadero tropical de TU Delft



Fuente: Fahriba, 2020.

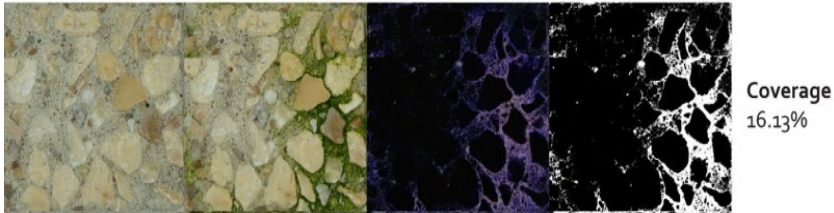
Para los ensayos de biorreceptividad se extrajo una biopelícula existente de una fachada de hormigón en la ciudad de Delft, y se diluyó con una solución de agua dulce con cianobacterias, para luego mantenerse bajo condiciones óptimas de crecimiento en un laboratorio. Esta biopelícula líquida fue posteriormente aplicada a las muestras de hormigón, las que se mantuvieron bajo condiciones óptimas por 56 días. Debido a limitaciones de tiempo, no fue posible realizar otra evaluación paralela bajo condiciones externas. La evaluación del crecimiento de las briofitas fue realizada con base en fotos tomadas a intervalos regulares, las que fueron tratadas posteriormente en Photoshop para aislar las zonas que presentaron crecimiento, convertidas a *bitmap* y analizadas en función de porcentaje de cobertura mediante ImageJ, un *software* de procesamiento de imágenes digitales de dominio público (figura 17).

Figura 16. Matriz de composiciones materiales evaluadas en el experimento

Sample	Aggregate	Cement additive	W/C ratio	Surface retarder
1 (Reg-BA-LW-R)	Regular	Bone ash (10%)	0.5	yes
2 (Reg-BA-LW-S)	Regular	Bone ash (10%)	0.5	no
3 (Reg-BA-HW-R)	Regular	Bone ash (10%)	0.6	yes
4 (Reg-BA-HW-S)	Regular	Bone ash (10%)	0.6	no
5 (Reg-No-LW-R)	Regular	None	0.5	yes
6 (Reg-No-LW-S)	Regular	None	0.5	no
7 (Reg-No-HW-R)	Regular	None	0.6	yes
8 (Reg-No-HW-S)	Regular	None	0.6	no
9 (CEC-BA-LW-R)	Crushed exp. clay	Bone ash (10%)	0.5	yes
10 (CEC-BA-LW-S)	Crushed exp. clay	Bone ash (10%)	0.5	no
11 (CEC-BA-HW-R)	Crushed exp. clay	Bone ash (10%)	0.6	yes
12 (CEC-BA-HW-S)	Crushed exp. clay	Bone ash (10%)	0.6	no
13 (CEC-No-LW-R)	Crushed exp. clay	None	0.5	yes
14 (CEC-No-LW-S)	Crushed exp. clay	None	0.5	no
15 (CEC-No-HW-R)	Crushed exp. clay	None	0.6	yes
16 (CEC-No-HW-S)	Crushed exp. clay	None	0.6	no

Fuente: Veeger, 2020.

Figura 17. Proceso de tratamiento de imágenes para la determinación del porcentaje de cobertura vegetal



Fuente: Veeger, 2020.

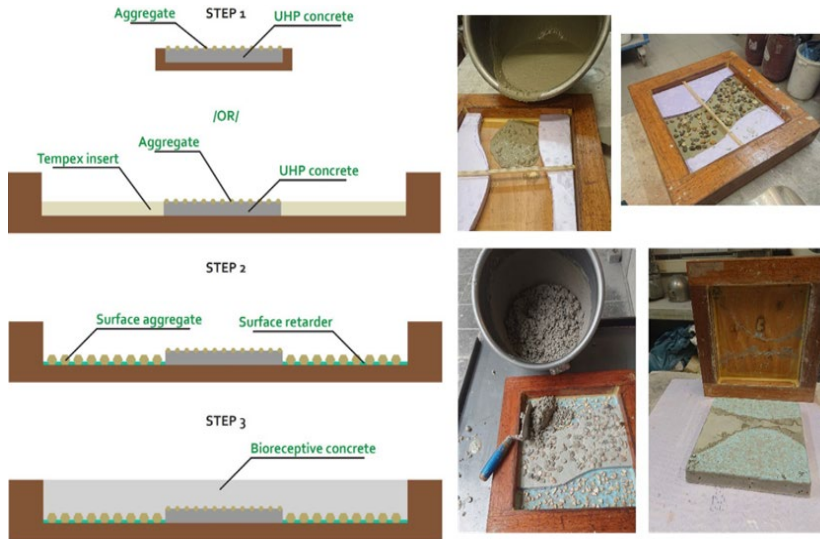
El porcentaje de cobertura al terminar el periodo de medición fue comparado con las características materiales de las muestras, encontrando mejores resultados al utilizar cemento de Portland (en contraste con algunas exploraciones previas). Además, con el uso de retardantes se obtuvieron los mejores resultados, posiblemente al incrementar la permeabilidad de la superficie; seguido por el uso de ceniza de hueso como aditivos. Finalmente, se encontró que la tasa de agua/cemento no tiene mayor impacto, pero debe regularse en función de los agregados considerados en la mezcla.

Estas lecciones fueron posteriormente puestas a prueba en el diseño de un panel de hormigón biorreceptivo para aplicación en fachadas. Dado que el objetivo inicial era poder guiar el crecimiento de briofitas, controlando en cierto grado el diseño del elemento, se consideraron dos tipos de mezcla en el desarrollo del panel: un hormigón biorreceptivo a partir del mejor resultado obtenido durante la evaluación previamente descrita, y una mezcla de hormigón totalmente opuesta, evitando el crecimiento de briofitas en las áreas en que este último fuera aplicado. Cemento de alta resistencia fue elegido como la mezcla no biorreceptiva, por su densidad, baja porosidad y alto contenido de cemento. De esta forma, los paneles desarrollados consideraron zonas biorreceptivas y no biorreceptivas en su diseño, con base en las propiedades materiales consideradas en cada una.

El diseño del panel consideró principalmente hormigón biorreceptivo para mejorar su capacidad de retención de humedad al considerar el espesor completo del elemento; mientras que la zona no biorreceptiva se resolvió mediante un inserto de hormigón de alta resistencia, de superficie lisa, moldeado previamente y luego depositado en el molde del panel junto a otros agregados, para ser finalmente cubierto por el hormigón biorreceptivo por la cara posterior del panel (figura 18). Dos prototipos fueron desarrollados siguiendo este principio, utilizando agregados de distinto grano.

Luego de ser desmoldados y curados por 28 días, para permitir una carbonatación inicial del hormigón, los prototipos fueron inoculados con una biopelícula extraída bajo el mismo procedimiento utilizado anteriormente. Los paneles se mantuvieron en un baño de agua destilada, con la línea de agua justo debajo de la superficie del hormigón, bajo condiciones óptimas para el crecimiento de las briofitas. Se encontró que después de sólo dos semanas bajo estas condiciones, las áreas biorreceptivas de los paneles estaban casi completamente cubiertas de briofitas. Al mismo tiempo, las zonas no biorreceptivas permanecieron libres de crecimiento (figura 19). Es importante destacar que este resultado fue obtenido bajo condiciones óptimas y constantes, por lo que sería necesario analizar el comportamiento de estos paneles en el ambiente exterior para poder evaluar el crecimiento y cobertura de las briofitas en el largo plazo. No obstante, la investigación pudo constatar que al menos en el corto plazo es posible dirigir el crecimiento de organismos biológicos mediante el uso de diferentes propiedades de materiales en el diseño de paneles de hormigón para aplicación en fachadas.

Figura 18. Proceso de construcción de los paneles biorreceptivos



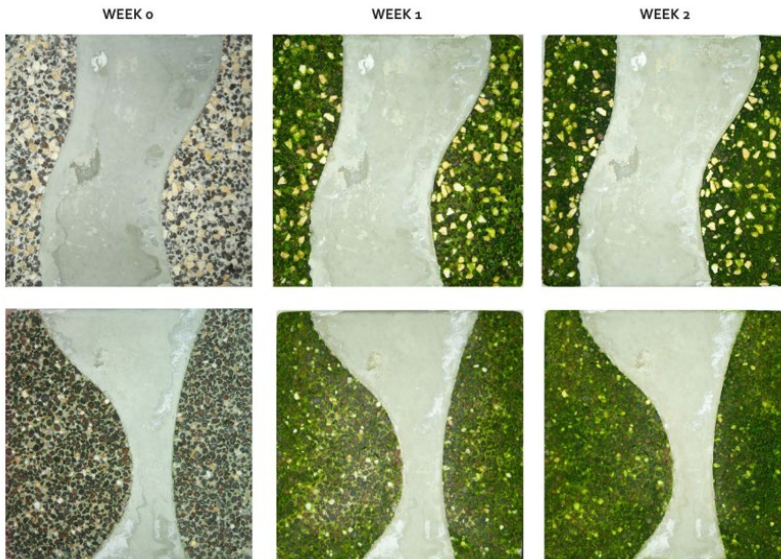
Fuente: Veeger, 2020.

Ambas experiencias descritas se presentan como evidencia del impacto que pueden tener ciertas estrategias arquitectónicas y materiales en el diseño y construcción de fachadas biorreceptivas. Si bien aún serán necesarias más investigaciones para cuantificar en detalle el impacto de coberturas vegetales no vasculares en el entorno construido, éstas se presentan como una alternativa de bajo costo para incrementar la biodiversidad en nuestras ciudades, que puede ser integrada junto a exploraciones estéticas en el diseño de envolventes. Así también, esta exploración plantea otro tipo de preguntas, en comparación con las primeras dos tecnologías discutidas en este capítulo, en relación con el nivel de tecnología que deberíamos integrar en componentes de fachada.

