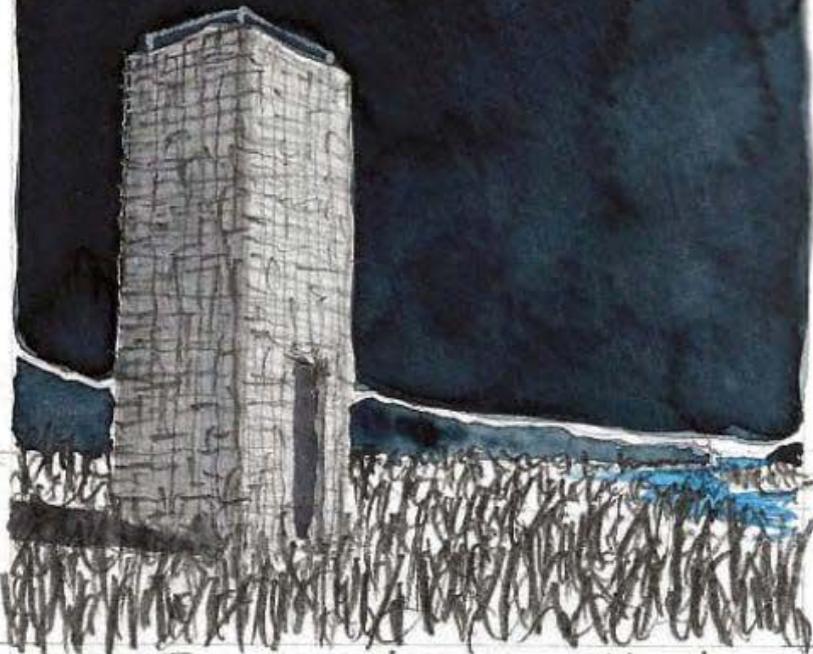


Don Torres y
Una Senda
Agroecológica
2016

Barrío 2022



Objeto singular Barro Monte



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700
Vol. 13 N°. 2
diciembre
2023



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO



**Revista
Hábitat
Sustentable**

ISSN 0719-0700
Vol. 13 N°. 2
diciembre
2023



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

RECTOR:

MAURICIO CATALDO MONSALVES

DECANO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO:

ROBERTO EDUARDO BURDILES ALLENDE

EDITORA RESPONSABLE:

Maureen Trebilcock-Kelly / Departamento Diseño y Teoría de la Arquitectura, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
aperezf@ubiobio.cl

Alexis Pérez-Fargallo / Departamento Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
mtrebilc@ubiobio.cl

PRODUCTORA EDITORIAL:

JOCELYN VIDAL RAMOS / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
javidal@ubiobio.cl

ASISTENTE EDITORIAL:

Arq M^ÁRIA PAZ CID ALARCÓN / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
mpcid@ubiobio.cl

CORRECCIÓN DE ESTILO:

Dra. OLGA OSTRIA REINOSO / Departamento Estudios Generales

GESTIÓN INFORMÁTICA:

KARINA LEIVA / Universidad del Bío-Bío, Chile

DIRECTOR DE ARTE Y DIAGRAMACIÓN:

IGNACIO A. SÁEZ ARANEDA

CONSEJO EDITORIAL:

Dra. M^ª BEATRIZ PIDERIT MORENO / Departamento de Teoría y Diseño de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile

Dr. RODRIGO GARCÍA ALVARADO / Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile

Dra. NINA HORMAZÁBAL / Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

Dr. WALDO BUSTAMANTE / Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

Dr. ERNESTO KUCHEN / Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, San Juan, Argentina

Dra. CRISTINA ENGEL DE ALVAREZ / Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Dr. OLAVO ESCORCIA OYOLA / Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Dr. ALEXANDER GONZÁLEZ CASTAÑO / Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia

Dr. CARLOS RUBIO-BELLIDO / Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Dra. MARÍA DEL PILAR MERCADER MOYANO / Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Dr. VICENTE FLORES ALÉS / Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Dr. FLAVIO CELIS D'AMICO / Universidad de Alcalá, Madrid, España

Dr. ERNESTO ECHEVERRÍA VALIENTE / Universidad de Alcalá, Madrid, España

TRADUCCIONES:

KEVIN WRIGHT

PORTADA:

HERNAN BARRIA CHATEAU

/ Acuarela Dos torres y un sendero, Azocar Catrón, 2016

DIRECCIÓN:

Avda. Collao 1202

CP: 4081112. Concepción, Chile

TEL.(56-41)3111409

Revista **HS** indexada en Scopus, SciELO, ERIHPLUS, Emerging Source Citation Index de Clarivate Analytics, Latindex Catálogo 2.0, Avery Index, DOAJ, Dialnet, Redib, EBSCO, Rebiun, JornalTOcs y ARLA.

HS se adhiere a la Declaración de San Francisco Sobre la Evaluación de la Investigación (DORA).

Los criterios expuestos en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente la opinión de la dirección de la revista.

Revista Hábitat Sustentable es editada por el Facultad de Arquitecturas Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, es financiada por el Fondo de Publicaciones Periódicas de la Vicerrectoría Académica, la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación y la Dirección de Postgrado de la Universidad del Bío-Bío junto al Programa de Información Científica Concurso Fondos de Publicación de Revistas Científicas 2018 Proyecto Código: FP180007



- 04 **EDITORIAL**
Maureen Trebilcock-Kelly, Alexis Pérez-Fargallo
- 10 **AEROPUERTO VERDE, CONCEPTO Y MARCO GENERAL DE DESARROLLO**
Oscar Díaz-Olariaga
- 22 **EXPLORING SUSTAINABLE APPROACHES AT DUBAI EXPO 2020: A BLEND OF BIOPHILIC AND BIOMIMICRY DESIGNS**
Iman Ibrahim, Balsam Munadhil Al-Chaderchi
- 36 **RELEVAMIENTO DEL USO DEL “CIELO DE BARRO Y PAJA ALIVIANADO” COMO PRÁCTICA CULTURAL EN LA TECHUMBRE VERNACULAR DE LA VIVIENDA AYMARA DE ARICA Y PARINACOTA, CHILE**
Sergio Alfaro-Malatesta, Massimo Palme, Jocelyn Cohen-Herrera
- 50 **CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS SIMPLES PARA EL CÁLCULO DEL REQUERIMIENTO ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES**
María Victoria Mercado, Gustavo Javier Barea-Paci, Andrés Esteban Aceña
- 62 **EVALUACIÓN DE LA ACCESIBILIDAD PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE SUBTERRÁNEO: ANÁLISIS DEL METRO DE SANTIAGO - CHILE**
Liborio Navas, Claudia Valderrama-Ulloa, Ximena Ferrada, Jorge Contreras, Zulay Gimenez
- 76 **FABRICACIÓN DE MORTEROS ALIGERADOS CON PERLITA Y CAL APLICADOS EN PANELES CON MATRIZ DE RESIDUOS DE PAJA DE ARROZ**
Henry Anderson Ramos-Rodríguez, Luisa Paulina Viera-Arroba
- 92 **DISEÑO BIOCLIMÁTICO DE VIVIENDA MEDIA EN LA ÉPOCA DEL AUGE PETROLERO EN TAMPICO, MÉXICO (1912-1930)**
Angelica Orozco-Cejudo, Mireya Alicia Rosas-Lusett, María López de Asiain-Alberich

EDITORIAL

El año 2023 ha marcado un hito climático alarmante con las temperaturas más elevadas desde que existen registros climáticos. Noviembre, en particular, ha alcanzado la cifra más alta para dicho mes con 2°C por encima del nivel preindustrial, elevándose la media global anual en 1,25°C por encima de la media preindustrial. Estos datos evidencian que estamos próximos a sobrepasar el umbral de 1,5°C fijado en el Acuerdo de París¹ para 2045, previendo que este límite se supere en 2034².

Siete años después de la implementación del Acuerdo, observamos un creciente compromiso global, con países, regiones, ciudades y empresas estableciendo objetivos de carbono neutralidad. Sin embargo, en 2022 se emitieron 53,8 Gt CO₂eq a nivel mundial, lo que supuso un 2,3% más que en 2019, año anterior a la pandemia Covid-19³. China, Estados Unidos, India, la UE27, Rusia y Brasil emitieron en 2022 el 61,6% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero del mundo.

El último Informe publicado por La Alianza Mundial para Edificios y Construcción⁴ (GlobalABC) sobre el estado mundial de los edificios revela una realidad nada halagüeña. En 2021, el sector edificatorio fue el responsable de más del 37% de las emisiones de CO₂ y del 34% de la demanda de energía, mostrando un repunte negativo respecto de 2020 y con un crecimiento promedio del 1% anual desde 2015.

Según Breakthrough Agenda Report 2023⁵, lograr cero emisiones netas para 2050 requiere que todos los edificios nuevos sean cero netos a partir de 2030, representando actualmente menos del 5%. Además, la intensidad

energética del sector debe reducirse en un 41% para 2030, sin embargo, hasta 2023 tan solo ha disminuido alrededor de un 6% en comparación 2015.

A pesar de la tendencia actual para encaminarse a la consecución de cero emisiones netas de carbono para 2050, el crecimiento global de superficie construida está compensando los esfuerzos enfocados en aumentar la eficiencia y descarbonizar el sector.

El 6 de diciembre de 2023, en la COP28 de los Emiratos Árabes Unidos, se lanzó oficialmente Buildings Breakthrough⁶, el evento fue titulado "*Buildings and construction for sustainable cities: New key partnerships for decarbonisation, adaptation and resilience*". Buildings Breakthrough es una plataforma de colaboración internacional codirigida por Francia y el Reino de Marruecos y bajo la coordinación de GlobalABC. Actualmente reúne a más de 25 países para trabajar juntos en desbloquear acciones en el sector de la construcción bajo el objetivo que las edificaciones con emisiones casi nulas y los edificios resilientes sean la norma o estándar para 2030. Según esta plataforma los "*edificios con emisiones casi nulas*" son construcciones concebidas con un enfoque de evaluación del ciclo de vida completo, de alta eficiencia energética y con una baja huella de carbono; mientras que los "*edificios resilientes*" son construcciones que integran especificaciones relacionadas con el clima futuro en su diseño, construcción y operación y mantenimiento.

Mientras que trabajamos en códigos, financiamiento y adaptación del sector de la construcción para lograr edificios de emisiones casi nulas y resilientes, el tiempo se

1 El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante. Fue adoptado por 196 Partes en la COP21, el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo es limitar el calentamiento mundial, en comparación con los niveles preindustriales, por debajo de 2 y, preferiblemente bajo 1,5 grados centígrados.

2 <https://climate.copernicus.eu/weve-lost-19-years-battle-against-global-warming-paris-agreement>

3 Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf E., Becker, W., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Riskez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Brandao De Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Vignati, E., GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/953322, JRC134504.

4 <https://globalabc.org/our-work/tracking-progress-global-status-report>

5 IEA, IRENA & UN Climate Change High-Level Champions (2023), Breakthrough Agenda Report 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023>, License: CC BY 4.0

6 <https://globalabc.org/our-work/fostering-collaboration>

acorta dramáticamente para mantener las temperaturas globales por debajo de 1,5°C en comparación con el promedio preindustrial. Además, enfrentamos riesgos significativos para la descarbonización del sector, como conflictos armados, volatilidad de los precios mundiales de la energía, incremento del costo de vida que enfrentan las economías, aumento de las tasas de interés, resistencia de los productores de energías fósiles, como se evidenció en la COP 28, junto con los desafíos inherentes al propio cambio climático, que incluyen alteraciones climáticas, fenómenos extremos, escasez hídrica, incendios, riesgo de inundaciones, entre otros.

Un ejemplo concreto de estos desafíos es el impacto que las sequías tienen en las fuentes de energía hidroeléctrica en América Latina, región donde esta fuente abastece la mitad de las necesidades de electricidad⁷. Durante 2022, la caída de la producción hidroeléctrica en la cuenca del Paraná-La Plata, obligó al uso de combustibles fósiles, contrarrestando así el impacto de las medidas de transición energética destinadas a lograr emisiones cero⁸.

Abordar estos desafíos requiere una combinación de innovación en diseño, tecnología y prácticas de construcción y urbanísticas, junto con políticas gubernamentales que fomenten la sostenibilidad y la resiliencia climática.

En este contexto, resulta fundamental que los gobiernos nacionales, regionales y locales establezcan códigos y estándares de construcción para alcanzar la carbono neutralidad en el menor tiempo posible. No obstante, este proceso debe ir de la mano con un aumento significativo en la inversión destinada a la eficiencia energética, así como con iniciativas que impulsen la reducción de emisiones de CO₂ a lo largo de toda la cadena de valor, respaldando, al mismo tiempo, la implementación de prácticas vinculadas a la economía circular.

Desde la perspectiva de la Revista Hábitat Sustentable, consideramos necesario intensificar nuestros esfuerzos de investigación en el ambiente construido, generando materiales, soluciones, sistemas constructivos, diseños, tecnologías, estrategias prácticas carbono neutrales. Además, abogamos por la importancia del aporte de los académicos e investigadores, como desarrolladores

de conocimiento, al impulso de hojas de ruta, políticas, códigos y estándares que conduzcan a un sector edificatorio y de construcción sostenible, cero carbono y resiliente.

7 <https://www.iea.org/reports/climate-impacts-on-latin-american-hydropower/climate-impacts-on-latin-american-hydropower>

8 https://library.wmo.int/viewer/66322?medianame=1322_State_of_the_Climate_in_LAC_2022_es_#page=5&viewer=picture&o=bookmark&n=0&q=

EDITORIAL

2023 has marked an alarming climate milestone, with the highest temperatures since climate records began. November, in particular, reached its highest-ever figure, 2°C above pre-industrial levels, raising the annual global average to 1.25°C above the pre-industrial average. These data show that we are close to exceeding the 1.5°C threshold set in the Paris Agreement¹ for 2045, currently predicting that this will be exceeded in 2034².

Seven years after the Agreement's implementation, we have seen a growing global commitment, with countries, regions, cities, and companies setting carbon neutrality targets. However, 53.8 Gt CO₂eq was emitted globally in 2022, 2.3% more than in 2019, the year before the Covid-19 pandemic³, with China, the United States, India, the EU27, Russia, and Brazil emitting 61.6% of the world's greenhouse gas emissions.

In the latest report published by The Global Alliance for Buildings and Construction⁴ (GlobalABC), the state of the world's buildings reveals an unflattering reality. In 2021, the building sector was responsible for more than 37% of CO₂ emissions and 34% of energy demand, a negative rebound compared to 2020, with an average yearly growth of 1% since 2015.

According to the Breakthrough Agenda Report 2023⁵, achieving net zero emissions by 2050 requires all new buildings to be net zero from 2030, when currently less than 5% are. In addition, the sector's energy intensity must be reduced by 41% by 2030. However, until 2023, it has only decreased by about 6% compared to 2015.

Despite the current trend towards achieving net zero carbon emissions by 2050, the global growth of the built surface area is offsetting the efforts to increase efficiency and decarbonize the sector.

On December 6th, 2023, at the COP28 in the United Arab Emirates, Buildings Breakthrough was officially launched⁶; the event was titled "*Buildings and Construction for Sustainable Cities: New Key Partnerships for Decarbonization, Adaptation, and Resilience.*" Buildings Breakthrough is an international collaboration platform co-managed by France and the Kingdom of Morocco and coordinated by GlobalABC. It currently has more than 25 countries working together to unlock actions in the construction sector under the goal that buildings with almost zero emissions and resilient buildings become the norm or standard by 2030. According to this platform, "*buildings with almost zero emissions*" are constructions conceived with an evaluation approach of their complete life cycle, high energy efficiency, and low carbon footprint. Meanwhile, "*resilient buildings*" integrate future climate specifications in their design, construction, operation, and upkeep.

While we work on codes, financing, and adaptation of the construction sector to achieve near-zero emissions and resilient buildings, time is dramatically short to keep global temperatures below 1.5°C compared to the pre-industrial average. In addition, we face significant risks for the sector's decarbonization, such as armed conflicts, volatility of world energy prices, an increase in the cost of living faced by economies, a rise in interest rates, and reticence of fossil energy producers, as evidenced

1 The Paris Agreement is a legally binding international climate change treaty. 196 Parties at COP21 adopted it on December 12th, 2015, and came into force on November 4th, 2016. Its goal is to limit global warming, compared to pre-industrial levels, to below 2°C and, preferably, under 1.5°C.

2 <https://climate.copernicus.eu/weve-lost-19-years-battle-against-global-warming-paris-agreement>

3 Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf E., Becker, W., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Riskey Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Brandao De Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Vignati, E., GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/953322, JRC134504.

4 <https://globalabc.org/our-work/tracking-progress-global-status-report>

5 IEA, IRENA & UN Climate Change High-Level Champions (2023), Breakthrough Agenda Report 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023>, License: CC BY 4.0

6 <https://globalabc.org/our-work/fostering-collaboration>

at COP 28, along with the challenges inherent in climate change itself, which include climatic alterations, extreme phenomena, water scarcity, fires, flood risk, among others.

A concrete example of these challenges is the impact of droughts on hydropower sources in Latin America, a region where this source supplies half of the electricity needs⁷. In 2022, the drop in hydroelectric production in the Paraná-La Plata basin forced the use of fossil fuels, thus counteracting the impact of energy transition measures aimed at achieving zero emissions⁸.

Addressing these challenges requires a combination of innovation in design, technology, construction, and urban planning practices, along with government policies that foster sustainability and climate resilience.

In this context, national, regional, and local governments must establish building codes and standards to achieve carbon neutrality quickly. However, this process must go hand in hand with a significant increase in investment targeting energy efficiency, as well as initiatives that promote the reduction of CO₂ emissions throughout the entire value chain, supporting, at the same time, the implementation of practices linked to the circular economy.

From the perspective of Hábitat Sustentable, we consider it necessary to intensify our research efforts in the built environment, generating carbon-neutral materials, solutions, construction systems, designs, technologies, and practical strategies. In addition, we advocate for the importance of the contribution of academics and researchers as knowledge developers for promoting roadmaps, policies, codes, and standards that lead to a sustainable, zero-carbon, and resilient building and construction sector.

7 <https://www.iea.org/reports/climate-impacts-on-latin-american-hydropower/climate-impacts-on-latin-american-hydropower>

8 https://library.wmo.int/viewer/66322?medianame=1322_State_of_the_Climate_in_LAC_2022_es_#page=5&viewer=picture&o=bookmark&n=0&q=

EDITORIAL

O ano de 2023 foi um marco climático alarmante, com as temperaturas mais altas desde que os registros climáticos são mantidos. Novembro, em particular, atingiu o valor mais alto para esse mês, com 2°C acima do nível pré-industrial, elevando a média global anual em 1,25°C acima da média pré-industrial. Esses dados mostram que estamos próximos de ultrapassar o limite de 1,5°C estabelecido no Acordo de Paris¹ para 2045, com a expectativa de que esse limite seja ultrapassado em 2034².

Sete anos após a implementação do Acordo, vemos um compromisso global crescente, com países, regiões, cidades e empresas estabelecendo metas de neutralidade de carbono. No entanto, 53,8 Gt CO₂eq foram emitidos globalmente em 2022, o que representou 2,3% a mais do que em 2019, o ano anterior à pandemia de Covid-19³. A China, os Estados Unidos, a Índia, a UE27, a Rússia e o Brasil emitiram 61,6% das emissões mundiais de gases de efeito estufa em 2022.

O último relatório publicado pela Global Alliance for Buildings and Construction⁴ (GlobalABC) sobre o estado dos edifícios do mundo revela uma realidade sombria. Em 2021, o setor de construção foi responsável por mais de 37% das emissões de CO₂ e 34% da demanda de energia, mostrando uma recuperação negativa em relação a 2020 e um crescimento médio de 1% ao ano desde 2015.

De acordo com o Breakthrough Agenda Report 2023⁵, para atingir zero emissões líquidas até 2050, é necessário que todos os novos edifícios tenham zero emissões líquidas a partir de 2030, o que atualmente representa

menos de 5%. Além disso, a intensidade energética do setor deve ser reduzida em 41% até 2030, mas até 2023 ela só diminuiu cerca de 6% em relação a 2015.

Apesar da tendência atual de se chegar a emissões líquidas zero de carbono até 2050, o crescimento global da área útil está compensando os esforços para aumentar a eficiência e descarbonizar o setor.

Em 6 de dezembro de 2023, na COP28, nos Emirados Árabes Unidos, foi lançado oficialmente o Buildings Breakthrough⁶. O evento foi intitulado "Buildings and construction for sustainable cities: New key partnerships for decarbonisation, adaptation and resilience". O Buildings Breakthrough é uma plataforma de colaboração internacional co-liderada pela França e pelo Reino do Marrocos e coordenada pela GlobalABC. Atualmente, ela reúne mais de 25 países para trabalhar em conjunto e desencadear ações no setor de construção com o objetivo de tornar os edifícios com emissão quase zero e resilientes a norma ou o padrão até 2030. De acordo com essa plataforma, "edifícios com emissão quase zero" são edifícios projetados com uma abordagem de avaliação completa do ciclo de vida, alta eficiência energética e baixa pegada de carbono, enquanto "edifícios resilientes" são edifícios que integram futuras especificações relacionadas ao clima em seu projeto, construção, operação e manutenção.

À medida que trabalhamos nos códigos, no financiamento e na adaptação do setor de construção para obtermos edifícios resilientes e com emissões quase nulas, o prazo

1 O Acordo de Paris é um tratado internacional juridicamente vinculativo sobre mudanças climáticas. Ele foi adotado por 196 Partes na COP21 em 12 de dezembro de 2015 e entrou em vigor em 4 de novembro de 2016. Seu objetivo é limitar o aquecimento global, em comparação com os níveis pré-industriais, a menos de 2 e, de preferência, a menos de 1,5 graus Celsius.

2 <https://climate.copernicus.eu/weve-lost-19-years-battle-against-global-warming-paris-agreement>

3 Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf E., Becker, W., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Brandao De Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Vignati, E., GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/953322, JRC134504.

4 <https://globalabc.org/our-work/tracking-progress-global-status-report>

5 IEA, IRENA & UN Climate Change High-Level Champions (2023), Breakthrough Agenda Report 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023>, License: CC BY 4.0

6 <https://globalabc.org/our-work/fostering-collaboration>

para mantermos as temperaturas globais abaixo de 1,5 °C em comparação com a média pré-industrial está diminuindo drasticamente. Além disso, enfrentamos riscos significativos para a descarbonização do setor, como conflitos armados, volatilidade dos preços globais de energia, aumento do custo de vida enfrentado pelas economias, aumento das taxas de juros, resistência dos produtores de energia fóssil, conforme evidenciado na COP 28, juntamente com os desafios inerentes à própria mudança climática, incluindo perturbações climáticas, eventos extremos, escassez de água, incêndios, risco de inundações, entre outros.

Um exemplo concreto desses desafios é o impacto que as secas têm sobre as fontes de energia hidrelétrica na América Latina, uma região onde a energia hidrelétrica supre metade das necessidades de eletricidade⁷. Durante o ano de 2022, a queda na produção de energia hidrelétrica na bacia do Paraná-La Plata forçou o uso de combustíveis fósseis, neutralizando assim o impacto das medidas de transição energética destinadas a atingir zero emissões⁸.

Para enfrentar esses desafios, é necessária uma combinação de inovação em design, tecnologia e práticas urbanas e de construção, juntamente com políticas

governamentais que promovam a sustentabilidade e a resiliência climática.

Nesse contexto, é essencial que os governos nacionais, regionais e locais estabeleçam códigos e padrões de construção para alcançar a neutralidade de carbono no menor tempo possível. No entanto, esse processo deve ser acompanhado de um aumento significativo no investimento em eficiência energética, bem como de iniciativas para promover reduções de emissões de CO₂ ao longo de toda a cadeia de valor, apoiando a implementação de práticas de economia circular.

Sob a perspectiva da Revista Hábitat Sustentable, consideramos necessário intensificar nossos esforços de pesquisa no ambiente construído, gerando materiais, soluções, sistemas de construção, projetos, tecnologias e estratégias práticas neutras em carbono. Além disso, defendemos a importância da contribuição de acadêmicos e pesquisadores, como desenvolvedores de conhecimento, para a promoção de roteiros, políticas, códigos e padrões que levem a um setor de construção sustentável, com zero carbono e resiliente.

Maureen Trebilcock-Kelly
Coeditora Hábitat Sustentable
Departamento Diseño y Teoría de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-1984-0259>
mtrebilc@ubiobio.cl



Alexis Pérez-Fargallo
Coeditor Hábitat Sustentable
Departamento de Ciencias de la Construcción, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-7071-7523>
aperezf@ubiobio.cl



⁷ <https://www.iea.org/reports/climate-impacts-on-latin-american-hydropower/climate-impacts-on-latin-american-hydropower>

⁸ https://library.wmo.int/viewer/66322?medianame=1322_State_of_the_Climate_in_LAC_2022_es_#page=5&viewer=picture&o=bookmark&n=0&q=

AEROPUERTO VERDE, CONCEPTO Y MARCO GENERAL DE DESARROLLO

GREEN AIRPORT, CONCEPT AND GENERAL DEVELOPMENT FRAMEWORK

AEROPORTO VERDE, CONCEITO E QUADRO GERAL DE DESENVOLVIMENTO

Oscar Díaz-Olariaga

Doctor Ingeniero Aeronáutico; Doctor en Economía y Administración de Empresas.
Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Santo Tomás
Bogotá, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-4858-3677>
oscardiazolariaga@usta.edu.co



RESUMEN

Los aeropuertos de todo el mundo están aumentando sus esfuerzos para reducir los impactos que generan en el medioambiente mediante la aplicación de sistemas de gestión ambiental. Esta línea de actuación de la industria aeroportuaria, que no lleva más de quince años, tiene el objetivo de transformar el aeropuerto en lo que se denomina 'aeropuerto verde'. Este se entiende como aquel aeropuerto que tanto su diseño como operación y administración se llevan a cabo de tal manera que su impacto ambiental es el mínimo posible, haciendo su gestión de carácter sostenible. Entonces, en el presente artículo se presenta un marco general de desarrollo del concepto, junto con un análisis de los procesos operativos de los aeropuertos que afectan negativamente al medio ambiente. A partir de lo anterior se sugieren políticas, estrategias y procesos de gestión que permitan minimizar o anular dichos efectos negativos en el entorno aeroportuario con el propósito de acercarlo hacia el concepto de 'aeropuerto verde'.

Palabras clave

aeropuerto verde, gestión ambiental de aeropuertos, aeropuertos sustentables

ABSTRACT

Airports around the world are increasing their efforts to reduce their environmental impacts by implementing environmental management systems. This line of action of the airport industry, which has been in place for no more than fifteen years, aims to transform the airport into what is called a "green airport." This is understood as an airport whose design, operation, and administration are carried out in such a way that its environmental impact is as low as possible, making its management sustainable. Therefore, this article presents a general framework for developing the concept, along with an analysis of airport operational processes that negatively affect the environment. Based on this, policies, strategies, and management processes are suggested that allow minimizing or canceling these adverse effects on the airport environment to bring it closer to the concept of a "green airport."

Keywords

green airport, environmental management of airports, sustainable airports

RESUMO

Os aeroportos de todo o mundo estão aumentando seus esforços para reduzir seus impactos ambientais por meio da implementação de sistemas de gestão ambiental. Essa linha de ação do setor aeroportuário, que está em vigor há não mais de quinze anos, tem por objetivo transformar o aeroporto no que é conhecido como "aeroporto verde". Ele é entendido como um aeroporto cujo projeto, operação e administração são realizados de forma que seu impacto ambiental seja o mínimo possível, tornando sua gestão sustentável. Portanto, este artigo apresenta uma estrutura geral para o desenvolvimento do conceito, bem como uma análise dos processos operacionais dos aeroportos que afetam negativamente o meio ambiente. Com base nisso, são sugeridas políticas, estratégias e processos de gerenciamento para minimizar ou cancelar esses efeitos negativos no ambiente do aeroporto, de modo a aproximá-lo do conceito de um "aeroporto verde".

Palavras-chave:

aeroporto verde, gestão ambiental de aeroportos, aeroportos sustentáveis

INTRODUCCIÓN

Los aeropuertos son uno de los pilares de la industria mundial de la aviación. Sin embargo, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero, no solo son grandes contribuyentes al cambio climático que el mundo experimenta actualmente (Postorino & Mantecchini, 2014), sino que también generan una amplia variedad de afectaciones ambientales que impactan tanto en el medio físico como a la salud de las comunidades que habitan en las proximidades de las terminales aéreas.

En la actualidad, la sostenibilidad ocupa un lugar central en los programas de desarrollo de aeropuertos, por lo que las crecientes preocupaciones ambientales demandan que el desarrollo y las operaciones de estos sean ecológicamente sustentables, para que el desarrollo de la aviación como industria sea sostenible (Kumar et al., 2020; Votsi et al., 2014). Asimismo, la demanda mundial de transporte aéreo está creciendo luego del intervalo impuesto por la pandemia del COVID-19 entre 2020 y 2021. Esto implica que los aeropuertos deberán crecer, en tanto ampliar su capacidad, para absorber la demanda prevista a mediano y largo plazo. Ahora bien, a pesar de la creencia común, no es la financiación o la disponibilidad de suelo lo que frena el crecimiento del aeropuerto, sino que son las consecuencias ambientales de la ampliación / expansión de sus infraestructuras las que plantean un desafío para su desarrollo (Ferrulli, 2016).

Lo anteriormente expuesto hace evidente que la sostenibilidad ambiental aeroportuaria es una preocupación emergente para el mundo (Korba et al., 2022). De acuerdo con esto, el *Airport Council International* (ACI) – organización internacional que reúne a todos los aeropuertos comerciales del mundo – define la sostenibilidad aeroportuaria como un enfoque holístico de la gestión de un aeropuerto para garantizar la integridad de la viabilidad económica, la eficiencia operativa, la conservación de los recursos naturales y la responsabilidad social del este (Airports Council International Europe, 2019). Por lo tanto, la sostenibilidad en los aeropuertos solo se puede lograr con el equilibrio correcto entre los objetivos socioeconómicos dentro de los límites impuestos por el entorno. Es precisamente esta idea la que fundamenta el objetivo del presente artículo, el cual es presentar, desde un punto de vista holístico, el concepto y principios de aeropuerto verde y el marco general de desarrollo que conlleva a la transformación de un aeropuerto en verde.

METODOLOGÍA

Para el presente trabajo se utilizó la metodología denominada mapeo sistemático, que es el proceso de identificar, categorizar y analizar la literatura existente que es relevante para un determinado tema de

investigación (Carrizo & Moller, 2018; Salama et al., 2017). El objetivo de esta revisión es mostrar una perspectiva general del campo científico relacionado, en este caso, el de los aeropuertos verdes. Este mapeo sistemático se desarrolla en tres bloques básicos: (a) en primer lugar, la definición para la búsqueda, en la cual se determina la pregunta de investigación, el alcance de la revisión, los criterios de inclusión / exclusión, y por último, la cadena de búsqueda; (b) luego se encuentra la ejecución de la búsqueda, y (c) en tercer lugar, el análisis y discusión de los resultados.

En lo que se refiere a la definición de la búsqueda, las preguntas de investigación son aquellas relacionadas con los fundamentos del concepto 'aeropuerto verde', a saber: ¿qué son o cómo se definen? ¿cuáles son sus criterios de desarrollo? ¿cómo se gestionan los indicadores relacionados? y finalmente ¿existe un modelo o estándar a seguir para transformar un aeropuerto en verde?

En cuanto al alcance de la revisión, esta se llevó a cabo fundamentalmente entre los años 2006-2023 (ambos inclusive). El argumento para ello es que durante el año 2006 se propone por primera vez el concepto de 'aeropuerto verde'. Sin embargo, también se tuvo en cuenta literatura científica previa que publicaba trabajos sobre 'aeropuertos ambientalmente sostenibles'.

La revisión se realizó mediante la búsqueda bibliográfica en los siguientes catálogos digitales: ScienceDirect, IEEE Xplore, Taylor & Francis, Springer, Wiley, SAGE y JSTOR, para la cual se utilizaron los siguientes descriptores: *green airport, environmentally sustainable airports, sustainable airport construction, sustainable air operations, airport environmental impact, airport environmental mitigation, airport and climate change, airport environmental management, green airport accreditation*.

Por su parte, en el proceso de filtrado de los estudios se aplicaron los siguientes criterios de inclusión / exclusión:

- (a) se incluyeron todas aquellas publicaciones científicas que solo tenían relación con el concepto de aeropuerto verde;
- (b) se incluyeron estudios editados en idioma inglés y español;
- (c) se incluyeron todos los estudios que proponían lineamientos y metodologías para la consecución de aeropuertos verdes;
- (d) se incluyeron casos de estudios, siempre y cuando aportaran un marco conceptual relacionado y con resultados concretos, medibles y comparables;
- (e) se excluyeron artículos sin diseño de investigación y sin una pregunta de investigación bien definida;
- (f) se excluyeron revisiones terciarias;
- (g) se excluyeron trabajos de revisión;
- (h) se excluyeron trabajos sobre encuestas de opinión o similar;
- (i) se excluyeron informes y/o estudios técnicos sin base

científica sólida;
 (j) se excluyó toda 'literatura gris' que no presentara un fundamento teórico sólido, riguroso y formal.

Con respecto a la conducta de la búsqueda, se aplicaron dos filtros de revisión: (a) el primero fue la revisión del título del artículo y resumen; (b) y el segundo fue la revisión del texto completo del artículo.

Finalmente, el último paso a desarrollar de la metodología es presentar, contextualizar y analizar toda la literatura encontrada y seleccionada, exclusivamente de acuerdo con los criterios de desarrollo de un aeropuerto verde. Dicho análisis se realizó de forma segmentada por criterio a fin de definir la planificación, construcción, evolución y gestión de un aeropuerto verde. Estos criterios, a su vez, se discriminan por conceptos y/o indicadores que están directamente relacionados con los diferentes aspectos operativos y de gestión de un aeropuerto. Esta segmentación en el análisis es necesaria debido a la gran complejidad operativa que presentan los aeropuertos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MAPEO TEMÁTICO

En primer lugar, y como resultado de la extensa revisión bibliográfica, se presenta un cuadro que sintetiza el mapeo temático y/o de conceptos que fue resultado de la revisión (Tabla 1). La descripción de los resultados, es decir, la categorización de los impactos ambientales y las correspondientes estrategias de mitigación, seguirá el patrón definido en la Tabla 1.