El desarrollo tecnológico detrás de fachadas biorreceptivas se encuentra a nivel de material y, en caso de geometrías complejas, procesos constructivos, que finalmente resultan en productos de fachada de alta simpleza que no requieren mantenimiento para asegurar un desempeño

robusto. Esto plantea un camino distinto a las otras experiencias presentadas al inicio del capítulo, donde los componentes de fachada aumentan en complejidad en busca de una mejora en el desempeño del edificio. Los desafíos medioambientales que debemos enfrentar requieren que exploremos distintos caminos en paralelo, impulsando particularmente la creatividad e innovación en el proceso formativo de nuestros futuros arquitectos y arquitectas. Sin embargo, debemos tener presente que la integración de nuevas tecnologías en soluciones de envolvente debe responder siempre a criterios básicos de sostenibilidad, optimizando el uso de recursos materiales, energéticos y económicos. Así, la factibilidad de una posible solución tecnológica deberá ser siempre evaluada en función de su contribución a la resolución del problema en un contexto determinado, para no terminar agravando el problema al incrementar la complejidad de sistemas de fachada hasta un punto inmanejable.

Figura 19. Crecimiento de briofitas en las zonas biorreceptivas de los paneles propuestos, bajo condiciones óptimas



Fuente: Veeger, 2020.

Conclusiones

En este capítulo se exploró la integración de nuevas posibilidades tecnológicas para el diseño de envolventes en climas cálidos, de manera de adaptar nuestros edificios a escenarios de mayores temperaturas mediante el uso de tecnologías alternativas, amigables con el medio ambiente, y así mitigar en parte las causas del aumento de temperaturas en nuestras ciudades. Los conceptos de fachada presentados corresponden a una selección de proyectos de tesis desarrollados por alumnas y alumnos del Máster de Building Technologies de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Tecnológica de Delft, supervisados por el autor en su rol de coordinador del Grupo de Investigación de Fachadas y Productos Arquitectónicos.

Estas experiencias académicas cumplen un doble propósito. En primer lugar, contribuyen con nuevo conocimiento al desarrollo de nuevas estrategias y tecnologías alternativas, mediante investigaciones sistemáticas y rigurosas que utilizan un amplio abanico de herramientas y métodos, para terminar en aplicaciones concretas que permiten visualizar posibles caminos para el diseño de componentes de fachada. En segundo lugar, y quizá más importante en nuestro rol de educadores, estas exploraciones permiten acercar a futuras arquitectas y arquitectos a soluciones tecnológicas alternativas, distintas a lo que comúnmente se emplea, de forma de incentivar en ellos un pensamiento crítico, creatividad e innovación como parte fundamental del proceso de diseño. Así también, enmarcar el diseño de la envolvente en función de los desafíos medioambientales que enfrentamos, permite poner en contexto el desarrollo tecnológico y arquitectónico actual, promoviendo el rol y la responsabilidad de nuestras futuras arquitectas y arquitectos en el diseño de un entorno construido sostenible y saludable.

Referencias bibliográficas

- ASHRAE. (2011). *Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings*. Atlanta.
- Charoenkit, S., & Yiemwattana, S. (2017). Role of specific plant characteristics on thermal and carbon sequestration properties of living walls in tropical climate. *Building and Environment*, 115, 67-79. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.01.017.
- CIBSE. (2012). *Guide F: Energy Efficiency in Buildings*. Reino Unido: CIBSE.
- Copernicus. (2025). Global Climate Highlights 2024. *The 2024 Annual Climate Summary*. European Commission [publicado en enero de 2025]. Recuperado el 30 de enero de 2025 en <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>
- Cosnier, M., Fraisse, G., & Luo, L. (2008). An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system. *International Journal of Refrigeration*, 31(6): 1051-1062. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2007.12.009
- Cruz, M., & Beckett, R. (2016). Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality. *Architectural Research Quarterly*, 20(1), 51-64. doi: 10.1017/s1359135516000130
- European Commission. (2010). *Directive 2010/31/EU: Energy Performance of Buildings - Recast*.
- Fahriba, K. (2020). *Geometrically articulated bio-receptive concrete facades*. Tesis MSc Architecture, Urbanism and Building Sciences, Building Technologies track, TU Delft.
- Ge, T. S., Cao, W., Pan, X., Dai, Y. J., & Wang, R. Z. (2017). Experimental Investigation on Performance of Desiccant Coated Heat Exchanger and Sensible Heat Exchanger Operating in Series. *International Journal of Refrigeration*, 83, 88-98. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.07.005
- Guillitte, O. (1995). Bioreceptivity: A new concept for building ecology studies. *Science of The Total Environment*, 167(1-3), 215-220. doi: 10.1016/0048-9697(95)04582-1
- Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (2004). *Facade Construction Manual*. Birkhauser.

- Ibáñez-Puy, M., Martín-Gómez, C., Bermejo-Busto, J., Sacristán, J. A., & Ibáñez-Puy, E. (2018). Ventilated Active Thermoelectric Envelope (VATE): Analysis of its energy performance when integrated in a building. *Energy and Buildings*, 158, 1586-1592. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.037
- IPCC/TEAP. (2005). *Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System*.
- Lechner, N. (2014). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*. Wiley.
- Manso, S., De Muynck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., & De Belie, N. (2014). Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth. *Science of The Total Environment*, 481, 232-241. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.059
- OECD/IEA. (2018). *The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning*. International Energy Agency. IEA Publications.
- ONU. (2016). *Decision XXVIII/1 Further Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Kigali, Rwanda.
- Prieto, A., Knaack, U., Auer, T., & Klein, T. (2019). Coolfacade: State-of-the-art review and evaluation of solar cooling technologies on their potential for façade integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 395-414. doi: 10.1016/j.rser.2018.11.015
- Prieto, A., Knaack, U., Auer, T., & Klein, T. (2017). Solar coolfacades: Framework for the integration of solar cooling technologies in the building envelope. *Energy*, 137, 353-368. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.141
- Riangvilaikul, B., & Kumar, S. (2010). An Experimental Study of a Novel Dew Point Evaporative Cooling System. *Energy and Buildings*, 42(5), 637-644. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.10.034
- Solair. (2009). *Solair Project: Increasing the market implementation of Solar Air-Conditioning Systems for small and medium applications in residential and commercial buildings*. Recuperado el 19 de noviembre de 2020 en <http://www.solair-project.eu/>

- Suwannapruk, N. (2019). *Desi-grated: Desiccant Integrated Facade System*. Tesis MSc Architecture, Urbanism and Building Sciences, Building Technologies track, TU Delft.
- Suwannapruk, N., Prieto, A., & Janssen, C. (2020). Desigrated-Desiccant Integrated Façade for the Hot-Humid Climate of Bangkok, Thailand. *Sustainability*, 12(13), 5490. doi: 10.3390/su12135490
- USGCRP. (2017). Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, vol. I. En: Wuebbles, D. J., D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. J. Dokken, B. C. Stewart, & T. K. Maycock (eds.), *U. S. Global Change Research Program*. Washington, DC, doi: 10.7930/J0J964J6
- Veeger, M. (2020). *Bio-receptive concrete façades: Towards the application of bio-receptive concrete in building envelopes*. Tesis MSc Arch., Urbanism and Building Sciences, Building Tech. track, TU Delft.
- Zenteno, Y. (2020). Increasing the performance of a thermoelectric integrated façade through the heat dissipation system. Tesis MSc Arch., Urbanism and Building Sciences, Building Tech. track, TU Delft.

Una revisión sobre la integración de nuevas tecnologías en la envolvente arquitectónica para lograr los objetivos del edificio sostenible en zonas áridas extremas

*José Guerra Ramírez*¹

Resumen

En el presente documento se plantea una revisión de las nuevas tecnologías integradas en la envolvente arquitectónica, como una estrategia clave para alcanzar los objetivos de certificación de edificios sostenibles (CES) de obras emplazados en climas áridos extremos de Chile. Se analiza la problemática específica de las estrategias de envolvente bioclimática para el control de la alta radiación solar, alto flujo luminoso que incide sobre las superficies, dispositivos de sombra y cubiertas vegetales que constituyen una respuesta apropiada de expresión y lenguaje arquitectónico en climas desérticos.

1 Universidad Católica del Norte Antofagasta, Chile. jguerra@ucn.cl

Se propone un marco metodológico de análisis cualitativo de las estrategias de acondicionamiento ambiental en casos de estudio locales, utilizando la matriz cualitativa de sustentabilidad ambiental.² Las estrategias de acondicionamiento ambiental se centran en mejorar la calidad del entorno mediante el uso de técnicas de diseño bioclimático, implementando soluciones pasivas de climatización e integración en la envolvente arquitectónica.

La responsabilidad del sector de la edificación en el consumo energético y cambio climático se hace cada vez más presente en las prioridades, metas y compromisos políticos del sector de la edificación.³ Diseñar edificios sustentables representa una oportunidad para mejorar los estándares de eficiencia energética, implementando la integración de las energías renovables en el diseño de la envolvente arquitectónica en zonas de climas áridos extremos.

Introducción

La innovación de la fachada en edificios en zonas áridas

Las zonas áridas del desierto de Atacama en el norte de Chile presentan desafíos únicos para la construcción sostenible. Las condiciones climáticas demandan soluciones arquitectónicas pasivas que minimicen los requerimientos energéticos para climatización y optimicen el uso de las energías renovables. La envolvente arquitectónica cumple un rol fundamental en este contexto, actuando como la principal interfaz entre el interior y el exterior del edificio. La integración de nuevas tecnologías ofrece la oportunidad de mejorar significativamente el desempeño ambiental de los edificios y un lenguaje contemporáneo de la arquitectura.

El potencial energético solar del desierto de Atacama posiciona al país y la región de Antofagasta como un generador y exportador de

2 Matriz cualitativa de sustentabilidad ambiental UDP.

3 https://www.c40.org/case_studies/cities100-santiago-slashing-smog-with-public-building-enhancements

energía solar, en un breve plazo se han construido más de 76 plantas de generación energética solar, que aportan el 30.8% de la matriz energética. Queda demostrado que estas condiciones han sido una ventaja competitiva para implementar una gran industria de la energía solar fotovoltaica, realizando un aporte significativo en energía limpia para la matriz energética nacional.⁴

Esta revolución a escala de la industria energética, sin embargo, no se ha transferido a la escala residencial, ni al equipamiento público, y son escasos los ejemplos de edificios que integren soluciones basadas en energía solar.

El diseño energético contemporáneo plantea que los cambios en este ámbito están relacionados con la reducción de la demanda de calefacción y refrigeración, en 30%, el aumento de la contribución solar térmica para climatización en 35% y captación en 15% de la demanda eléctrica a través de energía fotovoltaica.⁵ En Chile estos cambios se verifican mayormente en las zonas centro-sur del país, impulsados por los altos costos energéticos y ambientales por uso de la leña para la calefacción de las viviendas y edificios.

En cambio, en el norte del país, a pesar de las excelentes condiciones de radiación solar, no se ha masificado el uso de energías renovables para uso residencial como la refrigeración, calefacción o agua caliente sanitaria. Con el proyecto Casa Energética⁶ desarrollado el año 2023 se planteó como objetivo contribuir al desarrollo del mercado energético residencial, para promover una mayor conciencia energética en la comunidad regional que favorezca la generación de redes y espacios de trabajo para el desarrollo de esta industria.

4 <https://energia.gob.cl/noticias/antofagasta/energia-de-la-region-de-antofagasta>

5 <https://www.acciona.com/es/soluciones/ciudades/areas-actividad/edificacion-eficiente/>

6 Proyecto Casa energética “Programa de Vinculación Energética para el Desarrollo del Mercado Residencial”, Línea 1, “Plan de Vinculación Ciudadana – Mercado Domiciliario de la Región de Antofagasta”, ID 909389-5-LR22.

Envolvente arquitectónica

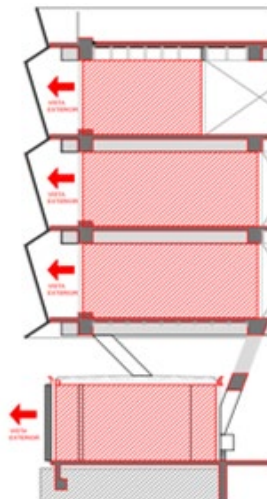
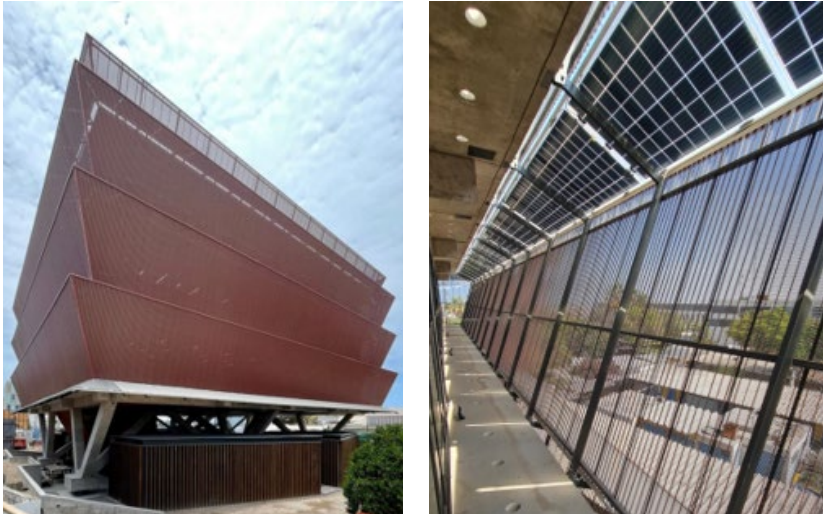
La principal estrategia pasiva de acondicionamiento energético para los edificios en zonas áridas es el diseño de su envolvente, cuyas principales cualidades son la protección de la radiación solar, el diseño de una fachada y/o cubierta ventilada y sistemas de aislación térmica y control de la iluminación natural en el ambiente interior. A ello se le suma como una innovación tecnológica la integración de una envolvente fotovoltaica para la captación solar en fachada norte, poniente y en superficie horizontal para potenciar la autonomía energética del edificio.

En la arquitectura tradicional y contemporánea del norte de Chile existen ejemplos arquitectónicos que responden a estas estrategias pasivas de diseño de la envolvente.⁷ A través de la certificación energética del edificio sustentable constatamos que el diseño energético se asume como un problema arquitectónico integral. Un buen ejemplo de ello es el edificio con certificación CES de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Tarapacá en Arica, su fachada se transforma en un soporte para la generación energética, con aleros fotovoltaicos de paneles bifaciales, monocristalinos doble vidrios sin marco son parte de los elementos constructivos, se construye un envolvente de sombra a partir de la integración de los paneles fotovoltaicos que cumplen además la función de filtro lumínico y fachada ventilada (figuras 1-2-3).

7 Sustentabilidad 2014, 6, 3321-3337; doi: 10.3390 / su6063321 sustentabilidad ISSN 2071-1050 (pdf) *Desempeño térmico de casas tradicionales y de nuevo concepto en el antiguo pueblo de San Pedro de Atacama y alrededores.*

Una revisión sobre la Integración de nuevas tecnologías en la envolvente arquitectónica para lograr los objetivos del edificio sostenible en zonas áridas extremas

Figuras 1, 2 y 3. Fachada, paneles fotovoltaicos, alero fotovoltaico y sección de envolvente con integración arquitectónica. Edificio Facultad de Ingeniería, Universidad de Tarapacá, Arica. Edificio con Certificación CES



Fuente: autor.

El diseño de las fachadas ha evolucionado en conjunto con la expresión de nuevos materiales, nuevos lenguajes arquitectónicos que se expresen en el comportamiento energético de los edificios, en las estrategias de captación y protección de la alta radiación solar, la autonomía y el ahorro energéticos que permiten reducir el impacto de la edificación en el cambio climático.

Normativas chilenas de construcción sustentable

Las nuevas propuestas arquitectónicas que incorporan los conceptos de construcción sustentable y eficiencia energética son parte de la Estrategia Nacional de Construcción Sustentable de Chile, es una iniciativa que busca integrar criterios de sustentabilidad en el sector de la construcción. Esta estrategia fue desarrollada en el marco del Convenio Interministerial de Construcción Sustentable y tiene como objetivo principal orientar el desarrollo de edificaciones e infraestructuras que sean eficientes en el uso de recursos y que promuevan la integración social. Específicamente en el contexto de la integración de nuevas tecnologías en la envolvente arquitectónica para zonas áridas extremas, es importante considerar un conjunto de regulaciones y estándares que, aunque no siempre específicos para zonas áridas, establecen el marco para un diseño sostenible y eficiente. A continuación se detallan las principales normativas más relevantes:

Reglamentación térmica (RT)

- *Ordenanza general de urbanismo y construcciones (OGUC)*. Es el cuerpo legal fundamental que regula la construcción en Chile. Contiene disposiciones sobre acondicionamiento térmico, exigiendo niveles mínimos de aislamiento térmico para muros, techos y pisos, diferenciados por zonas climáticas. Si bien no hay una zonificación específica para “zonas áridas extremas”, las zonas más áridas del norte de Chile (Zona 1 y parte de la Zona 2 según la RT) tienen los requerimientos más exigentes de aislamiento.

- *Norma Chilena NCh. 853*. Establece las exigencias térmicas que deben cumplir las viviendas y otros edificios. Define las zonas climáticas de Chile y los valores de transmitancia térmica (valor U) máximos permitidos para los diferentes elementos constructivos. Esta norma es fundamental para el diseño de la envolvente y la selección de materiales aislantes. La Reglamentación Térmica ha tenido actualizaciones progresivas, buscando aumentar los niveles de exigencia y promover la eficiencia energética.

Calificación energética de viviendas (CEV) y certificación edificios sustentables (CES)

- *Sistema de calificación energética de viviendas en Chile*. Es una herramienta que evalúa el desempeño energético de las viviendas, asignándoles una letra (de la A - G, siendo A la más eficiente). Considera aspectos como la envolvente, los sistemas de calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación. Si bien es voluntaria para viviendas nuevas (excepto para viviendas sociales), es una herramienta útil para evaluar el impacto de las tecnologías en la envolvente.
- *Sistema de Certificación Edificio Sustentable*. Es una herramienta que permite evaluar, calificar y certificar el comportamiento ambiental de edificios de uso público en Chile, tanto nuevos como existentes, sin diferenciar administración o propiedad pública o privada. Promueve la incorporación de estrategias que superan los estándares básicos de sustentabilidad.

Normativas sobre energías renovables

- En Chile, *net metering* y *net billing* no son lo mismo, aunque ambos términos se refieren a la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y su inyección a la red. Ambos sistemas están regulados por la Ley 20.571 en Chile, pero tienen diferencias clave en cómo se manejan los créditos y pagos por la energía generada.

- *Net Metering*. Este sistema permite a los usuarios generar su propia electricidad y compensar su consumo con la energía que producen. Si generan más de lo que consumen, el exceso se inyecta a la red y se les acredita para futuros consumos. En esencia, el medidor puede “retroceder” cuando se inyecta energía a la red.
- *Net Billing*. En este modelo la energía generada y consumida se mide por separado. La energía inyectada a la red se compra a un precio menor que el precio de la energía consumida. Es decir, los usuarios reciben un pago por la energía que inyectan a la red, pero este pago es generalmente menor que el costo de la energía que consumen.

Consideraciones específicas para zonas áridas extremas

Si bien las normativas mencionadas no tienen una sección específica para “zonas áridas extremas”, los siguientes aspectos son cruciales en este contexto climático:

- *Control solar*. La alta radiación solar requiere un diseño cuidadoso de la envolvente para minimizar la ganancia de calor. Esto implica el uso de elementos de sombreado (aleros, persianas, celosías), vidrios de control solar y un buen aislamiento térmico. La RT exige valores bajos de transmitancia térmica, lo cual es aún más importante en zonas áridas.
- *Inercia térmica*. La amplitud térmica diaria requiere soluciones con alta inercia térmica para estabilizar la temperatura interior. Esto se puede lograr con el uso de materiales densos y con alta capacidad calorífica, como el adobe, el hormigón o la piedra, o mediante la integración de materiales de cambio de fase (PCM).
- *Ventilación natural*. El diseño debe optimizar la ventilación natural para refrescar los espacios y reducir la necesidad de refrigeración mecánica. Esto implica considerar la dirección de los vientos predominantes, la forma del edificio y la disposición de las aberturas.