Tabla 1: Mapeo temático de la revisión de la bibliografía, segmentado por asociación entre impacto ambiental generado y estrategia desarrollada.
 Fuente: Elaboración propia del Autor.

Estrategia ambiental (en función del impacto generado)	Referencias
Medidas de mitigación contra ruidos de vehículos de servicios y aviones.	Fyhri & Aasvang (2010); Meister & Donatelle, (2000); Babisch (2006); Haines et al. (2002); Heinonen-Guzejev et al. (2007); Díaz Olariaga (2018); ICAO (2013); ICAO (2022); Karakoc et al., (2019); Licitra & Ascari, (2014); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Reducción de emisiones, gestión de la calidad del aire, y eficiencia energética.	Halpern & Graham (2018); Young & Wells (2019); Budd & Ison (2017); Bamidele (2023); Karakoc et al., (2019); Čokorilo (2016); Monsalud et al., (2015); Postorino & Mantecchini (2014); ACA (2023); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Gestión del agua.	Guillamón (2010); Carvalho et al. (2013); Li et al., (2022); Young & Wells (2019); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Gestión de residuos.	Budd & Ison (2017); Guillamón (2010); Kumar et al., (2016); Baxter (2022); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Diseño y construcción sustentable.	Ferrulli (2016); Chang & Yeh (2016); Korba et al., (2022); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Gestión de procesos ambientales (varios tópicos / conceptos) y monitoreo.	Kumar et al., (2020); Budd & Ison (2017); Dimitriou & Karagkouni (2022); Young & Wells (2019); Ferrulli (2016); ACI Europe (2015); Kilkis & Kilkis (2016); Dalkiran (2022); ACI Europe (2019); ACI Europe (2015); ACRP (2013); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).

DEFINICIÓN

El aeropuerto verde es aquel que ha sido diseñado y tanto su operación como su administración se ejecuta de tal manera que su impacto ambiental sea el mínimo posible para hacer su gestión de carácter sostenible (Airports Council International Europe, 2015; Ferrulli, 2016) , y cuya base tecnológica pretende asegurar que todos los recursos se utilizan y gestionan de la manera más eficiente posible para generar el menor impacto medioambiental. Para ello, el aeropuerto aplica sistemas inteligentes, colaborativos, dinámicos y automatizados capaces de responder a las necesidades cotidianas de todos sus grupos de interés.

En esta línea, un aeropuerto verde debe contemplar las siguientes actuaciones (Dalkiran et al., 2022; Kilkis & Kilkis, 2016):

- Explorar los distintos avances tecnológicos orientados a mejorar la eficiencia energética, para reducir los consumos.
- Favorecer la producción de energía con fuentes de energías renovables.
- Promover la colaboración en el desarrollo e implantación de estas medidas con los operadores y concesionarios del aeropuerto.
- Evaluar la viabilidad, eficacia y rentabilidad de estas tecnologías, así como de nuevos procedimientos operativos.
- Validar que la puesta en servicio de las diferentes actuaciones garantice la operatividad y la seguridad del aeropuerto.

Por lo tanto, y de acuerdo con lo anterior, se debe entender por aeropuerto verde aquella infraestructura aeroportuaria cuya gestión y operación está basada en criterios de sostenibilidad, lo que, según Airports Council International Europe (2015), Airports Council International Europe, (2019) y National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (Haseman, 2013) implica que:

- a. la organización tiene definida una política ambiental;
- b. dispone de un sistema de gestión ambiental acorde con su política ambiental;
- c. hace un uso eficiente de la energía disponible;
- d. utiliza fuentes de energías renovables en sus instalaciones;
- e. gestiona de manera eficiente sus residuos sólidos y los vertidos;
- f. hace un uso racional del agua y de otros recursos naturales;
- g. dispone de procedimientos que minimizan los impactos asociados a las operaciones;
- h. dispone de procedimientos para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero y de las emisiones contaminantes de ámbito local;
- i. promueve la utilización de buenas prácticas ambientales y cumple con la legislación medioambiental local¹.

Puede observarse, entonces, que los criterios anteriores se centran en la implementación de tecnologías y metodologías técnicas que tienen como propósito la reducción de los impactos ambientales negativos de los aeropuertos². Esta visión corresponde a uno de los discursos ambientales predominantes en la industria para la construcción de una política de sostenibilidad en la aviación, enfatizando en la modernización ecológica de los aeropuertos.

IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR EL AEROPUERTO

La calidad ambiental en los alrededores de un aeropuerto puede verse afectada por múltiples impactos asociados a la actividad aeroportuaria. Por ello, es común segmentarlos de la siguiente manera, en relación con lo que se propone en Guillamón (2010), Young y Wells (2019); y Li et al. (2022):

- a) Impactos directos, los que resultan como consecuencia directa de la existencia del aeropuerto y su operación.

b) Impactos indirectos, los cuales se caracterizan por no estar directamente vinculados al aeropuerto, aunque tengan su desarrollo asociado a la existencia de este.

c) Impactos inducidos, que son aquellos generados como consecuencia de la existencia del aeropuerto, pero no por la acción directa de su instalación u operación.

A partir de lo anterior, se presenta el análisis centrado en los problemas ambientales relacionados con el aeropuerto y sus operaciones.

RUIDO

El ruido generado por la aeronave, ya sea en sobrevuelo, durante el despegue y el aterrizaje o bien, al rodar sobre el campo de vuelo (pistas, calles de rodaje), es uno de los problemas ambientales más inmediatos y desafiantes de la industria aeroportuaria, ya que es uno de los factores que provoca la inmediata reacción de las comunidades vecinas al aeropuerto, debido a que es un problema que afecta la salud y el bienestar de los residentes en su área de influencia.

Trabajos epidemiológicos sugieren que la exposición al ruido de los aviones está relacionada con ciertos efectos negativos en el desempeño psicológico, fisiológico y cognitivo de los afectados, los que incluyen alteraciones y/o interrupción del sueño (Fyhri & Aasvang, 2010), aumento del estrés (Meister & Donatelle, 2000), hipertensión (Babisch, 2006), dificultades de lectura para niños y la pérdida de audición (Haines et al., 2002).

Otros estudios afirman que la sensibilidad al ruido puede ser un factor de riesgo para personas con problemas cardiovasculares (Heinonen-Guzejev et al., 2007). En definitiva, limitar o reducir el número de personas afectadas por el ruido es, hoy en día, una prioridad clave (Díaz Olariaga, 2018; Licita & Ascari, 2014).

CALIDAD DEL AIRE

Las emisiones de gases contaminantes como CO₂, NO_x y CO no provienen exclusivamente de las aeronaves, tanto en vuelo como en sus operaciones terrestres. Los medios de transporte que facilitan el acceso al aeropuerto, el consumo de energía (ya sea gas o electricidad) y los vehículos de servicio que respaldan la operatividad aeroportuaria, específicamente en el área conocida como 'lado aire', también son fuentes significativas de estos contaminantes. Estos elementos contribuyen de manera conjunta a la

1 Se entiende aquí la legislación medioambiental local como todos los criterios y/o exigencias ambientales que, según el país, se deben cumplir para que un aeropuerto no sea penalizado en sus operaciones, o bien, un proyecto de ampliación o nuevo aeropuerto sea aprobado.

2 A nivel de ejemplo o referencia en una subsección posterior, se presentan cifras sobre el impacto positivo en los indicadores ambientales resultados de las metodologías y estrategias implementadas por los gestores aeroportuarios.

degradación de la calidad del aire en las zonas aledañas al aeropuerto, como lo señalan Halpern y Graham (2018) y Young y Wells (2019).

A pesar de que la normativa sobre calidad del aire difiere entre países, los gestores aeroportuarios documentan y comunican las emisiones producidas, categorizándolas en las siguientes fuentes, según Budd y Ison (2017):

- a. Emisiones directas originadas de recursos que están bajo la propiedad o gestión del aeropuerto, incluidos los vehículos que operan en el lado aire o los edificios del aeropuerto;
- b. Emisiones indirectas asociadas principalmente con la adquisición de electricidad generada en otros lugares para su uso en las instalaciones aeroportuarias;
- c. Otras emisiones indirectas derivadas de las actividades del aeropuerto, que abarcan desde las operaciones de las aeronaves hasta los distintos medios de transporte que acceden al aeropuerto.

Las emisiones de tercer grupo (c) constituyen la mayor proporción del total de las emisiones en un aeropuerto, como indica Bamidele et al. (2023). Sin embargo, estas también son las emisiones sobre las cuales el operador aeroportuario, por lo general, ejerce poco o ningún control.

Existen principalmente dos fuentes de mala calidad del aire que han captado la atención de los operadores aeroportuarios: el acceso al aeropuerto por la vía terrestre y el servicio de vehículos de transporte en el lado aire del aeropuerto. En lo que respecta al primer tipo, es vital la cooperación de las autoridades locales para fomentar el uso del transporte público para llegar y desde el aeropuerto, y también para implementar el uso de energías renovables en sus sistemas de transporte público (Janić, 2018). Por su parte, sobre la segunda fuente de contaminación, cabe destacar que numerosos aeropuertos ya están utilizando, en el lado aire, vehículos de servicios impulsados eléctricamente.

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Tanto la planta de energía del aeropuerto, la flota de vehículos (de servicios), como el mantenimiento de la infraestructura aeroportuaria, el equipo de apoyo en plataforma, el equipo de energía de emergencia, los sistemas de eliminación de residuos, etc., constituyen fuentes significativas de emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, los elementos que predominan en la generación de estos gases en un aeropuerto incluyen los equipos de climatización de los edificios, la iluminación interior y los servicios de asistencia a la aeronave en plataforma. Por otra parte, si bien representan una proporción menor, el balizamiento, la iluminación de la plataforma y los equipos de ayuda a la navegación aérea también contribuyen al coste total de la factura energética de un aeropuerto (Karakoc et al., 2019).

CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES

La contaminación del agua puede ser resultado de una descarga directa o indirecta de sustancias en corrientes o cuerpos de agua, lo que provoca alteraciones en las propiedades de los ecosistemas naturales y la química del agua. Las aguas superficiales son las más vulnerables a la contaminación, dado que los contaminantes pueden ser arrastrados desde las superficies pavimentadas del aeropuerto (pistas, calles de rodaje y plataforma) hacia arroyos, ríos, humedales y lagos cercanos. El agua subterránea también puede verse afectada cuando las fugas o derrames de líquidos industriales se infiltran en el suelo (Guillamón, 2010; Santa et al., 2020).

GENERACIÓN DE RESIDUOS

Los aeropuertos generan una serie de residuos, tanto peligrosos como no peligrosos, como resultado de sus variadas operaciones (Budd & Ison, 2017; Guillamón, 2010). Estos se pueden clasificar en:

- a. Residuos peligrosos derivados de las instalaciones de mantenimiento.
- b. Residuos (orgánicos e inorgánicos) producidos por los concesionarios del aeropuerto, como las tiendas.
- c. Residuos inorgánicos no necesariamente tóxicos generados por las oficinas administrativas del aeropuerto.
- d. Artículos confiscados en los controles de seguridad y en el equipaje facturado.
- e. Productos orgánicos, como alimentos diversos, confiscados en los controles de aduana.
- f. Residuos generados durante las operaciones de limpieza de las aeronaves.
- g. Residuos originados en la construcción y las obras civiles en el aeropuerto.
- h. Residuos industriales.
- i. Aguas residuales y aguas pluviales que han sido contaminadas.

ESTRATEGIAS DE GESTIÓN AMBIENTAL

Además de proporcionar beneficios ambientales evidentes, las estrategias efectivas respaldadas por una serie de políticas públicas, programas y medidas, deberían permitir una mejor anticipación y resolución rápida de problemas ambientales, sin afectar el rendimiento económico o las oportunidades comerciales (Budd & Ison, 2017). En el caso específico de los aeropuertos, estas estrategias pueden focalizarse en mejorar la gestión ambiental, el monitoreo y las prácticas operacionales (Dimitriou & Karagkouni, 2022; Young & Wells, 2019).

CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

La contaminación acústica es una de las principales fuentes de quejas y reclamos por parte de los residentes cercanos a los aeropuertos. Para reducir las emisiones sonoras de las principales operaciones, como los despegues y aterrizajes, los aeropuertos a nivel mundial han estado implementando gradualmente los criterios de 'enfoque equilibrado', promovidos por la *International Civil Aviation Organization* o ICAO (2014), según sus siglas en inglés. Este enfoque comprende cuatro elementos clave:

1. Reducción de ruido en la fuente.
2. Procedimientos operacionales para la atenuación del ruido.
3. Gestión y planificación de uso del suelo.
4. Introducción de restricciones operativas.

Para el primer elemento, la industria aeronáutica ha estado trabajando durante años en el diseño y construcción de motores más silenciosos, un área sobre la cual los aeropuertos no tienen competencias ni control (International Civil Aviation Organization, 2022; Karakoc et al., 2019).

El tercer elemento también escapa a la competencia y control del aeropuerto, ya que la gestión del uso del suelo en las proximidades del aeropuerto depende exclusivamente de las autoridades locales. Sin embargo, el aeropuerto sí tiene competencia y control sobre el segundo y cuarto elemento. En particular, introducir restricciones operativas, correspondientes al cuarto elemento, en la actualidad, es la táctica más aplicada en los aeropuertos más grandes del mundo (Licitra & Ascari, 2014).

CONTROL DE LA CALIDAD DEL AIRE

Desde que se reconocieron los efectos nocivos de los principales contaminantes atmosféricos producidos por las operaciones aeroportuarias, los gobiernos y las organizaciones internacionales han desarrollado regulaciones y programas dirigidos a minimizar su impacto negativo en la salud y el medio ambiente. Por lo tanto, es esencial que los programas de monitoreo se diseñen en cuanto a las siguientes condiciones (Čokorilo, 2016):

- a. En todo momento sea posible conocer de manera confiable e inmediata los valores de contaminación existentes, asegurándose de cumplir con los valores normalizados y acreditados correspondientes.
- b. Que permitan determinar los procesos de dispersión atmosférica de los contaminantes a través de una correcta ubicación de las estaciones de monitoreo.
- c. En caso de que los datos sean significativos, se permita controlar crisis puntuales de contaminación y analizar su evolución.

Simultáneamente, el aeropuerto puede mejorar la calidad del aire local mediante la aplicación de diferentes medidas en función de la fuente específica de los contaminantes (Greer et al., 2020; Karakoc et al., 2022).

CONTROL DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Los aeropuertos, a fin de controlar las emisiones contaminantes, han comenzado a modernizar las plantas de energía, calefacción y enfriamiento para mejorar la eficiencia, al mismo tiempo que innovan al generar energía a partir de fuentes renovables. Del mismo modo, los edificios del aeropuerto se están diseñando (o rediseñando) para ser 'inteligentes' y eficientes en energía, lo que los sitúa a la par con ciertos estándares internacionales (Karakoc et al., 2019).

Si bien algunos aeropuertos ya han comenzado a trabajar en la 'eficiencia energética', esto aún no es un estándar en el diseño de la infraestructura aeroportuaria. Se entiende que la eficiencia energética corresponde a un conjunto de medidas inteligentes aplicadas a un entorno específico que permiten el ahorro de energía en cualquiera de sus formas, mientras se mantienen los niveles de calidad y servicio de los sistemas energéticos de dicho entorno sin comprometer los objetivos establecidos. El uso sostenible de la energía implica necesariamente la mejora de la eficiencia energética, lo que a su vez lleva a una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero (Monsalud et al., 2015). De este modo, de acuerdo con lo planteado por Postorino y Mantecchini (2014), la eficiencia energética en una infraestructura aeroportuaria deberá: a) garantizar la seguridad y operatividad del aeropuerto; b) contribuir al transporte de pasajeros y mercancías; y c) mejorar el rendimiento energético de los procesos que forman parte de su actividad.

En este sentido, los aeropuertos están cada vez más optando por la certificación del programa *Airport Carbon Accreditation* (ACA, 2023), que es el único programa global de certificación de gestión de carbono para aeropuertos respaldado institucionalmente por el Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI). El ACA ofrece un marco común y una herramienta únicos para una gestión del carbono activo en los aeropuertos con resultados medibles, abarcando también las actividades operativas que más contribuyen a las emisiones de carbono.

El *Airport Carbon Accreditation* evalúa y reconoce los esfuerzos de los aeropuertos para gestionar y reducir sus emisiones de carbono a través de seis niveles de certificación o acreditación, las que se grafican en la Figura 1: 'mapeo' (medición de la huella de carbono), 'reducción' (gestión de la reducción de la huella de carbono), 'optimización' (participación de terceros en la reducción de la huella de carbono), 'neutralidad'

(neutralidad del carbono para las emisiones directas a través de compensaciones), 'transformación' (transformación de las operaciones aeroportuarias y las de sus socios comerciales para lograr reducciones absolutas de emisiones), y 'transición' (contrarrestar las emisiones residuales a través de compensaciones fiables) (ACA, 2023).

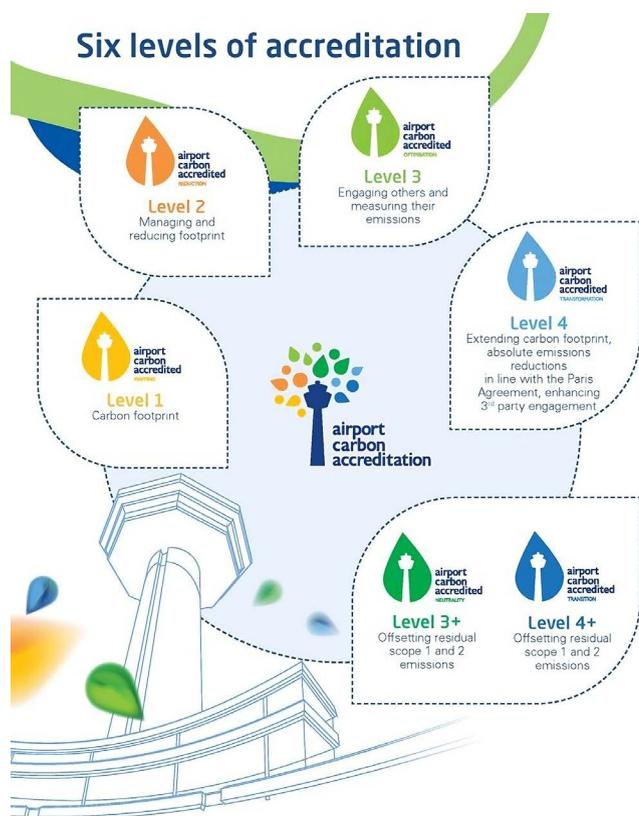


Figura 1: Niveles de acreditación de gestión de carbono para aeropuertos. Fuente: Airport Carbon Accreditation (<https://www.airportcarbonaccreditation.org/>)

CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA

Los aeropuertos consumen cantidades significativas de agua en la prestación de servicios básicos a pasajeros, empleados, visitantes, y también a otras instalaciones, equipos e infraestructuras. Actualmente, el agua ya no se percibe como un recurso ilimitado y el costo de su suministro va en aumento, por lo que los aeropuertos están gestionando el consumo de agua a fin de reducir costos y como parte de su estrategia de desarrollo sostenible.

En términos de la gestión del recurso, existen dos enfoques clave para la conservación del agua potable: por un lado, reducir su uso y, por otro, sustituir el agua potable proveniente de la red por otras fuentes, como la recogida y reutilización del agua de lluvia, el tratamiento de aguas residuales y el reciclaje de aguas de refrigeración (Carvalho et al., 2013; Guillamón, 2010; Li et al., 2022; Young & Wells, 2019).

GESTIÓN ÓPTIMA DE RESIDUOS

Baxter (2022) señala que la principal intención de los aeropuertos con respecto a las prácticas ambientales es reducir la generación de residuos, lo que resulta en una imagen positiva del aeropuerto ante a la sociedad. En este sentido, Guillamón (2010) evidencia que los aeropuertos han estado trabajando en tres niveles jerárquicos para la gestión eficiente de los residuos generados. El primero consiste en prevenir la generación de residuos a fin de evitar la producción innecesaria de estos. El segundo nivel corresponde a implementar políticas de reutilización y el tercer nivel refiere a establecer estrategias de reciclaje.

La gestión de residuos es uno de los problemas ambientales críticos que deben enfrentar en los aeropuertos a nivel mundial (Baxter et al., 2018). Los residuos sólidos y peligrosos producidos por los aeropuertos pueden ser procesados principalmente de tres formas: por reciclaje, por incineración y por disposición a vertedero. Gracias a la innovación, los residuos se están considerando cada vez más como un recurso para ser optimizado, minimizando así su impacto negativo sobre el medio ambiente.

El enfoque de la jerarquía de residuos se centra en su prevención, que es un pilar crucial en la economía verde y que contribuye a mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos y a reducir la necesidad de materias primas. Esta jerarquía comienza con la prevención y continúa con la reutilización, el reciclaje, la recuperación y, finalmente, la eliminación (Kumar et al., 2016).

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLES

El diseño y la construcción de las infraestructuras de un aeropuerto es un desafío para la ingeniería aeroportuaria contemporánea debido a la necesidad de tener en cuenta las preocupaciones ambientales (Ferrulli, 2016). Por esta razón, los aeropuertos deben desarrollarse de tal manera que la capacidad operativa y el desarrollo futuro no se vean afectados por limitaciones ambientales. Por otro lado, las autoridades aeroportuarias pueden implementar prácticas de construcción ecológica para hacer que los edificios aeroportuarios sean más ecológicos y respetuosos con el medio ambiente (Chang & Yeh, 2016).

GESTIÓN DE PROCESOS AMBIENTALES Y MONITOREO

La presión pública, política y el endurecimiento de la legislación han propiciado que la industria aeroportuaria preste una mayor atención a la mitigación ambiental. A partir de esto, la gestión ambiental, el monitoreo y los procesos operativos se han integrado profundamente en las estrategias comerciales de la mayoría de los operadores aeroportuarios.

Tabla 2: Impacto de las estrategias ambientales del aeropuerto en los indicadores. Cifras de referencia en aeropuertos internacionales mediano-grandes (que gestionan entre 20 y 40 millones pasajeros/año), en los últimos cuatro años. Fuente: Airports Council International, 2022; Airports Council International, 2021 Airports Council International, 2020; Airports Council International, 2019.

Indicador	Acción / Estrategia	Reducción / Ahorro
Emisiones	Buses, y vehículos de servicio, eléctricos en lado aire	91% reducción de emisiones al año (342 T de CO ₂ /año; 202 Kg de NOx/año)
Emisiones	Sistema avanzado de control de aire acondicionado en Terminal de pasajeros	Ahorro de 1,7 millones kWh/año, y 630 T de CO ₂
Emisiones	Utilización de luces LED en Terminal de pasajeros	32% reducción de emisiones CO ₂ / año
Emisiones	Sistema limpio de calefacción y refrigeración geotérmica (para Terminal de pasajeros)	83% reducción de emisiones CO ₂ / año
Emisiones	Utilización de luces LED en las pistas	Reducción de emisiones de CO ₂ (para dos pistas): 712 T de CO ₂ /año.
Emisiones	Equipos de apoyo en tierra a aeronaves con energía solar	Reducción anual de 102.209 litros de diésel, y de emisiones: NOx (1.672 kg); CO (965 kg); PM (190 kg).
Energía eléctrica	Implantación de programa de eficiencia energética (para todo el aeropuerto)	26% de reducción de consumo de electricidad al año
Calidad del aire	Instalación de estaciones de monitoreo continuo de la calidad del aire ambiente	12,5% de reducción anual de emisiones (incluidas las gaseosas y las partículas)
Calidad del aire	Implantación de un sistema gestión de la calidad del aire	Reducción de concentraciones (por año): SO ₂ 49%, NOx 6,7%, NO ₂ 11,7%, PM10 27,6%, PM2,5 26,3%
Calidad de aire	Plan de reducción de contaminantes del aire	Reducción anual: 10,1 T de TSP, 1,7 T de PM10, 1,2 T de PM2,5, 59,9 T de NOx, 36,1 T de SOx, 49,9 T de CO, y 12,5 T de hidrocarburos no metano.
Combustible de aviación	Rodaje de aeronaves en tierra con un solo motor	Ahorro de 4.382 kl de combustible / año
Agua	Implantación de un sistema de gestión del agua	30,92% de eficiencia en el uso del agua. 50% de la demanda de agua del aeropuerto se cubre con recursos internos como aguas residuales tratadas y aguas superficiales.
Agua	Sistema de reciclaje de aguas pluviales	Reducción el 50 % del total de agua de red utilizada dentro de Terminal de pasajeros.
Agua	Lavado en seco de aeronaves	Reducción del 90% de utilización agua.
Agua	Instalación de torres de enfriamiento de alta eficiencia	Reducción de 72.154 toneladas/año de consumo de agua en el Terminal de pasajeros.
Residuos	Sistema de minimización de residuos mediante compostaje y tratamiento de residuos orgánicos	Reducción anual de 238 T CO ₂ , evitar el vertido de 353 MT/año de residuos de alimentos en vertederos, generar 276 MT de abono para paisajismo y horticultura.
Residuos	Sistema de gestión y reciclaje de residuos	Reducción general del 57 % en los residuos que van al vertedero.
Residuos	Sistema de separación de residuos y reciclaje	El 30,8% de los residuos generales se recicla. El 93,7% de los residuos a eliminar se utiliza como fuente de combustible derivado de residuos para la producción de cemento.

Del mismo modo, los sistemas de gestión ambiental se han adoptado ampliamente para proporcionar indicadores de referencia que garanticen respuestas coordinadas a una variedad de problemas ambientales. Es por ello que la implementación de regímenes de monitoreo confiables y replicables representa un componente vital tanto de las evaluaciones de impacto ambiental como de los sistemas de gestión ambiental (Kumar et al., 2020).

IMPACTO DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN LOS INDICADORES

Durante al menos las dos últimas décadas, muchos aeropuertos en el mundo han comenzado a implementar acciones y estrategias para convertirse en infraestructuras ambientalmente sostenibles. Como se ha mencionado, los gestores aeroportuarios deben trabajar en varios ámbitos operativos, con planes a mediano y largo plazo que requieren inversiones de capital significativas para lograr mejoras considerables en los diferentes indicadores ambientales afectados por la actividad aeroportuaria. Para ilustrar el potencial de cómo los gestores aeroportuarios pueden impactar positivamente en los indicadores ambientales con sus acciones y estrategias, la Tabla 2 presenta estadísticas de experiencias recientes de varios aeropuertos internacionales de tamaño mediano y grande que gestionan anualmente de 20 a 40 millones de pasajeros en diferentes regiones del mundo.

CONCLUSIONES

Los resultados de la extensa revisión temática del concepto 'aeropuerto verde' muestran elementos de convergencia entre los académicos en cuanto a la estructura o marco de desarrollo sobre el cual la gestión aeroportuaria debe basarse para fundamentar y lograr la sostenibilidad ambiental. La línea de acción planteada por la mayoría de los estudios e investigaciones comienza identificando los aspectos ambientales negativamente afectados por la actividad aeroportuaria. Luego, se identifica la fuente de los impactos ambientales y finalmente se formulan acciones, estrategias y métodos para mitigar o anular los impactos generados.

Un denominador común de la literatura analizada es la recomendación de que un aeropuerto sea ambientalmente sustentable o 'verde', los gestores aeroportuarios deben implementar prácticas ecológicas en sus competencias básicas debido a estrictas normas y regulaciones ambientales estrictas (exigidas en sus respectivos países). La creciente competencia ha llamado la atención de las autoridades aeroportuarias a nivel mundial para que adopten prácticas ecológicas en sus actividades organizativas y operativas.

En definitiva, los aeropuertos pueden verse limitados por cuestiones ambientales que restringen las operaciones actuales y acotan el crecimiento potencial futuro. Para maximizar las oportunidades de crecimiento es necesario considerar todos los factores involucrados en la construcción y operación de un aeropuerto para evitar afectaciones ambientales que impacten en las estrategias de sostenibilidad. El ciclo de vida y la planificación a largo plazo de infraestructuras aeroportuarias exigen un enfoque sistémico para satisfacer la necesidad de cambio mediante una mejor definición de procesos de gestión y cumplimiento de los requisitos de sostenibilidad ambiental.

Contribución de autores: Conceptualización, O.D.O.; Curación de datos; Análisis formal O.D.O.; Adquisición de financiación; Investigación, O.D.O.; Metodología, O.D.O.; Administración de proyecto, O.D.O.; Recursos; Software; Supervisión, O.D.O.; Validación, O.D.O.; Visualización; Escritura – borrador original, O.D.O.; Escritura – revisión y edición O.D.O.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRPORT CARBON ACCREDITATION. (2023, December 11). *Home - Airport carbon accreditation*. <http://www.airportcarbonaccreditation.org/>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. (2022). *Green Airports Recognition 2022: Carbon Management*. <https://www.aci-asiapac.aero/f/library/3198/Green%20Airports%20Recognition%202022%20-%20Carbon%20Management.pdf>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. (2021). *Green Airports Recognition 2021. Air Quality Management*. <https://www.aci-asiapac.aero/f/library/2186/Green%20Airports%20Recognition%202021%20-%20Air%20Quality%20Management.pdf>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. (2020). *Green Airports Recognition 2020. Water Management*. <https://www.aci-asiapac.aero/f/library/1367/GAR%202020%20Publication.pdf>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. (2019). *Green Airports Recognition 2019. Green Airport Infrastructure*. https://www.aci-asiapac.aero/f/library/1368/GAR_2019_Publication.pdf

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL EUROPE (2019). *Sustainability strategy for airports*. <https://www.aci-europe.org/downloads/resources/aci%20europe%20sustainability%20strategy%20for%20airports.pdf>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL EUROPE (2015). *Green Airports. ICAO Intl. Aviation and Environment Seminar, Warsaw, 19 March 2015*. https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/2015-Warsaw/8_2_Green%20Airports-ACI-Europe.pdf

Babisch, W. (2006). *Transportation noise and cardiovascular*

risk: Updated Review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased. *Noise & Health*, 8(30), 1. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.32464>

Bamidele, R. O., Öztüren, A., Haktanir, M., & Ogunmokun, O. A. (2023). Realizing Green Airport Performance through Green Management Intransigence, Airport Reputation, Biospheric Value, and Eco-Design. *Sustainability*, 15(3), 2475. <https://doi.org/10.3390/su15032475>

Baxter, G., Srisaeng, P., & Wild, G. (2018). Sustainable airport waste management: The case of Kansai International Airport. *Recycling*, 3(1), 6. <https://doi.org/10.3390/recycling3010006>

Baxter, G. (2022). Towards sustainable airport waste management through the adoption of a “green” airport strategy: The case of Incheon International Airport. *Clean Technologies and Recycling*, 2(4), 247–278. <https://doi.org/10.3934/ctr.2022013>

Budd, L., & Ison, S. (2017). *Air Transport Management: An International Perspective*. Routledge.

Carrizo, D., & Moller, C. (2018). Estructuras metodológicas de revisiones sistemáticas de literatura en Ingeniería de Software: un estudio de mapeo sistemático. *Ingeniare. Revista Chilena De Ingeniería*, 26, 45–54. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052018000500045>

Carvalho, I., Calijuri, M. L., Assemany, P. P., Silva, M. D. F. M. E., Neto, R. F. M., Da Fonseca Santiago, A., & De Souza, M. H. B. (2013). Sustainable airport environments: A review of water conservation practices in airports. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.016>

Chang, Y. H., & Yeh, C. (2016). Managing corporate social responsibility strategies of airports: The case of Taiwan’s Taoyuan International Airport Corporation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 92, 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.06.015>

Čokorilo, O. (2016). Environmental issues for aircraft operations at airports. *Transportation Research Procedia*, 14, 3713–3720. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.491>

Dalkiran, A., Ayar, M., Kale, U., Nagy, A., & Karakoç, T. H. (2022). A review on thematic and chronological framework of impact assessment for green airports. *International Journal of Green Energy*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/15435075.2022.2045298>

Díaz Olariaga, O. (2018). Análisis de mitigación de ruido aeroportuario. El caso del Aeropuerto Internacional de Bogotá-El Dorado (Colombia). *Ciudad y Territorio*, 197, 557-576. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/76682/46998>

Dimitriou, D. & Karagkouni, A. (2022). Airports’ Sustainability Strategy: Evaluation Framework Upon Environmental Awareness. *Frontiers in Sustainability*, 3. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.880718>

Fyhri, A. & Aasvang, G. (2010). Noise, sleep and poor health: modelling the relationship between road traffic noise and cardiovascular problems. *Science of the Total Environment*, 408(21), 4935–4942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.057>

Ferrulli, P. (2016). Green Airport Design Evaluation (GrADE) – methods and tools improving infrastructure planning. *Transportation Research Procedia*, 14, 3781-3790. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.463>

Greer, F., Rakas, J. & Horvath, A. (2020). Airports and environmental sustainability: a comprehensive review. *Environmental Research Letters*, 15(10), 103007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb42a>

Guillamón, J.M. (2010). *El aeropuerto y su entorno. impactos ambientales y desarrollo sostenible*. AENA.

Haines, M., Stansfeld, S., Head, J. & Job, R. (2002). Multilevel modelling of aircraft noise on performance tests in schools around Heathrow Airport London. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 56(2), 139–144. <https://doi.org/10.1136/jech.56.2.139>

Halpern, N. & Graham, A. (2018). *The Routledge companion to air transport management*. Routledge.

HASEMAN, Z. (2013). Integrating Environmental Sustainability into Airport Contracts. In *Transportation Research Board eBooks*. <https://doi.org/10.17226/22567>

Heinonen-Guzejev, M., Vuorinen, H. S., Mussalo-Rauhamaa, H., Heikkilä, K., Koskenvuo, M., & Kaprio, J. (2007). The association of noise sensitivity with coronary heart and cardiovascular mortality among Finnish adults. *Science of the Total Environment*, 372(2–3), 406–412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.08.048>

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. (2014). *Assembly Resolutions in Force (as of 4 October 2013)*. Doc 10022. ICAO. https://www.icao.int/sustainability/Documents/A38-Res_10022_en.pdf

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. (2022). *2022 Environmental Report*. ICAO. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2022.aspx>

Janić, M. (2018). *Landside accessibility of airports: Analysis, Modelling, Planning, and Design*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76150-3>

Karakoc, T., Colpan, C., Altuntas, O. & Sohret, Y. (2019). *Sustainable aviation*. Springer.