La no integración de los sistemas fotovoltaicos en la envolvente arquitectónica

La integración de sistemas fotovoltaicos en la envolvente arquitectónica representa una estrategia clave para avanzar hacia edificaciones energéticamente eficientes y sostenibles. Sin embargo, aunque existe una normativa adecuada, no hay una exigencia de que las instalaciones fotovoltaicas contemplen la variable de integración arquitectónica, ésta no adopción de una correcta implementación de esta tecnología en el contexto regional pone de manifiesto una serie de problemáticas que impactan al desempeño energético de los edificios, como al cumplimiento de las normativas vigentes en construcción sustentable. La ausencia de una adecuada integración de esta tecnología, en particular en proyectos de viviendas sociales y edificios públicos, limita el impacto positivo que estas construcciones podrían tener en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En ese sentido, se constata que la incorporación de sistemas fotovoltaicos que se realizan en edificios existentes o de nueva construcción, por lo general se limitan a su instalación en las cubiertas, sin considerar si pierden la oportunidad de una integración a otras funciones que pueden asumir estas instalaciones como, por ejemplo:

- *Función dual.* Los sistemas fotovoltaicos integrados en la arquitectura pueden cumplir una doble función. Una activa proporcionando energía, y otra pasiva como muros, cortinas y fachadas ventiladas y elementos de filtro solar de lamas y parasoles.
- *Eficiencia energética.* La integración de paneles solares en diferentes superficies del edificio puede mejorar la eficiencia energética general. En particular en zonas del trópico donde la incidencia es mayor en cubiertas horizontales y fachadas verticales norte y poniente. Así, por ejemplo, estrategias de cubiertas verdes combinadas con paneles solares pueden reducir la temperatura de la superficie en varios grados, mejorando la eficiencia de los paneles.
- *Desafíos: estética y diseño.* La integración arquitectónica de los sistemas fotovoltaicos en fachadas y cubiertas puede mejorar la

estética del edificio y contribuir a un diseño más sostenible. La falta de enfoques de diseño integrador lleva a soluciones aditivas,

Fig. 4. Instalación fotovoltaica en cubierta de Edificio Habitacional de nueva construcción sector Av. Brasil



Fuente: Autor

Fig. 5. Instalación fotovoltaica en cubierta de Edificio de salud con certificación CES



Fuente: Autor

donde los módulos fotovoltaicos se colocan sobre cubiertas o fachadas sin considerar su armonización con la arquitectura.

Fig. 6. Rehabilitación energética Instalación fotovoltaica en cubierta de Hotel Antofagasta



Fuente: Autor

Fig. 7. Instalación fotovoltaica en cubierta Edificio Habitacional nueva construcción



Fuente: Autor

Enfoques teóricos

Edificios cero energía

Los edificios representan en países desarrollados el 40% del consumo de energía primaria; en Chile este porcentaje es del 24%,⁸ gran parte de esa energía se utiliza para las prestaciones de confort de calefacción, refrigeración e iluminación de los edificios. En el marco de la sustentabilidad para el sector de la edificación, ésta es una razón que marca tendencia en el desarrollo de edificios con alta eficiencia energética que buscan el balance cero energías entre generación y demanda.

El concepto de edificio cero energía o edificio de consumo casi nulo (NZEB)⁹ se refiere a un edificio que tiene un alto rendimiento energético,¹⁰ se relaciona con la capacidad de un edificio de transformarse en generador de su propia energía, principalmente integrando energías renovables para su funcionamiento y ofrecer un alto confort térmico y lumínico, pero con bajas necesidades energéticas y altos estándares de eficiencia energética, que incluye estrategias de diseño energético pasivo.

Los edificios cero energía suman al uso de técnicas de climatización natural, sistemas pasivos de protección de la incidencia solar, ventilación natural y masa térmica del edificio, nuevas tecnologías que mejoran la eficiencia energética para conseguir el objetivo de disminuir el consumo de energía y reducir las emisiones contaminantes con el uso de fuentes renovables.

El desarrollo de los edificios sustentables ha ido de la mano del diseño de estándares de certificación y calificación energética aun de carácter voluntario, aportando significativos avances en la calidad constructiva, y

8 https://energia.gob.cl/sites/default/files/01_eficiencia_energetica_en_edificios_publicos_y_programas_relacionados.pdf

9 Los edificios NZEB (*near zero energy buildings*, por sus siglas en inglés) o edificios de consumo casi nulo son edificaciones que cumplen con los más altos niveles de exigencia en sostenibilidad, disminuyendo al máximo el consumo de energía de red y por ende generando ahorro en los costos asociados a la demanda energética.

10 EPBD consultation, review, possible revision and NZEB: a methodological discussion and proposals by eceee. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/22151613>

reducciones en el consumo energético entre el 86 a 47% de los edificios con certificación CES¹¹ (véase tabla 1).

La adopción de estándares de rendimiento energético de los edificios¹² ha permitido, por una parte, que los edificios más eficientes alcancen ahorros medios en consumo de energía de hasta 70% y, por otra, que este tipo de construcciones sostenibles revaloricen los bienes inmuebles hasta en 20%.

Tabla 1. Beneficios de edificios cero energías

Socio culturales	<ul style="list-style-type: none"> • La integración de energías renovables fotovoltaicas ofrece un mejor aprovechamiento cuando se aplican como soluciones comunitarias. • La generación distribuida o generación ciudadana es un aporte a la integración sociocultural.
Estéticos arquitectónicos	<ul style="list-style-type: none"> • La implementación de una fachada solar fotovoltaica es parte de una nueva estética arquitectónica contemporánea. • Los edificios existentes renuevan su imagen con la rehabilitación energética. • La implementación de estrategias de cero energías permite mantener el estándar de confort y calidad del ambiente interior.
Económicos	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la autonomía energética ante situaciones de emergencia. • Permite fortalecer una imagen de sostenibilidad empresarial. • Permite ahorros en la cuenta de la electricidad. • Permite cumplir las metas de reducción de las emisiones de CO₂.
Energético -ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Permite mejoras en los estándares de confort con energías limpias y con menores emisiones de CO₂. • Permite ampliar el uso de tecnologías de producción de energía con fuentes renovables.
Constructivos y tecnológicos materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Ofrece nuevas soluciones de aislamiento e integración de los tradicionales sistemas pasivos. • Incorporación de nuevos materiales. • Alta gestión con estándar de certificación del edificio sustentable.

Fuente: elaboración propia.

¹¹ <http://www.construccion.cl/contenidos/noticias/primera-reportaje-de-consumo-de-energia-real-en-edificios-certificados-ces>
¹² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/txt/?qid=1583922805643&uri=celex:02010l0031-20181224> Directiva europea sobre el rendimiento energético de los edificios.

En un contexto mundial de cambio climático y eficiencia en el uso de recursos energéticos, se plantea un urgente llamado a cambiar y modificar nuestras prácticas hacia una construcción sostenible, con mayor responsabilidad ambiental que se debe materializar en todo su proceso, desde el origen del proyecto, en su etapa de construcción, de uso, y finalmente al término de su vida útil.

La autonomía y eficiencia energética están referidas a que los edificios puedan ser capaces de autogenerar los recursos energéticos que necesitan para funcionar. En los albores de la crisis energética de los años setenta, fue el surgimiento de la arquitectura bioclimática, cuando las soluciones pasivas estaban vinculadas con el acondicionamiento ambiental en función del tipo de clima, el entorno, la forma del edificio, su compacidad, porosidad y esbeltez, las características de la piel o envolvente y su interioridad programática.

El escenario actual de desarrollo sostenible y cambio climático desafía nuevamente a la arquitectura a asumir medidas para reducir el impacto de la edificación. Los estudios del programa de medio ambiente de las Naciones Unidas¹³ demuestran que es posible reducir entre 20 a 50% las emisiones del sector de la edificación usando las tecnologías disponibles en el mercado. La conceptualización de la fachada se debe rediseñar como un elemento de captación energética, transformando la envolvente del edificio en el principal elemento generador de energías limpias.

La integración de los estándares de construcción sustentable CES en Chile ha logrado una mayor calidad energética y ambiental en las construcciones como respuesta a la ley de eficiencia energética, lo que crea una conciencia pública que impacta en una modificación de conductas; esto se ve claramente reflejado en los edificios educacionales, edificios públicos y de salud con certificación CES, que incorporan estrategias pasivas de protección solar y tecnologías de alta eficiencia para confort térmico, lumínico y acústico.

13 United Nations Environment Programmed-Sustainable Buildings & Climate Initiative, 2009.

Es muy necesario comenzar con acciones en las etapas de diseño y de presupuesto que signifiquen un cambio real y visible en el diseño energético de la arquitectura, aprovechando la tecnología, podemos comprometernos con el control de nuestros consumos energéticos e hídricos, lo que significa reeducar nuestras conductas para enfocarnos en una conciencia medioambiental y cuidado de la tierra.

La utilización directa de energía solar en edificios ocurre a través de sistemas solares fotovoltaicos que tienen como objetivo absorber la radiación solar y generar electricidad. Por lo tanto, la instalación de sistemas fotovoltaicos tiene el potencial de generar beneficios económicos para las viviendas y edificios.¹⁴ El avance de la tecnología solar nos permite aseverar que hoy no basta con poner un panel fotovoltaico en el techo del edificio para decir que es una solución sostenible. El proceso de transición energética hacia un modelo más sostenible y autosuficiente para potenciar la generación distribuida, hoy se debe buscar la integración arquitectónica de los paneles fotovoltaicos en la envolvente del edificio. El mercado ofrece distintas tecnologías que permiten integrar los paneles en la fachada, ya sea como aleros, barandas o quiebra vista, y también los paneles se pueden incorporar como una doble piel para implementar un sistema pasivo de fachada ventilada y control de la radiación solar, adicional a la captación energética.

Las tecnologías involucradas en la innovación de la envolvente son: tecnologías pasivas y de conservación de la energía; eficiencia energética en el funcionamiento del edificio; y tecnologías para producción de energía a partir de energías renovables.¹⁵

El desarrollo de la eficiencia energética de edificios, en nuestro país se verifica en la utilización de estrategias de diseño pasivo, validadas para la singularidad climática de cada región, en la aplicación de los estándares de certificación energética de viviendas (CEV) y certificación de edificios

14 Yan Li, & Chunlu Liu. (2018). Techno-economic analysis for constructing solar photovoltaic projects on building envelopes. *Building and Environment*, 127, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.014>

15 Cao, Dai y Liu (2016).

sustentable (CES). En este contexto la implementación de la Ley 20.571 de Generación Distribuida o Net Billings, permite la autogeneración de energía con base en energías renovables no convencionales (ERNC) y cogeneración eficiente.

La entrada en vigor de la Ley de Eficiencia Energética es un incentivo para potenciar el uso obligatorio de las energías renovables en la edificación, siendo además un mercado en alza. El desarrollo de la industria solar es una inversión cada vez más rentable debido a la baja en los costos de proyectos solares,¹⁶ mostrando tasas de retorno de la inversión muy adecuados en todo el país, sólo de 3.7 años en la zona norte como Antofagasta y de 6.4 años en zona sur de Puerto Montt.