Karakoc, T., Colpan, C. & Dalkiran, A. (2022). *Progress in Sustainable Aviation*. Springer.

Kilkis, S. & Kilkis, S. (2016). Benchmarking airports based on a sustainability ranking index. *Journal of Cleaner Production*, 130, 248-259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.031>

Korba, P., Koščáková, M., Fözö, L., & Sekelová, I. (2022). Current State and Possible Challenges in the Development of Green Airports. *2022 New Trends in Civil Aviation*. <https://doi.org/10.23919/ntca55899.2022.9934733>

Kumar, A., Aswin, A., & Gupta, H. (2020). Evaluating green performance of the airports using hybrid BWM and VIKOR methodology. *Tourism Management*, 76, 103941. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2019.06.016>

Kumar, A., Dixit, G., & Prabhakar, D. (2016). Analyzing the factors affecting the Sustainable Municipal Solid Waste Management (MSWM). *Indian journal of science and technology*, 9(1), 1-7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/105286>

Li, X., Chen, X. & Liu, Z. (2022). Research on construction and development of green airport. *Advances in economics, business and management research*. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.220502.077>

Licitra, G. & Ascari, E. (2014). G den: An indicator for European noise maps comparison and to support action plans. *The Science of the Total Environment*, 482-483, 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.014>

Meister, E. A., & Donatelle, R. J. (2000). The Impact of Commercial Aircraft Noise on Human Health: A Neighborhood Study in Metropolitan Minnesota. *Journal of Environmental Health*, 63(4), 9-15. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=HRCA&u=anon~cb41f220&id=GALEIA67882799&v=2.1&it=r&sid=googleScholar&asid=ad58d236>

Monsalud, A., Ho, D. & Rakas, J. (2015). Greenhouse gas emissions mitigation strategies within the airport sustainability evaluation process. *Sustainable Cities and Society*, 14, 414-424. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.08.003>

Postorino, M. & Mantecchini, L. (2014). A transport carbon footprint methodology to assess airport carbon emissions. *Journal of Air Transport Management*, 37, 76-86. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.03.001>

Salama, M., Bahsoon, R. & Bencomo, N. (2017). Managing Trade-offs in Self-Adaptive Software Architectures: A Systematic Mapping Study. En *Managing Trade-offs in Adaptable Software Architectures* (pp. 249-297). Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802855-1.00011-3>

Santa, S. L. B., Ribeiro, J. M. P., Mazon, G., Schneider, J., Barcelos, R. L., & De Andrade Guerra, J. B. S. O. (2020). A Green Airport model: proposition based on social and environmental management systems. *Sustainable Cities and Society*, 59, 102160. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102160>

Votsi, N., Mazaris, A., Kallimanis, A. & Pantis, J. (2014). Natural quiet: An additional feature reflecting green tourism development in conservation areas of Greece. *Tourism Management Perspectives*, 11, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2014.02.001>

Young, S., & Wells, A. T. (2019). *Airport Planning & Management, Seventh Edition*. McGraw Hill Professional.

EXPLORING SUSTAINABLE APPROACHES AT DUBAI EXPO 2020: A BLEND OF BIOPHILIC AND BIOMIMICRY DESIGNS

Recibido 12/10/2023
Aceptado 28/11/2023

EXPLORACIÓN DE ENFOQUES SUSTENTABLES EN LA EXPO DE DUBÁI DE 2020: UNA MEZCLA DE DISEÑOS BIOFÍLICOS Y BIOMÍMESIS

EXPLORANDO ABORDAGENS SUSTENTÁVEIS NA DUBAI EXPO 2020: UMA MISTURA DE DESIGNS BIOFÍLICOS E BIOMIMÉTICOS

Iman Ibrahim

PhD Architectural Engineering
Assistant Professor, Applied Design Department , College of Fine Arts & Design
University of Sharjah
Sharjah, United Arab Emirates
<https://orcid.org/0000-0003-0374-3494>
iibrahim@sharjah.ac.ae

Balsam Munadhil Al-Chaderchi

MSc in Environmental Engineering
Architectural engineering, College of Engineering University of Sharjah
Sharjah, United Arab Emirates
<https://orcid.org/0009-0003-2179-0574>
u14121047@sharjah.ac.ae



ABSTRACT

Dubai Expo 2020 provides an international platform for advancing innovation through meticulously curated exhibits with themes such as sustainability and cultural exchange displayed in pavilions dedicated to individual countries. This research study uses biophilic or biomimetic design strategies to assess the sustainability practices employed in a group of pavilions at the Dubai Expo 2020 that employ biophilic and/or biomimetic design strategies. Biophilic philosophy emphasizes nature-based concepts to foster positive relationships between humans and living organisms, whereas biomimicry imitates natural processes/systems for building practices. Incorporating biophilic and/or biomimetic techniques into pavilion design provides visitors with a one-of-a-kind experience while displaying explicit sustainability principles that go beyond the event's existing architectural framework guidelines. The research evaluation process includes architectural structure designs, materials used during production/creation periods, energy efficiency measurements implemented, and sustainable water management plans based on natural ecological systems. It will also evaluate the adherence of each pavilion chosen to genuine sustainability values by analyzing the incorporation of nature-based concepts into its overall design for potential future reference applications. These techniques have significant potential to improve human health, reduce environmental impact, and encourage global resiliency when implemented beyond Dubai Expo 2020. In conclusion, the research aims to inspire sustainable designs well beyond the Dubai Expo 2020 by demonstrating how biophilic or biomimetic practices are crucial facilitators in constructing spaces that maximize human welfare without endangering the environment. It is also a foundational resource for architects and urban planners committed to advancing sustainable architectural practices through future development projects prioritizing human welfare and environmental protection.

Palabras clave

Expo Dubai 2020, sustainability, biophilic, biomimicry, nature-based

RESUMEN

La Expo de Dubái 2020 es una plataforma internacional para el avance de la innovación a través de exposiciones meticulosamente seleccionadas, con temas como la sostenibilidad y el intercambio cultural expuestos en pabellones dedicados a países individuales. Esta investigación usa estrategias de diseño biofílico o biomimético para evaluar las prácticas de sustentabilidad usadas en un grupo de pabellones en la Expo de Dubái de 2020, que usan estrategias de diseño biofílico y/o biomimético. La filosofía biofílica hace hincapié en conceptos basados en la naturaleza, con el objetivo de fomentar relaciones positivas entre los seres humanos y los organismos vivos, mientras que la biomimesis imita los procesos/sistemas naturales para las prácticas de construcción. La incorporación de técnicas biofílicas y/o biomiméticas en el diseño de los pabellones proporciona a los visitantes una experiencia única, al tiempo que muestra principios de sostenibilidad explícitos que van más allá de las directrices del marco arquitectónico del evento. El proceso de evaluación de la investigación incluye diseños de estructuras arquitectónicas, los materiales utilizados durante los periodos de producción/creación, las medidas de eficiencia energética aplicadas y los planes de gestión sostenible del agua basados en sistemas ecológicos naturales. También se evaluará la adhesión de cada pabellón seleccionado a auténticos valores de sostenibilidad analizando la incorporación de conceptos basados en la naturaleza en su diseño general para posibles aplicaciones futuras de referencia. Estas técnicas tienen un potencial significativo para mejorar la salud humana, reducir el impacto ambiental y fomentar la resiliencia global cuando se lleven más allá de la Expo de Dubái de 2020. En conclusión, la investigación apunta a inspirar diseños sostenibles mucho más allá de la Expo de Dubái de 2020, al demostrar cómo las prácticas biofílicas o biomiméticas sirven de facilitadores clave en la construcción de espacios que maximizan el bienestar humano, sin poner en peligro al medio ambiente. También sirve como recurso fundamental para arquitectos y urbanistas comprometidos con el avance de las prácticas arquitectónicas sostenibles a través de futuros proyectos de desarrollo, que den prioridad tanto al bienestar humano como a la protección del medio ambiente.

Keywords

Expo de Dubái 2020, sustentabilidad, biofílica, biomimesis, basada en la naturaleza

RESUMO

A Dubai Expo 2020 oferece uma plataforma internacional para o avanço da inovação por meio de exposições meticulosamente selecionadas com temas como sustentabilidade e intercâmbio cultural exibidos em pavilhões dedicados a países individuais. Este estudo de pesquisa utiliza estratégias de design biofílico ou biomimético para avaliar as práticas de sustentabilidade adotadas em um grupo de pavilhões da Dubai Expo 2020 que empregam estratégias de design biofílico e/ou biomimético. A filosofia biofílica enfatiza conceitos baseados na natureza para promover relações positivas entre humanos e organismos vivos, ao passo que a biomimética imita processos/sistemas naturais para práticas de construção. A incorporação de técnicas biofílicas e/ou biomiméticas no projeto do pavilhão proporciona aos visitantes uma experiência única, ao mesmo tempo em que exhibe princípios explícitos de sustentabilidade que vão além das diretrizes de estrutura arquitetônica propostas para o evento. O processo de avaliação da pesquisa inclui projetos de estruturas arquitetônicas, materiais utilizados durante os períodos de produção/criação, medidas de eficiência energética implementadas e planos de gerenciamento sustentável da água com base em sistemas ecológicos naturais. Ele também avaliará a adesão de cada pavilhão escolhido aos valores genuínos de sustentabilidade, analisando a incorporação de conceitos baseados na natureza em seu projeto geral para possíveis aplicações futuras de referência. Essas técnicas possuem um potencial significativo para melhorar a saúde humana, reduzir o impacto ambiental e incentivar a resiliência global se forem implementadas após a Dubai Expo 2020. Por fim, a pesquisa tem como objetivo inspirar projetos sustentáveis muito além da Dubai Expo 2020, demonstrando como as práticas biofílicas ou biomiméticas são facilitadoras cruciais na construção de espaços que maximizam o bem-estar humano sem colocar em risco o meio ambiente. É também um recurso fundamental para arquitetos e planejadores urbanos comprometidos com o avanço das práticas arquitetônicas sustentáveis por meio de futuros projetos de desenvolvimento que priorizem o bem-estar humano e a proteção ambiental.

Palavras-chave:

Expo Dubai 2020, sustentabilidade, biofílico, biomimética, baseado na natureza.

INTRODUCTION

Emulating life's creativity is crucial for human survival and a sustainable future. Nature serves as a source of design inspiration for the built world, as it understands sustainable construction. Sustainability is a significant factor in design, and understanding the value of nature and its influence on design is essential. Nature's natural cycles, such as providing food for insects and fruits for variety, have been challenging for humans to complete since humanity's inception (Green, K, 2005; Karabetça, A.R., 2015).

Nature is critical to reaching the worldwide goal of net zero emissions by 2050. However, according to United Nations Secretary-General Antonio Guterres, nature needs assistance. We can escape climate catastrophe and restore our world by defeating the COVID-19 pandemic (Abounaga & Helmy, 2022). Biophilia, bioengineering, bionics, and biomimicry are biological terms that describe the laws of nature that have governed 30 million species for 3.85 billion years (Isle & Leitch, 2023). Bio-concepts, such as biophilia and biomimicry, are used to integrate nature into human activities, focusing on Janine Benyus' principles for sustainability. This study explores these concepts in architecture.

BIOPHILIC DESIGN

The creation of biophilic design has taken many steps in history. As shown in Figure 1, it has involved considering guidelines in the design phase, incorporating natural characteristics into built environments, and representing shapes like botanical, animal, and shell motifs through arches, vaults, and domes, varying sensory experiences through time, change, transitions, and complementary contrasts (Terrapin Bright Green, 2014). This type of design evokes historical, cultural, geographic, spiritual, and ecological significance, transforming humans and creating nature-like environments (Biancardi & Cascini, 2023; Al-Rhodesly, 2019). Biophilic Design focuses on reconnecting with nature, transforming human awareness, and fostering a new ethic of duty for caring for the world (Van der Ryn & Cowan, 2013; Thampanichwat et al., 2013). Mass and volume are linked to biophilic design, with material, object, light, landscape, and viewpoint referencing natural elements, without examining color or sound details.

BIOMIMICRY

From the Greek words bios-life and *mimesis*-mimic, imitate, biomimicry translates to "the imitation of life." Engineering, product design, and architecture all use biomimicry, which takes inspiration from nature's mechanisms and applies them to the shortcomings humans face (Thampanichwat et al., 2013; Taylor Buck,

2017). Biomimicry in design can promote climate action, build green, sustainable cities, achieve sustainable development, and comply with the United Nation's SDGs. Incorporating natural elements into a design can inspire sustainability and protect ecosystems in the face of climate change and COVID-19 while combining architectural features with nature and technology can overcome city resilience challenges (Abounaga & Helmy, 2022).

Designers are increasingly aware of the natural opportunities to enhance human and system functionality. This has increased interest in biomimicry for built environments and sustainability (Oguntona & Aigbavboa, 2023; Jamei & Vrcelj, 2021). Architecture that uses biomimicry takes cues from the methods, tools, and ideas employed by other organisms to suit their needs and secure their existence on Earth. J. Benyus proposes two key methods for using biomimicry (Jamei & Vrcelj, 2021; Aamer et al., 2020). Biology-to-design aims to solve design challenges by identifying basic functions and analyzing natural principles. This approach enables advanced, sustainable buildings with aesthetic, physical, and mechanical aspects. Designers can create this technique by collaborating with nature, existing practices, or experimental design-science (Fahmy, 2018). The parallels between nature and architecture in this context have motivated numerous researchers to use biological systems to manage environmental variables (Varshabi, Arslan Selçuk, & Mutlu Avinç, 2022; Perricone et al., 2021). As a result, biomimicry-based design has arisen as a transdisciplinary, groundbreaking architectural movement (Faragalla & Asadi, 2022).

Sustainable pavilions at expos typically focus on environmentally friendly practices, energy efficiency, and the use of renewable resources. These pavilions often incorporate green building technologies, sustainable materials, and innovative designs that minimize their environmental impact. These pavilions may showcase advancements in renewable energy, waste reduction, water conservation, and sustainable living practices.

Features of sustainable pavilions are achieved within biophilic and biomimicry design frameworks and may include:

- Solar panels for energy generation.
- Rainwater harvesting systems.
- Sustainable and recyclable construction materials.
- Smart technologies for energy management.

OBJECTIVES AND METHODS

The objective is to inspect and analyze biophilic and biomimicry features applied in Dubai expo's pavilions

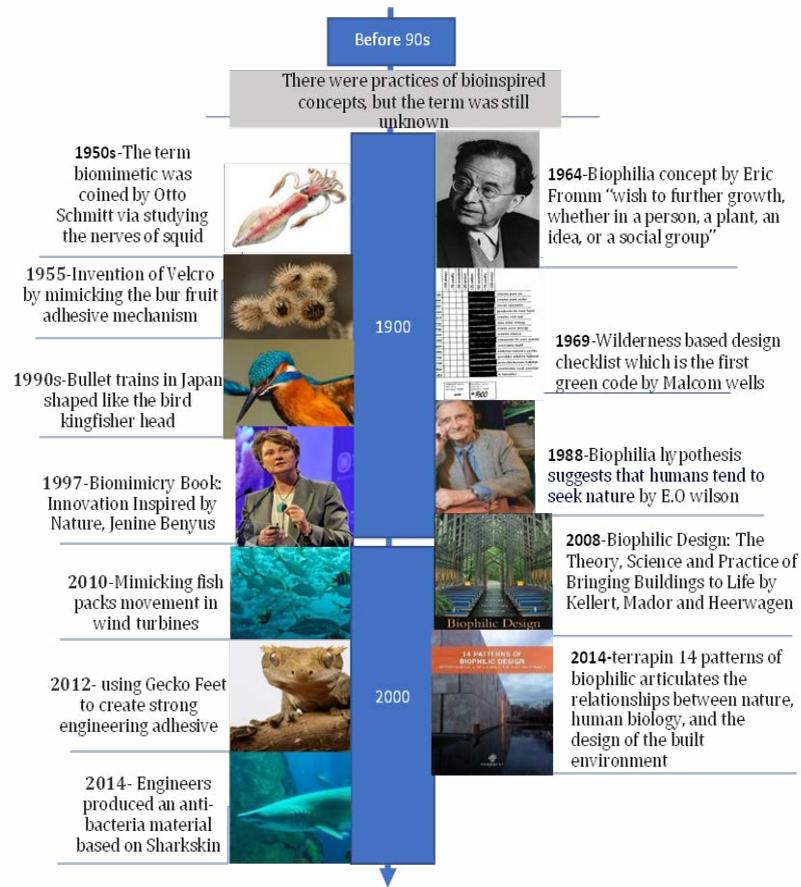


Figure 1. Summarized history of Biophilic and Biomimicry design. Source: Schreiner, (2018); University of Minnesota, (2023); Zare et al., (2021).

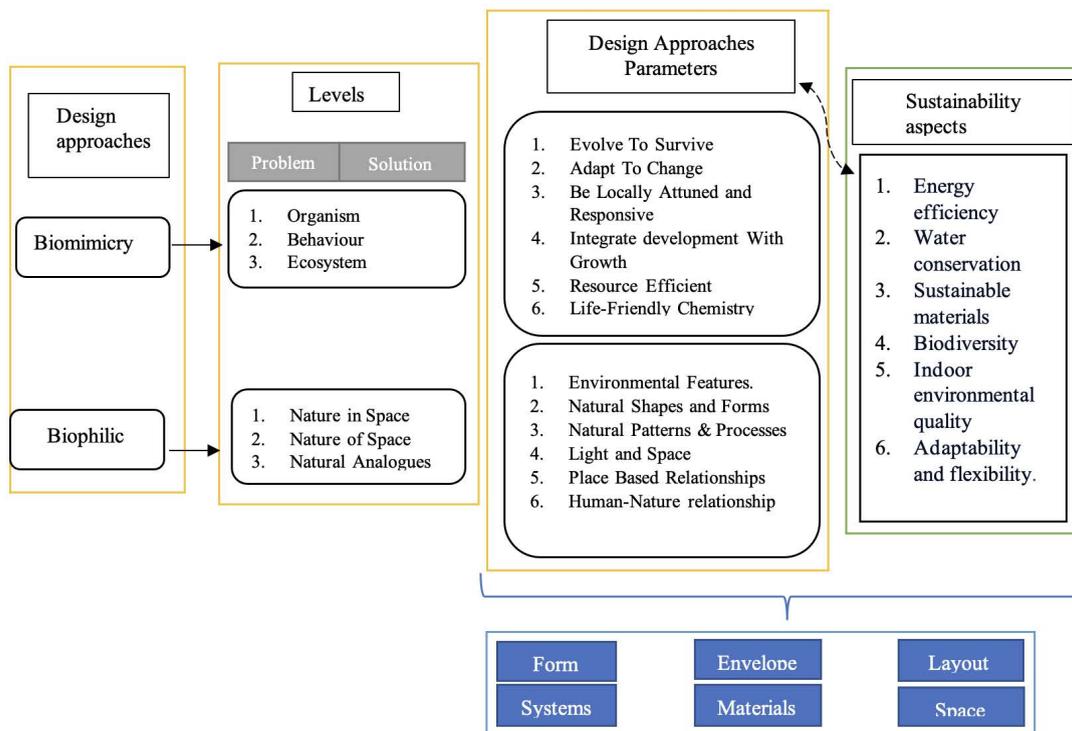


Figure 2. Flow chart of the study analysis framework. Source: The authors.

through their architecture and relationship with sustainability approaches.

1. Evaluate the integration of biophilic and biomimetic concepts in pavilion architecture.
2. Examine how these strategies enhance explicit sustainability principles.
3. Analyze architectural elements, materials, and their compatibility with these strategies.
4. Measure reduced environmental impact and potential energy efficiency gains.
5. Validate the long-term applicability of these techniques beyond the Expo.

The methodology evaluates the biophilic and biomimicry features in terms of sustainability:

1. Establishing a biophilic and biomimicry identification and categorization guide
2. Referencing biophilic design to green designs and biomimicry as science to learn strategies from nature.
3. Identifying sustainability criteria and goals

4. Analyzing each biophilic and biomimicry feature in terms of sustainable design principles / biophilic design principles

ANALYSIS FRAMEWORK

The identification and categorization guide for the five pavilions at the Dubai Expo focuses on biomimicry and biophilia concepts. It involves collecting and recognizing building elements, such as ventilation systems and architectural design, and classifying them using a checklist (Figure 2). Successful elements are considered under the study concepts, and the number of parameters added measures the strength of the concept's implementation.

There are some characteristics shown in Table 1 that aid in recognizing whether a building element responds to a particular parameter. Realistically, the building elements are identified from data that can be analyzed in different ways depending on the purpose of the analysis.

Table 1. Biomimicry and Biophilic design characteristics. Source: Ibrahim, 2023.

Biomimicry parameter	Characteristics	Biophilic parameter	Characteristics
Evolve to survive	Replicate strategies Embody information Redo successful approaches Create new options	Environmental Features.	Air, Water, Plants Animals, Materials
Adapt to change	Respond to dynamic contexts Incorporate diversity Self-renewal Embody resilience Meet a functional need	Natural Shapes and Forms	Botanical Motifs Shells and spirals Curves and arches Fluid forms Abstraction of nature
Be locally attuned and responsive	Use available resources Integrate within the surrounding	Natural Patterns and Processes	Sensory richness Area of emphasis Patterned wholes Bounded spaces Linked series and chains
Integrate development with growth	Self-organize Start from simple to complex. Allow interactions	Light and Space	Composition Communication Preference Engagement Pragmatics Daylight Filtered light Reflected light
Resource efficient	Recycle all materials Fit form to function Multi-functional design One solution for multi-needs Low energy Processes	Place-based Relationships	Geographic connection Historic connection Ecological connection Cultural connection
Life-Friendly Chemistry	Use water as solvent. Small subset of elements. Support life processes.	Human-Nature relationship	Prospect/refuge Order/complexity Curiosity/enticement Attraction/attachment Exploration/discovery

Nevertheless, the characteristics are examples of what a biophilic and/or biomimetic element can be like, but not necessarily all that it can be. Understanding the parameters as fundamental for making judgments is key to the identification process; the guide is just there to guide, not to determine facts.

DUBAI EXPO 2020 PAVILIONS ANALYSIS

This study will focus on five pavilions of Belgium, Netherlands, Singapore, Sustainability, and UAE, spread all over the Dubai expo area. It is important to point out that all these pavilions are high-tech structures. They represent countries with high per capita income and vast resources to support them. Each pavilion will be introduced in general and analyzed by element; each building element (form, materials, layout, space, systems, and envelope) that possesses biophilic or biomimicry parameters will be represented here; the parameters are coded in reference to Table 2. These parameters define a vital part of the analysis framework (Figure 2); once the building element is recognized, the author can relate it to

Table 2. Reference codes for biophilic and biomimicry parameters. Source: The authors.

Biophilic design	Code
Environmental Features.	P1
Natural Shapes and Forms	P2
Natural Patterns and Processes	P3
Light and Space	P4
Place-Based Relationships	P5
Human-Nature relationship	P6
Biomimicry	Code
Evolve to Survive	M1
Adapt to Change	M2
Be Locally Attuned and Responsive	M3
Integrate development with Growth	M4
Resource Efficient	M5
Life-Friendly Chemistry	M6

biophilic or biomimicry concepts (Ibrahim, 2023).

BELGIUM PAVILION

The Belgium Pavilion information is shown in Table 3. It was inspired by the notion of a “Green Arch” and forms a massive four-story rectangular structure wrapped in luxuriant vegetation. It comprises 500m² of exhibitions offering a glimpse into the future of Belgium’s mobility technologies and innovations. A brasserie and takeaway

kiosk for your fix of Belgium specialties in a luxurious yet cozy setting. A rooftop terrace with a lounge area for you to enjoy the sunset and the view. Almost 100 vertical strips of blonde wood line the pavilion’s longest façades, rising skyward to resemble the ribs of a vast ship.

Table 3. Belgium Pavilion information. Source: Expo, 2020; Expo, 2021.

Architect	Assar / Vincent Callebaut
Theme	Diversity in harmony
Area	3,500 m ²
Location	Mobility District

SOLAR CANOPY

The slender bridge-building shown in Figure 3 is a dynamic monolith dedicated to renewable energies, covered with a large photovoltaic and thermal solar canopy. This building element uses renewable natural resources such as sunlight to produce electricity and domestic hot water for the pavilion’s self-consumption. Easing the pressure of limited natural resources and using what is abundant in the surroundings is one of the most natural behaviors of decomposers, using the dead tissues available everywhere in nature as a food source. (M5)



Figure 3. (A) Belgium pavilion’s perspective and (B) roof plan indicating solar canopy. Source: Assar, 2020; Dey, 2021.

THE PARABOLOID

The paraboloid shown in Figure 4 is built with more than 5.5 linear kilometers of spruce louvers, generating a giant wooden Mashrabiya. It is considered a significant cultural connection to the United Arab Emirates as part of heritage building design elements. (P5) The Mashrabiya, built in CLT, features a 180-degree rotating element for solar protection, energy efficiency, and natural ventilation. This contributes to (P1) because it is the integration of natural materials but highly contradicts (M3). The wood used in the building is not native and is likely imported, potentially reducing energy savings. The wrapping technique creates mystery and surprise in the building's shape and form. (P6) The element significantly impacts the building layout, emphasizing the main axis and creating a fluid shape, connecting urban surroundings and outdoor spaces (P1) (P5). The surface exposure to the outside is increased thanks to the curvature shape, allowing more daylight into the building, contributing to saving energy and better indoor environment quality (M5) (P6).



A



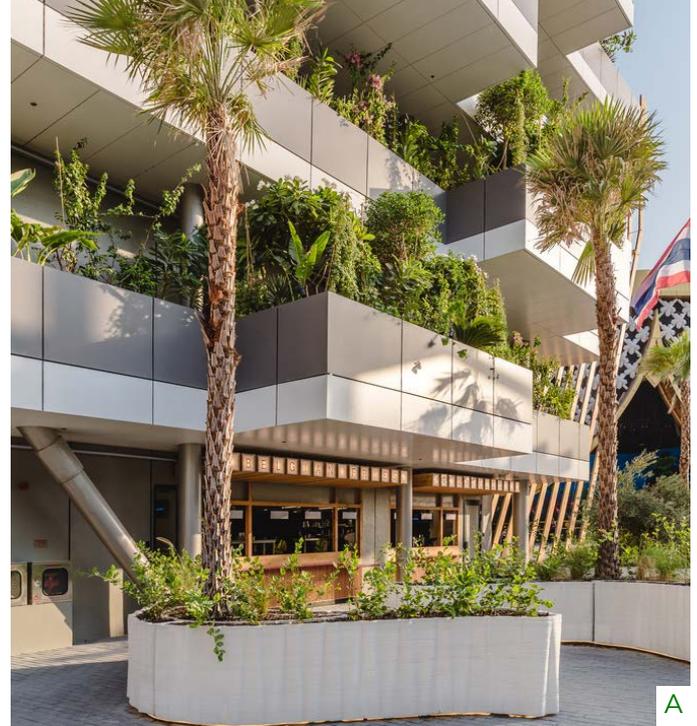
B

Figure 4. (A) Belgium pavilion's paraboloid indications on the ground floor and (B) a close-up with spruce louvers representing the Mashrabiya concept. Source: Assar, 2020; ArchDaily, 2021.

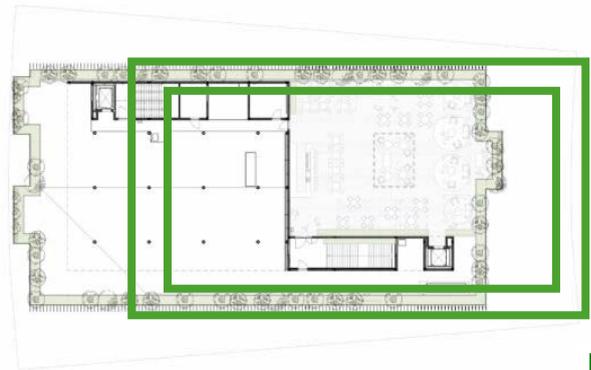
GREEN FAÇADE

The green arch features balconies and a rooftop with over 2,500 plants, shrubs, and trees. Drip-watered façades refresh outdoor terraces, promoting sustainable water

delivery and resource preservation. Greenery aligned on different levels helps the building's cooling and energy savings (Figure 5) (M5). The approach involves using living organisms to solve problems, connecting the building's natural identity and form to nature, and enhancing its performance (P1).



A



B

Figure 5. (A) Belgium pavilion's green façade and (B) its indications on the plan. Source: Assar, 2020.

THE ESCALATOR

The futuristic escalator shown and indicated in Figure 6, designed as a space-time tunnel, propels visitors toward the 2050 Odyssey. This area induces sensory enrichment due to its interior design, which is unique from the rest of the building (P3). Making this design for a multiple-level system creates an experience involving mystery in the discovery at the end of the ride, primarily because this is an event-based building that is not regularly found in similar residential or commercial buildings (P6).

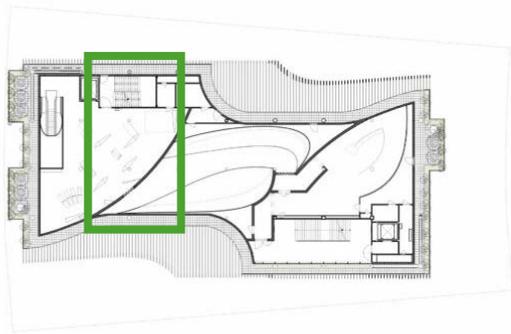


Figure 6. (A) Belgium pavilion space-time tunnel escalator and (B) its location on the plan. Source: Assar, 2020; ArchDaily, 2021.

NETHERLANDS' PAVILION

As the Netherlands' contribution to Expo 2020 Dubai, V8 Architects designed a pavilion with its own contained water, electricity, and food system, as well as a leave-no-trace mentality. The Dutch Biotope pavilion includes, in addition to the main exhibition space, an auditorium, VIP lounge, restaurant, store, and back offices on a total floor area of 3,727 square meters.

Table 4. Netherlands Pavilion information. Source: The National UAE, (2020).

Architect	V8 Architects
Theme	Sustainable solutions through out-of-the-box creativity
Area	3,727 m ²
Location	Sustainability District

Biotope

Inside the pavilion, a large cone is the main element of the exhibit- a vertical farm covered in edible plants on the outside and mushrooms on the inside, as shown in Figure 7. Providing indoor natural elements that are also useful is a core in integrating development with growth

(P5) (P1) and creating a solid ecological connection where the element is positioned and designed as a core part of the pavilion (M4). The chimney-like structure regulates temperature and moisture, harvesting water from air humidity for plant irrigation. Powering renewable energy from lightweight, transparent solar cells, the pavilion uses the sun's abundant sun and scarce water to feed 9,300 plants (M3). The result of creating such a significant natural element is the ability to minimize active system usage and energy use by relying on the natural process to regulate temperature (M5). The condensation process leaves high levels of CO₂, making the cone the ideal place to grow other kinds of food. The space is humid, dark, and cold; these are the perfect conditions for edible oyster mushrooms. You can smell them here as they grow inside the cone, creating a sensory-rich experience (P3).



Figure 7. Netherlands Pavilion Biotope exhibiting vertical farm as a core. Source: Aouf, 2020.

Entrance

Visitors descend into the pavilion on a ramp, as shown in Figure 7, and start experiencing the shift in temperature, creating a sense of exploration and discovery right at the beginning of the experience. The contrast of order and complexity reinforces the machine metaphor in the control room that leads inside the central cone, where the pavilion’s technical innovations can be projected onto white umbrellas (P6).

Materials

The Netherlands Pavilion uses reclaimed iron, biopolymers, and bio-mass tiles for an eco-friendly exterior, promoting circular economy principles (M5) (M6). V8 Architects built the pavilion primarily from steel hired from locally based companies. Sand excavated from the site is used for filling the double sheet piling and as a temporary insulation material and will be used to fill the plot back in again after the Expo (M3). The walls shown in Figure 8 are made from steel sheet piling, and the roof is made from steel tubes, while concrete was avoided in the pavilion foundations to avoid harsh chemicals (M6). Amsterdam-based Buro Belén’s biodegradable canopy and biopolymer maize curtain in the space enhance environmental connection and human-made construction elements (P1).



Figure 8. (A) Netherlands Pavilion 3D section showing materials, levels, and movement axis and (B) entrance gateway with a horizontal projection and leveling. Source: Aouf, 2021; The National UAE, 2020.

SINGAPORE PAVILION

The Singapore Pavilion at Expo 2020 Dubai exemplifies the city’s desire for a sustainable future that integrates architecture, nature, technology, and culture. The pavilion was developed by WOHA Architects and landscape design firm Salad Dressing to present a sample of Singapore’s urban environment that exemplifies the city-state’s City in Nature goal. Through the marriage of technology and nature, the multi-layered green space generates a self-sufficient ecosystem that highlights notions of sustainability and resilience.

Table 5. Singapore Pavilion information. Source: Expo 2020 – Singapore Pavilion, 2023.

Architect	WOHA
Theme	Nature. Nurture. Future.
Area	1,500 m ²
Location	Sustainability District

The ground gardens

Singapore’s multi-layered green space (Figure 9) showcases sustainability and resilience by integrating technology and nature. With over 170 plant species,

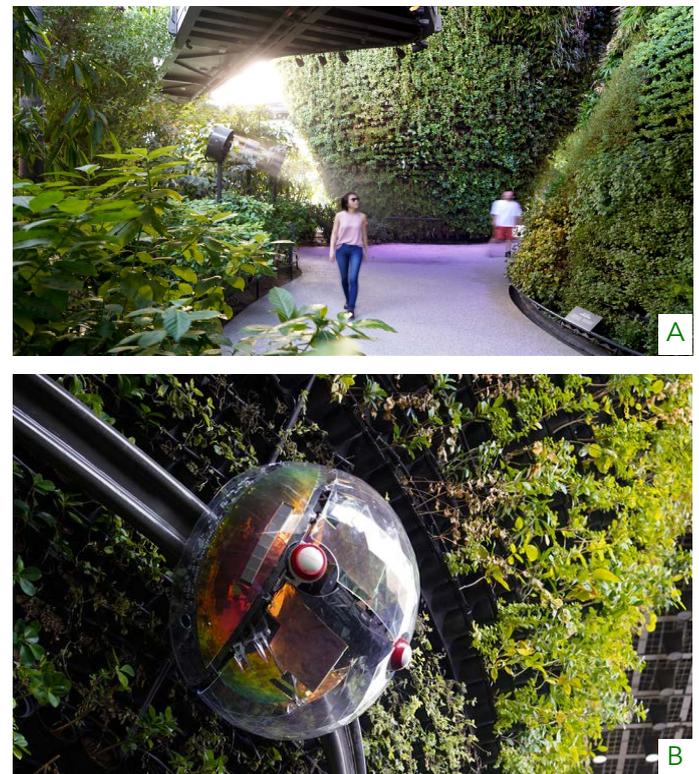


Figure 9. Singapore pavilion ground floor vertical garden and (B) climbing robots that act as a maintenance system. Source: Transsolar Klima Engineering, 2021.

visitors can experience tropical rainforests, mangrove areas, and forest streams, creating a rich bio environment (M4) (P3) (P1) (P6). Housing 80,000 plants from more than 170 plant varieties and an integrated system of greenery, energy, and water management within an efficiently designed 1,500-square-meter site is creating a new self-sufficient environment that mimics the sufficiency of nature as a system (M1).

Oceania Robotics developed three prototype climbing robots for vertical and skysrise gardens, utilizing communication systems reminiscent of living organisms to maintain greenery and monitor plant health (M4).

Thematic cones

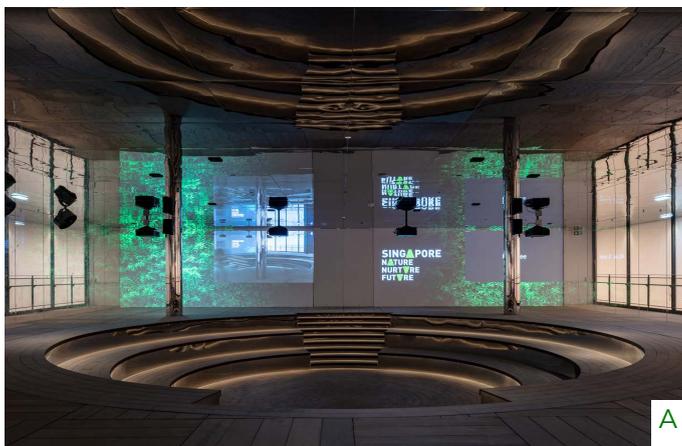
The pavilion's biophilic design and architecture showcase nature as an urban solution, surrounded by 3 modular cones, vertical greenery, and a hanging garden. It features tropical trees, shrubs, orchids, and ethnobotanical plants. Innovative solutions like dry misting and solar pipes enable tropical plants to thrive, creating a sensory heaven (P1) (M4). The shape of the cone can be more thoughtful because nature is messy and not perfectly curved and geometrical (P2).

Experience an experiential journey through the Pavilion, featuring Ground Garden, Garden Cones, and Hanging Garden, showcasing Singapore's natural heritage, innovative urban solutions, and orchid species (P3).

Singapore pavilion offers comfortable, enjoyable walks with shading, vegetation cooling, and fine mist fans, saving resources and the cooling load in the desert (M5).

Sky market

Although the sky market in Figure 10A is isolated from the very dense greenery on the first two floors, it represents a great element of prospect, mystery, and discovery. On the other hand, the exterior in Figure 10 B clearly defines it as an endpoint for the nature journey by creating a completely opposite environment with plain walls, clean edges, and a central destination (P6).



A



B

Figure 10. (A) Singapore pavilion's exotic interior sky market and (B) its emphasis on the exterior. Source: form Transsolar Klima Engineering, 2021.

Solar canopy

The pavilion, powered by 517 solar panels, provides 161 MWh of power during the expo. It is self-sustaining in the harsh desert environment, using local resources and irrigation for the extensive greenery. The pavilion's design mimics nature's power, reducing the ambient temperature by 6-10°C (M5) (M3).

SUSTAINABILITY PAVILION

Grimshaw's pavilion is one of three flagship structures at Expo 2020 Dubai, which opened earlier this month, a year later than planned due to the pandemic. It contains 6,000 square meters of exhibition space and sits at the heart of the Expo's Sustainability District. It promises to show visitors "how we can change our everyday choices to reduce our carbon footprint and environmental impact."

Table 6. Sustainability Pavilion information. Source: Expo 2020 - Terra 2023.

Architect	Grimshaw Architects
Theme	Nature. Nurture. Future.
Area	1,500 m ²
Location	Sustainability District

Energy and water system

The pavilion's design combines natural processes like photosynthesis, optimizing sunlight, and humidity harvesting, with a 130-meter roof, photovoltaic panels, and 18 "Energy Trees" for shade (M1). The pavilion's water management system uses condensation, filtered and disinfected, mixed with desalinated water, and generates power through rooftop photovoltaic panels. It

generates clean water through wastewater, condensation, and brackish surface water—the combined usage of many sustainable resources achieves many of the region’s sustainable goals (M5).

Materials

Sustainability Pavilion at Expo 2020 Dubai for having an embodied carbon footprint of almost 18,000 tons – a figure that is double the recommended level for a building of its size. Its spectacular steel canopy, shown in Figure 11, is responsible for significant, unnecessary, and harmful emissions that contribute to global warming and pollute nature (M6).



Figure 11. Sustainability pavilion exterior canopy made of steel and (B) photovoltaic trees that are nature-based in form and function. Source: Fairs, 2021; Prisco, 2021.

Form

The funnel shape shown in Figure 12 stimulates natural ventilation and brings daylight inside the pavilion. The curvature shape is a biophilic pattern, and its contribution to ventilation helps minimize cooling loads and save energy. Daylight acts as a natural element inside the pavilion and contributes to energy savings by reducing the need for artificial lighting (M5) (M4) (P2).

UAE PAVILION

The design of the UAE Pavilion evokes a falcon in flight, referencing the Emirates’ traditional art of falconry. The

main building resembles a titanic oval, with a grand, four-story entrance set into the tip. More than 25 feather-like panels are arranged at the dome of the pavilion, each curving down toward the structure’s entrance.

Table 7. UAE Pavilion information. Source: Expo 2022 – UAE Pavilion, 2023.

Architect	Santiago Calatrava
Theme	Introducing the UAE’s rich culture and bright future
Area	15,000 m2
Location	Opportunity District

Roof design

The four-story pavilion was informed “by a falcon in flight” and is topped by a series of “wings,” creating a natural shape and form for the entire building. To bring the pavilion’s central theme of “falcon in flight” to life, the roof is designed in the shape of wings that portrays the flow of movement (P2). The sloped geometry of the roof and the floating wings create visual and outward connections that welcome visitors approaching the UAE pavilion from all directions, enhancing its accessibility (P5).

There are 28 wings made of carbon fiber and covered in PV panels, as shown in Figure 12. Hydraulic actuators fuel the wings’ movement (M5). The entire roof can be opened in three minutes by spreading the wings, which gives the ability to adapt to change and create new options (M1) (M2). The structure protects panels from rain and sandstorms, while local sourcing and cold-forming processes minimize environmental impacts, conserving resources and enhancing local employment opportunities (M3) (M5).



Figure 12. UAE pavilion wing-like form. Source: Ravenscroft, 2021.

Spherical Center

At the center of the 15,000-square-meter pavilion is a sphere-shaped void, as shown in Figure 13, that serves as an auditorium. It is surrounded by a multi-level gathering space, with a circular skylight incorporating the Expo 2020 logo. (P2) The platform, which supports the seating, can move and transport the audience between different floors, which creates a sense of dynamic discovery while meeting functional needs (M2) (P6). The Oculus skylight is designed like the Expo 2020 logo and is located at 27.8 meters. It provides daylight inside the pavilion space, reducing the need for artificial lighting by using a sustainable light source (P4).



Figure 13. (A) UAE pavilion spherical core and (B) its section. Source: Ravenscroft, 2021.

Landscape

Moreover, the surrounding landscape shown in Figure 13 contains 80 trees and over 5,600 plants to ensure a biophilic environment is maintained and enhance biodiversity (P1). The design incorporates plant species not commonly used in public spaces, juxtaposing them with the falaj, an ancient irrigation system in the UAE. This geographically, culturally, and ecologically sustainable approach highlights the innovative falaj's cultural significance. (P5)

Passive cooling, ventilation, and shading strategies reduce the building's energy consumption, creating comfortable outdoor environments with shaded gardens and large pools (M3). Shaded arcades, protected by the sheltering form of the floating wings, allow for outdoor environments that are host to native and regionally adapted tree and plant

species, highly functional and responsive to the region's hot climate. These passive strategies reduce energy use, especially for the prevailing cooling needs (P5).

DISCUSSION

Biophilic and biomimicry features can serve the sustainable agenda; the five cases discussed contain 60 features, each achieving 1-2 sustainable aspect(s), as shown in Table 8. This shows how integrating nature into the human-built environment can benefit the occupants and the natural environment. Future applications can attempt to cover more aspects in a strategy to promote the benefits of bio-inspired design strategies in buildings. This can be achieved by dedicated research into integrating nature's needs with human necessities. We can benefit the world and the human species by further understanding nature and how it works.

Table 8. Summary of patterns and their sustainability aspects. Source: The authors

Biophilic design	Code	No. of applications	Sustainability aspects addresses
Environmental Features.	P1	8	Energy efficiency Indoor environmental quality
Natural Shapes and Forms	P2	4	Energy efficiency Adaptability and flexibility
Natural Patterns and Processes	P3	4	Biodiversity Indoor environmental quality
Light and Space	P4	1	Energy efficiency
Place-Based Relationships	P5	6	Biodiversity Indoor environmental quality
Human-Nature relationship	P6	7	Indoor environmental quality Adaptability and flexibility
Biomimicry	Code	No. of applications	Sustainability aspects addresses
Evolve to Survive	M1	3	Biodiversity
Adapt to Change	M2	2	Adaptability and flexibility
Be Locally Attuned and Responsive	M3	6	Energy efficiency Water conservation
Integrate development with Growth	M4	5	Energy efficiency Biodiversity
Resource Efficient	M5	11	Energy efficiency Indoor environmental quality
Life-Friendly Chemistry	M6	3	Sustainable materials

CONCLUSION

The combination of biophilia and biomimicry in design represents a paradigm shift to peacefully integrate human and natural ecosystems. The reverence for life reveals itself in biophilic design, which smoothly incorporates nature into the structural composition of numerous buildings. Integrating sustainability concepts from the start of a project shows a commitment to harmonious relationships between built surroundings and ecological systems. This dedication supports sustainability.

Dubai Expo 2020 pavilions feature nature-inspired designs that promote sustainability and harmony with nature's beauty. Biomimetic design addresses interdisciplinary sustainability issues, promoting energy conservation and a deep connection with the natural world. Biomimicry demonstrates economic and environmental sustainability, showcasing the wisdom of nature and human inventiveness in interacting with nature.

The study examined the Dubai Expo 2020 pavilions' biomimetic application. These examples showed how these techniques may transform design through sustainability. These pavilions offered physical places and immersive experiences that reflected nature's dynamic and harmony by incorporating natural concepts and ideas.

Nature, biophilia, and biomimicry are fundamental concepts that create harmony in structures. As architects, creativity encompasses human connections, environmental sustainability, and a future where architecture becomes part of life's symphony rather than just shelter.

Authors' contribution: Conceptualization, I.I. and B.A.; Data curation, B.A. and I.I. ; Formal analysis B.A. ; Investigation, B.A. , Funding acquisition, I.I. ; Research, I.I. and B.A ; Methodology, B.A. and I.I.; Project Management, I.I.; Resources; Software; Supervision I.I. ; Validation, I.I. ; Visualization I.I. ; Writing - original draft, B.A.; Writing - review and editing I.I.e architecture becomes part of life's symphony rather than just shelter.

REFERENCES

- Aamer, H.S., Hamza, A. F., Khairy, M., & Ghonimi, I. (2020). Biomimicry as a Sustainable Design Methodology for Building Behaviour. *Engineering Research Journal-Faculty of Engineering (Shoubra)*, 46(1), 191-201.
- Aboulnaga, M. and Helmy, S.E. (2022). Biomimicry in Criticism: Argument, Defense, and the Direction Toward Sustainability. In: *Biomimetic Architecture and Its Role in Developing Sustainable, Regenerative, and Livable Cities: Global Perspectives and Approaches in the Age of COVID-19* (pp. 411-454). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08292-4_6
- Aboulnaga, M. and Helmy, S. E. (2022). Can Nature and Biomimicry Be the Solution for Net-Zero Cities? Discussions and Recommendations for the Future of Biomimetic Architecture. In: *Biomimetic Architecture and Its Role in Developing Sustainable, Regenerative, and Livable Cities: Global Perspectives and Approaches in the Age of COVID-19* (pp. 507-549). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08292-4_8
- Al-Rhodesly, A., (2019). Biophilic Approach to Architecture: Case of the Alhambra. Al-Andalus [Thesis for the degree of Master of Science in Architectural Engineering]. Alexandria University.
- Bianciardi, A., Becattini, N., Cascini, G. (2023). How would nature design and implement nature-based solutions? *Nature-Based Solutions*, 3, 100047. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100047>
- Aouf, R.S. (2021). V8 Architects' Dutch Biotope pavilion generates water and food at Dubai Expo. Available from: <https://www.dezeen.com/2021/10/06/v8-architects-dutch-biotope-pavilion-dubai-expo-2020-architecture/>.
- ArchDaily, (2021). The Green Arch Belgian Pavilion Expo 2020 Dubai / Vincent Callebaut Architectures + Assar Architects. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/971259/the-green-arch-belgian-pavilion-expo-2020-dubai-vincent-callebaut-architectures-plus-assar-architects>
- Assar. (2020). The Green Arch Belgian Pavilion Expo Dubai. Assar. <https://www.assar.com/project/the-green-arch-belgian-pavilion-dubai/>
- Dey, K. (2021). Dubai Expo- The Belgium Pavilion- Country's 2050 Mobility Vision. BIOREV. <https://biorev.com/blog/2020-dubai-expo-the-belgium-pavilion-countrys-2050-mobility-vision/>
- Expo2020. (2021). Belgium Pavilion. EXPO2020 DUBAI UAE. <https://www.expo2020dubai.com/en/understanding-expo/participants/country-pavilions/belgium>
- Expo2020. (2023). Singapore Pavilion. EXPO2020 DUBAI UAE. <https://www.expo2020dubai.com/en/understanding-expo/participants/country-pavilions/singapore>
- Expo2020. (2023) Terra - The Sustainability Pavilion. EXPO2020 DUBAI UAE. <https://www.expo2020dubai.com/en/understanding-expo/participants/special-pavilions/sustainability>
- Expo2020. (2023). UAE pavilion. EXPO2020 DUBAI UAE. <https://www.expo2020dubai.com/en/understanding-expo/participants/country-pavilions/uae>
- Fahmy, S.F.A. (2018). Biomimicry as an innovation in modern Architecture Design. In: 3rd International Conference for Arab Civilization and the Islamic Arts "The Civilization and Building Creative Characters" Fourth core: Architecture, art, technology and building creative characters
 Second element: Innovation, creation and development in art, design and architecture, Hurghada, Egypt. <https://doi.org/10.12816/0044834>
- Fairs, M. (2021). Grimshaw's "completely OTT" Sustainability Pavilion at Expo 2020 Dubai caused "significant unnecessary emissions". *dezeen*. <https://www.dezeen.com/2021/10/15/>

grimshaw-sustainability-pavilion-expo-2020-dubai-significant-unnecessary-emissions/

Faragalla, A.M., & Asadi, S. (2022). Biomimetic Design for Adaptive Building Façades: A Paradigm Shift towards Environmentally Conscious Architecture. *Energies*, 15(15), 5390. <https://doi.org/10.3390/en15155390>

Green, K. (2005). The 'Bio-logic' of Architecture," Proceedings for the 2005 ACSA National Conference, Chicago, 522-530. <https://www.acsa-arch.org/proceedings/Annual%20Meeting%20Proceedings/ACSA.AM.93/ACSA.AM.93.62.pdf>

Ibrahim, I. (2023). SUSTAINABLE INTERIOR ENVIRONMENTS.

Isle, N. & E. Leitch. (s.f.). Biomimicry—Life's Principles: Applying the Laws of Nature. [cited 2023]. Oregon State Bar Sustainable Future Section. <https://sustainablefuture.osbar.org/section-new-sletter/20101spring6isleleitch/#NIELReturn>

Jamei, E., & Vrcelj, Z. (2021). Biomimicry and the built environment, learning from nature's solutions. *Applied sciences*, 11(16), 7514. <https://doi.org/10.3390/app11167514>

Karabetça, A.R. (2015, 24-28 March). Nature Inspired Architectural Designs: Using Biomimicry as a Design Strategy. [Proceeding Book]. International Conference on New Trends in Architecture and Interior Design. Grand Excelsior Hotel, Sharjah/Dubai. <https://icntadconference.com/wp-content/uploads/2023/03/1st-ICNTAD-2015-PROCEEDING-BOOK.pdf>

Oguntona, O. A., & Aigbavboa, C. (2023). Nature Inspiration, Imitation, and Emulation: Biomimicry Thinking Path to Sustainability in the Construction industry. *Frontiers in Built Environment*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1085979>

Perricone, V., Santulli, C., Rendina, F., & Langella, C. (2021). Organismal Design and Biomimetics: a problem of scale. *Biomimetics*, 6(4), 56. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040056>

Prisco, J. (2021). This Expo pavilion makes its own water and energy. CNN. <https://edition.cnn.com/travel/article/sustainability-pavilion-expo-2020-water-energy-dubai-spc-intl/index.html>

Ravenscroft, T. (2021). Santiago Calatrava tops UAE Pavilion at Dubai Expo with 28 opening wings. *dezeen*. <https://www.dezeen.com/2021/10/01/uae-pavilion-dubai-expo-2020-santiago-calatrava/>

Schreiner, W. (2018). Biomimicry: A History. The Ohio State University. *Ehistory*. <https://ehistory.osu.edu/exhibitions/biomimicry-a-history>

Taylor Buck, N. (2017). The Art of imitating life: The potential contribution of biomimicry in shaping the future of our cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(1), 120-140. <https://doi.org/10.1177/0265813515611417>

Terrapin Bright Green (2014). 14 PATTERNS OF BIOPHILIC DESIGN. Improving Health & Well-Being in the Built Environment. TERRAPIN. <https://www.terrabinbrightgreen.com/reports/14-patterns/>

Thampanichwat, C., Moorapun, Ch., Bunyarittikit, S., Suphavarophas, Ph., & Phaibulputhipong P. (2023). A Systematic Literature Review of Architecture Fostering Green Mindfulness. *Sustainability*, 15(4), 3823. <https://doi.org/10.3390/su15043823>

The National UAE. (s.f.). Dutch Pavilion Expo 2020. <https://www.thenationalnews.com/2021/06/26/dutch-pavilion-expo-2020/>

Transsolar Klima Engineering. (2021). Singapore Pavilion Expo 2020, Dubai, United Arab Emirates. <https://transsolar.com/projects/singapore-pavilion-at-expo-2021>

University of Minnesota. (2023). Biophilic Net-Positive Design Project. <https://biophilicdesign.umn.edu/>

Van der Ryn, S. and Cowan, S. (2013). *Ecological design*. Island Press.

Varshabi, N., Selçuk, S. A., & Avinç, G. M. (2022). Biomimicry for Energy-Efficient Building Design: A Bibliometric analysis. *Biomimetics*, 7(1), 21. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7010021>

Zare, G., Faizi, M., Baharvand, M., & Masnavi, M. (2021). A review of Biophilic Design Conception Implementation in Architecture. *Journal of Design and the Built Environment*, 21(3), 16-36. <https://doi.org/10.22452/jdbe.vol21no3.2>

RELEVAMIENTO DEL USO DEL "CIELO DE BARRO Y PAJA ALIVIANADO" COMO PRÁCTICA CULTURAL EN LA TECHUMBRE VERNACULAR DE LA VIVIENDA AYMARA DE ARICA Y PARINACOTA, CHILE¹

REVIEW OF "LIGHTENED SLIPSTRAW CEILINGS" AS A CULTURAL PRACTICE IN THE VERNACULAR ROOFING OF AYMARA HOUSES IN ARICA AND PARINACOTA, CHILE

PESQUISA SOBRE O USO DO "TETO DE BARRO E PALHA ALIVIADO" COMO PRÁTICA CULTURAL NO TELHADO VERNACULAR DAS RESIDÊNCIAS AIMARÁS EM ARICA E PARINACOTA, CHILE

Sergio Alfaro-Malatesta

Doctor en proyectos de innovación tecnológica en la ingeniería del proceso y producto
Profesor Asociado, Académico Planta permanente Escuela de Arquitectura
Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-6730-9713>
salfaro@ucn.cl

Massimo Palme

Doctor en Arquitectura, Energía y Medioambiente
Profesor Asociado, Académico Departamento de Arquitectura
Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-1166-2926>
massimo.palme@usm.cl

Jocelyn Cohen-Herrera

Psicóloga y Licenciada en Psicología
Investigadora independiente, Antofagasta, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-5583-3462>
jocelyncohenherrera@gmail.com

RESUMEN

Este artículo trata acerca de la caracterización de la tecnología de un cielo raso de paja y barro denominada en lengua aymara como "caruna". El estudio se realizó en viviendas Aymaras a más de 4.000 metros sobre el nivel del mar en la localidad de Tacora, en la región de Arica y Parinacota, Chile. El estudio forma parte del proyecto 49204 financiado por el Servicio Nacional del Patrimonio Cultural. Su objetivo es rescatar esta técnica vernácula como alternativa a los materiales industrializados que han modificado la vivienda andina y la calidad de vida en climas extremos durante los últimos 25 años. Se recogieron muestras de los materiales utilizados en esta técnica, reproducida por un cultor local, y se analizaron en laboratorio para determinar sus propiedades térmicas y de trabajabilidad. Además, se monitoreó el desempeño energético de tres viviendas en el poblado de Tacora para comparar los resultados obtenidos con los de los laboratorios. Los hallazgos revelaron que la matriz de barro utilizada en esta técnica de encielado es predominantemente arcillosa con mediana compresibilidad y baja conductividad térmica, lo que la hace adecuada como aislante en climas desérticos fríos. El cielo de barro y paja alivianado se destacó por su presencia en la cultura local, la disponibilidad de recursos materiales y su facilidad de instalación. Este estudio subraya la importancia de preservar el conocimiento tradicional, respetando los saberes ancestrales y mejorando el desempeño térmico de las viviendas en la cordillera norte de Chile, Perú y Bolivia, destacando su relevancia para el desarrollo de soluciones habitacionales sostenibles y culturalmente pertinentes.

Palabras clave

construcción en tierra, arquitectura vernácula, fibras naturales, aislación térmica, Ichu.

ABSTRACT

This article reviews the slipstraw ceiling technology known in the Aymara language as "caruna." The study was made in Aymara homes at more than 4,000 meters above sea level in the town of Tacora, in the region of Arica and Parinacota, Chile, as part of project 49204, financed by the National Cultural Heritage Service. It aims to recover this vernacular technique as an alternative to industrialized materials that have modified Andean housing and the quality of life in extreme climates over the last 25 years. Samples of materials used in this technique, reproduced by a local craftsman, were collected and analyzed in the laboratory to determine their thermal properties and workability. The energy performance of three homes in Tacora was also monitored to compare the results obtained with those of the laboratories. The findings revealed that the mud mold used in this ceiling technique is predominantly made from clay with medium compressibility and low thermal conductivity, which makes it apt for insulation in cold desert climates. Lightened clay and straw ceilings stand out in the local culture thanks to the availability of material resources and ease of installation. This study highlights the importance of preserving traditional knowledge, respecting ancestral knowledge, and improving the thermal performance of homes in the northern mountain range of Chile, Peru, and Bolivia, highlighting its relevance for developing sustainable and culturally relevant housing solutions.

Keywords

earth construction, vernacular architecture, natural fibers, thermal insulation, Ichu.

RESUMO

Este artigo trata da caracterização da tecnologia de um teto feito de palha e barro, conhecido na língua aimará como "caruna". O estudo foi realizado em habitações aimarás a mais de 4.000 metros acima do nível do mar na cidade de Tacora, na região de Arica e Parinacota, Chile. O estudo faz parte do projeto 49204, financiado pelo Serviço Nacional de Patrimônio Cultural. Seu objetivo é resgatar essa técnica vernacular como uma alternativa aos materiais industrializados que modificaram as moradias andinas e a qualidade de vida em climas extremos nos últimos 25 anos. Amostras dos materiais usados nessa técnica, que foi reproduzida por um cultor local, foram coletadas e analisadas em laboratório para determinar suas propriedades térmicas e de trabalhabilidade. Além disso, o desempenho energético de três casas no vilarejo de Tacora foi monitorado para comparar os resultados obtidos com os dos laboratórios. As descobertas revelaram que a matriz de barro usada nessa técnica é predominantemente argilosa, com compressibilidade média e baixa condutividade térmica, o que faz com que seja adequada como isolante em climas desérticos frios. O telhado de palha e barro destacou-se por sua presença na cultura local, pela disponibilidade de recursos materiais e pela facilidade de instalação. Este estudo ressalta a importância de preservar o conhecimento tradicional, respeitar o conhecimento ancestral e melhorar o desempenho térmico das habitações na cordilheira norte do Chile, Peru e Bolívia, destacando sua relevância para o desenvolvimento de soluções habitacionais sustentáveis e culturalmente relevantes.

Palavras-chave:

construção em terra, arquitetura vernacular, fibras naturais, isolamento térmico, Ichu.

INTRODUCCIÓN

La revisión de los censos de Población y Vivienda de la Región de Arica y Parinacota en los últimos 25 años demuestra la existencia de un cambio sustancial en la composición de los materiales usados en las techumbres de las viviendas vernáculas aymaras (Figura 1), lo cual, a su vez, pudo haber llevado a cabo un proceso de cambio en eficiencia y efectividad de estas ante el clima extremo donde se ubican.

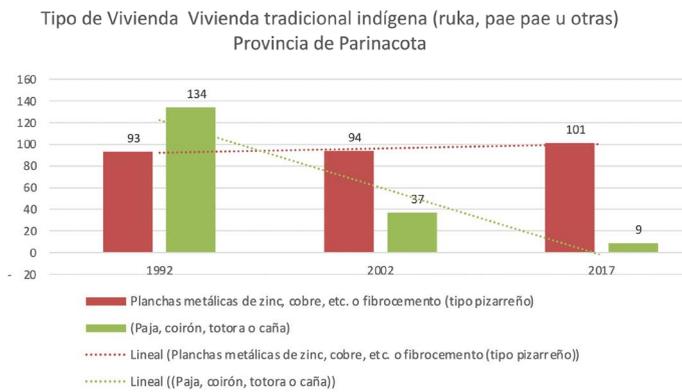
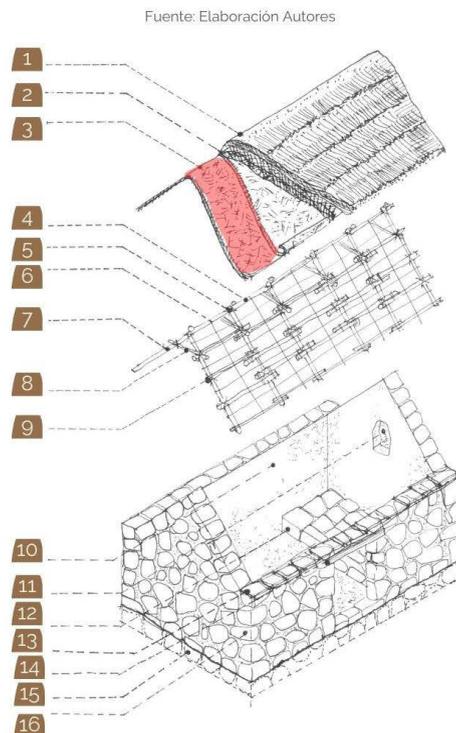


Figura 1. Análisis de la sustitución material entre techo vegetal a planchas de zinc o fibrocemento, vivienda "tradicional indígena" provincia de Parinacota períodos intercensales 1992-2002-2017. Fuente: Elaboración de los autores

Diversas investigaciones en el ámbito de antropología cultural realizadas entre los años 1968 y 1969 en Enquelga (Chile) evidenciaron el uso del barro y paja en los cielos de las viviendas aymaras. En este registro etnográfico se identificaron 90 viviendas en las que se describía el uso de la técnica local denominada "[...]Caruna" o "Karuna" (Šolc, 2011; Weber et al., 1998), o también "takta" (Figura 2 y Figura 3), que era el modo tradicional empleado para encielar las techumbres en los pueblos del altiplano andino en el norte de Chile (Šolc, 2011).



Figura 2. Cielo interior de una vivienda tradicional en Guallatire, "caruna" o "takta", el material en estudio en color blanco, fotografía año 2022. Fuente: Elaboración de los autores



Partes y Elementos vivienda andina tradicional sobre los 4.000 m.s.n.m, caso de Guallatire, Arica y Parinacota, Chile.

1. Cubierta exterior: Paja brava, "gualla", embarrada, e= 10 a 15 cm. se construye el alero protector perimetral, "morro y "pescado".
2. Capa intermedia paja brava suelta de espesor regular de 20 cm.
3. Cielo interior: (Caruna, Karuna, takta, p'ira, t'ili): Barro y Paja "Sikulla" e = 1 a 2 cm.
4. Viga cumbreira: madera de "Queñoa" sin elaborar" diám. app. 7 cm.
5. Amarra en forma de "x" llamada "correhuela" de cuero de llamo mojado,
6. Sub estructura: correas de cuero de llamo e = 1 cm
7. Pierna tijeral: madera de "Queñoa" sin elaborar" diámetro app. 7 cm.
8. Nudillo o tranquilla: madera de "Queñoa" sin elaborar" diámetro app. 5 cm.
9. Costanera o "quiras": madera de "Queñoa" sin elaborar" diámetro app. 7 cm.
10. Revoque de muros: arcilla arena, eventualmente incorpora cal.
11. Hornacina en muro testero, también llamados "phutu", origen preincaico.
12. Lajaeado a sobre nivel: permite la disposición de una cama.
13. Alerones de lajas con rocas volcánicas, ignimbrita o similar.
14. Dintel de madera aserrada.
15. Cimiento corrido piedra de grandes dimensiones sobresalen del suelo 0,15 a 0,20 cm. rocas de gran densidad, del tipo igneas.
16. Bloques esquineros rocas ciclópeas canteadas, el muro en general se construye a dos caras con rocas partidas con su cara lisa o canteada hacia el exterior, el ancho del muro alcanza un ancho de 35 a 40 cm de ancho.

Figura 3. Vivienda tradicional en Guallatire, incorpora el uso de "Caruna o Takta". Fuente: Elaboración de los autores



Figura 4. Plano de Tacora, agosto 2022, vista general del poblado, plantas de muros y de cielo de viviendas consideradas para el estudio de clima interior. Fuente: Elaboración de los autores

Este sistema constructivo revela implicancias sociales, culturales y rituales en términos de establecer una estrategia adaptativa al medio físico-climático del habitar en la altura. La última vez que se hizo mención a este sistema constructivo fue en la década de los 70', gracias a las investigaciones realizadas por el Dr. Václav Šolc en la localidad de Enquelga.

El antecedente de los cielos de barro y paja ha sido mencionado recientemente en el contexto de estudios de etnobotánica. En este ámbito, cuando se considera que la arquitectura aymara es una respuesta adaptativa al medio ambiente extremo, muchos autores se han arriesgado a una caracterización de la vivienda andina como "[...] aquella que posee características comunes y patrones tipológicos repetitivos en toda la macrozona andina los que han sido ampliamente descritos por numerosos arquitectos, antropólogos e historiadores de la arquitectura" (Jorquera, 2014).

En el año 2018, a partir de la restauración del poblado de Tacora, se realizó una reintroducción de esta técnica, aunque esta vez incorporando materiales industrializados,

estandarizados y combinados con la técnica vernácula. Precisamente es este fenómeno el que constituye el caso de estudio que se trata en este artículo (Figura 4 y Figura 5).

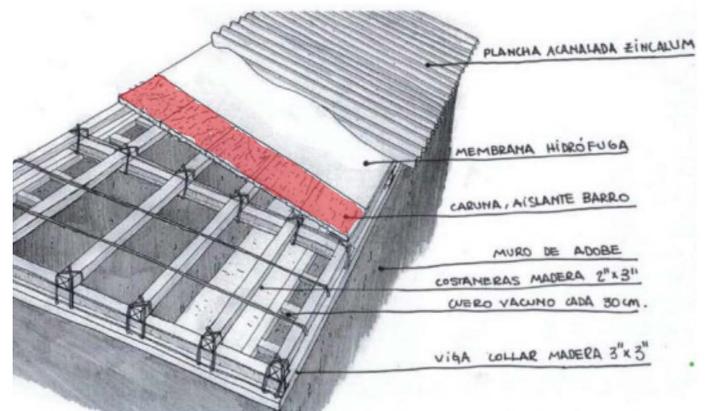


Figura 5. Isométrica constructiva vivienda restaurada en Tacora año 2018. Fuente: adaptación de los autores de Fundación Altiplano

POTENCIAL DE LA TÉCNICA CONSTRUCTIVA “CARUNA”

La técnica constructiva aymara “Caruna o Takta” consiste en el uso de una plancha de barro y paja alivianada de 1 a 2 cm de espesor y dimensionada en franjas de 50 cm de ancho, las que se colocan sobre un entramado de caña traslapados levemente, con una superficie interior lisa. Su confección se realiza *in situ*, con paja fina y barro apisonado bajo una tela para comprimirlo (Dirección de Arquitectura, Ministerio de Obras Públicas, 2016).