La Ley de Generación Distribuida en Chile ha tenido un gran desarrollo; sin embargo, el 85% de la capacidad instalada de proyectos de generación distribuida o Net Billings se encuentra en la zona centro-sur del país. Por ello es relevante que para la zona norte se debiera contemplar una ordenanza solar regional que obligue a los propietarios de edificios de nueva construcción contemplar un porcentaje significativo de la energía que requieren para su funcionamiento, que provenga de energía solar.

En este proceso de transición hacia la arquitectura y construcción sustentable, es la fachada donde mejor se verifica este proceso de cambio, ésta tiene la responsabilidad de cumplir con nuevas prestaciones, es el complejo de la envolvente (techumbre-cubierta + muro-cerramiento + piso-pavimento) la que debe estar diseñada para controlar la transferencia de calor, de adentro hacia afuera y la carga de calor solar de afuera hacia adentro de manera eficiente (tabla 2).

Tabla 2. Integración de diseño energético según etapa de construcción de un edificio

<i>Etapas</i>	<i>Diseño</i>	<i>Construcción</i>	<i>Uso</i>	<i>Demolición</i>
---------------	---------------	---------------------	------------	-------------------

16 <https://tritec-intervento.cl/proyectos-solares-en-el-sur-de-chile-se-vuelven-cada-dia-mas-atractivos/>

Flexibilidad de diseño	Participativo y comunitario.	Integración de energías renovables en edificios nuevos.	Uso de energías renovables en espacios comunes.	Rehabilitación energética edificios existentes.
Alta eficiencia y autonomía energética	Sistemas pasivos y activos de alta eficiencia.	Edificio con certificación energética CES.	Gestión comunitaria de ahorro de energía.	Gestión de residuos y reutilización de materiales.
Resiliencia y adaptación a los cambios	Diseño contempla riesgos y autonomía energética.	Control de calidad constructiva prefabricación.	Materiales de baja emisión de carbono.	Ciclo de vida de los materiales, tecnologías de ecodiseño.
Responde a las necesidades de las personas	Diseño con gestión energética comunitaria.	Medidas de gestión y control del consumo energético comunitarias.	Mantenimiento y operación que contemple a usuarios, jardín vertical.	Estrategias de extensión de vida útil de edificación.

Fuente: elaboración propia.

Estrategias bioclimáticas integradas en la envolvente de edificios contemporáneos

Existe integración arquitectónica cuando los módulos cumplen una doble función energética y arquitectónica y además sustituyen elementos constructivos convencionales o son elementos constituyentes de la composición arquitectónica.

La fachada como generadora, captadora y productora de energía, permite integrar los paneles fotovoltaicos en la propia ventana, incorpora una solución pasiva como muro ventilado o doble fachada, aleros fijos o móviles, elemento de control de la radiación solar en superficies horizontales y verticales, filtros o tamiz de control de la luz natural en la cubierta como cobertizos, sombreadores, todas soluciones que aportan al desarrollo de la arquitectura sustentable y adaptación al cambio climático.

La fisonomía de la envolvente arquitectónica asume nuevas formas y funciones; así, por ejemplo, el muro verde, jardín vertical ayudan a reducir el exceso de dióxido de carbono (CO_2), la fachada se transforma en un soporte para la agricultura urbana, y cultivar nuestros alimentos; está demostrado que el diseño energético de los edificios tiene impacto y funciona. En climas áridos extremos permite disminuir la climatización activa y costos de consumo eléctrico si el diseño contempla estrategias pasivas como ventilación nocturna, ventilación cruzada, ventilación convectiva de una chimenea solar, sistemas de protección solar, y fachada ventilada para evitar el sobrecalentamiento.

Fachada muro cortina fotovoltaico en invernadero adosado

En la ciudad más austral del mundo, Punta Arenas, se implementó una fachada fotovoltaica integrada al muro cortina que genera 5,000 kWh de energía solar con una potencia de 8.6 kWp. El muro cortina fotovoltaico con tecnología de silicio monocristalino se integra a un espacio invernadero adosado que cumple la función de captación activa y calefacción pasiva, contribuyendo a la eficiencia y sostenibilidad del recinto de salud.

La fachada obtiene la semitransparencia deseada por la disposición y dimensión de las células monocristalinas cuadradas, las cuales dejan un espacio de entre líneas horizontales. Esta banda horizontal transparente se extiende a lo largo de toda la fachada, produciendo un efecto de variado tamiz de la iluminación natural en el interior.

Figs. 8 y 9. Fachada fotovoltaica integrada en ventana termopanel en edificio salud. Punta Arenas Chile

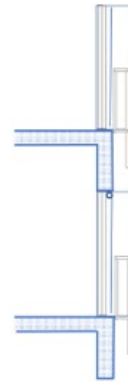
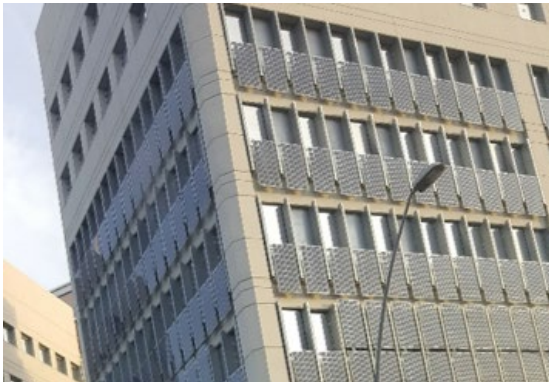


Fuente: Autor

Rehabilitación energética con paneles fotovoltaicos integrados a la fachada

La instalación de paneles fotovoltaicos en el edificio de Policía de los Mossos d'Esquadra de Plaça España en Barcelona, es un ejemplo de integración y rehabilitación arquitectónica diseñado por MBM-Arquitectes. Los paneles están situados en la parte inferior de la ventana, no tienen la función de sombreadero ni de barandilla, pero sí que crean una composición de fachada integrada y de innovación a este edificio de oficinas existente.

Figs. 10 y 11. Rehabilitación energética con Integración de placas fotovoltaicas de Edificio existente, detalle de la sección baranda. Ubicado en Barcelona, España



Fuente: Autor

Fachada celosías parasoles fotovoltaica Centro Sanitario del Alzheimer Madrid

El proyecto incorpora parasoles fijos o lamas fotovoltaicas situadas por encima de las ventanas en forma de células de vidrio laminado, actúan de primera piel captadora y de sombra, logrando optimizar las funciones arquitectónica y eléctrica, convirtiendo a la envolvente del edificio en área activa de producción eléctrica, Building Integrated Photovoltaics (BIPV)¹⁷.

La propia estructura de las lamas y de los montantes verticales que soportan el conjunto deben incorporar registros para la inserción del cableado de conexión, tanto para conectar los módulos entre sí, como para guiar su entrada en el edificio.

17 <https://www.eadic.com/eficiencia-energetica/>
<https://www.envolventesarquitectonicas.es/project/centro-alzheimer/>

Figs. 12 y 13. Envolvente y detalle de arquitectura integrada como lamas fotovoltaicas de captación y sombra en edificio salud. Madrid, España



Fuente: Autor

Fachada ventilada de cerámica con parasoles fotovoltaicos Edificio 70 del CIEMAT Madrid

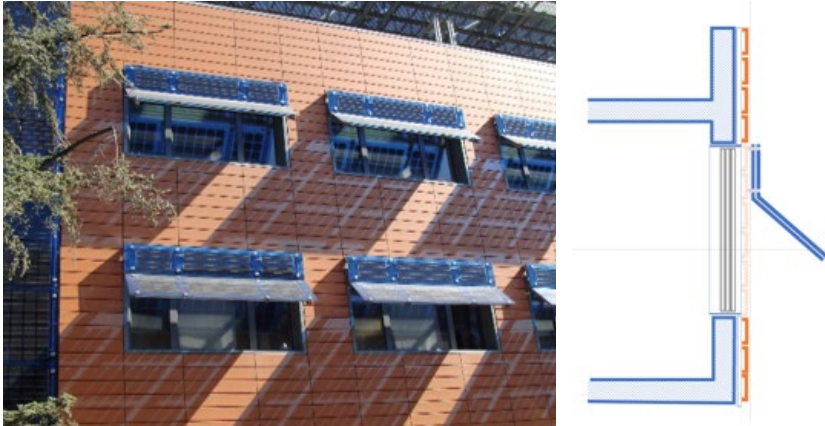
Es un edificio de investigación del proyector Arfrisol, que incorpora diversas estrategias bioclimáticas pasivas, una fachada ventilada de placa cerámica, diferentes tipos de vidrio y espesor de aislamiento en función de la orientación, sombreados fotovoltaicos en ventanas integradas a la fachada sur y de cubierta con una gran pérgola que además es soporte para energía solar térmica.¹⁸

Las marquesinas y toldos para sombreado de ventanas y superficies acristaladas construidos a base de materiales fotovoltaicos ofrecen soluciones muy creativas y a su vez, son una perfecta vía para realzar los diseños de la fachada. Además, sería recomendable incluir un sistema

18 <http://construible.blogspot.com/2013/01/edificio-c-ddi-sp3-ed70-ciemat-moncloa.html>
<https://docplayer.es/18543426-El-contenedor-demostrador-de-investigacion-sp3-arfrisol-un-edificio-de-energia-casi-nula.html>
<https://static.construible.es/media/2016/12/18-roberto-bosqued-ciemat.pdf>

de ventilación para disminuir la temperatura de los paneles, sobre todo durante los meses de verano.