La combinación de barro y paja denominada “tierra alivianada” se ha relacionado con sistemas mixtos de estructuras en madera portante. En algunos países de Europa, como por ejemplo, Alemania o Francia, son utilizados desde hace tiempo de forma moderna y conforme a las normativas, logrando un buen desempeño térmico y acústico (Meli et al., 2019). Sin embargo, aún se requiere evaluar su comportamiento sísmico.

En una visión más ecológica, la confección de la plancha de barro y paja para encielar se le relaciona con el ciclo de los pastos andinos. La construcción de las techumbres de las casas se realiza antes de la floración, ya que las especies de pastos andinos con las que se confecciona la plancha de barro y paja alivianada registran un mejor rendimiento y durabilidad cuando se cosechan en esta etapa. Las especies de pasto utilizadas para la paja incluyen la paja kise, la paja blanca y la paja brava, las cuales son comúnmente empleadas en los cielos y techumbres de las casas en el sector andino (García et al., 2018).

Por otra parte, diversas investigaciones sobre el efecto de las fibras artificiales y naturales en el comportamiento del suelo han reportado que dichas fibras son materiales estabilizadores de suelos eficientes y de bajo costo. También se ha comprobado que la resistencia a la tracción y el alargamiento de las fibras son mayores cuando están húmedas (Charca et al., 2015).

PROPIEDADES TÉRMICAS Y MECÁNICAS

La “Caruna”, en tanto sistema constructivo mixto, presenta propiedades térmicas y mecánicas interesantes para la construcción actual. Algunas investigaciones como las realizadas por Weiser et al. (2020), Volhard (2016) y Vincelas et al. (2019), han establecido que las propiedades térmicas de sistemas constructivos mixtos de barro y paja alivianada tienen un gran potencial como aislante, recubrimiento o masa de relleno en tabiquerías de muros o techumbre. En cuanto a su desempeño térmico, este depende en gran medida de la densidad de la matriz de barro y paja. No obstante, se ha planteado la posibilidad de que, frente a densidades superiores a 1200 kg/m³, puedan obtenerse rendimientos térmicos cercanos a los valores de 0,150 W/mK (Meli et al., 2019).

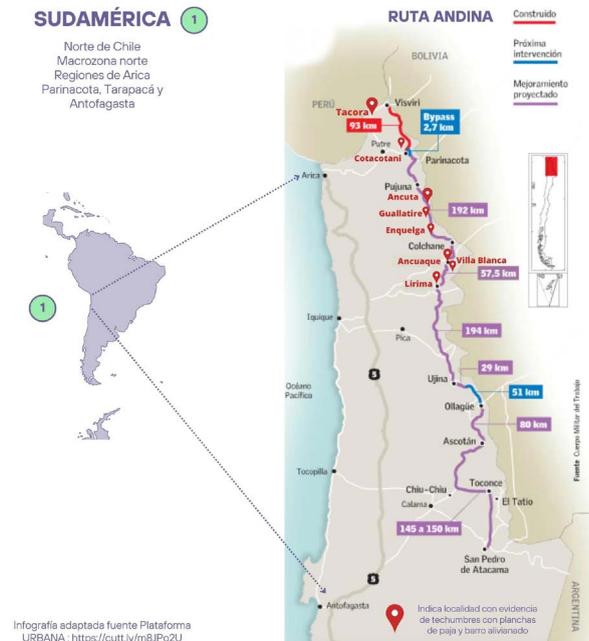


Figura 6. Área de ubicación casos de estudio, se observan los casos identificados desde Tacora hasta Guallatire a través de las rutas A-23, Ruta 11, A-211 y A-235 de la Provincia de Parinacota. Fuente: adaptación de los autores de infografía plataforma urbana.

Por último, en lo que respecta a las propiedades de resistencia mecánica, se ha demostrado que tanto la selección como la disposición de las fibras de paja mejora la resistencia mecánica del material dentro de la matriz de barro (Noaman et al., 2020).

MARCO DE INVESTIGACIÓN Y CASO DE ESTUDIO

El presente artículo se enmarca en las acciones desarrolladas en el proyecto de investigación denominado “Caruna: rescate tecnológico de los saberes vernáculos sostenibles para el aislamiento térmico en la arquitectura andina de Arica y Parinacota”, desarrollado gracias a la obtención del Fondo del Patrimonio Cultural 2021, en la submodalidad de investigación, registro y levantamiento de patrimonio cultural.

El objetivo general del proyecto de investigación consistió en ampliar el conocimiento para la salvaguardia de la “Caruna” como saber ancestral y expresión material de práctica constructiva del mundo andino, que en la actualidad no cuenta con identificación oficial y se encuentra en peligro de desaparecer del repertorio constructivo de las comunidades y de la arquitectura vernácula de la región de Arica y Parinacota.

El área estudio se localiza en la zona alto Andina de la Región de Arica y Parinacota, a más de 4000 m.s.n.m, considerando específicamente los poblados de Tacora, Guallatire, Ancuta, Chua y Misitune, que forman parte de la comuna General Lagos y Putre y se encuentran

inmediatamente al oeste de la Cordillera de Los Andes (Figura 6). En esta zona, el clima es del típico desierto marginal de altura, clasificado como BWk en la taxonomía de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007), donde la temperatura puede alcanzar mínimos de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y máximos de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, con niveles muy elevados de radiación solar (más de 1000 W/m^2 al medio día durante casi todo el año) y precipitaciones concentradas en el período de enero y febrero (Figura 7 y Figura 8).



Figura 7. Caracterización climática Alto Andina, Región de Arica y Parinacota. Fuente: Mapa base <http://www.gep.uchile.cl>

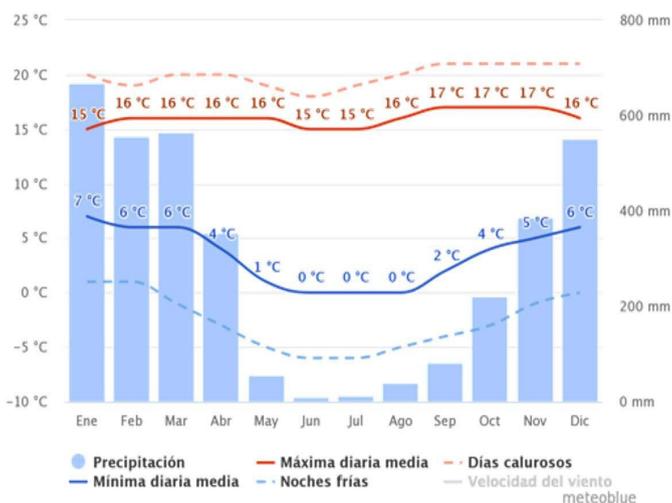


Figura 8. Temperaturas medias y precipitaciones. Datos climáticos y meteorológicos históricos de Tacora. Fuente: Meteoblue

El caso de estudio de este trabajo se ubica en el pueblo de Tacora, que recibe su nombre del volcán sobre cuyas faldas se asienta y que es el límite con Perú. Este sector se caracteriza por un extraordinario paisaje natural y cultural marcado por las condiciones de un desierto a gran altura. Su origen se remonta a las formaciones coloniales incas que tuvieron lugar durante el siglo XVI en respuesta al avance de la corona española dentro del territorio, dando lugar a las estancias de Ancomarca, Cosapilla y Tacora. Recibió influencia de la ruta de la plata y, más recientemente, en el siglo XIX tuvo su apogeo económico vinculado a la extracción de azufre y la conexión con el ferrocarril de Arica a la Paz. A partir de 1967, la extracción del mineral cesó completamente y comenzó una migración hacia el centro urbano más próximo de Arica, que continúa hasta el día de hoy. El pueblo de Tacora tiene una población permanente de 4 personas y otras tantas que se desplazan desde la ciudad al poblado para la celebración de las fiestas patronales de la Virgen del Carmen (Pereira & Yuste, 2019).

METODOLOGÍA

La metodología aplicada para la realización de este estudio puede dividirse en cuatro etapas. La primera tiene relación con realizar un estudio bibliográfico y un levantamiento de información para confirmar la presencia de diferentes materialidades de cubierta en viviendas de la zona de interés. Luego, en la segunda etapa, se realizaron encuestas para establecer el grado de conocimiento transferido entre generaciones de pobladores de la provincia de Parinacota respecto de las técnicas constructivas asociadas a cubiertas vernáculas. En la tercera etapa se obtuvieron probetas de material identificado como "Caruna" y se realizaron ensayos de caracterización microscópica y de comportamiento térmico de las mismas. Finalmente, en la cuarta etapa se realizaron estudios de monitorización del comportamiento térmico de dos viviendas, con materialidades de aislamiento diferentes.

ETAPAS DE LA METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Primera Etapa: Confirmación De Materialidades De Cubierta

En relación con la primera etapa, esta consistió en hacer un estudio longitudinal de 25 años sobre la sustitución de las materialidades de las techumbres en áreas rurales de la provincia de Parinacota. Para ello, se analizaron los datos obtenidos a partir de los Censos de Población y Vivienda de 1992, 2002 y 2017, centrándose en dos categorías de información: a) Tipologías de identificación de viviendas que utiliza el INE; y b) tipologías materiales que componen las distintas partes de la vivienda.

El análisis consistió en revisar cada uno de los períodos intercensales y posteriormente realizar cruces de información a partir de la focalización en tipos específicos

de materiales como la "paja", el "coirón", la "totora", y la "caña".

Segunda Etapa: Transferencia De Conocimiento Entre Generaciones

Para esclarecer la efectividad de la transmisión del conocimiento entre generaciones, correspondiente a la segunda etapa, se abordó como primera tarea el tomar contacto con la población local juvenil escolarizada a fin de determinar qué nivel de conocimiento tenían respecto de la forma tradicional de elaboración del "cielo de barro y paja alivianado". Para efectos de este trabajo, la muestra seleccionada (de tipo intencional) correspondió a 32 estudiantes de 16-17 años de edad del Liceo Técnico Agrícola Granaderos de Putre.

Lo anterior debido a que las fuertes políticas estatales, desarrolladas en las últimas dos décadas, para fomentar el reconocimiento de los pueblos originarios, han dado como resultado una tendencia en los jóvenes a afirmar identidades étnicas, lo cual conlleva a valorar el pasado, recuperar ritualidades y resignificar estos ritos en los espacios urbanos (Gavilán & Viguera, 2020; Yáñez & Capella, 2021).

La metodología del encuentro contempló, en primer lugar, una exposición teórica de las características del material, su relevancia y la descripción de la investigación (Figura 9). En segundo lugar, para la determinación del saber constructivo en jóvenes andinos se utilizó una encuesta que consideró 10 preguntas divididas en dos dimensiones (tabla 1). La primera dimensión estuvo orientada a identificar el conocimiento previo acerca de la técnica constructiva, la cual adopta distintos nombres según el poblado donde se encuentre. Estas denominaciones se obtuvieron a partir de una revisión bibliográfica previa. La segunda dimensión estuvo dirigida a dilucidar la motivación e interés de perpetuar la tradición constructiva. En este caso, las aseveraciones tuvieron una opción de respuesta binaria (sí-no).



Figura 9: Hito de Lanzamiento del proyecto en la localidad de Putre, agosto de 2022, aplicación de instrumento de medición acerca del saber constructivo. Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 1: Dimensiones de la encuesta que indaga acerca del conocimiento previo y la proyección de perpetuación del saber por parte de los jóvenes de la localidad de Putre. Fuente: Elaboración de los autores

Dimensión 1: Identificación del Conocimiento Previo.	Dimensión 2: Motivación e Interés para Perpetuar la Tradición Constructiva.
1. He escuchado anteriormente el término "caruna".	6. En mi familia se habla de este tipo de techumbre.
2. He escuchado anteriormente el término "tacta".	7. Conozco otros métodos de construcción típicos para hacer techumbres.
3. He escuchado anteriormente el término "p'ira".	8. Encuentro valor en los saberes constructivos típicos de la cultura local.
4. He escuchado anteriormente el término "t'ili".	9. Me interesaría aprender de estos métodos de construcción.
5. Sé que cualquiera de estos términos ("caruna", "tacta", "p'ira", "t'ili") forman parte de algunas costumbres tradicionales.	10. Me interesaría saber más acerca de la arquitectura andina.

Tercera Etapa: Determinación De Propiedades Térmicas De La "Caruna"

Para la obtención de muestras de "Caruna", se contactó a un cultor y albañil del poblado de Visviri (Figura 10), quien rescató este saber a partir de su experiencia personal y permitió incorporar esta técnica en la restauración del poblado de Tacora en 2018. Se obtuvo de él un relato de primera fuente acerca de su perspectiva y valoración de este saber constructivo y además confeccionó dos probetas de "caruna". Estas probetas fueron testeadas posteriormente en el laboratorio CITEC bajo la norma NCH 850 Of 2008.

De acuerdo con el informe del laboratorio, las muestras analizadas se definieron como un material natural fabricado en base a suelo-paja, denominado por el cliente como "Caruna", de dimensiones 30cm x 30cm x 0,5 cm y densidad seca aparente de 1252 kg/m³. Por su parte, para obtener valores de transmitancia y resistividad de la solución constructiva, se utilizó el método del anillo de guarda de acuerdo al procedimiento que se describe en la misma norma.

El ensayo normalizado consta de una placa metálica central (placa caliente) provista de calefacción eléctrica. Esta placa se encuentra rodeada en forma de marco (anillo de guarda), que puede ser calentada independientemente. A ambos lados de las placas se disponen las probetas (2), de igual dimensión y de



Figura 10: Cultor Aymara elaborando las probetas para ser enviadas al laboratorio. Fuente: Elaboración de los autores

ALTURA 4.088 M.S.N.M.	
CASO DE ESTUDIO (TAC-04)	
<p>CASO TAC-04 VIVIENDA POBLADO DE TACORA PROPIETARIA SRA. TEODORA FLORES</p> <p>UBICACIÓN: POBLADO DE TACORA PROVINCIA DE PARINACOTA COMUNA DE GENERAL LAGOS</p> <p>OBSERVACIÓN SE IDENTIFICA TOTORA EN EL CIELO DE LA VIVIENDA PRODUCTO DEL PROCESO DE RESTAURACIÓN EFECTUADO POR FUNDACIÓN ALTIPLANO EN 2018, ESTA SOLUCIÓN DE CUBIERTA PRESENTA UNA SOBRE ESTRUCTURA DE MADERA Y LANA MINERAL DE 2 CM CON CUBIERTA DE ZINC ACANALADO Y TERMINADO CON PINTURA DE TECHO</p> <p>CLASIFICACIÓN DEL CASO MIXTO (VERNACULAR CON MATERIALES NATURALES)</p>	
EMPLAZAMIENTO CASO	
EXTERIOR VIVIENDA	INTERIOR RECINTO VIVIENDA

Figura 12. Viviendas restauradas con cielo de totora, Tacora, 2022. Fuente: Elaboración de los autores

ALTURA 4.088 M.S.N.M.	
CASO DE ESTUDIO (TAC-02)	
<p>CASO TAC-02 VIVIENDA POBLADO DE TACORA PROPIETARIO SR. PABLO CHURA</p> <p>UBICACIÓN: POBLADO DE TACORA PROVINCIA DE PARINACOTA COMUNA DE GENERAL LAGOS</p> <p>OBSERVACIÓN SE IDENTIFICA CARUNA EN EL CIELO DE LA VIVIENDA PRODUCTO DEL PROCESO DE RESTAURACIÓN EFECTUADO POR FUNDACIÓN ALTIPLANO EN 2018, ESTA SOLUCIÓN DE CUBIERTA PRESENTA UNA SOBRE ESTRUCTURA DE MADERA Y FIELTRO CON CUBIERTA DE ZINC ACANALADO Y TERMINADO CON PINTURA DE TECHO</p> <p>CLASIFICACIÓN DEL CASO MIXTO (VERNACULAR CON MATERIALES NATURALES)</p>	
EMPLAZAMIENTO CASO	
EXTERIOR VIVIENDA	INTERIOR RECINTO VIVIENDA

Figura 11. Viviendas restauradas con cielo de barro y paja, Tacora, 2022. Fuente: Elaboración de los autores

caras planas paralelas. Ajustadas a las probetas, se ubican las respectivas placas metálicas refrigeradas con agua (placas frías), cuya forma es semejante a la de un sándwich.

Cuarta Etapa: Monitorización Del Comportamiento Higrotérmico

Como se mencionó anteriormente, este estudio se realizó en el poblado de Tacora, dado que allí, por una parte, se contaba con una intervención contemporánea y reciente del uso de la caruna, a propósito de la restauración del poblado que se hizo en 2018. Por otra parte, en este poblado se podía contar con un material

de contraste que también se usa en el encielado por ser considerado un buen aislante térmico, como es la "Totora" (Aza-Medina et al., 2023; Hidalgo-Cordero et al., 2023).

Para hacer este contraste, se seleccionaron inicialmente cuatro viviendas: dos con cielo de "barro y paja" y dos con cielo de "totora". Luego, se hizo una nueva selección eligiendo una de cada una para ser monitorizadas (Figura 11 y Figura 12). Dicho proceso se orientó, en primer lugar, a obtener parámetros y datos de confort ambiental a través de variables de temperatura y humedad del clima interior - exterior de las viviendas que usan totora, para posteriormente compararlo con simulaciones de confort ambiental de las viviendas a partir de la obtención de datos normalizados de transmitancia térmica del material de "barro y paja".

LEVANTAMIENTO DE DATOS

En cuanto al proceso de levantamiento de datos climáticos, estos se obtuvieron mediante una campaña en terreno planificada para medir con precisión el comportamiento ambiental interior y exterior de las viviendas. A partir de esta campaña, se identificaron los puntos de interés y las herramientas y equipos necesarios para recopilar la información tanto en el interior como en el exterior de las viviendas.

En el interior de las cuatro viviendas seleccionadas se instalaron equipos de medición de temperatura y humedad (Datalogger), los cuales se posicionaron a nivel de cubierta. Los equipos instalados corresponden a pequeños termógrafos de registro que permiten

almacenar gran cantidad de datos durante extensos periodos. Para efectos de esta investigación, los equipos se configuraron para obtener información cada 15 minutos durante un periodo de 5 meses (julio- noviembre). Asimismo, se utilizó una estación de medición del confort (Testo 400) compuesta por:

- un termómetro de globo para la medición de la temperatura media radiante
- un anemómetro de hilo caliente para la medición de la velocidad del aire
- un termómetro para la medición de la temperatura ambiente
- un higrómetro para la medición de la humedad relativa
- un registrador procesador para el cálculo del voto medio previsto

El proceso para determinar la ubicación de los equipos consistió, en una primera instancia, en realizar la medición del recinto en donde se ubicaría el equipo con un medidor láser. Esta medición incluyó el área de la habitación, las ventanas y puertas y la altura de la vivienda. A partir de la información obtenida, se determinó la posición en donde se ubicaría el Datalogger. Se procuró que el equipo quedara lo más centrado en la habitación y alejado de cualquier fuente de calor y humedad que pudiera alterar los datos generales. Para su instalación, se sujetó con cuerdas a las vigas de la techumbre y se inspeccionó el inicio de la lectura de datos. Finalmente, se tomó registro del código del equipo y el lugar donde se posicionó en la habitación. Por su parte, para la instalación del equipo TESTO 400, se determinó considerar cinco puntos establecidos de medición y dos alturas de registro en cada uno de los puntos, debido a que el ambiente interior no era homogéneo.

En el exterior de las viviendas se instaló una estación meteorológica digital compuesta por una estación base y sensores para obtener los valores de medición. Estos sensores se ubicaron en un punto de medición sobre un mástil a cuatro metros de altura. La información obtenida por los sensores se envió a la estación base mediante una consola de visualización, la cual se ubicó en el interior de la vivienda y desde allí se obtuvo una lectura en tiempo real a través de la señal de wifi. Además, se estableció la conexión de la estación meteorológica con uno de los dispositivos móviles de un miembro del equipo para monitorear el correcto funcionamiento de la estación y previsualizar los datos que almacenan los sensores. Esto permitió realizar una primera aproximación de la fluctuación meteorológica registrada.

La Tabla 2 sintetiza las especificaciones técnicas de cada equipo utilizado en la medición de la temperatura, humedad y confort en el interior y exterior de las viviendas a monitorizar.

Tabla 2. Detalle de los Instrumentos utilizados en la fase de monitoreo de las viviendas. Fuente: Elaboración de los autores

Equipo	Especificaciones técnicas
Datalogger temperatura (t°) y Humedad (H%) Elitehc	Rango de medición de t°: +60°C ~-30°C (Sensor interno) -40°C ~+85°C (externo) Rango de H%: 10% - 99% Precisión: ± 0,5°C Resolución: 0.1°C Tamaño: 84mm x 44 mm x 120 mm
Instrumento multifunción testo 400 set confort	Sonda de CO2 digital -Sonda digital de grado de turbulencia -Sonda de globo 150 mm, TP tipo K, para medir calor radiante
Estación Meteorológica Comunicación Inalámbrica 111-METWIFI	Rango de t° interior: 0°C a 50°C Rango de t° exterior: -30°C a 65°C Rango de H%: 1%RH – 99% Velocidad viento Anemómetro: 0-50 m/s Pluviómetro: 0 - 9,999 mm Rango de luminosidad: 0-400,000Lux Presión: 300 – 1100 hPa

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CATASTRO DE MATERIALES UTILIZADOS EN CUBIERTAS

El análisis de datos censales del período 1992-2017 sobre la materialidad de la vivienda focalizado en la provincia de Parinacota, demostró un descenso en la presencia de materiales vegetales como aislantes en las techumbres en las viviendas. Esta aseveración se refleja en la tabla 3, la cual muestra que, de un total de 180 viviendas censadas entre 1992 y 2017 y catalogadas como "vivienda indígena", en 1992 había 134 viviendas (74% del total de la muestra analizada) que usaban este tipo de material aislante, en 2002 se redujo este número a 37 viviendas (20,5%) y en 2017 tan solo 9 viviendas tenían aislantes vegetales en sus techumbres, representando un 5% del total.

El análisis también determinó la existencia de una relación inversamente proporcional entre el uso de materiales vegetales y la presencia de materialidad de techumbre recubierta con planchas metálicas o compuestas (zinc, cobre, fibrocemento). Este tipo de techumbre está inicial y mayoritariamente relacionada con el tipo de vivienda catalogada como "casa" y, en menor grado, con la "vivienda tradicional indígena". Sin embargo, en un lapso de 25 años (1992 – 2017), el total de viviendas con techo de planchas de zinc y fibrocemento alcanzó una cantidad de 929 viviendas, mostrando un progresivo aumento de la presencia de estos materiales en las zonas altiplánicas (Tabla 4).

Tabla 3. Material en la cubierta del techo: Paja, coirón, totora o caña, Provincia de Parinacota, (Rural) datos Censos de población y vivienda años 1992, 2002, 2017. Fuente: Elaboración de los autores

Presencia de cubierta vegetal en diferentes tipos de vivienda	1992	2002	2017
Otro Tipo de vivienda particular	0	0	0
Mediagua, mejora, rancho o cobertizo	1	0	0
Pieza en casa antigua o en conventillo	0	0	0
Vivienda Indígena (ruka, pae pae u otra)	134	37	9
Casa	23	0	0

Tabla 4. Material en la cubierta del techo: planchas de zinc, cobre etc. fibrocemento, Provincia de Parinacota, (Rural) datos Censos de población y vivienda años 1992, 2002, 2017. Fuente: Elaboración de los autores

Presencia de planchas de zinc, cobre etc. fibrocemento diferentes tipos de viviendas	1992	2002	2017
Otro Tipo de vivienda particular	2	3	3
Mediagua, mejora, rancho o cobertizo	2	32	11
Pieza en casa antigua o en conventillo	1	16	2
Vivienda Indígena (ruka, pae pae u otra)	93	94	101
Casa	314	378	237

Respecto de la materialidad de los muros exteriores, el 36,36% correspondió a viviendas de tapial, el 27,27% a piedra y barro y el 36,36% restante a viviendas correspondió a adobe. En comparación con los datos que aporta el INE respecto de la composición material de la techumbre, este muestreo indica que, aun cuando el material de cubierta mayoritario es la plancha de zinc, el cielo de las viviendas tradicionales presenta un alto porcentaje de materialidad de paja y barro en los cielos.

TRANSMISIÓN DEL CONOCIMIENTO ENTRE GENERACIONES

Analizando los datos obtenidos a través de las encuestas realizadas, en la primera dimensión podemos confirmar que los alumnos desconocen en su mayoría dicha técnica

constructiva. Por ejemplo, la pregunta sobre si conocen el término "t'ili" obtuvo un 24% de reconocimiento, transformándose esta técnica como la más conocida por los encuestados. Por su parte, la pregunta sobre la asociación de alguno de estos términos ("caruna", "tacta", "p'ira", "t'ili") con las techumbres, obtuvo un 67% de menciones (Figura 13).

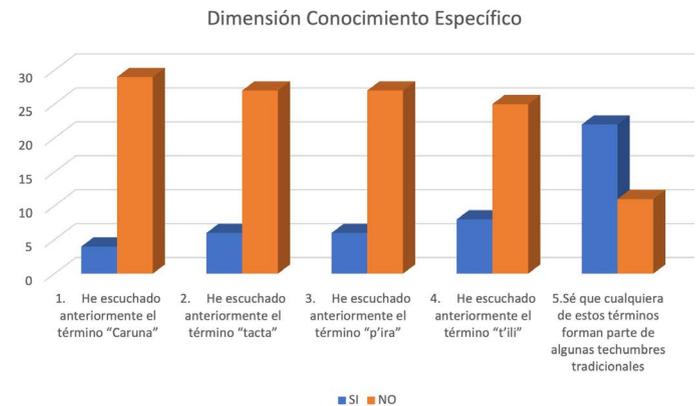


Figura 13. Asociación entre el nombre del sistema constructivo y las denominaciones locales de la técnica de "barro con paja alivianado" en población juvenil de Putre. Fuente: Elaboración de los autores

Respecto a la segunda dimensión, se puede identificar la existencia de un desconocimiento tanto de la caruna como de las otras técnicas generales de construcción típica, ya que, en ambos puntos, más de la mitad de la población encuestada refiere no tener conocimientos al respecto (67% y 55% respectivamente). Esta situación contrasta con el 97% que encuentra valor en estos saberes y el 85% que directamente manifiesta interés en aprender acerca de esta y otras técnicas de construcción tradicional andina (Figura 14).

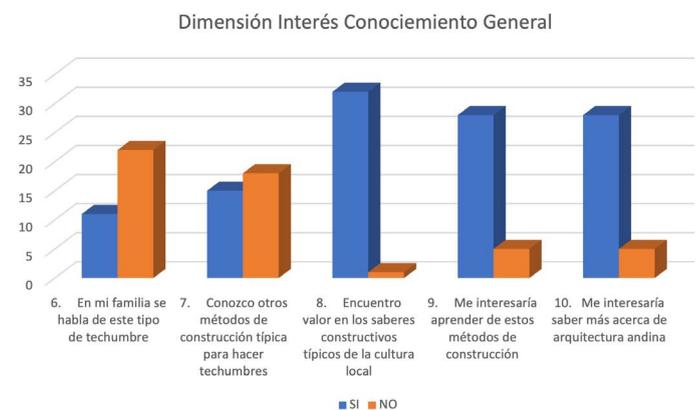


Figura 14. Número de respuestas de los estudiantes respecto de la valoración de los sistemas constructivos típicos de la cultura local. Fuente: Elaboración de los autores

RESULTADOS

ENSAYOS Y DEL TRABAJO DE MONITORIZACIÓN

Para la determinación del comportamiento térmico de un material compuesto, como es el presente caso, se necesita de un resultado de ensayo de laboratorio que permita su aplicación en los trámites de permisos de construcción, según indicado por la normativa vigente (MINVU, 2006).

Para el caso de la "caruna", la probeta testeada en laboratorio consistió en un material natural fabricado a base de suelo-paja, de dimensiones 30 cm x 30 cm x 0,5 cm y densidad seca aparente de 1252 kg/m³. El ensayo de laboratorio se efectuó de acuerdo con la norma NCh 851. En este, la probeta alcanzó un valor de conductividad térmica lineal de 0,1477 W/mK. Respecto de las consideraciones sobre la densidad aparente del material testeado (Tabla 5) y su caracterización como un material alivianado, el valor de referencia obtenido queda por sobre los 52 gr., tal como lo señalan Wieser et al. (2020).

Tabla 5. Resultados ensayo conductividad térmica lineal NCh 851 Probeta de (suelo-paja) "Caruna". Fuente: Elaboración de los autores

Resistencia térmica lineal (r)	0,0359	(m K/ W)
Conductividad térmica (λ)	0,1477	(W/ m K)
Densidad del material seco (δ)	1252	(Kg/m 3)
Humedad del material (H)	22,32	(%)

La Tabla 6 muestra los valores referenciales de conductividad térmica lineal. Dentro del rango de materiales de los que se posee información estandarizada y de acuerdo con los resultados obtenidos a través del testeo en laboratorio, se ubica el dato sobre el resultado del valor para la probeta de "caruna". Los datos de la tabla indican para los valores de transmitancia que, en la medida que la magnitud es mayor, el material tiene menor capacidad aislante. Un cerramiento con un buen material aislante (5-8 cm) alcanza valores de transmitancia del orden de 0,6-0,4 W/m² K.

Los cerramientos de techumbre comúnmente utilizados en las viviendas de los pueblos andinos corresponden a cubiertas livianas de zinc, de tarta de barro o de madera. En algunos casos, se observa el uso de losas de hormigón en viviendas de construcción reciente. La cubierta liviana que usa caruna logra un desempeño térmico mejor que las losas sin aislar y comparable con las cubiertas de barro o de madera. Respecto de las cubiertas de chapa metálica, la ventaja es todavía mayor, mejorando también el valor del retraso de la ola térmica, que es indicador de la inercia térmica de la cubierta. Este resultado se

Tabla 6. Valores referenciales de transmitancia y retraso térmico para techumbres. Fuente: Elaboración de los autores

Material	Espesor (cm)	Transmitancia (W/m ² K)	Time Lag
Caruna 5 mm + fieltro 1 mm + zinc 2 mm	0,8	5,75	30 min
Caruna 10 mm + fieltro 1 mm + zinc 2 mm	1,3	4,76	40 min
Caruna 20 mm + fieltro 1 mm + zinc 2 mm	2,3	3,63	1 h 30 min
Cement roof	15	4,48	2 h 50 min
Zinc roof	0,2	7,14	1 min
Earth roof	7	3,6	1 h 11 min
Wooden roof	5	2,56	1 h 30 min

encuentra alineado con los resultados obtenidos por otros estudios similares (Palme et al., 2012, Palme et al., 2014) que muestran que, al aumentar el espesor de la caruna, el desempeño térmico puede mejorar proporcionalmente, pudiendo alcanzar y superar los valores de resistencia térmica típicamente ofrecidos por techos de madera o con otros aislantes naturales como, por ejemplo, el corcho.

La Figura 15, por otra parte, muestra los resultados de monitorización para un día típico del mes de julio, con oscilaciones de temperatura interior entre 1 y 22 grados, tanto para el caso de cubierta de "caruna" como para el caso de cubierta de totora. Este resultado, si bien muestra cierto grado de enfriamiento nocturno por debajo de niveles considerados como aceptables para estar en confort, evidencia que el aislamiento térmico ofrecido por la caruna es similar al ofrecido por otros materiales tradicionalmente utilizados en cubiertas de viviendas de las zonas alto andinas.

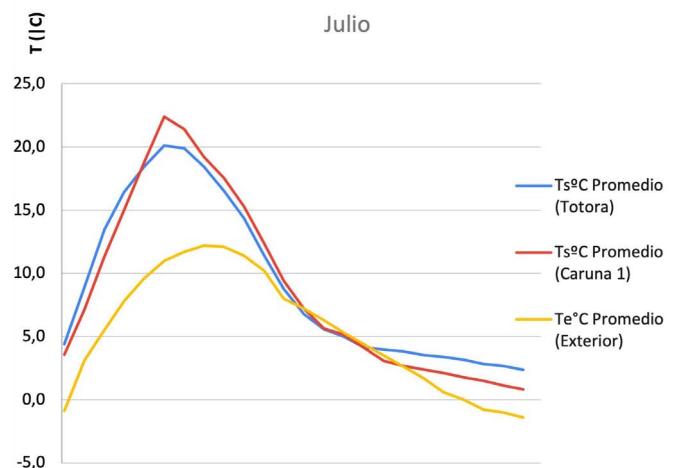


Figura 15. Gráfico de monitorización de desempeño, día típico del mes de Julio. Fuente: Elaboración de los autores.

Respecto de la monitorización del confort, la Figura 16 y Figura 17 muestran los resultados obtenidos en las mediciones efectuadas en Julio 2022 con el equipo TESTO 400. En estas se utilizaron valores de 70 W/m² como actividad metabólica y 1 CLO como resistencia térmica de la ropa para la estimación del voto medio previsto (PMV - predict mean vote), que es la medición estándar del grado de confort en espacios interiores (Fanger, 1973). A pesar de cierto desfase de horario en la toma de datos, los resultados muestran un comportamiento térmico algo mejor para el caso de cubierta de "caruna", con temperaturas medias radiantes entre los 18 y los 20 grados centígrados, cosa que se concreta en una indicación del PMV de -0,8 (ambiente ligeramente fresco).

Caso 1: cielo de "totora" (fibra natural)

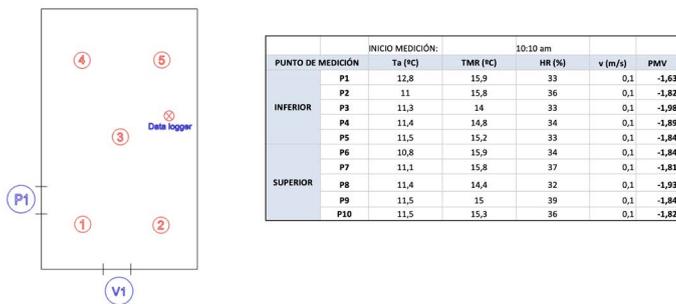


Figura 16. Planta de la vivienda con cielo de "totora" indica puntos de recogida de datos. Fuente: Elaboración de los autores.

Caso 2: cielo de "caruna", (Barro y paja alivianada)



Figura 17. Planta de la vivienda con cielo de "caruna" indica puntos de recogida de datos. Fuente: Elaboración de los autores.

CONCLUSIONES

La presente investigación ha permitido redescubrir un saber ancestral constructivo definido como "cielo de barro y paja aligerado", el que posee buenas características de aislación térmica en comparación con otros materiales que cumplen un rol similar. Los resultados obtenidos permiten retomar la discusión etnográfica que se desarrolló en la década de los 70 en el altiplano andino y vincularla con los procesos de revaloración y reapropiación de los modos tradicionales del habitar la altura. Sin duda, la salvaguardia y difusión de estos saberes permitirá

poner atención sobre el modo de preservar una tradición material, simbólica y doméstica que se ha presentado como una estrategia frente al clima extremo de la tundra de altura, en el contexto del desierto sobre la cota de 4.000 m.s.n.m.

Desde la perspectiva de la reapropiación tecnológica de los saberes ancestrales, en la pequeña muestra en relación con el conocimiento sobre estos de los jóvenes andinos, se pudo encontrar una representación clara del riesgo de la pérdida de estos otros saberes debido a la falta de transmisión de los mismos. No obstante, afortunadamente los jóvenes manifiestan su disposición e interés de acercarse a este tipo de aprendizajes, abriendo un espacio importante de conservación de la tradición constructiva. Con esto, se pueden identificar dos puntos clave que dan más fuerza y valor a la realización de este proyecto e incrementan el posible impacto positivo en la perpetuación y salvaguarda del uso y la práctica de la elaboración de la "caruna" o "placa de barro y paja alivianada".

La lectura longitudinal de los datos sobre la composición de los materiales de cubierta obtenidos de los Censos de Población y Vivienda de Chile, tomados en 1992, 2002 y 2017 para la Provincia de Parinacota, han permitido visibilizar el impacto de la sustitución tecnológica de los materiales de cubierta en la tipología definida por el INE como "vivienda tradicional indígena". Esto evidencia una drástica caída del uso de los materiales naturales en contraste con el aumento del uso de materiales industrializados como la plancha de zinc y otros en formatos de planchas de tamaño no superior a 1,10 m de largo. A pesar de estos resultados, igualmente se destaca la recurrencia a la plancha de paja y barro aligerado como una práctica habitual en la definición del espacio de la vivienda andina que se ubica en altitudes superiores a los 4.000 m.s.n.m.

En cuanto a las propiedades térmicas del material, el testeo realizado ha mostrado que el valor de resistencia al paso del calor del compuesto es más que aceptable para un aislante natural, lo cual se traduce en un desempeño en obra similar al de otras estructuras tradicionales. Las posibilidades que ofrece la caruna, en cuanto a sostenibilidad del proceso constructivo de viviendas en pueblos alto andinos, es muy elevada gracias a su condición de mezcla de barro y paja locales. Las modernas cubiertas tipo sándwich, aun cuando puedan incorporar materiales aislantes, tendrán necesariamente un costo ambiental más elevado debido a los impactos generados por la fabricación y el transporte en el lugar de instalación. Incluso uso de la totora requiere de desplazamientos de material de unos cuantos centenares de kilómetros para ser instalado en los pueblos de Tacora, Guallatire y circundantes.

Por último, se estima que los procesos de fabricación del cielo alivianado puedan ser gradualmente transformados

en procesos más consolidados, de modo que se pueda incorporar el conocimiento ancestral de las técnicas artesanales con las más contemporáneas. Sin embargo, lo anterior no significa que se llegue a un producto de elevada industrialización que haría que aumentara de forma considerable el impacto ambiental. Por el contrario, la gestión apropiada del conocimiento y su traspaso entre generaciones, así como la presencia eventual de algún pequeño emprendimiento local respetuoso del frágil ecosistema del desierto andino, podrían contribuir a la consolidación de la fabricación, distribución y uso de este importante material como aislante térmico natural construcciones ubicadas en las localidades estudiadas y, más en general, en toda la macro región del altiplano.

Contribución autores: Conceptualización, S.A. y J.C.; Curación de datos, S.A. y M.P.; Análisis formal, S.A. y J.C.; Adquisición de financiación, S.A.; Investigación, S.A., M.P. y J.C.; Metodología, S.A., J.C. y M.P.; Administración de proyecto, S.A.; Recursos, S.A. y J.C.; Software, M.P.; Supervisión, S.A.; Validación, M.P.; Visualización, S.A., J.C. y M.P.; Escritura – borrador original, S.A., J.C., M.P.; Escritura – revisión, S.A., J.C. y M.P.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aza-Medina, L. C., Palumbo, M., Lacasta, A. M., & González-Lezcano, R. A. (2023). Characterization of the thermal behavior, mechanical resistance, and reaction to fire of Totora (*Schoenoplectus Californicus* (C.A. Mey.) SoJAK) panels and their potential use as a sustainable construction material. *Journal of Building Engineering*, 69, 105984. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105984>

Charca, S., Noel, J., Andia, D., Flores, J., Guzman, A., Renteros, C., & Tumialan, J. (2015). Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions. *Energy and Buildings*, 108, 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.053>

DIRECCIÓN DE ARQUITECTURA, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. (2016). *Guía de Diseño Arquitectónico AYMARA para edificios y Espacios públicos*. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/server/api/core/bitstreams/cd7a8ae4-2abf-4b46-95f7-1edbf9e69f73/content>

Fanger, O. P. (1973). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press.

García M., Castro, V., Belmonte, E., Muñoz, T., Santoro, C., & Echeverría, J. (2018): Etnobotánica y territorio en el pastal de Mulluri (Norte de Chile). Las enseñanzas del pastoreo Aymara. *Latin American and Caribbean Bulletin of Medicinal and Aromatic Plants*, 17(5), 522-540. <https://blacpma.ms-editions.cl/index.php/blacpma/article/view/135>

Gavilán, V. & Viguera, P. (2020). Embodied temporalities and memories in aymara rituals in northern Chile. *Cultura y religión*, 14(2), 100-127. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-47272020000200107>

Hidalgo-Cordero, J. F., & Aza-Medina, L. C. (2023). Analysis of the thermal performance of elements made with totora using different production processes. *Journal of Building Engineering*, 65, 105777. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105777>

Jorquera, N. (2014). Culturas sísmicas: estrategias vernaculares de sismorresistencia del patrimonio arquitectónico chileno. *Arquitectura del Sur* 32(46), 18-29. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/AS/article/view/739>

Meli G., Onnis S., & Wieser M. (2019). Introducción en el contexto peruano de un nuevo sistema constructivo con madera y tierra alivianada. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 19. FUNDASAL / PROTERRA. p. 604-613, <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/187747>

MINVU. (2006). *Manual de aplicación de reglamentación térmica (Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones)*. <https://es.scribd.com/document/50958657/Manual-de-Aplicacion-de-la-Reglamentacion-Termica-Chile-Parte1>

Noaman, M. F., Khan, M. A., & Ali, K. (2022). Effect of artificial and natural fibers on behavior of soil. *Materials Today: Proceedings*, 64, 481-487 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.954>

Palme, M., Guerra, J., & Alfaro, S. (2012). Earth of the Andes Comparing techniques and materials used in houses in San Pedro de Atacama. *En PLEA 2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture*. https://www.researchgate.net/publication/250917170_Earth_of_the_Andes_Comparing_techniques_and_materials_used_in_houses_in_San_Pedro_de_Atacama

Palme, M., Guerra, J., & Alfaro, S. (2014). Thermal Performance of Traditional and New Concept Houses in the Ancient Village of San Pedro De Atacama and Surroundings. *Sustainability* 6(6), 3321-3337. <https://doi.org/10.3390/su6063321>

Peel, M. C., Finlayson, L., & McMahon, T. A. (2007). Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

Pereira, H. (2003). Uso de la técnica mixta tierra aligerada (LeichtlehmBau) en Chile. En Proterra, Proyecto XIV 6, Habyted, Subprograma XIV, Tecnología para Viviendas de Interés Social, (Ed.), *Tecnologías de Construcción con Tierra* (pp. 51-64). Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED. https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/06/3_PP-T%C3%A9cnicas-Mixtas_2003.pdf

Pereira, M. & Yuste, B. (2019). *El último Mallku. Paisaje cultural de Tacora*. Fundación Altiplano. https://issuu.com/fundacionaltiplano/docs/el_u_ltimo_mallku._paisaje_cultural_de_tacora

Šolc, V. (2011). Casa Aymara en Enquelga. *Chungara*, 43(1), 89-111. <https://doi.org/10.4067/s0717-73562011000100006>

Vinceslas, T., Colinart, T., Hamard, E., Menibus, A.H., Lecompte, T., & Lenormand, H. (2019). Light Earth Performances for Thermal Insulation: Application to Earth-Hemp. *Earthen Dwellings and Structures*, 357-367. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5883-8_31

Volhard, F. (2016). *Light earth building: A handbook for building with wood and earth*. Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783035606454>

Weber, D.J., Zambrano, F.C., Villar, T.C., & Dávila, M.B. (1998). *Rimaycuna Quechua de Huánuco: Diccionario del Quechua del Huallaga con Índice Inglés (Serie Lingüística Peruana)*. Instituto Lingüística de Verano.(pp. 126)

Wieser, M., Onnis, S., & Meli, G. (2020). Desempeño térmico de cerramientos de tierra alivianada : posibilidades de aplicación en el territorio peruano. *Revista de Arquitectura*, 22(1), 164–174. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2633>

Yáñez, C. A., & Capella, C. (2021). Construcción de identidad personal en niños y niñas aymara residentes en Chile. *Revista De Psicología*, 30(2). <https://doi.org/10.5354/0719-0581.2021.60644>

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS SIMPLES PARA EL CÁLCULO DEL REQUERIMIENTO ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES¹

Recibido 22/05/2023
Aceptado 16/11/2023

BUILDING SIMPLE MATHEMATICAL MODELS TO CALCULATE THE ENERGY REQUIREMENTS OF BUILDINGS.

CONSTRUÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS SIMPLES PARA CALCULAR OS REQUISITOS DE ENERGIA DE EDIFICAÇÕES

María Victoria Mercado

Doctora en Ciencias
Investigadora Adjunta
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-1471-3709>
mvmercado@mendoza-conicet.gob.ar

Gustavo Javier Barea-Paci

Doctor en Ciencias
Investigador Adjunto
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-5643-3206>
gbarea@mendoza-conicet.gob.ar

Andrés Esteban Aceña

Doctor rerum naturalium
Investigador Adjunto, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Instituto Interdisciplinario de Ciencias Básicas CONICET-Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-5790-8103>
acena.andres@gmail.com

1 Proyecto apoyado por CONICET PIP 0777. TRANSICIÓN A EDIFICIOS ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES: Ajuste de la escala de rangos de certificación (A-G) aplicable al Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas por medio de metamodelos predictivos con IA.

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo desarrollar un modelo matemático predictivo que otorgue un primer acercamiento al valor de requerimiento energético (RE) de un edificio en un clima templado continental, con el propósito de aportar al conocimiento teórico sobre herramientas de evaluación energética. Se realizaron simulaciones paramétricas procesadas con los programas *EnergyPlus 9.5* y *JePlus*. Los resultados fueron utilizados como *Dataset* para el armado de diferentes modelos matemáticos, para los cuales se utilizó el programa SageMath a fin de desarrollar ecuaciones que predigan el RE de cada escenario. Se trabajó con modelos escalonando su complejidad en cuanto a métodos utilizados y cantidad de parámetros. Se seleccionó un modelo con bajo nivel de error (0.08) y 15 parámetros. Se advirtió que, si bien el aumentar la cantidad de parámetros acercaba los modelos al error 0.02, se corría el peligro de *overfitting*. El modelo seleccionado busca incorporar la precisión y validez de las simulaciones dinámicas a una herramienta de predicción sencilla y aplicable por profesionales de la construcción.

Palabras clave

modelo matemático, simulaciones, arquitectura sustentable

ABSTRACT

This work looks to build a predictive mathematical model that can provide a first approach to a building's energy requirement (ER) value in a temperate continental climate. The aim is to contribute to the theoretical knowledge of energy assessment tools. To do this, parametric simulations were run and processed using the EnergyPlus 9.5 and JePlus programs. The results were then used as a dataset to build different mathematical models, using the SageMath program to run equations that predicted the ER of each scenario. Work was done with the models, scaling their complexity with the methods and the number of parameters used. Finally, a model with a low error (0.08) and 15 parameters was chosen. It was noted that, although increasing the number of parameters brought the models closer to a 0.02 error, there was a risk of overfitting. The chosen model seeks to incorporate dynamic simulations' accuracy and validity into a simple prediction tool that construction professionals can apply.

Keywords

mathematical modeling, simulations, sustainable architecture

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático preditivo que possibilite uma primeira abordagem do valor dos requisitos de energia (ER) de um edifício em um clima continental temperado, de forma a contribuir para o conhecimento teórico das ferramentas de avaliação energética. As simulações paramétricas foram realizadas e processadas com os softwares EnergyPlus 9.5 e JePlus. Os resultados foram utilizados como Dataset para a construção de diferentes modelos matemáticos, para os quais foi utilizado o programa SageMath para desenvolver equações que preveem o ER de cada cenário. Trabalhamos com modelos que escalonam sua complexidade em termos de métodos utilizados e número de parâmetros. Foi selecionado um modelo com baixo nível de erro (0,08) e 15 parâmetros. Observou-se que, embora o aumento do número de parâmetros tenha aproximado os modelos ao erro de 0,02, havia o risco de sobreajuste. O modelo selecionado busca incorporar a precisão e a validade das simulações dinâmicas em uma ferramenta de previsão simples que pode ser aplicada por profissionais da construção.

Palavras-chave:

modelo matemático, simulações, arquitetura sustentável.

INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción contribuye significativamente a la demanda mundial de energía. La intensidad energética de los edificios no ha cambiado en los últimos años, manteniéndose en 150kWh/m². Según las estimaciones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, según sus siglas en inglés), para lograr “Emisiones netas cero”, es necesario que la intensidad disminuya un 35% aproximadamente respecto del nivel actual y se mantenga alrededor de los 95 kWh/m² (International Energy Agency, 2022). Lamentablemente, esta no ha variado prácticamente desde 2019 (United Nations Environment Programme, 2022).

A medida que la población global continúa expandiéndose, se prevé un incremento en la demanda energética de los edificios. Una estrategia para mitigar esta situación radica en la optimización de su eficiencia energética, abordada en la fase de diseño, en la etapa de construcción y en la etapa de operatividad del inmueble. Por lo tanto, resulta imprescindible contar con pronósticos precisos del requerimiento energético, tornándose fundamental para lograr ahorros significativos de energía en el sector de la construcción (Chang et al., 2019).

Timuçin y Wilde (2021) advierten que, a la hora de diseñar, debe prestarse más atención a la investigación holística de todos los factores para el logro de la eficiencia energética. Para hacer esto posible, es necesario considerar una serie de variables que influyen en el consumo energético y el confort de los usuarios, tales como: la orientación del edificio, la calidad térmica de la envolvente, la relación entre superficies opacas y translúcidas, la forma del edificio, entre otros.

En la actualidad, los profesionales recurren frecuentemente al modelado y la simulación computacional (BPS, por su acrónimo en inglés *Building Performance Simulation*) como herramientas fundamentales para evaluar y analizar diversas estrategias de diseño y operación. Lo anterior debido a que la efectividad del BPS ha sido documentada en la literatura y se ha utilizado en una amplia gama de aplicaciones (Azar et al., 2021; Raj et al., 2021; Schwartz & Raslan, 2013).

Tanto el modelamiento como simulación computacional se realizan antes de proceder a la construcción o remodelación de un edificio, para lo cual también se tienen en cuenta tanto las variables anteriores como las condiciones climáticas del exterior. Los resultados que se arrojan gracias a este procedimiento son bastos y precisos a lo largo de un período y en una misma frecuencia. Dichos resultados pueden ser, entre otros, el consumo de energía del edificio, las cargas máximas y las condiciones ambientales internas (Seyedzadeh et al., 2019). No obstante, esta metodología suele requerir un gran número de ejecuciones, lo que conlleva a un consumo considerable de tiempo (Papadopoulos et al.,

2018) y exige un alto nivel de experiencia, junto con el uso de recursos informáticos potentes (Catalina et al., 2013). Para superar estas limitaciones, los investigadores han comenzado a aplicar modelos sustitutos que complementen las capacidades de BPS. El proceso consiste en entrenar un modelo matemático que imite su rendimiento, lo que permite probar varias configuraciones edilicias a un bajo costo computacional (Ye et al., 2019; Fang & Cho, 2019).

Los modelos sustitutos permiten a los usuarios prever el comportamiento energético de un edificio en diferentes condiciones. Algunos de los trabajos que han utilizado modelos matemáticos para predecir consumos energéticos incluyen, por ejemplo, el uso de modelos de redes neuronales o el uso de modelos de regresión lineal múltiple (Chou & Ngo, 2016; González-Vidal et al., 2017; Huang et al., 2021; Jiwon et al., 2022; Kwak et al., 2013; Zhao & Magoulès 2012). Sin embargo, estos son de difícil resolución y acceso para los profesionales de la construcción.

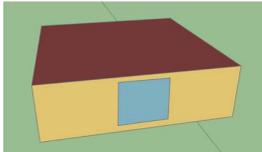
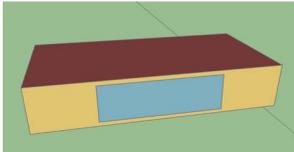
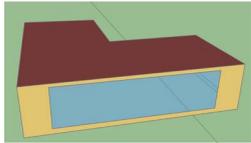
En relación con lo anterior, el objetivo del presente trabajo busca aportar al conocimiento teórico sobre herramientas de evaluación energética en las que no se tenga que recurrir a entornos de simulación eficaces pero complejos. Por esta razón, se plantea la formulación de un modelo matemático simplificado, basado en variables morfológicas simples, con el propósito de calcular de manera predictiva el requerimiento energético anual para la climatización de edificios (REC). El argumento que sustenta este objetivo es que la simplificación de modelos matemáticos para primeras evaluaciones energéticas en edificios, actualmente está sujeta a balances térmico-energético de tipo estacionario, lo que implica una brecha entre las realidades dinámicas y las respuestas que puede otorgar el BPS. Debido a esto, el modelo que se busca conseguir pretende captar la variabilidad del balance térmico-energético-dinámico a partir del programa computacional *EnergyPlus*, dado que la construcción del *Dataset* se realiza desde las simulaciones paramétricas que este realiza. Esta aproximación simplificada puede ofrecer a los profesionales de la construcción una herramienta práctica y accesible para la toma de decisiones en términos de eficiencia energética.

Finalmente, cabe señalar que el contexto donde se aplicará este modelo será en edificios ubicados en un entorno de clima templado continental, específicamente en la región de Mendoza, Argentina.

METODOLOGÍA

La metodología de trabajo del presente estudio es aplicada y se divide en tres etapas secuenciales: la primera corresponde a la simulación paramétrica; la segunda al armado de *Dataset* y, por último, la tercera que abarca la construcción de los modelos matemáticos.

Tabla 1. Variable consideradas para el estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

Variable discreta			
Tipología de forma	C - cuadrado	R – rectangular	L – forma esquina
			
	Variables continuas		
v–Factor WWR (relación aberturas y muro opaco)	20 - 30 - 40 - 50 - 60 - 70 - 80 - 90 - 100		
w– orientación	0 - 15 - 30 - 45 - 60 - 75 - 90 - 105 - 120 - 135 - 150 - 165 - 180 - 195 - 210 - 225 - 240 - 255 - 270 - 285 - 300 - 315 - 330 - 345 - 360		
x-Muro-espesor de aislación EPS (poliestireno expandido)	0.01 - 0.02 - 0.03 - 0.04 - 0.05 - 0.06 - 0.07 - 0.08 - 0.09 - 0.10 - 0.11 - 0.12 - 0.13 - 0.14 - 0.15 - 0.16 - 0.17 - 0.18 - 0.19 - 0.20		
y-Techo-espesor de aislación EPS	0.01 - 0.02 - 0.03 - 0.04 - 0.05 - 0.06 - 0.07 - 0.08 - 0.09 - 0.10 - 0.11 - 0.12 - 0.13 - 0.14 - 0.15 - 0.16 - 0.17 - 0.18 - 0.19 - 0.20		

Cada una de estas consta de subetapas, las cuales se detallan a continuación. La primera etapa de simulación paramétrica se conforma a partir de, en primer lugar, identificar las variables de entrada y sus rangos a utilizar como inputs en el modelo de simulación; y, en segundo lugar, realizar las simulaciones paramétricas para el clima de la ciudad de Mendoza, estableciendo como output los datos de requerimientos energéticos para climatización.

Por su parte, las subetapas que componen la de armado de Dataset se constituye desde el procesamiento de los datos obtenidos de las simulaciones con los datos de entrenamiento. Finalmente, una vez completada esta etapa, se inicia la tercera fase de armado de los modelos matemáticos, la cual corresponde al proceso para la elaboración de estos. A continuación, se explica detalladamente cada una de las etapas y subetapas.

SIMULACIÓN PARAMÉTRICA

Las simulaciones computacionales cuentan en la actualidad con validación estricta en estudios y análisis de comportamientos lumínicos, térmicos y energéticos, entre otros, de proyectos de edificios o edificios construidos (Malkawi, 2004). Por lo tanto,

los datos obtenidos de las simulaciones se consideran verosímiles de los valores de REC de las formas edilicias utilizadas. La metodología de simulaciones paramétrica permite la combinación sistemática de todas las variables en un mismo procedimiento de simulación, ya que simplifica al usuario simulador las acciones de ejecutar y programar la interacción de las variables de a una por una en simulaciones individuales.

VARIABLES Y RANGOS

INPUTS, Datos de entrada de los modelos de simulación

Como variables de estudio se utilizaron: la forma, la orientación, la relación de envolvente opaco-transparente y los valores de transmitancia de muros y techos. La Tabla 1 presenta las variables categorizadas, los rangos utilizados y su denominación posterior en los modelos matemáticos.

Las variables se dividen en discretas y continuas. Como variables discretas se determinan las tipologías edilicias de viviendas en relación con su forma: cuadrada, rectangular y L, ejemplificando diferentes índices de compacidad (IC), 88.6%, 82.6% y 75.5% respectivamente.

SIMULACIONES COMPUTACIONALES PARAMÉTRICAS

En esta fase se utilizó el programa *EnergyPlus 9.2* y *Jeplus* para realizar simulaciones paramétricas. La metodología paramétrica es un método exhaustivo que otorga la posibilidad de evaluar la combinación cruzada e interrelación de numerosos valores de rangos ingresados como inputs, cambiando uno a la vez. De esto se desprende un total de 270.000 simulaciones.

Se modelaron las tres tipologías formales de edificios. Con estos modelos, se realizaron las simulaciones paramétricas modificando las variables tipo inputs presentadas en la Tabla 1. Los modelos se trabajaron como una sola zona térmica de 80m². En la materialización, se tomó como referencia el sistema de construcción tradicional y másico de la Ciudad de Mendoza, siendo para muros: ladrillo cerámico másico, revoque en ambos lados y aislación térmica; y para techos: losa de hormigón alivianada, mortero para pendiente, membrana asfáltica y aislación térmica. La variabilidad de los paquetes constructivos se trabajó modificando los espesores de aislación térmica, utilizando como tal EPS (poliestireno expandido) en ambos casos.

Como dato de salida, se trabajó con los outputs *Zone Ideal Loads Heating Energy* y *Zone Ideal Loads Cooling Energy* del programa *EnergyPlus*, el cual otorga los valores de requerimiento energético para calefacción y enfriamiento. Estos valores se suman y, posteriormente, se toma el total anual de climatización. A partir de lo anterior, se establecieron termostatos relacionados a los rangos de confort de Olgay, es decir, que para invierno se fijó en 20°C y para verano, 24°C. Se trabajó con los REC de carga ideal, por lo que no se consideraron sistemas específicos de HVAC.

CONSTRUCCIÓN DEL DATASET

Para el armado del *Dataset*, se utilizaron los resultados de las simulaciones correspondientes a la etapa anterior, cuyos datos se usaron completamente para conformar el entrenamiento de los modelos matemáticos. A diferencia de lo que se realiza con metodologías de redes neuronales artificiales, en este estudio, con el objetivo de optimizar los modelos y bajar los valores de error, la muestra no se dividió en un grupo para entrenamiento y otro grupo de testeo, puesto que la obtención de más datos propiciaría el aumento de la muestra de entrenamiento.

El *Dataset* consta de dos columnas. En la primera se coloca el nombre en código del caso que representa el cambio del valor de cada variable, de forma de ir combinando las diferencias de *uno a la vez* entre todas ellas. La segunda columna corresponde el valor de REC obtenido por la simulación. En la Tabla 2 se presenta el esquema construido.

Tabla 2. Esquema de Dataset construido a partir de las simulaciones paramétricas. Fuente: Elaboración de los autores a partir de los resultados.

NOMBRE CASO	VALOR REC [Kw]
EP_G_Pv_0_Pw_0_Px_0_Py_0	x1
EP_G_Pv_0_Pw_0_Px_0_Py_1	x2
EP_G_Pv_0_Pw_0_Px_0_Py_2	x3
EP_G_Pv_0_Pw_0_Px_0_Py_nx	xN
EP_G_Pv_1_Pw_3_Px_7_Py_0	x5
EP_G_Pv_1_Pw_3_Px_7_Py_1	x6
EP_G_Pv_1_Pw_3_Px_7_Py_2	x7
EP_G_Pv_nx_Pw_nx_Px_nx_Py_nx	xN

Donde:

EP: EnergyPlus;

G: Archivo climático; Pv: Variable WRR;

Pw: Variable orientación;

Px: Variable espesor de aislación MURO; Py: Variable espesor de aislación TECHO;

Nx: cantidad de veces q cambia el valor del rango de cada variable hasta completar la combinación de todas y, en este caso, los 270.000 casos;

x1-x2-xN: valores de REC obtenidos de las simulaciones para cada caso.

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

Elaboración de los modelos matemáticos

Una vez concluida la etapa de elaboración del esquema de *Dataset*, se procedió a iniciar la tercera etapa de elaboración de los modelos matemáticos. Para ello, la información sintetizada en el esquema del *Dataset* fue incorporada en el software *SageMath*, cuya función es la construcción de modelos matemáticos. En el proceso, se buscó un equilibrio entre la obtención de un modelo fino y el modelo estadístico que se acercara al valor de referencia, el cual se tomó desde los resultados obtenidos de las simulaciones (REC). De esta manera, cada modelo matemático se desarrolló como una ecuación en la que las variables independientes corresponden a las variables continuas (v: factor WWR, w: orientación, x: Muro-espesor aislación EPS, y: Techo-espesor aislación EPS). Los parámetros de las ecuaciones se fijan a través de un ajuste de cuadrados mínimos, utilizando para esto las simulaciones computacionales. Una vez determinados los parámetros en la ecuación, esta puede usarse para predecir el REC del edificio reemplazando las variables continuas por el valor correspondiente del edificio en cuestión.

Tabla 3. Tipos de modelos ensayados y medidas de ajuste para cada uno. Fuente: Elaboración de los autores

MODELOS	MEDIDAS DE ERROR								
	Forma cuadrada			Forma rectangular			Forma en L		
	Min.	Max.	STD	Min.	Max.	STD	Min.	Max.	STD
L	-0.123	0.127	0.047	-0.213	0.296	0.099	-0.26	0.224	0.083
Lin	-0.89	0.097	0.033	-0.121	0.219	0.06	-0.199	0.153	0.062
CC/C	0.05	0.064	0.018	-0.094	0.126	0.042	-0.078	0.116	0.033
Cs/C	-0.081	0.116	0.035	-0.154	0.177	0.053	-0.183	0.211	0.063
Cln c/C	-0.044	0.037	0.009	-0.063	0.067	0.022	-0.046	0.061	0.016
Cln s/C	-0.081	0.107	0.032	-0.136	0.154	0.042	-0.17	0.196	0.059
Cln c/R	-0.07	0.056	0.018	-0.086	0.093	0.032	-0.071	0.071	0.023
Cln c/r2	-0.067	0.058	0.018	-0.077	0.095	0.031	-0.074	0.063	0.023
F2t	-0.038	0.031	0.013	-0.101	0.168	0.058	-0.05	0.076	0.022
F3t	-0.03	0.23	0.011	-0.048	0.044	0.018	-0.029	0.053	0.011
F3t/S	-0.036	0.028	0.012	-0.069	0.062	0.032	-0.039	0.061	0.015
F4t	-0.026	0.02	0.006	-0.052	0.015	0.007	-0.028	0.047	0.008

Se desarrollaron un total de 40 modelos matemáticos, intentando que estos no fueran innecesariamente complicados. Se realizó una exploración de opciones que inició con modelos lineales, los cuales arrojaron errores altos del orden del 29.6%. Como referencia, a medida que el modelo tenga más parámetros, en general menos errores debería tener. Sin embargo, esto puede ser riesgoso en el sentido de producirse "overfitting". Para evitar esto, se prefirieron modelos que tenían errores que no decrecían sustancialmente al aumentar el número de parámetros. En consecuencia, las mejoras se realizaron con modelos cuadráticos. Además, se advirtió que la orientación era una variable angular, lo que derivó en la necesidad de actualizar al uso de modelos trigonométricos.

RESULTADOS

Se exploraron diferentes resultados obtenidos de los modelos que permitieron una aproximación a una ecuación genérica sencilla. Estos se analizaron en dos sentidos: uno, la ecuación, su forma y desarrollo en cuanto a cantidad y representatividad de los parámetros involucrados; y el otro, a partir del error como objeto de diagnóstico del valor predictivo y la efectividad del modelo.

Como medida de ajuste, se consideró la evaluación de los errores mínimos y máximos relativos. En la Tabla 3 se presentan los modelos ensayados y las medidas de error en relación con cada forma. También se presenta el valor de desviación estándar como medida de bondad.

Cc/C Cuadrático con terminos cruzados Cs/C Cuadrático sin terminos cruzados L Lineal Cln c/C Cuadrático inverso con terminos cruzados Clns/C Cuadrático inverso sin terminos cruzados Lin Lineal inverso F4t Fourier 4 terminos --> parece overfitting F3t Fourier 3 terminos F3t/S Fourier 3 terminos simetrico F2t Fourier 2 terminos Cln c/R Cuadrático inverso con recorte Cln c/R2 Cuadrático inverso con recorte V2

Los modelos se dividieron por familia, vinculados a las hipótesis asumidas. De los 40 modelos explorados, se destacan tres, debido a las siguientes razones:

- los errores en las predicciones obtenidas están acotados;
- el número de parámetros no lleva al *overfitting*; y
- permiten analizar el comportamiento del consumo energético en términos de las variables incluidas.

Los tres modelos que fueron considerados como óptimos, se presentan a continuación:

Modelo 1 [M1] (modelo 01, Fourier Lineal 2 términos par) (Ecuación 1)

$$Co(v, w, x, y) = F + F_v v + F_x \frac{1}{x} + F_y \frac{1}{y} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$$F_i = A_i + B_i \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right)$$

Este modelo cuenta con 8 parámetros (A, B, Av, Bv, Ax, Bx, Ay y By). Los valores estimados para cada forma se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de las estimaciones para los parámetros del Modelo 1.
 Fuente: Elaboración de los autores.

Modelo 1	C	L	R
A	10633.1	2190.61	5093.01
B	-128.62	-250.7	-442.29
Av	-17.49	-4.49	-5.33
Bv	-14.67	-6.56	-12.09
Ax	14.76	10.7	12.97
Bx	1.79	1.49	2.34
Ay	2.09	4.97	3.9
By	5.94	1.96	3.75

Modelo 2 [M2] (modelo 30 Angular cuadrático par) (Ecuación 2)

$$Co(v, w, x, y) = F + F_w \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) + F_v v + F_x \frac{1}{x} + F_y \frac{1}{y} + F_{ww} \cos^2\left(\frac{\pi}{180} w\right) + F_{vv} v^2 + F_{xx} \frac{1}{x^2} + F_{yy} \frac{1}{y^2} + F_{wv} v \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) + F_{wx} \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) \frac{1}{x} + F_{wy} \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) \frac{1}{y} + F_{vx} v \frac{1}{x} + F_{vy} v \frac{1}{y} + F_{xy} \frac{1}{xy}$$

(Ecuación 2)

Este modelo utiliza 15 parámetros. Los valores ajustados de los mismos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de las estimaciones de los parámetros del Modelo 2.
 Fuente: Elaboración de los autores.

Modelo 2	C	L	R
F	11226.94	2459.96	5834.87
Fw	-128.62	-250.7	-442.29
Fv	-35.09	-14.09	-29.29
Fx	5.28	8.44	6.76
Fy	-6.28	4.61	2.91
Fww	40.69	-8.89	-148.99
Fvv	0.11	0.06	0.17
Fxx	-0.02	-0.03	-0.05

Fyy	0.01	-0.03	-0.04
Fwv	-14.67	-6.56	-12.09
Fwx	1.79	1.49	2.34
Fwy	5.94	1.96	3.75
Fvx	0.16	0.07	0.17
Fvy	0.09	0.04	0.06
Fxy	0.12	0.07	0.05

Modelo 3 [M3] (modelo 15, Fourier cuadrático, 2 términos par) (Ecuación 3)

$$Co(v, w, x, y) = F + F_v v + F_x \frac{1}{x} + F_y \frac{1}{y} + F_{vv} v^2 + F_{xx} \frac{1}{x^2} + F_{yy} \frac{1}{y^2} + F_{vx} \frac{v}{x} + F_{vy} \frac{v}{y} + F_{xy} \frac{v}{xy}$$

(Ecuación 3)

Donde (Ecuación 4):

$$F_i = A_i + B_i \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right)$$

(Ecuación 4)

Los valores de los parámetros se presentan en la Tabla 6. En este caso, se utiliza un total de 20.

Tabla 6. Valores de las estimaciones de los parámetros del Modelo 3.
 Fuente: Elaboración de los autores.