Figs. 14 y 15. Fachada fotovoltaica y detalle de la integración de alero en edificio de CIEMAT Madrid, España



Fuente: Autor

Figs. 16. Alero de sombra, sistema pasivo tradicional integrado a fachada de edificio. María Elena, Chile



Fuente: Autor

Figs. 17. Sistema sombreado fijo integrado a fachada norte y poniente CESFAM, Antofagasta, Chile



Fuente: Autor

Cubierta fotovoltaica estación central de trenes de Berlín

La impresionante estación de trenes de Berlín no sólo lo es por su tamaño, sino que aun más por sus naves de cristal con células solares fotovoltaicas encapsuladas o embebidas entre placas de vidrio laminar. Su diseño puede determinar la densidad, el tipo y el color de las células fotovoltaicas. El vidrio frontal posee bajo contenido en hierro y elevado factor de transmisión. Los módulos pueden integrarse en un acristalamiento aislante, que tiene la posibilidad de incorporar una capa de baja emisividad y una o dos cámaras de aire o de gas según requerimientos de aislamiento.¹⁹

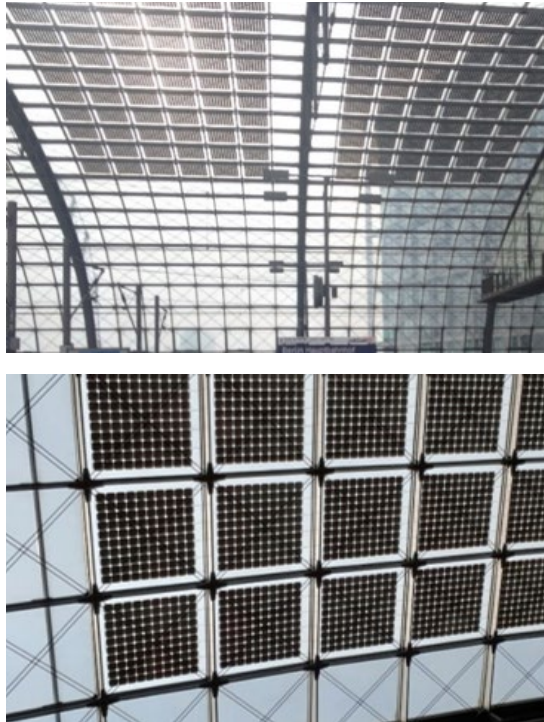
¹⁹ <https://tectonica.archi/materials/celulas-fotovoltaicas-embebidas-en-vidrio-laminar/>

Fachada fotovoltaica de alto rendimiento integrada al muro como elemento constructivo de revestimiento

El edificio del Ministerio Federal de Educación e Investigación en la ciudad de Berlín se diseñó con el más alto estándar de tecnología fotovoltaica en la cubierta y en la fachada. Ello permite la autogeneración energética con reducción de emisiones contaminantes de protección energética y climática.

En este caso la fachada fotovoltaica se integra al muro como elemento de revestimiento cromático.

Figs. 18 y 19. Paneles fotovoltaicos integrados a cubierta de vidrio en estación trenes Berlín, Alemania



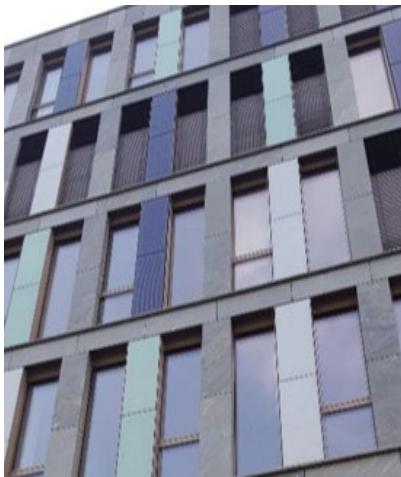
Fuente: Autor

*La fachada con jardín vertical integrado a la fachada*²⁰

El uso de muros con vegetación, jardines y arborización alrededor de los edificios es una alternativa pasiva muy extendida en climas mediterráneos y áridos, permite reducir la ganancia de calor y la demanda de refrigeración e incorporar humedad al ambiente, la cual no supera el 30%.

Las soluciones son diversas y a distintas escalas, desde entramados para cubrir las fachadas con enredaderas o plantas colgantes, últimamente está vigente el concepto de “bosque vertical” con grandes árboles y vegetación de diferentes especies que incorporan la naturaleza y la luz filtrada al interior de los espacios.

Figs. 20 y 21. Paneles fotovoltaicos integrados a cubierta de vidrio en estación trenes Berlín, Alemania



Fuente: Autor

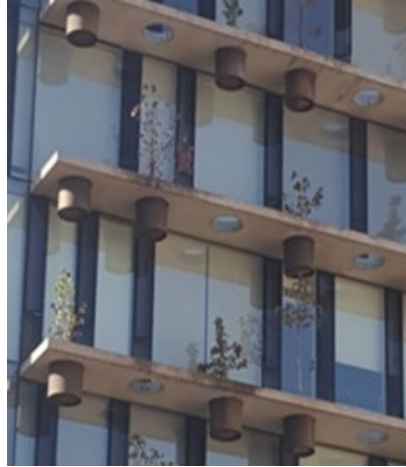
20 <https://ovacen.com/jardines-verticales/>
https://www.arquitecturaydiseno.es/pasion-eco/precht-joven-estudio-que-reconecta-arquitectura-y-naturaleza_3832
<https://www.terapiaurbana.es/wp-content/uploads/2011/04/Especial-Entre-Espacios-pag5.jpg>
<https://www.terapiaurbana.es/sistemas-de-terapia-urbana-en-revista-cic-arquitectura-y-construccion/>

22. Fachada jardín vertical integrada a muro en edificio habitacional. Tokio, Japón



Fuente: Autor

Fig. 23. Fachada jardín vertical integrada a muro en edificio privado. Las Condes, Chile



Fuente: Autor

24. Fachada jardín vertical integrada a muro en edificio educacional. Santiago, Chile



Fuente: Autor

Fig. 25. Fachada treillage de madera soporte de jardín integrada a muro. María Elena, Chile



Fuente: Autor

Fachada doble piel o fachada ventilada

Crean una cámara de aire entre la capa exterior y el aislamiento, reduciendo la ganancia de calor por radiación solar y mejorando el aislamiento térmico.

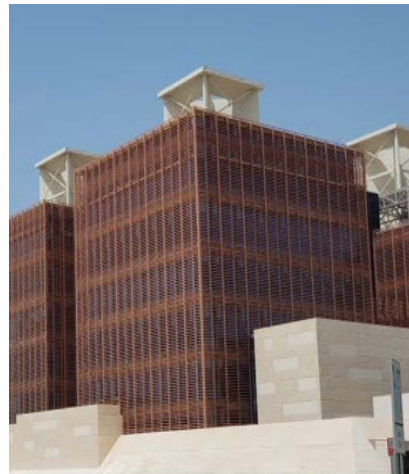
La fachada de paredes ventiladas o doble piel permite una gran diversidad de filtros solares, últimamente los más utilizados por su valor estético son las fachadas revestidas con cerámica color terracota, las que cumplen los requerimientos de diseño energético pasivo y funcional, ofreciendo una solución a las demandas de alto rendimiento térmico, protección solar y acústica. Los diversos estudios realizados al respecto permiten afirmar que la fachada ventilada permite reducciones de 20 a 30% en el ahorro energético.

26. Fachada ventilada cerámica integrada a muro en casa habitación. Barcelona, España



Fuente: Autor

Fig. 27. Fachada ventilada cerámica integrada a envolvente tradicional en edificio público. Nuevo Palacio Justicia de Abu Dabi, EAU



Fuente: Autor

Vidrios de baja emisividad y control solar

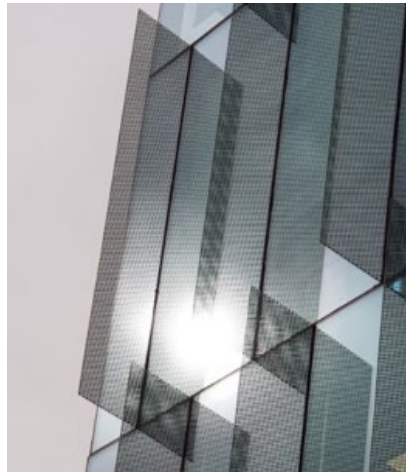
Reducen la transferencia de calor por radiación y conducción, mejorando el aislamiento térmico y el confort visual.

28. Fachada muro cortina doble piel ventilada integrada a en edificio público. Santiago, Chile



Fuente: Autor

Fig. 29. Fachada muro cortina doble piel ventilada integrada a en edificio público. Santiago, Chile



Fuente: Autor

Sistemas de sombreadamiento inteligentes

Controlan la entrada de radiación solar en función de la posición del sol y las condiciones climáticas, maximizando el confort lumínico y minimizando la ganancia de calor.

Es una fachada con componentes dinámicos o variables controlados por sistemas remotos o también por propia operación de los usuarios, están diseñadas con base en módulos que ofrecen una alta integración arquitectónica. En las imágenes se presentan dos soluciones que actúan como elementos de control de la radiación solar, el primero lo hace de manera automática según el control de sensores, y la segunda lo hace directamente por la operación del usuario.

Estos componentes ofrecen control de la radiación solar, permitiendo generar sombra y ventilación natural, así como una adecuada integración arquitectónica de la fachada. En términos materiales se pueden combinar estas soluciones con componentes fotovoltaicos, adaptando la solución a la captación energética.²¹

Análisis de casos de estudio


Se analizan tres casos de edificios de reciente construcción en Antofagasta, donde se constata que el diseño de la fachada no contempla los aspectos de innovación indicados en el párrafo anterior. Las imágenes termográficas nos permiten relevar los problemas de aislación térmica, puentes térmicos y de confort de temperatura interior y eficiencia energética al no considerar elementos de protección solar adecuados para las condiciones del clima desértico.

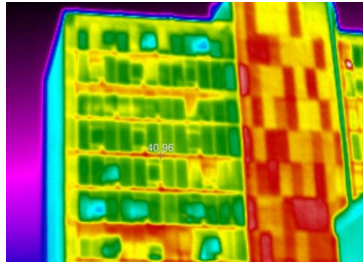
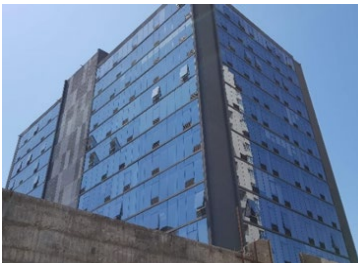
Se adapta como marco metodológico de análisis la matriz cualitativa de sostenibilidad ambiental,²² considerando aspectos como el confort térmico, la eficiencia energética y el uso de materiales, como también las pérdidas energéticas por puentes térmicos y puntos singulares, utilizando la termografía como herramienta auxiliar para la obtención de consideraciones de diseño.