Modelo 3	C	L	R
A	11247.28	2455.51	5760.38
B	-197.85	-105.05	-16.54
Av	-35.09	-14.09	-29.29
Bv	-13.03	-13.39	-29.96
Ax	5.28	8.44	6.76
Bx	2.33	2.29	2.32
Ay	-6.28	4.61	2.91
By	8.97	3.49	5.35
Avv	0.11	0.06	0.17
Bvv	-0.03	0.05	0.14
Axx	-0.02	-0.03	-0.05
Bxx	-0.02	-0.01	-0.01
Ayy	0.01	-0.03	-0.04
Byy	-0.07	-0.02	-0.04
Avx	0.16	0.07	0.17
Bvx	0.03	0.01	0.03
Avy	0.09	0.04	0.06
Bvy	0.07	0.02	0.04
Axy	0.12	0.07	0.05
Bxy	-0.01	-0.01	-0.01

Tabla 7. Medidas de Errores, Min, Max y Std absolutas y relativas para la forma cuadrada. Fuente: Elaboración de los autores.

Forma C	Errores absolutos			Errores relativos		
	Min	Max	Std	Min	Max	Std
M1	-1693	726	183	-0.14	0.07	0.02
M2	-801	897	125	-0.06	0.08	0.01
M3	-521	899	118	-0.05	0.08	0.01

Tabla 8. Medidas de Errores, Min, Max y Std absolutas y relativas para la forma rectangular. Fuente: Elaboración de los autores.

Forma R	Errores absolutos			Errores relativos		
	Min	Max	Std	Min	Max	Std
M1	-1304	735	189	-0.19	0.17	0.04
M2	-551	1038	110	-0.08	0.14	0.02
M3	-597	980	104	-0.09	0.18	0.02

Tabla 9. Medidas de Errores, Min, Max y Std absolutas y relativas para la forma esquina. Fuente: Elaboración de los autores.

Forma L	Errores absolutos			Errores relativos		
	Min	Max	Std	Min	Max	Std
M1	-875	352	103	-0.21	0.17	0.05
M2	-362	564	72	-0.16	0.14	0.04
M3	-347	538	67	-0.14	0.14	0.03

Respecto del valor predictivo de cada modelo, en la Tabla 7 se presentan los errores mínimos y máximos absolutos, errores relativos y la desviación estándar (Std) entre el modelo matemático y la predicción de las simulaciones para la forma C, análogamente en las tablas 8 y 9 para la forma L y R.

De estos análisis se desprende que, en la Forma C con el M2, el valor de REC calculado por el modelo puede tener un error relativo del 1.2%. En relación con los valores de error mínimo y máximo, corresponden al porcentaje de error que se puede producir cuando la ecuación del modelo otorgue un menor consumo (error Min) o un mayor consumo (error Max) en relación con la referencia. Siguiendo con el ejemplo del M2, el error puede variar un 6% dando un valor menor de REC y un 8% otorgando un valor mayor de REC.

USO DEL MODELO EN UN EJEMPLO DE DISEÑO

Para el siguiente ejemplo se supuso el proyecto de una vivienda con determinadas características, presentadas en la Tabla 12.

Tabla 10. Variables primeras asumidas para un proyecto de vivienda, Caso n. Fuente: Elaboración de los autores.

Forma	Cuadrada	Rectangular	L
v -WWR	40%	40%	40%
w – orientación	0 (Norte)	0 (Norte)	0 (Norte)
x – espesor aislación muro	0.01 (considerando un muro sin aislación)	0.01 (considerando un muro sin aislación)	0.01 (considerando un muro sin aislación)
y – espesor aislación techo	0.05	0.05	0.05

Con las variables de la Tabla 10, y utilizando el Modelo 1 (considerándolo como óptimo), se obtiene el REC. Para esto, el primer paso es obtener los valores de F (Ecuación 5), Fv (Ecuación 6), Fx (Ecuación 7) y Fy (Ecuación 8) para w=0:

$$F = A + B \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) = 2190.6 - 250.7 \cos\left(\frac{\pi}{180} 0\right) = 1939.9 \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$F_v = A_v + B_v \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) = -4.49 - 6.56 \cos\left(\frac{\pi}{180} 0\right) = -11.05 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$F_x = A_x + B_x \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) = 10.7 + 1.49 \cos\left(\frac{\pi}{180} 0\right) = 12.19 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$F_y = A_y + B_y \cos\left(\frac{\pi}{180} w\right) = 10.7 + 1.49 \cos\left(\frac{\pi}{180} 0\right) = 12.19 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Con estos valores se reemplaza en la ecuación del modelo (Ecuación 9):

$$Co(v, w, x, y) = F + F_v v + F_x \frac{1}{x} + F_y \frac{1}{y} = 1939.9 - 11.05 \times 40 + 12.19 \frac{1}{0.01} + 6.93 \frac{1}{0.05} = 2855.5 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Los valores obtenidos con los modelos matemáticos se confrontan con los resultados del Dataset de simulaciones para evaluar el margen de error. Estos valores se presentan en la Tabla 11, donde se observa que los errores se encuentran dentro de los umbrales presentados en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9, siendo el Max para la forma cuadrada del 7%, el 17% para las formas rectangular y en L.

Tabla 11. Resultados de Requerimiento energético de climatización [KW/m2] y error relativo. Fuente: Elaboración de los autores.

	Cuadrada	Rectangular	L
	Original	Original	Original
Modelo matemático	11034	5638	2855
Simulación computacional	10646.97	5067.73	2656.52
Error relativo	4%	11%	8%

Tabla 12. Variables corregidas para mejorar el proyecto Caso n. Fuente: Elaboración de los autores.

Forma	Cuadrada	Rectangular	L
v -WWR	20%	30%	30%
w – orientación	0 (Norte)	0 (Norte)	0 (Norte)
x – espesor aislación muro	0.05	0.05	0.1
y – espesor aislación techo	0.1	0.1	0.1

Tabla 13. Resultados de Requerimiento energético de climatización [KW/m²] y porcentaje de ahorro energético. Fuente: Elaboración de los autores.

	Cuadrada		Rectangular		L	
	Original	Mejorada	Original	Mejorada	Original	Mejorada
Resultado modelo matemático	11034	10273	5638	4510	2855	1800
Reducción REC		7%		20%		37 %

Los valores permiten considerar cambios y mejoras en el proyecto, tales como: aumentar la aislación en muros y techos, llevando a los valores $x=0.1$ y $y=0.1$; y reducir la proporción de aberturas a un 20% en la Forma C y un 30% en las formas R y L. (Tabla 12).

Realizando el cálculo con el modelo matemático, se observan las mejoras obtenidas en la reducción del requerimiento energético. Dichos resultados se presenta en la Tabla 13.

La reducción y ahorro energético se diferencia entre formas edilicias. Se alcanza hasta un 37% de mejora en la forma L; 20% en la mejora para la forma rectangular y un porcentaje menor del 7% para la forma cuadrada. Esto permite diferenciar estrategias de mejoras y de diseño bioclimático para las diferentes configuraciones geométricas del edificio. Además, revela la importancia y potencial de los modelos matemáticos desarrollados.

DISCUSIÓN

El modelado matemático presenta un camino ventajoso para la predicción del REC. Si bien, el uso de 20 parámetros puede parecer excesivo, esto contrasta con el tiempo, recursos y experticia que son necesarios para realizar las 270.000 simulaciones que alimentaron el modelo.

En el análisis de errores se considera aceptable, en particular, el error relativo restringido por debajo del 2.1%. Respecto del número de parámetros, al pasar

del M1 (8 parámetros) al M2 (15 parámetros), se obtiene una mejora sustancial. Sin embargo, cuando se pasa del M2 al M3 (20 parámetros), no se observa la misma relevancia en la mejora del modelo, por lo que se advierte que considerar modelos con más de 20 parámetros no reportan ventajas predictivas y corre el riesgo de *overfitting*.

En relación con los modelos no presentados, es importante destacar que la elección de la forma funcional del modelo impacta fuertemente en la capacidad predictiva. Es decir, si en lugar de considerar como variables $1/x$ y $1/y$ se tomaran en cuenta directamente x y y , los errores crecen sustancialmente. Lo mismo se presenta para la dependencia angular en w . Además, sobre los valores calculados se realiza una medida de "goodness of fit" para todos los modelos, utilizando la metodología de *chi-cuadrado sobre grados de libertad* ($x^2/d.o.f.$). Esta medida permite evaluar si los errores se distribuyen aleatoriamente con respecto a la predicción, en términos de que, si el modelo ajusta bien, el valor de x^2/dof debería ser lo más cercano a 1.

En la Tabla 14 se observa la existencia de modelos que se alejan considerablemente de la medida de referencia (1) y otros que resultan razonables, aunque no son perfectos. Sin embargo, dado que el *Dataset* es muy numeroso y los parámetros son pocos, se puede optar por el camino de realizar más modelos con mayor cantidad de parámetros y, de esta manera, amenguar el x^2/dof correspondiente. El problema de esta situación es que los modelos comienzan a complejizarse, perdiendo su característica de sencillez.

Tabla 14. Valores de chi-cuadrado sobre grados de libertad. Fuente: Elaboración de los autores.

Modelo	Nro de Parámetros	Forma		
		C	L	R
01 Fourier Lineal 2 términos par [M1]	8	3.4	5	7.4
02 Fourier Lineal 2 términos impar	8	51.6	93.5	130.4
03 Fourier Lineal 3 términos	12	3.2	5	7.2
04 Fourier Lineal 3 términos par	12	3.3	4.5	6.3
05 Fourier Lineal 3 términos impar	12	51.6	93.3	130.4
06 Fourier Lineal 4 términos	16	3.2	4.8	6.1
07 Fourier Lineal 5 términos	20	3.2	4.3	6.1
08 Fourier Cuad STC 2 términos par	14	2.8	3.4	6.1
09 Fourier Cuad STC 2 términos impar	14	51.1	92.6	128.5
10 Fourier Cuad STC 3 términos	21	2.7	3.4	3.9
11 Fourier Cuad STC 3 términos par	21	2.7	3.4	3.9
12 Fourier Cuad STC 3 términos impar	21	51	92.4	128.4
13 Fourier Cuad STC 4 términos	28	2.6	3.1	2.7
14 Fourier Cuad STC 5 términos	35	2.6	2.7	2.7
15 Fourier Cuad 2 términos par [M3]	20	1.4	2.2	2.1
16 Fourier Cuad 2 términos impar	20	1.4	2.2	2.1
17 Fourier Cuad 3 términos	30	1.3	2.1	1.9
18 Fourier Cuad 3 términos par	30	1.3	1.7	0.9
19 Fourier Cuad 3 términos impar	30	49.8	91.4	126.9
20 Fourier Cuad 4 términos	40	1.2	1.8	0.7
21 Fourier Cuad 5 términos	50	1.2	1.4	0.7
22 Fourier LinealExtra 2 términos par	12	3.3	4.8	7.2
23 Fourier LinealExtra 2 términos impar	12	51.6	93.4	130.3
24 Fourier CuadExtra V1 2 términos par	20	1.4	2.4	2.9
25 Fourier CuadExtra V1 2 términos par	20	49.8	91.7	127.5
26 Fourier Cuad IExtra V2 2 términos par	20	1.4	2.4	2.2
27 Fourier Cuad IExtra V2 2 términos impar	20	49.9	91.8	127
28 Angular Cuad STC par	9	11.2	11.5	15.5
29 Angular Cuad STC impar	9	51	92.7	129.1
30 Angular Cuad par [M2]	15	1.6	2.5	2.4
31 Angular Cuad impar	15	49.8	91.7	127.4
35 Lineal	5	56.8	58.4	135.6
36 Cuadrático STC	9	16	49.4	24.2
37 Cuadrático	15	14.5	44.5	22.2
38 Lineal inverso	5	51.5	45.9	129.1
39 Cuadrático inverso STC	9	13.9	45.1	21.5
40 Cuadrático inverso	15	12.6	40.2	18.9

La mejora observada al pasar del modelo 1 al modelo 2 evidencia que la consideración de cambiar a modelos no lineales es una decisión que va en la dirección correcta. Sin embargo, se hace necesario resaltar que con el tipo de modelos lineales, y consecuentemente menos complejos, es factible conseguir predicciones razonables. La utilización de modelos no lineales permite alcanzar conclusiones respecto de la importancia de las distintas variables, no sólo por sí mismas, sino también en sinergia con las demás. Para discutir este punto se selecciona el M2, que parece el modelo más exitoso de la búsqueda realizada en este trabajo.

En la Tabla 15 se presentan los parámetros de M2 normalizados teniendo en cuenta el rango de la variable asociada, semejantes a los presentados a la Tabla 5. Es decir, el cambio que produce esa variable en el consumo cuando pasa de un extremo a otro de su rango, lo que permite ver claramente la importancia de cada término en el REC.

Tabla 15. Valores de las estimaciones de los parámetros del Modelo 2.
 Fuente: Elaboración de los autores.

Modelo 2	C	L	R
F	11227	2460	5835
Fw	-257	-501	-885
Fv	-3509	-1409	-2929
Fx	528	844	676
Fy	-628	461	291
Fww	41	-9	-149
Fvv	1099	631	1660
Fxx	-215	-350	-474
Fyy	89	-328	-358
Fvv	-2934	-1312	-2418
Fwx	357	298	468
Fwy	1188	391	750
Fvx	1560	740	1653
Fvy	887	389	596
Fxy	1217	662	477

Lo primero que se observa es que un alto grado del consumo está dado por el parámetro F, es decir, la constante en el modelo que no depende de ninguna de las variables. Es también de importancia que la constante más baja se obtiene para la forma L, lo que resalta el hecho de que el diseño arquitectónico tiene un impacto sustancial en el consumo energético. Sobre esta base de consumo, la dependencia angular dada por Fw y Fww no es sustancial.

Asimismo, es preciso tener presente lo que sucede con Fv, cuya función es proporcionar la contribución respecto de la proporción de superficie vidriada. Este término es siempre importante y, además, negativo, lo que indica que el aumento de la superficie vidriada lleva a una reducción en el consumo. Sin embargo, se advierte que Fvv (superficie vidriada), en el término cuadrático, lleva a un aumento del consumo, aunque considerablemente menor que el ahorro si el término fuera lineal.

Por último, en lo que respecta al análisis por variables individuales, se observa que tanto el espesor de la aislación del techo como el de los muros posee menor incidencia que otras variables. Esto quiere decir que existe un impacto menor en el consumo. El término cruzado de mayor importancia es Fwv, el que, además, es negativo. El resto de los términos son de importancia intermedia, lo que muestra que, si bien hay factores a resaltar, la excesiva simplificación del modelo y las consideraciones de diseño son detrimentales.

CONCLUSIONES

La investigación presentada aborda el estudio de ecuaciones representativas para la obtención del valor del REC de viviendas. Al tomar decisiones constructivas, el requerimiento energético es uno de varios factores a considerar. Dentro de ese análisis, contar con un modelo predictivo como el presente, simplifica la toma de decisiones, permitiendo que se tomen sobre consideraciones cuantitativas.

A partir de resultados de simulaciones paramétricas se elaboraron 40 modelos matemáticos. Los modelos no lineales se consideran más adecuados en un equilibrio entre complejidad para usuarios no especialistas con bajos niveles de error.

Los modelos considerados como óptimos demostraron que es posible acercarse de manera simple a un valor de referencia. El caso utilizado para la demostración de este sirve para verificar los valores sobre la base de las simulaciones, considerando a estas como verosímiles. Los resultados alcanzados evidencian que estos modelos responden de manera correcta a un primer análisis y son la base para decisiones certeras en beneficio de la eficiencia energética en los primeros pasos del proyecto arquitectónico.

El presente trabajo es factible de replicar en otras regiones del país por medio del cambio del archivo climático. El trabajo comprende la diversidad de transmitancia total de diferentes muros y techos, orientaciones y relación WWR. Para futuros trabajos se estipula necesario y posible la reducción de los datos utilizados como Dataset con la utilización de metodologías de muestreo y categorización como LHS (hiper cubo latino).

Contribución de los autores: Conceptualización, M.V.M. y G.J.B.; Curación de datos, A.A. y M.V.M.; Análisis formal A.A. y M.V.M.; Adquisición de financiación, M.V.M.; Investigación, M.V.M.; G.J.B y A.A. Metodología M.V.M.; Administración de proyecto, M.V.M.; Recursos; Software; Supervisión; Validación, M.V.M., G.J.B; y A.A.; Visualización: M.V.M.; Escritura – borrador original, M.V.M.; Escritura – revisión y edición M.V.M.; G.J.B y A.A.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azar, E., Alaifan, B., Lin, M., Trepici, E., & Asmar, M. E. (2021). Drivers of energy consumption in Kuwaiti buildings: insights from a hybrid statistical and building performance simulation approach. *Energy Policy*, *150*, 112154. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112154>

Cătălina, T., Iordache, V., & Caracaleanu, B. (2013). Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand. *Energy and Buildings*, *57*, 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.010>

Chang, C. C., Shi, W., Mehta, P., & Dauwels, J. (2019). Life cycle energy assessment of university buildings in tropical climate. *Journal of Cleaner Production*, *239*, 117930. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117930>

Chou, J., & Ngo, N. (2016). Time series analytics using sliding window metaheuristic optimization-based machine learning system for identifying building energy consumption patterns. *Applied Energy*, *177*, 751–770. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.074>

González-Vidal, A., Ramallo-González, A. P., Terroso-Sáenz, F., & Skarmeta, A. F. (2017). Data driven modeling for energy consumption prediction in smart buildings. *2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. <https://doi.org/10.1109/bigdata.2017.8258499>

Huang, S., Lin, Y., Chinde, V., Ma, X., & Lian, J. (2021). Simulation-based performance evaluation of model predictive control for building energy systems. *Applied Energy*, *281*, 116027. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116027>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2022). Tracking Buildings 2022. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/energy-system/buildings>

Kim, J., Kwak, Y. H., Mun, S., & Huh, J. (2022). Electric energy consumption predictions for residential buildings: Impact of data-driven model and temporal resolution on prediction accuracy. *Journal of Building Engineering*, *62*, 105361. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105361>

Kwak, Y. H., Seo, D., Jang, C., & Huh, J. (2013). Feasibility study on a novel methodology for short-term real-time energy demand prediction using weather forecasting data. *Energy and Buildings*, *57*, 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.041>

Malkawi, A., & Augenbroe, G. (2004). *Advanced Building Simulation*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203073674>

Papadopoulos, S., Azar, E., Woon, W. L., & Kontokosta, C. E. (2017). Evaluation of tree-based ensemble learning algorithms for building energy performance estimation *Journal of Building Performance Simulation*, *11*(3), 322–332. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1354919>

Raj, B. P., Meena, C. S., Agarwal, N., Saini, L., Khahro, S. H., Subramaniam, U., & Ghosh, A. (2021). A Review on Numerical Approach to Achieve Building Energy Efficiency for Energy, Economy and Environment (3E) benefit. *Energies*, *14*(15), 4487. <https://doi.org/10.3390/en14154487>

Schwartz, Y., & Raslan, R. (2013). Variations in results of building energy simulation tools, and their impact on BREEAM and LEED ratings: A case study. *Energy and Buildings*, *62*, 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.022>

Seyedzadeh, S., Rahimian, F. P., Rastogi, P., & Glesk, I. (2019). Tuning machine learning models for prediction of building energy loads. *Sustainable Cities and Society*, *47*, 101484. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101484>

Harputlugil, T., & De Wilde, P. (2021). The interaction between humans and buildings for energy efficiency: A critical review. *Energy Research & Social Science*, *71*, 101828. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101828>

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>

Fang, Y., & Cho, S. (2019). Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. *Solar Energy*, *191*, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.039>

Ye, Y., Hinkelman, K., Zhang, J., Zuo, W., & Wang, G. (2019). A methodology to create prototypical building energy models for existing buildings: A case study on U.S. religious worship buildings. *Energy and Buildings*, *194*, 351–365. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.037>

Zhao, H., & Magoulès, F. (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *16*(6), 3586–3592. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>

EVALUACIÓN DE LA ACCESIBILIDAD PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE SUBTERRÁNEO: ANÁLISIS DEL METRO DE SANTIAGO - CHILE

EVALUATING ACCESSIBILITY TO UNDERGROUND TRANSPORT SYSTEMS: ANALYSIS OF THE SANTIAGO - CHILE METRO

AVALIAÇÃO DE ACESSIBILIDADE PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE SUBTERRÂNEO: ANÁLISE DO METRÔ DE SANTIAGO DO CHILE

Liborio Navas

Magíster en Construcción
Estudiante, Escuela de Construcción Civil
Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile
<https://orcid.org/0009-0002-0462-792X>
lwnavas@uc.cl

Claudia Valderrama-Ulloa

Doctora en Mecánica
Investigadora Asociado, Centro de Investigación en Tecnologías para la Sociedad, Facultad de Ingeniería
Universidad del Desarrollo, Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-1603-9714>
claudia.valderrama@udd.cl

Ximena Ferrada

Doctora en Ciencias de la Ingeniería
Directora de Carrera Ingeniería Civil en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería,
Centro de Investigación en Tecnologías para la Sociedad, Universidad del Desarrollo, Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-7774-8354>
ximenaFerrada@udd.cl

Jorge Contreras

Magíster en Educación en Ciencias de la Salud
Investigador, Centro de Investigación en Tecnologías para la Sociedad, Facultad de Ingeniería,
Académico Facultad de Medicina, Universidad del Desarrollo, Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-0925-9548>
jgcontreras@udd.cl

Zulay Gimenez

Doctora en Ciencias de la Ingeniería
Académica, Escuela de Construcción Civil
Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-9051-1434>
zmgimenez@uc.cl



RESUMEN

Considerando que una parte importante de la población mundial vive con algún tipo de discapacidad y que la esperanza de vida aumenta, el hecho de tener un transporte accesible permitiría que las personas mejoraran su calidad de vida, accediendo a más oportunidades socioeconómicas. A partir de un diseño descriptivo mixto (cualitativo etnográfico y cuantitativo), este artículo presenta una herramienta de evaluación del nivel de accesibilidad en el uso del tren subterráneo para personas con discapacidad visual, física, cognitiva y auditiva. Se analizaron los datos de 30 estaciones del Metro de Santiago de Chile, estudiando el desplazamiento desde el exterior a la estación, la permanencia en zona de pagos y el desplazamiento hacia andenes y combinaciones. De los indicadores evaluados, los que tienen relación con el desplazamiento hacia el andén son los que presentan menores niveles de accesibilidad, ya que no responden a todas las necesidades para los distintos tipos de discapacidad analizados.

Palabras clave

discapacidad sensorial, discapacidad física, discapacidad cognitiva, metro, accesibilidad

ABSTRACT

Considering that a significant part of the world's population lives with some disability and life expectancy is increasing, accessible transportation would allow people to improve their quality of life and access more socioeconomic opportunities. Based on a mixed descriptive design (qualitative, ethnographic, and quantitative), this article presents a tool for evaluating the level of accessibility to subway trains for people with visual, physical, cognitive, and hearing disabilities. Data from 30 Metro stations in Santiago de Chile were analyzed, studying movements into the station, permanence in the payment area, and movements toward platforms and connecting lines. Among the indicators evaluated, those related to getting to the platform have the lowest levels of accessibility, as they do not meet all the needs of the different types of disabilities analyzed.

Keywords

sensory impairment, physical disability, intellectual disability, subway, accessibility

RESUMO

Considerando que uma parte significativa da população mundial vive com algum tipo de deficiência e que a expectativa de vida está aumentando, dispor de um transporte acessível permitiria que as pessoas melhorassem sua qualidade de vida, tendo acesso a mais oportunidades socioeconômicas. Com base em um projeto descritivo misto (qualitativo, etnográfico e quantitativo), este artigo apresenta uma ferramenta de avaliação do nível de acessibilidade no uso do metrô para pessoas com deficiências visuais, físicas, cognitivas e auditivas. Foram analisados dados de 30 estações de metrô de Santiago do Chile, estudando o deslocamento do exterior ao interior da estação, o tempo de permanência na área de pagamento e o deslocamento para as plataformas e combinações. Dos indicadores avaliados, os relacionados ao deslocamento até a plataforma são os que apresentam os níveis mais baixos de acessibilidade, pois não atendem a todas as necessidades dos diferentes tipos de deficiência analisados.

Palavras-chave:

deficiência sensorial, deficiência física, deficiência cognitiva, metrô, acessibilidade.

INTRODUCCIÓN

Según los datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS o WHO, según sus siglas en inglés) el 16% de la población mundial vive con algún tipo de discapacidad (Organización Mundial de la Salud, 2023). De esta cifra, alrededor de 85 millones de personas están en Latinoamérica. En 2022, los mayores de 60 años en la región representan el 13,4% y las proyecciones indican que este número podría incrementarse hasta el 25,1% en 2050 (CEPAL, 2022). La relación entre ambas estadísticas es relevante debido a que la prevalencia de la discapacidad aumenta a medida que se incrementa la edad.

Asimismo, lo anterior impacta en el desarrollo urbano y, más específicamente, en el transporte, puesto que tanto las personas mayores con dificultades para desplazarse como las personas con discapacidad (en adelante, PcD), muchas veces únicamente cuentan con acceso al transporte público para movilizarse o bien, o este es su opción preferida. Es por esta razón que se hace fundamental evaluar tanto las necesidades de la población con respecto a la infraestructura en cada país como la importancia de la posición espacial entre la infraestructura pública y las viviendas, ya que esto conlleva al desarrollo de las oportunidades socioeconómicas de las PcD (Lima et al., 2019; Sze & Christensen, 2017).

Existen distintas investigaciones sobre el fenómeno de la accesibilidad en zonas urbanas. Algunas analizan la accesibilidad hacia un lugar, en tanto la manera efectiva de ayudar a las personas a llegar a su destino (Jiron & Mancilla, 2013), otras han estudiado la satisfacción con los viajes (Lättman et al., 2019; Grisé et al. 2019; Wong, 2018) o con las distintas formas de transporte (Wong et al., 2017; Bascom & Christensen, 2017).

Por otro lado, y en relación con el tema de estudio de este trabajo, se encuentran las investigaciones de Srichuae et al. (2016), las cuales indagan en los factores que afectan la movilidad de personas mayores, como por ejemplo, la distribución de espacios públicos con servicios de transporte accesibles y la capacidad de viajar sin asistencia, donde se destaca la necesidad de incluir principios de diseño universal. Por su parte, Cochran (2020) analiza las experiencias de PcD al usar el transporte, señalando que falta análisis del comportamiento de viaje, ya que representa una de las barreras en el uso de transporte. Además, Sze y Christensen (2017) revisan pautas de diseño de transporte accesible en EU, Reino Unido y Hong Kong que podrían influir en el comportamiento de viaje, el patrón de actividad y la elección del modo de transporte de PcD, haciendo hincapié que el diseño accesible debería implementarse en un enfoque de red de transporte más integrada.

En Chile, distintos autores (Jirón & Mancilla, 2013; Vecchio et al., 2020) han tenido una aproximación desde diversos enfoques de investigación hacia la comprensión de la exclusión social desde la movilidad cotidiana urbana. Dentro de estos enfoques se encuentra el estudio de la accesibilidad, en donde se incluyen las condiciones físico-espaciales o cómo las barreras pueden ser comprendidas desde su espacialidad como aquellas limitaciones que los sujetos encuentran cotidianamente en sus movimientos a través de la ciudad.

En relación con accesibilidad y movilidad, el trabajo de Kaufmann et al. (2004) redefine la accesibilidad como una dimensión estructurante de la vida social, lejos de ser simplemente una conexión entre puntos. La "motilidad", que abarca la movilidad socioespacial, se presenta como un activo que varía entre individuos, grupos e instituciones en acceso, competencia y apropiación. Este enfoque destaca la complejidad de las relaciones entre estructuras sociales y territoriales, conectando la accesibilidad con la capacidad de acceder y apropiarse de bienes, información y personas en diferentes contextos locales y geopolíticos.

De esta manera, la accesibilidad, dentro del marco de la motilidad, se convierte en un componente clave para comprender las dinámicas de sociedades altamente móviles. En el caso de Cass et al. (2005), se destaca que la noción de accesibilidad es compleja y va más allá de describir la exclusión de grupos sociales de ciertos servicios, ya que se enfoca en la conciencia espacial y relacionada con la movilidad de la ciudadanía. Al vincular la sociedad interconectada con la dispersión de la vida cotidiana, el autor identifica la creciente "carga de movilidad" en la sociedad. Además, subraya la importancia de considerar no solo las dimensiones espaciales y temporales de la provisión de transporte, sino también la conexión con las redes sociales de las que las personas desean formar parte, destacando la dinámica y la importancia de las redes en la inclusión social.

Siguiendo con la búsqueda de análisis de la accesibilidad, Lucas et al. (2016) proponen utilizar las teorías éticas de igualitarismo y suficietarismo como marco teórico para evaluar los Índices de Accesibilidad Espacial, destacando la necesidad de identificar indicadores y umbrales en colaboración con las partes involucradas, especialmente con personas más rezagadas en relación con este índice.

En otro aspecto, el tren subterráneo o metro es un medio de transporte sumamente importante para la movilidad urbana y, por lo mismo, es necesario revisar cómo ocurre la accesibilidad en este. , la mayoría de las publicaciones centran la revisión y análisis de sus características en función a la capacidad de un

individuo para cubrir la distancia entre el origen y el destino (Bascom & Christensen, 2017), en las que se analiza la cantidad de tiempo para viajar (Márquez et al., 2019; Park et al., 2022; Wong, 2018), tiempo de esperas (Vandenbulcke et al., 2009) o distancias caminables (Yun, 2019). Si bien Prasertsubpakij y Nitivattananon (2012) proponen un método de evaluación del metro de Bangkok con 24 indicadores, el estudio se centra en entrevistas que evalúan la satisfacción de un grupo amplio de usuarios y no incluye discapacidad sensorial ni cognitiva. Así, se evidencia la necesidad de un análisis exhaustivo del lugar y de los componentes que permiten un acceso y uso equiparable para personas con diversas capacidades (Shen et al., 2023; WHO, 2023).

De acuerdo con la OMS, la discapacidad existe cuando no hay una adecuada relación del entorno con las capacidades funcionales de una persona y, por ende, existe una limitación en actividades o restricciones en la participación social (Organización Mundial de la Salud, 2023). Por lo tanto, las barreras del entorno construido harán que una PcD experimente una capacidad funcional reducida. A este grupo de personas se le presentan más barreras al momento de viajar debido a sus limitaciones físicas, sensoriales y cognitivas, lo que se traduce en menores números de viajes, recorridos más cortos y tiempos de viajes más largos (Shen et al., 2023). Debido a esto, en América más del 33% de las PcD eligen no viajar (Brumbaugh, 2018). Considerando que las PcD realizan viajes mayoritariamente por razones médicas (Krahn et al., 2015) y que la población envejece, es necesario disminuir estas barreras en la infraestructura y en el transporte para que una PcD pueda transportarse libre e independientemente a cualquier espacio, sea público o privado.

De este modo, al enfocarnos en barreras físicas espaciales en el transporte, se espera que este posea un diseño universal que pueda ser utilizado por todas las personas, en la mayor medida posible, sin necesidad de ninguna adaptación o diseño especializado (Iwarsson & Stahl, 2003). Para ello, el diseño universal se basa en siete principios: uso equitativo, flexibilidad de uso, uso sencillo e intuitivo, información perceptible, tolerancia al error, bajo esfuerzo físico y tamaño y espacio de aproximación y uso (Iwarsson & Stahl, 2003). Para aplicar estos principios, un diseño universal, a diferencia de un diseño accesible en el que se busca diseñar solo para el grupo específico con discapacidad y de esa forma genera exclusión (ISO, 2001), debe integrar características de accesibilidad y usabilidad desde el principio, eliminando todas las ideas preconcebidas y dando lugar a la inclusión social del mayor número posible de usuarios, independientemente de su condición.

Dado lo anterior, este artículo presenta una herramienta de evaluación del nivel de accesibilidad en el uso del tren subterráneo para PcD visual, física, cognitiva y auditiva.

A través de esta herramienta se analizaron los datos recopilados de 30 estaciones del Sistema de Metro de Santiago de Chile (SMS), estudiando el desplazamiento desde el exterior a la línea de metro, la permanencia en la zona de pagos y el desplazamiento hacia el andén.

METODOLOGÍA

El presente estudio tiene un enfoque mixto cualitativo-cuantitativo. Desde el punto de vista de su diseño, este corresponde a un tipo descriptivo secuencial (Hernández Sampieri et al., 1997), con una primera fase cualitativa etnográfica (Hammersley & Atkinson, 2007) que explora las necesidades de accesibilidad en el Sistema de Metro de Santiago de Chile para PcD, y una segunda fase cuantitativa que consiste en determinar un sistema de evaluación para informar sobre el nivel de accesibilidad en las estaciones de metro.

En la fase etnográfica se obtuvo el consentimiento de PcD que utilizan el Sistema de Metro de Santiago de Chile a fin de recopilar datos a través de observaciones participantes de campo, conversaciones informales y entrevistas semiestructuradas (a personas en sillas de ruedas, persona mayor con problemas de desplazamiento, persona ciega, cuidador de persona mayor con problemas cognitivos). Dicho proceso se realizó durante 64,5 horas entre agosto y septiembre del año 2021, tiempo en el cual se visitaron distintas estaciones de varias líneas del Sistema de Metro de Santiago de Chile para obtener una perspectiva amplia y representativa, se tomaron registros audiovisuales de las estaciones y se midieron elementos arquitectónicos relevantes, realizando recorridos con PcD. Los datos recopilados fueron sistematizados mediante tablas de indicadores cualitativos y cuantitativos.

Para asegurar la naturalidad de los comportamientos observados, se siguió un enfoque etnográfico basado en el modelo comprimido propuesto por Jeffrey y Troman (2004). El análisis de los datos en esta fase se basó en los principios de la *Grounded Theory* (Glaser & Strauss, 1967), lo que permitió organizar y analizar la información rigurosamente a través de la aplicación de técnicas de codificación, lo que derivó en la generación de categorías y subcategorías interrelacionadas. La triangulación de la información obtenida involucró comparar datos de varias fuentes, revisar la información de otros investigadores y contrastar las observaciones del investigador, lo cual permitió determinar la validez de la información recopilada.