21 Zoltan Nagy, Bratislav Svetozarevic, Prageeth Jayathissa, Moritz Begle, Johannes Hofer, Gearoid Lydon, Anja Willmann, & Arno Schlueter. (2016). The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes. *Frontiers of Architectural Research*, 5(2), 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.03.002>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263516300048>)


22 Matriz cualitativa de sustentabilidad ambiental UDP.

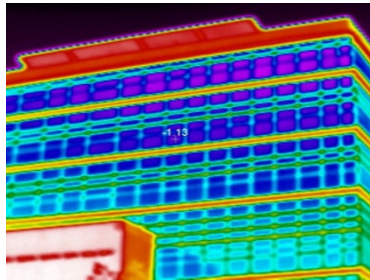
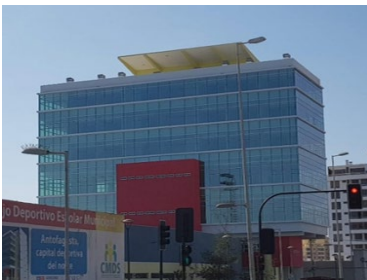
Análisis termográfico de fachadas edificios Antofagasta


CASO 1	Edificio de oficinas
<i>Parámetro</i>	<i>Descripción</i>
Ubicación	Antofagasta, Chile
Clima	Desértico costero (alta radiación solar, baja humedad, fuerte influencia marina)
Orientación	Norte
Material de fachada	Vidrio
Condición del entorno	Urbana (isla de calor, reflejo de superficies circundantes, contaminación) 
Temperatura exterior	18-25°C (promedio diario), hasta 35°C en superficies expuestas
Temperatura superficial	Vidrio: 35-50°C (según tipo de vidrio y sombreado)
Patologías detectadas	Alta absorción y radiación térmica- Efecto invernadero en interiores- Posibles deslumbramientos y reflejos no deseados
Recomendaciones	Uso de vidrios de control solar (baja emisividad, reflectantes o con doble acristalamiento)- Incorporación de sombreado (aletas, parasoles, serigrafía en vidrio)- Uso de ventilación cruzada para disipar calor interior



Una revisión sobre la Integración de nuevas tecnologías en la envolvente arquitectónica para lograr los objetivos del edificio sostenible en zonas áridas extremas

CASO 2	Edificio de oficinas
<i>Parámetro</i>	<i>Descripción</i>
Ubicación	Antofagasta, Chile
Clima	Desértico costero (alta radiación solar, baja humedad, fuerte influencia marina)
Orientación	Norte
Material de fachada	Vidrio
Condición del entorno	Urbana (isla de calor, reflejo de superficies circundantes, contaminación) Av Angamos 
Temperatura exterior	18-25°C (promedio diario), hasta 35°C en superficies expuestas
Temperatura superficial	Vidrio: 35-50°C (según tipo de vidrio y sombreado)
Patologías detectadas	Alta absorción y radiación térmica- Efecto invernadero en interiores- Posibles deslumbramientos y reflejos no deseados
Recomendaciones	Uso de vidrios de control solar (baja emisividad, reflectantes o con doble acristalamiento)- Incorporación de sombreado (aletas, parasoles, serigrafía en vidrio)- Uso de ventilación cruzada para disipar calor interior



CASO 3	Edificio de oficinas
<i>Parámetro</i>	<i>Descripción</i>
Ubicación	Antofagasta, Chile
Clima	Desértico costero (alta radiación solar, baja humedad, fuerte influencia marina)
Orientación	Norte
Material de fachada	Vidrio
Condición del entorno	Urbana (isla de calor, reflejo de superficies circundantes, contaminación) Sector Av Barsil 
Temperatura exterior	18-25°C (promedio diario), hasta 35°C en superficies expuestas
Temperatura superficial	Vidrio: 35-50°C (según tipo de vidrio y sombreado)
Patologías detectadas	Alta absorción y radiación térmica- Efecto invernadero en interiores- Posibles deslumbramientos y reflejos no deseados
Recomendaciones	Uso de vidrios de control solar (baja emisividad, reflectantes o con doble acristalamiento)- Incorporación de sombreado (aletas, parasoles, serigrafía en vidrio)- Uso de ventilación cruzada para disipar calor interior

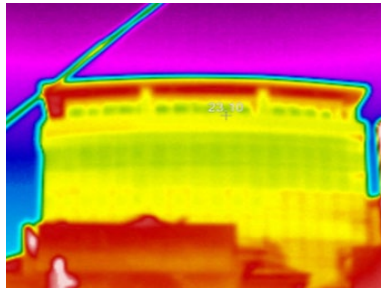
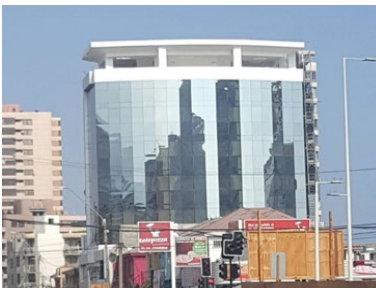


Tabla 3. Síntesis de análisis cualitativo sobre la adopción de cualidades de sostenibilidad de la envolvente arquitectónica

ELEMENTO		TIERRA			
<i>Concepto</i>		<i>Materiales: origen y tipologías</i>			
CRITERIOS	ESTRATEGIA	COMENTARIOS	CASO 1	CASO 2	CASO 3
1. Materiales reciclados certificados	Privilegia la incorporación de materiales según su producción y ciclo de vida	Incorpora elementos prefabricados, reciclados	Privilegia la fachada de vidrio sin elementos de protección solar en todas sus caras	No se incorporan materiales reciclados	Tipologías no adaptadas a las condiciones climáticas de Antofagasta
2. materiales locales Naturales o Artificiales reciclados	Privilegia la incorporación de materiales naturales o locales	Utiliza materiales autóctonos, privilegia el uso de madera Mejora el estándar de confort para los habitantes de la comunidad	No se contemplan materiales naturales como madera		
ELEMENTO		AIRE			
<i>Concepto</i>		<i>Materiales: origen y tipologías</i>			
CRITERIOS	ESTRATEGIA	COMENTARIOS	CASO 1	CASO 2	CASO 3
3. Aislación frío /calor pasivo.	Se utiliza el diseño pasivo procurando condiciones térmicas adecuadas al clima.	Dimensionamiento y ubicación de superficies vidriadas, doble piel.	Mayores pérdidas de calor debido a propiedades poco aislantes del panel.	Claramente visibles en juntas, esquinas y puntos de unión. Aparecen como líneas de alta temperatura indicando pérdidas de energía.	
4. Calefacción / refrigeración activa y renovables.	Se utilizan sistemas de calefacción o refrigeración con base en energías renovables.	Geotermia, muro trombre.	No se aplica.		

5. Ventilación y humedad natural.	Se considera una renovación de aire eficiente y ventilación natural.	Ventilación cruzada, patio Interior.	Mejora de la calidad del ambiente interior.		
6. Ventilación artificial renovable.	Se utilizan dispositivos de ventilación y humedad con base en energías renovables o mecánicas.	Sistemas de ventilación mecánica.			
ELEMENTO		ENERGÍA			
<i>Concepto</i>		<i>Materiales: origen y tipologías</i>			
CRITERIOS	ESTRATEGIA	COMENTARIOS	CASO 1	CASO 2	CASO 3
7. emplazamiento / Distribución programática	Se distribuye y dimensiona el programa en planta de acuerdo con el confort visual	Implementación de iluminación natural	Distribución térmica: Variaciones significativas de temperatura en toda la superficie. Inconsistente, con puntos calientes y fríos distribuidos irregularmente.		
8. Iluminación natural / sombreado	Se favorece la iluminación natural y/o protecciones solares de diseño eficaz de envolventes, respondiendo a las necesidades lumínicas del uso interior	Iluminación natural por medio del diseño de envolventes, pieles, sombreaderos,			
9. Ahorro y reducción consumo energético	Se especifican tecnologías de ahorro y reducción del consumo energético	Artefactos bajo consumo energético	<p>Pérdidas de calor concentradas alrededor de ventanas, puertas y juntas.</p> <p>Elevado consumo energético para mantener temperatura interna</p> <p>Aislamiento insuficiente visible en termogramas, mayor transferencia de calor.</p> <p>Mejorar la plusvalía de los edificios nuevos y rehabilitados</p>		

10. Producción con energías renovables	Se produce y/o utiliza energía eléctrica o calórica de una fuente renovable local	Energías renovables no contaminantes, paneles fotovoltaica	No hay aplicaciones de Energías renovables		
ELEMENTO		VIDA			
<i>Concepto</i>		<i>Materiales: origen y tipologías</i>			
CRITERIOS	ESTRATEGIA	COMENTARIOS	CASO 1	CASO 2	CASO 3
11. Integración biodiversidad y paisaje	Se integra con el paisaje, crea biotopos y no desequilibra la biodiversidad del lugar	Generación ecosistemas frágiles, Corredores ecológicos	No se presentan estrategias de integración con el paisaje		
12. Introducción de vegetación local	Se considera en su diseño la incorporación de vegetación endógena	Patios interiores, fachadas verdes	No se contemplan fachadas verdes, ni patios interiores		

Conclusiones

La presente revisión permite actualizar los conceptos contemporáneos de la fachada y conocer las brechas existentes en el diseño de la envolvente en edificios de zonas áridas; el estudio constata que las actuales instalaciones fotovoltaicas en los edificios de reciente construcción en la región de Antofagasta se implementan como estructuras sobrepuestas adaptadas a las cubiertas.

El estudio establece como un desafío recurrente, traspasar la tecnología desarrollada en las grandes plantas fotovoltaicas en la región de Antofagasta, escalando al nivel de los edificios residenciales y equipamiento público. Antofagasta, como “capital solar”, requiere que su imagen evolucione hacia una ciudad sustentable y conectada con las tecnologías de punta que se desarrollan en los principales sectores productivos de la región; las experiencias de innovación y sustentabilidad de industrias de la minería, astronomía y energía debieran transferirse y reflejarse en la fisonomía y modelo de una ciudad contemporánea en el desierto.

La conceptualización de la fachada como elemento constructivo de la envolvente arquitectónica de los edificios en zonas áridas, implica

rediseñar la fachada como un elemento de captación y control solar, transformando la envolvente del edificio en el principal dispositivo generador de la energía limpia.

La planificación urbana y la normativa de construcción deben concebir a los edificios como activo estratégico para una ciudad con alta calidad de vida y creatividad para sus ciudadanos. Diseñando a escala las necesidades locales, aplicando los nuevos estándares de confort, con aprovechamiento de las energías renovables, forman parte de las soluciones posibles.

Las instalaciones fotovoltaicas más habituales que se pueden encontrar en los edificios de la ciudad de Antofagasta son estructuras montados en las cubiertas o terrazas de los edificios; en general, no se destacan por la integración a la envolvente arquitectónica, se presentan como armazones no integradas a la arquitectura, sobrepuestas a las cubiertas, son parte de los elementos agregados al edificio para su funcionamiento y operación. Por lo cual hay una oportunidad de innovación, gestión en el diseño, trabajo coordinado de profesionales para el desarrollo del diseño energético integral.

El desarrollo de nuevas tecnologías en la envolvente arquitectónica ha revolucionado la construcción sostenible, ofreciendo múltiples beneficios tanto para el medio ambiente como para los ocupantes de los edificios.

La importancia de las nuevas tecnologías en la envolvente arquitectónica y metodologías destacadas radica en lo siguiente:

- *Reducción del consumo energético.* Al optimizar el aislamiento térmico y la gestión de la luz natural, se disminuye la demanda de calefacción y refrigeración, lo que se traduce en menores costos operativos y una huella de carbono reducida.
- *Mejora del confort interior.* Los sistemas inteligentes y los materiales innovadores permiten crear ambientes interiores más saludables y agradables, con una calidad del aire interior superior y una mayor estabilidad térmica.
- *Aumento de la durabilidad de los edificios.* Los materiales y sistemas constructivos más resistentes a los agentes externos pro-

longan la vida útil de los edificios y reducen las necesidades de mantenimiento.

- *Mayor flexibilidad y adaptabilidad.* Las tecnologías inteligentes permiten una mayor personalización de los espacios y una adaptación a las necesidades cambiantes de los usuarios.
- *Contribución a la economía circular.* El uso de materiales reciclados y biodegradables, así como la optimización de los recursos, promueve una economía más circular y sostenible.

Tabla 4. Resumen de las principales tendencias en fachadas fotovoltaicas

<p>Materiales innovadores</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Aislamiento térmico.</i> Se utilizan materiales con mayor capacidad de aislamiento, como la lana de roca, el poliestireno expandido y nuevos materiales a base de biomasa. • <i>Fachadas ventiladas.</i> Permiten una mejor regulación térmica y reducen la condensación. • <i>Vidrios inteligentes.</i> Controlan la entrada de luz y calor, adaptándose a las condiciones climáticas. • <i>Materiales reciclados y biodegradables.</i> Se integran en la construcción para reducir el impacto ambiental.
<p>Sistemas inteligentes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Sensores.</i> Monitorean condiciones como temperatura, humedad y luz para optimizar el funcionamiento de los sistemas. • <i>Automatización.</i> Permite controlar de forma eficiente la iluminación, calefacción y ventilación. • <i>Energías renovables.</i> Integración de paneles solares fotovoltaicos y térmicos en la fachada para generar energía limpia.
<p>Diseño bioclimático</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Orientación y forma del edificio.</i> Se optimiza para aprovechar la luz natural y reducir la ganancia solar en verano. • <i>Protección solar.</i> Uso de elementos como aleros, celosías y vegetación para evitar el sobrecalentamiento. • <i>Ventilación natural.</i> Se diseñan sistemas para aprovechar las corrientes de aire y reducir el uso de sistemas mecánicos.
<p>Tecnologías emergentes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Impresión 3D.</i> Permite crear elementos arquitectónicos personalizados y con mayor eficiencia energética. • <i>Nanotecnología.</i> Se aplica en el desarrollo de materiales con propiedades mejoradas, como autolimpieza y resistencia. • <i>Bioluminiscencia.</i> Se investiga su uso para crear fachadas luminosas sin consumo de energía eléctrica.

Referencias bibliográficas

- Caamaño Martín, Estefanía. (1998). *Edificios fotovoltaicos conectados a red: Características y posibilidades energéticas*. (Tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid-Instituto de Energía Solar.
- Cao, Dai, y Liu. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 128, 198-213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>
- Cereceda, G., Bastias, R., y Barra, A. (2012). Revisión de indicadores de comunicación de aspectos ambientales para el consumo de productos sustentables. *Hábitat Sustentable*, 2(2), 73-87. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/422>
- Elisabeth Gratia, André de Herde. (2004). Optimal operation of a south double-skin façade. *Energy and Buildings*, 36(1), 41-60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.06.001> (<http://www.science-direct.com/science/article/pii/S0378778803000914>)
- Fernández Solla, Ignacio, & Martín Chivelet, Nuria. (2007). *La envolvente fotovoltaica en la arquitectura*. Barcelona: Reverté.
- González-Cruz, E. (2018, octubre). *Sistemas pasivos de climatización y los edificios de consumo de energía casi nulo (EECN-NZEB)*. Conferencia: 2^{do} Seminario Internacional “Arquitectura Bioclimática y Sustentable en Europa”. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco.
- Haggag, M., Hassan, A., & Qadir, G. (2017). Rendimiento energético y económico de la fachada de un edificio a la sombra de las plantas en un clima cálido y árido. *Sostenibilidad*, 9(11), 2026. <https://doi.org/10.3390/su9112026>
- Hanselka H., y Nuffer, J. (2009). Materiales inteligentes. En: Bullinger, H. J. (Ed.), *Guía de tecnología*. Berlín/Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88546-7_10
- Iglesias P., Cristina. (2013). Integración arquitectónica de los sistemas fotovoltaicos para captación de energía solar. *Greencities & Sostenibilidad: Inteligencia aplicada a la sostenibilidad urbana*

- (pp. 1-16). Recuperado de Convocatoria de comunicaciones y 1ª Bial de Edificación y Urbanismo Sostenible, Málaga España.
- Nagy, Z., Svetozarevic, B., Jayathissa, P., Begle, M., Hofer, J., Lydon, G., Willmann, A., & Schlueter, A. (2016). The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes. *Frontiers of Architectural Research*, 5(2), 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.03.002>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263516300048>
- Prasad, D., & Snow, M. (2005). *Designing with Solar Power: A source book for Building Integrated Photovoltaics*. Victoria: Images Publishing.
- R. C. G. M., Loonen, M., Tr ka, D., Cóstola, J. L. M., & Hensen. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483-493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002670>)
- Ríos González, Isabel. (2020). Actuales desafíos en ahorro y eficiencia energética en España: Incidencia en la protección ambiental. *e-Pública [online]*, 4(2), 353-388. Disponible en: http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2183-184X2017000200016&lng=pt&nrm=iso
- United Nations Environment Programmed. (2009). *Sustainable Buildings & Climate Initiative*. <https://www.eadic.com/eficiencia-energetica/> <https://www.envolventesarquitectonicas.es/project/centro-alzheimer/>
- Valdés-González, Gonzalo D., Rodríguez-Ponce, Emilio R., Miranda-Visa, Christian, & Lillo-Sotomayor, Jorge. (2020). Estudio de viabilidad de sistemas fotovoltaicos como fuentes de energía distribuida en la ciudad de Arica, Chile. *Información Tecnológica*, 31(3), 249-256. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000300249>
- Yan, Li, & Chunlu, Liu. (2018). Techno-economic analysis for constructing solar photovoltaic projects on building envelopes. *Building and Environment*, 127, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.014>. http://www.publicacions.bcn.es/b_mm/ebmm67/48_MartorellQCcas.pdf

Referencias electrónicas


- https://www.c40.org/case_studies/cities100-santiago-slashing-smog-with-public-building-enhancements
- <https://energia.gob.cl/noticias/antofagasta/energia-de-la-region-de-antofagasta>
- <https://www.accion.com/es/soluciones/ciudades/areas-actividad/edificacion-eficiente/>
- https://energia.gob.cl/sites/default/files/01_eficiencia_energetica_en_edificios_publicos_y_programas_relacionados.pdf
- <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/22151613>
- <http://www.iconstruccion.cl/contenidos/noticias/primer-reporte-de-consumo-de-energia-real-en-edificios-certificados-ces>
- <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/txt/?qid=1583922805643&uri=celex:02010L0031-20181224>. Directiva europea sobre el rendimiento energético de los edificios.
- <http://construible.blogspot.com/2013/01/edificio-c-ddi-sp3-ed70-cie-mat-moncloa.html>
- <https://docplayer.es/18543426-El-contenedor-demostrador-de-investigacion-sp3-arfrisol-un-edificio-de-energia-casi-nula.html>
- <https://static.construible.es/media/2016/12/18-roberto-bosqued-cie-mat.pdf>
- <https://tectonica.archi/materials/celulas-fotovoltaicas-embebidas-en-vidrio-laminar/>
- <https://ovacen.com/jardines-verticales/>
- https://www.arquitecturaydiseno.es/pasion-eco/precht-joven-estudio-que-reconecta-arquitectura-y-naturaleza_3832
- <https://www.terapiaurbana.es/wp-content/uploads/2011/04/Especial-Entre-Espacios-pag5.jpg>
- <https://www.terapiaurbana.es/sistemas-de-terapia-urbana-en-revista-cic-arquitectura-y-construccion/>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263516300048>

Arquitectura e Innovación, la universidad como campo de desarrollo.

se terminó de editar en diciembre de 2025
en los talleres gráficos de Ediciones de la Noche.
Madero #687, Zona Centro 44100, Guadalajara, Jalisco, México.

www.edicionesdelanoche.com





A *rquitectura e Innovación, la Universidad como campo de desarrollo* reúne experiencias de investigación e incidencia desarrolladas en Chile y México que muestran cómo la arquitectura, entendida desde un enfoque complejo del hábitat, puede convertirse en un verdadero motor de transformación social, tecnológica y territorial.

La obra articula aportes del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (México) y del Centro de Investigación en Arquitectura, Energía y Sustentabilidad (Chile), dos referentes latinoamericanos en innovación aplicada al hábitat. A través de estudios, modelos conceptuales y prototipos tecnológicos, los capítulos evidencian cómo la investigación universitaria genera conocimiento situado con potencial para incidir en políticas, marcos normativos, procesos de diseño y prácticas comunitarias.

Las temáticas abordadas —calidad ambiental en aulas post-COVID, edificaciones sustentables, estrategias urbano-rurales para un hábitat justo, diseño bioclimático para la mitigación del calentamiento global, y tecnologías aplicadas a envolventes en climas áridos— muestran la diversidad y madurez de las líneas de trabajo que hoy impulsan transiciones sociotécnicas hacia la sostenibilidad.

Este libro ofrece una mirada integral y contemporánea del hábitat como sistema complejo, donde convergen ciencia, tecnología, territorio y comunidad.

CUAAD

CENTRO UNIVERSITARIO DE
ARTE, ARQUITECTURA Y DISEÑO

ISBN 978-607-581-907-5



9 786075 819075