En la etapa cuantitativa, se diseñó una metodología de evaluación basada en la revisión sistemática de la literatura y en los hallazgos cualitativos previos. Se identificaron indicadores de evaluación (enfocados principalmente en las barreras físicas espaciales) y se asignaron los parámetros para determinar el nivel de accesibilidad. Para

validar la metodología, se analizaron las estaciones de la Línea 5 del sistema del metro de Santiago, considerando las siguientes características:

- Es una de las 3 líneas más antiguas del sistema, por lo que hay criterios de accesibilidad no resueltos.
- Línea más extensa y con más estaciones del sistema (30 estaciones).
- Es la línea que recorre más comunas (10), con estratos socioeconómicos diferentes.
- Presenta tres tipos de sistemas constructivos: estaciones elevadas, nivel suelo y subterráneas,
- Tiene el mayor número de combinaciones con otras líneas y estaciones intermodales.
- Recorre puntos estratégicos, tales como universidades, clínicas y hospitales, espacios públicos, centro históricos y comerciales.

CASO DE ESTUDIO

El sistema de transporte público de Santiago incorpora a todos los buses de transporte público de la capital, Metro-Tren Nos (línea de servicio de trenes) y al Sistema de Metro de Santiago de Chile. Este último es el eje del sistema, siendo uno de los medios de transporte público más importantes en la ciudad. El sistema del metro de Santiago de Chile comenzó a estructurarse durante la década del sesenta y, actualmente, posee seis líneas que abarcan 142,4 km (Figura 1). En noviembre 2017, cuando comenzó a operar la línea 6, se transportaron en promedio más de 85 mil personas por hora (Metro de Santiago, 2020).



Figura 1. Configuración espacial y descriptiva con datos de longitud, número de estaciones, número de comunas a las que sirve y % de afluencia de las líneas del Sistema de metro de Santiago de Chile y ubicación de las estaciones analizadas. Fuente: Elaboración de los autores

Desde el 2012, la empresa Metro S.A. ha llevado a cabo el plan de accesibilidad para adaptarse a los requerimientos actuales, donde uno de sus objetivos era dotar de ascensores a todas las estaciones de la red, lo cual fue cumplido en 2019 (Metro de Santiago, 2020). Además, la remodelación incluye la habilitación en estaciones de puertas bidireccionales configurables, de espacios preferenciales en los vagones para personas en silla de ruedas, dispositivos de comunicación entre pasajeros y conductor, mapa LED para indicar próximas estaciones y cámaras al interior de los trenes. Este plan permitirá que los PcD que circulan en la red cuenten con mayor accesibilidad desde su ingreso a la estación hasta su salida.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

LEVANTAMIENTO DE BARRERAS Y NECESIDADES

Las PcD acompañadas en sus diferentes recorridos por el Metro de Santiago tenían los siguientes tipos de discapacidad:

1. visual, entendidas como aquellas deficiencias, limitaciones y restricciones a las que se enfrenta una persona que tiene una enfermedad ocular al interactuar con su entorno físico, social o actitudinal, (Espinosa-Muñoz, 2016; Alarcón & Vizcarra, 2016; Shen et al., 2023);
2. física, en cuanto a personas que por distintas razones tienen dificultad para desplazarse, ya sea temporal o permanentemente (Saéz-González, 2020; Olivares-Medina et al., 2019; Shen et al., 2023),
3. cognitiva, que involucra limitaciones del funcionamiento intelectual, así como también del comportamiento adaptativo en los dominios conceptual, social y práctico (Brusilovsky, 2014; CEAPAT, 2018) y
4. auditiva, en tanto personas que en la interacción con el entorno se enfrentan a barreras que impiden su acceso a la información y comunicación auditiva-oral dadas por la lengua (Espínola-Jiménez, 2015; Agudelo-Zapata & Cadavid-Ospina, 2016).

A través de una revisión bibliográfica y recorridos vivenciales en los que los entrevistados informaron sobre sus apreciaciones, se procedió a describir las barreras y necesidades encontradas, las que posteriormente fueron categorizadas de acuerdo con el tipo de discapacidad (Tabla 1). Algunas de estas apreciaciones sirvieron como base para la creación de los indicadores de evaluación.

Tabla 1. Discapacidades - Barreras. Fuente: Elaboración de los autores

Discapacidad visual	Discapacidad física	Discapacidad cognitiva	Discapacidad auditiva
Falta de guías podotáctiles	Falta de escaleras mecánicas o inhabilitación de estas.	Falta de contraste en los botones de los ascensores.	Falta de información visual dentro de los trenes respecto de la ubicación y próximas estaciones
Falta de advertencia podotáctil en inicio y fin de escaleras y andén	Diferencia de altura y diámetro en pasamanos	Personas de apoyo al usuario sin formación en discapacidad	Falta de información por medio de pantallas en los ascensores
Diferencia horizontal entre el vagón y el andén	Falta de ventanilla preferencial.	Falta de información adecuada para PcD cognitiva cuando se presenten fallas en el metro.	Falta de información lumínica en algunos trenes cuando hay cortes de servicio o cierre de estaciones.
Falta de información auditiva en los ascensores.	Falta de puertas bidireccionales configurables	Señalizaciones mal ubicadas, con poca o sin iluminación.	Falta de información oportuna en los andenes debido a fallas en los monitores de información.
Falta de iluminación adecuada en algunos puntos.	Altura de los botones de los ascensores fuera de rango para Personas en Sillas de Ruedas (PeSR)	Mural de información con simbologías inentendibles por PcD cognitiva	Falta de información en los trenes sobre el estado de ascensores de ciertas estaciones
Falta de guía podotáctil en entrada, boletería, ascensores y escaleras.	Altura de murales de información no accesibles para PeSR	Información digital confusa (Línea de metro- tiempo y publicidad)- algunas apagadas.	
Falta de guía podotáctil en entrada, boletería, ascensores y escaleras.	Diferencia vertical entre el vagón y andén.		
Falta de máquinas vendedoras o de recargas de tarjeta de pago con sistema Braille o con audio	Asientos en el andén fuera de altura. Rampas con pendientes pronunciadas		

DEFINICIÓN DE INDICADORES

Para una mayor comprensión del viaje desde la perspectiva del usuario, se separaron las áreas que comprende un trayecto. A dichas áreas se les denominará "Momentos de Trayecto" y serán definidos como:

- Momento 1: ENTRADA-E: Comprende todos los espacios desde la entrada exterior y accesos principales hasta la zona de boletería, los cuales son: accesos en escaleras fijas, escaleras mecánicas o ascensores, incluyendo sus conexiones con las distintas áreas que la componen, ya sea zona de máquinas dispensadoras y recarga de tarjetas de pago, ventanillas, conexión con el torniquete y ascensores que van hacia el andén, entre otros.
- Momento 2: HACIA ANDÉN-A: Comprende el trayecto desde el torniquete hasta la zona del andén.

Incluye escaleras internas, escaleras mecánicas, ascensores y el andén propiamente tal.

- Momento 3: COMBINACIÓN-C: Involucra todos los parámetros detectados desde que un usuario abandona el tren hasta su combinación hacia otra línea o estación intermodal. Este parámetro solo es aplicable a estaciones con combinación a otras líneas o conexión con algún intermodal.

Para analizar el nivel de accesibilidad de cada uno de los momentos de trayecto, se evaluaron distintos indicadores relacionados principalmente a barreras físicas espaciales, los que sumados entregaron un puntaje. Los puntajes de cada indicador se promediaron según la configuración de la estación y, con base en el puntaje final obtenido, se entregó el nivel de accesibilidad. La escala para evaluar los criterios es: MB (muy bueno), 2 puntos; B (bueno), 1 punto; M (malo), 0 punto.

A continuación, en la Tabla 2 se detalla la cantidad de indicadores encontrados y, en relación con ellos, los puntajes máximos ideales a alcanzar en cada momento de un trayecto. Luego, la Tabla 3 presenta cada uno de los indicadores asociados a los momentos E, A o C, según corresponda, con su respectiva escala de evaluación y puntajes asociados.

Tabla 2. Cantidad de indicadores y puntajes ideales asociados a los momentos. Fuente: Elaboración de los autores

Momentos	Cantidad de indicadores	Puntaje Ideal
Entrada (E)	24	48
Andén (A)	9	18
Combinación (C)	15	30

Tabla 3. Indicadores de evaluación. Fuente: Elaboración de los autores

Momento	Indicador	Escala de evaluación		
		Muy Bueno (2p)	Bueno (1p)	Malo (0p)
E	Pantalla acceso principal	Existe con información del estado del metro	Existe, con información no actualizada	Inexistente
E/A/C	Pasamanos escaleras	Presenta dos pasamanos. Uno a 90 cm del NPT y el segundo a 60 cm del NPT. Y un diámetro entre 3,5 a 5,0 cm (Figura 2a)	Presenta un pasamanos a una altura de 90 cm del NPT y un diámetro: 3,5 a 5,0 cm	Hay pasamanos, pero con altura y diámetros diferentes a los establecidos. (Figura 2b)
E/A/C	Escaleras mecánicas	Son de doble sentido	Son en un sentido	Inexistente
E/A	Ascensor y salvaescalera	Existen. Ambos funcionan	Existen. Uno no funciona	Inexistentes o ninguno funciona
E/A	Advertencia podotáctil	Contraste de color al inicio y término de todas las escaleras y acceso a vagones (límite andén)	Contraste de color en algunos accesos a vagones y escaleras	Inexistente
E/A	Tramo de escalera	Tramos de 15 escalones separados por descanso de mínimo 120 cm de huella	Tramos entre 16 a 18 escalones separados con descanso	Tramos de más de 18 escalones sin descanso
E/A	Huella y contrahuella de escalera	Huella 28 cm y contrahuella 18 cm	Huella menos de 28 cm o contrahuella más de 18 cm	Huella menos de 28 cm y contrahuella más de 18 cm
E	Conexión guía podotáctil en entrada	Existe conexión entre escaleras, boletería y torniquete. (Figura 3a)	Existe parcialmente conexión entre escaleras, boletería y torniquete.	Inexistente (Figura 3b)
E	Conexión guía podotáctil hacia el ascensor que lleva al exterior	Existe total conexión entre ascensores, boletería, torniquete y acceso a puerta preferencial.	Existe parcialmente conexión entre ascensores, boletería, torniquete y acceso a puerta preferencial.	Inexistente
E	Ventanilla boletería	Preferencial con altura adecuada para PcD	Preferencial sin altura adecuada para PcD	Inexistente
E	Máquinas de recarga/consultas/compra	Existentes. Altura adecuada entre 90-120 cm del NPT	Existentes. Sin altura adecuada entre 90-120 cm del NPT	Inexistentes
E	Máquinas recarga/consultas/compra en boletería	Presentan sistema de navegación por voz y Braille.	Presentan sistema de navegación por voz o Braille.	No presentan sistema de navegación
E	Puerta entrada para sillas de ruedas y coches hacia andén	Puerta bidireccional configurable.	Puerta manual	Inexistente o debe pedirse ayuda para utilizarla

Momento	Indicador	Escala de evaluación		
		Muy Bueno (2p)	Bueno (1p)	Malo (0p)
E	Ascensor	Dimensión permite entrada, giro y salida de silla de ruedas (150 cm de diámetro). O permite entrada y salida en el sentido de la marcha.	Dimensión 110 por 140 cm sólo permite la entrada (hacia adelante) de una silla de ruedas	No presenta dimensión para sillas de ruedas o no funciona
E	Puerta ascensor	Ancho mínimo 90 cm. Apertura automática y corredera.	Ancho mínimo 90 cm. Apertura manual y abatible.	No tiene ascensor o no funciona.
E/C	Botones ascensor	Ubicados a una altura entre 90-120 cm del NPT (preferencia horizontal)	Algunos ubicados a una altura superior a 120 cm del NPT	Ubicados a más de 120 cm del NPT, no funcionan o no hay
E	Botones Comando ascensor con sistema Braille, en relieve	Todos presentes. Altura adecuada.	Algunos presentes. O altura inadecuada	Sin sistema Braille
E/C	Audio y pantalla en ascensor para anunciar nivel	Ambos funcionando	Existe uno o uno funciona	Inexistentes o dañados
E	Rampa acceso ascensor	Existe con protección lateral en toda la pendiente es > a los 150 cm de longitud	Existe con protección lateral en una parte de pendiente cuando es < 150 cm de longitud	Existe sin protección lateral
E	Espacio salida ascensor	Permite maniobrar (diámetro 150 cm)	Permite maniobrar con dificultad (diámetro < 150 cm)	Inexistente o con obstáculos
E	Cámara de seguridad y botón de llamada en ascensor	Ambos funcionando	Existe uno o uno funciona	Inexistentes o dañados
E	Señal sonora y luminosa en ascensor para avisar el cierre de puertas	Ambos funcionando	Existe uno o uno funciona	Inexistentes o dañados
E	Guía podotáctil entrada y salida de ascensor	Existe advertencia táctil y contraste de color.	Existe sólo contraste de color amarillo	Inexistente
E/A	Información de ubicación (salidas, combinación, salidas de emergencia, murales informativos, ubicación de ascensores)	Presenta buena iluminación, altura adecuada y sin obstáculos	Presenta algunos obstáculos que impiden visualizarla	No presenta buena iluminación, altura adecuada y con obstáculos
A/C	Recorrido	No hay vacíos en el recorrido	Hay vacíos, pero con protección	No hay protección en los vacíos
A	Guía podotáctil andén	Existe y está conectado con elemento vertical de salida (Figura 4a)	Existe, pero sin conexión	Inexistente (Figura 4b)
A	Zona preferencial de espera	Cercana a ascensores y escaleras	Alejada de ascensores o escaleras	Inexistente
A	Advertencia podotáctil / contraste color en término de andén	Ambos presentes	Solo franja amarilla, sin huella podotáctil	Inexistentes
A	Asientos en andén	Todos a 46 cm del NPT	Algunos a menos de 46 cm del NPT	Inexistente o algunos están a más de 48 cm del NPT
A	Elemento digital de información del estado de estaciones, líneas del metro y tren.	Pantallas electrónicas y televisores.	Solo televisores	Inexistentes, no se leen o no funcionan.

Momento	Indicador	Escala de evaluación		
		Muy Bueno (2p)	Bueno (1p)	Malo (0p)
A/C	Planos informativos (andén) Información cambio de línea (combinación)	Presentan buena iluminación, sin obstáculos y altura adecuada para ser visto por PeSR	Éstos no tienen buena iluminación, con obstáculos o a una altura que no permite ser visto por PeSR	Inexistente
A	Diferencia vertical y horizontal entre andén y tren	Inexistente	Diferencia mínima	Mucha diferencia. La PcD necesita ayuda para ingresar/ egresar.
C	Conexión guía podotáctil entre ascensores que conectan dos líneas	Existe de manera continua	Existe de manera interrumpida	Inexistente
C	Conexión guía podotáctil entre escaleras que conectan dos líneas	Existe de manera continua	Sólo al inicio o final de las escaleras	Inexistente

A continuación, se presentan algunos buenos ejemplos de los indicadores (a) y otros que necesitan atención (b):



Figura 2a. Ejemplo de escalera con doble pasamanos en sus bordes.
 Fuente: Elaboración de los autores

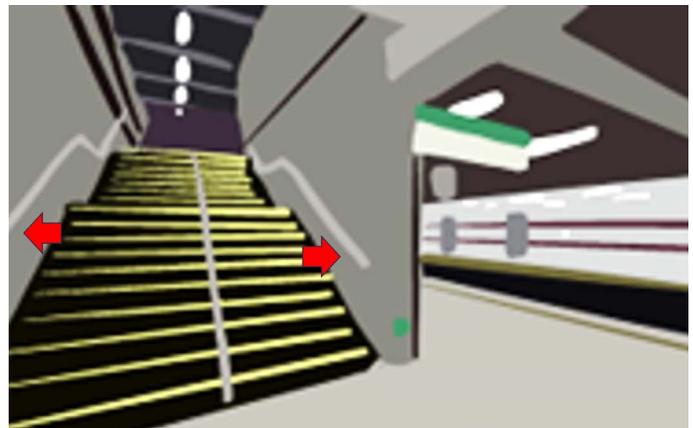


Figura 2b. Ejemplo de una escalera que tiene un solo pasamanos (en los bordes y al centro). Fuente: Elaboración de los autores

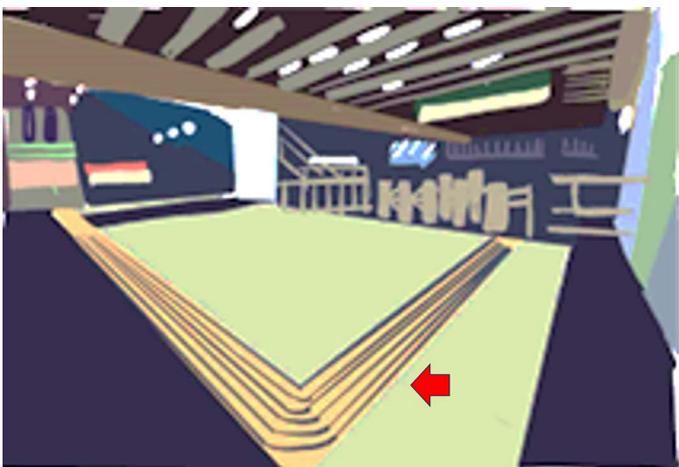


Figura 3a. Ejemplo de una completa conexión de la huella podotáctil entre la boletería y el acceso a los torniquetes. Fuente: Elaboración de los autores

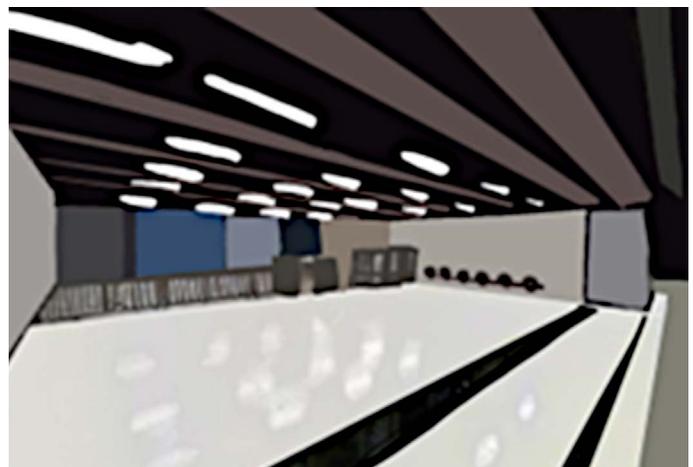


Figura 3b. Entrada en una estación que no posee huella podotáctil, solo colores en el pavimento. Fuente: Elaboración de los autores

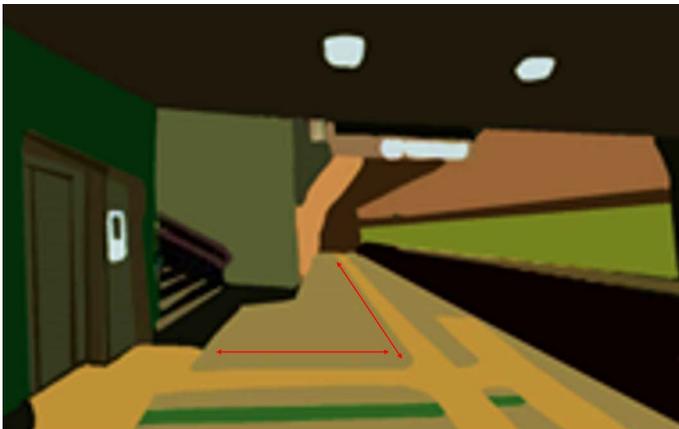


Figura 4a. Huella podotáctil en el pasillo del andén que se conecta en todo su recorrido con un elemento vertical de salida (ascensor).
 Fuente: Elaboración de los autores

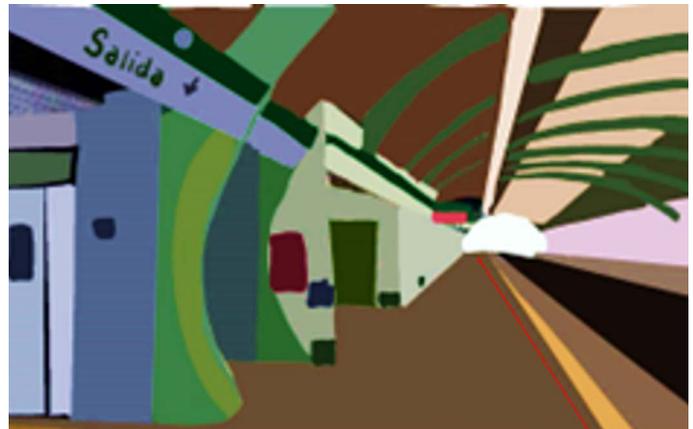


Figura 4b. En el pasillo del andén no existe huella podotáctil (sólo una franja amarilla que advierte de su límite). Fuente: Elaboración de los autores

Es importante indicar que, debido a las características y sistemas constructivos que presenta cada una de las estaciones, no necesariamente pueden aplicarse todos los indicadores, por lo que no todas podrían obtener los puntajes máximos indicados por momento de trayecto (Tabla 3). Por este motivo, se calculó el porcentaje de cumplimiento en cada momento de viaje. La sumatoria de todos los momentos entrega el puntaje total por estación. La división del puntaje total obtenido versus puntaje total posible entrega el porcentaje de cumplimiento que representa los niveles de accesibilidad definidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Niveles de accesibilidad. Fuente: Elaboración de los autores

% de cumplimiento	Niveles de accesibilidad
80% - 100%	Muy Bien Adaptado
60% - 79%	Bien Adaptado
40% - 59%	Parcialmente Adaptado
20% - 39%	Mal Adaptado
< 20%	Muy Mal Adaptado

La aplicación de la metodología se muestra a través de los resultados de 5 estaciones seleccionadas por sus sistemas y configuraciones especiales:

1. Estación subterránea (Bellas Artes)
2. Estación aérea con dos niveles (San Joaquín)
3. Estación aérea con 5 niveles (Monte Tabor)
4. Estación combinación con otra línea (Ñuble)
5. Estación combinación con una estacional intermodal (Bellavista de La Florida).

EVALUACIÓN DE LAS ESTACIONES

De las 5 estaciones evaluadas, la estación Bellavista de La Florida (subterránea, conexión intermodal y acceso a centro comercial, identificada con letra E en la Figura 1), fue la que obtuvo el porcentaje más bajo como estación (52%), en la entrada (56%) y combinación (39%). La baja evaluación se debe, entre otros aspectos, a que la entrada principal no presenta ascensores, escaleras mecánicas, ni rampas de acceso. Así, la única forma de que las PcD puedan acceder o salir de la estación es requiriendo ayuda de guardias o acompañantes. Asimismo, la combinación con el intermodal del mismo nombre no cuenta con una buena conexión y accesibilidad. Uno de los problemas detectados en relación con la comunicación para el acceso intermodal y que afecta principalmente a personas con discapacidad cognitiva es la utilización de paneles informativos con información contradictoria (Figura 5). Por otro lado, un problema identificado que afecta a personas con discapacidad visual es la falta de huella podotáctil al inicio-fin de escaleras (Figura 6).



Figura 5. Información contradictoria en paneles del trayecto conexión intermodal (donde se observan dos indicaciones de dirección diferentes). Fuente: Elaboración de los autores

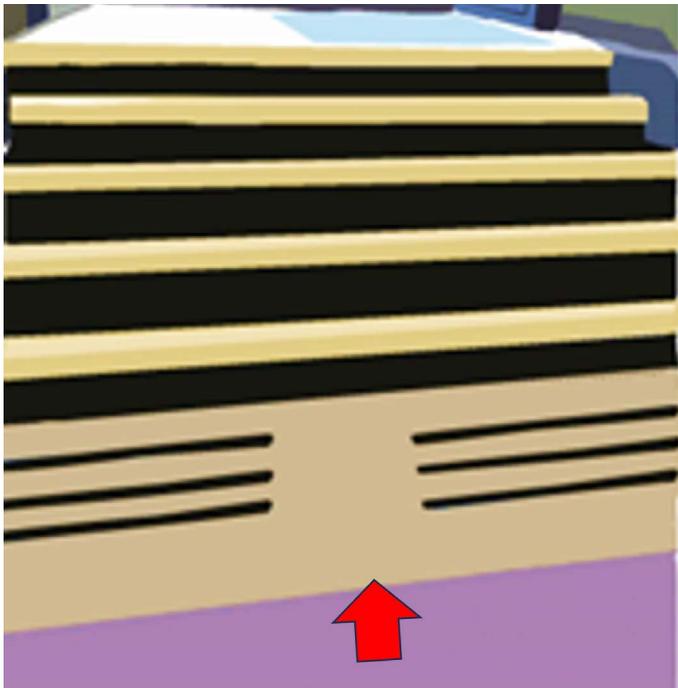


Figura 6. Falta de huella podotáctil en acceso a escalera que sólo se identifica con una franja de color amarillo. Fuente: Elaboración de los autores

Por el contrario, la estación Ñuble (estación con entrada a nivel, andén aéreo y combinación con otra línea, marcada con la letra C en Figura 1) es la que obtuvo el porcentaje más alto (69%). Esto se debe principalmente a su conexión con la Línea 6 (inaugurada en 2017), cuyo diseño implicaba mejoras en temas de accesibilidad. Tanto sus criterios de ENTRADA y COMBINACIÓN obtuvieron puntajes altos (71% y 78% respectivamente). Sin embargo, el área del andén tuvo una baja calificación debido a la falta de huella podotáctil y sus conexiones con las escaleras, lo que afectó su evaluación global. Esta estación es la única de la línea 5 que en su entrada principal cuenta con accesos automáticos y máquinas adaptadas para todos los usuarios.

Por su parte, la estación San Joaquín (estación área, acceso a universidades y centro médico, marcada con la letra D en Figura 1) alcanzó un 57%. Al igual que la mayoría de las estaciones, su menor puntaje se presenta en HACIA ANDÉN (53%), principalmente por falta de la huella podotáctil en el lugar, así como también por su conexión con ascensor y escaleras. La estación cuenta con un solo ascensor que no está siempre operativo, lo que obliga a las PcD a solicitar ayuda de guardias o acompañantes o incluso a ir hasta la próxima estación para acceder o salir del metro.

La siguiente estación evaluada, que es Bellas Artes (estación subterránea, acceso casco histórico de la ciudad, marcada con la letra B en Figura 1), no cuenta con huella podotáctil en el acceso principal que conecta con la boletería ni a lo largo del andén, lo que dificulta el

desplazamiento de las personas con discapacidad visual. Además, los asientos están muy por encima de los 45 cm de alto requeridos. Tampoco cuenta con escaleras mecánicas, ni salvaescaleras en caso de que los ascensores no funcionen. Es por ello que su nivel de accesibilidad total (58%) se ve afectado por los indicadores HACIA ANDÉN (50%).

Finalmente, la estación Monte Tabor (estación aérea, acceso centro comercial, identificada con la letra A en Figura 1) presenta su menor puntaje en HACIA ANDÉN (57%), nuevamente por la falta de huella podotáctil, incluyendo sus conexiones con los ascensores y escaleras. Aun así, obtuvo un buen puntaje en ENTRADA (69%) por contar con escaleras mecánicas de doble sentido.

En la Tabla 5 se sintetizan los resultados de la aplicación de la evaluación en cada uno de los momentos que comprenden un trayecto en el Metro de Santiago, analizando Entrada (E), Andén (A) y Combinación (C).

Tabla 5. Resultado de estaciones evaluadas. Fuente: Elaboración de los autores

Estación	E	A	C	Promedio	Nivel estación
Bellavista de La Florida (letra E – Figura 1)	27/48 56%	18/30 60%	7/18 39%	52%	Parcialmente Adaptado
San Joaquín (letra D – Figura 1)	28/46 61%	16/30 53%		57%	Parcialmente Adaptado
Ñuble (letra C – Figura 1)	10/14 71%	17/30 57%	14/18 78%	69%	Bien Adaptado
Bellas Artes (letra B – Figura 1)	32/48 67%	15/30 50%		58%	Parcialmente Adaptado
Monte Tabor (letra A – Figura 1)	29/42 69%	17/30 57%		63%	Bien Adaptado

CONCLUSIÓN

A partir de los distintos problemas que presentan las PcD en el uso del transporte público, se logró levantar una serie de indicadores, relacionados principalmente a barreras físicas espaciales, lo que permitió crear una herramienta de evaluación del nivel de accesibilidad en la red del Metro de Santiago de Chile. De su aplicación en algunas estaciones representativas, se concluyó que la mayoría de las estaciones antiguas obtuvieron los puntajes más bajos en el criterio "HACIA ANDÉN", pero buenos resultados en el criterio "ENTRADA", principalmente por las recientes instalaciones de ascensores en esas estaciones.

Si bien es cierto que la empresa Metro de Santiago S.A. ha realizado trabajos de mejoras en el tema de accesibilidad, estas se han centrado en la discapacidad física y, por tanto, aún es insuficiente en la incorporación de necesidades de otras discapacidades. Esta situación permite recomendar que los próximos trabajos de adecuación y remodelación se debieran centrar en aquellos criterios con los puntajes más bajos obtenidos por las estaciones para mejorar su nivel de accesibilidad. Además, para ampliar la visión de accesibilidad en el transporte público, sería interesante evaluar otros espacios tales como conexiones intermodales o el espacio circundante a una estación de Metro.

Por otra parte, como el trabajo se centró en el análisis de barreras físicas espaciales, fue más fácil evaluar en terreno las necesidades de personas con discapacidad física o visuales. Aunque se intentó incorporar indicadores para personas con discapacidad auditiva o cognitiva, en una próxima versión de la metodología se podrían analizar más aspectos sensoriales en el análisis.

Finalmente, es importante mencionar que, dada la relevancia de los temas de accesibilidad, se debe considerar continuamente las modificaciones reglamentarias que se van actualizando (como, por ejemplo, el DS30 que se modificó después de realizar este estudio). El aporte de esta propuesta es que sea evolutiva y que incluya, elimine o actualice los indicadores acá presentados.

Contribución de autores: Conceptualización, L.N. y C.V.U.; Curación de datos, L.N.; Análisis formal L.N., C.V.U., X.F. y Z.G.; Adquisición de financiación; Investigación, L.N. y C.V.U.; Metodología, C.V.U., J.C. y X.F.; Administración de proyecto, C.V.U.; Recursos; Software, L.N.; Supervisión; C.V.U.; Validación, C.V.U.; Visualización: X.F., J.C. y Z.G.; Escritura – borrador original, C.V.U., X.F., J.C. y Z.G.; Escritura – revisión y edición, C.V.U., X.F., J.C. y Z.G.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agudelo-Zapata, K., & Cadavid-Ospina, L. (2016). *Percepción sobre la inclusión social en términos de cultura e integración por parte del personal operativo del Metro de Medellín y de sus usuarios en situación de discapacidad auditiva que acceden al servicio de transporte* [Tesis de grado]. Corporación Universitaria Minuto de Dios, Medellín, Colombia. <http://hdl.handle.net/10656/5284>

Alarcón S., & Vizcarra Q. (2016). Personas en situación de Discapacidad Visual en relación a las barreras y estrategias que afectan las actividades de la vida diaria instrumentales. *Revista Chilena de Terapia Ocupacional*, 16(2), 153-162. <https://doi.org/10.5354/0719-5346.2016.44759>

Bascom, G.W., & Christensen, K.M., (2017). The impacts of limited transportation access on persons with disabilities' social participation. *Journal of Transport & Health* 7, 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.10.002>

Brumbaugh, S., (2018). Travel Patterns of American Adults with Disabilities [Issue Brief]. *BTS Special Reports and Issue Briefs*. <https://doi.org/10.21949/1524180>

Brusilovsky, B. (2014). *Modelo para diseñar espacios accesibles. Espectro Cognitivo*. Colección Democratizando la Accesibilidad Vol. 1. La Ciudad Accesible. https://www.descubreme.cl/wp-content/uploads/2019/04/Modelo-para-Disen%CC%83ar-Espacios-Accesibles_Espectro-Cognitivo.pdf

Cass, N., Shove, E., & Urry, J. (2005). Social Exclusion, Mobility and Access. *The Sociological Review*, 53(3), 539-555. <https://doi.org/10.1111/j.1467-954X.2005.00565.x>

CENTRO DE REFERENCIA ESTATAL DE AUTONOMÍA PERSONAL Y AYUDAS TÉCNICAS [CEPAT]. (2018). *ACCESIBILIDAD cognitiva en el transporte. Barreras y facilitadores para la orientación y comprensión de los espacios del metro, desde la perspectiva de usuario*. http://riberdis.cedid.es/bitstream/handle/11181/5527/Accesibilidad_cognitiva_en_el_transporte.pdf?sequence=1

COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE [CEPAL]. (2022, December 13). *CEPAL examina el panorama actual del envejecimiento en la región*. www.cepal.org. <https://www.cepal.org/es/noticias/cepal-examina-panorama-actual-envejecimiento-la-region-asi-como-avances-desafios-ejercicio>

Cochran, A. (2020). Understanding the role of transportation-related social interaction in travel behavior and health: A qualitative study of adults with disabilities. *Journal of Transport & Health*, 19, 100948. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100948>

Espínola-Jiménez, A. (2015). *Accesibilidad Auditiva. Pautas básicas para aplicar en los entornos*. Colección Democratizando la Accesibilidad Vol. 7. La Ciudad Accesible. http://riberdis.cedid.es/bitstream/handle/11181/5368/Accesibilidad_auditiva_pautas_entornos.pdf?sequence=1&rd=0031731133640576

Espinosa-Muñoz, M. (2016). *Accesibilidad en las estaciones del Metro de Santiago de Chile para personas con discapacidad visual*. [Tesis de Magister]. Universidad de Chile. repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/141438/Accesibilidad-en-las-estaciones-del-metro-de-Santiago.pdf?sequence=1

Glaser, B., & Strauss, A. (1967). *The Discovery of Grounded Theory*. Aldine Publishing Company.

Grisé, E., Boisjoly, G., Maguire, M., & El-Geneidy, A. (2019). Elevating access: Comparing accessibility to jobs by public transport for individuals with and without a physical disability. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 125, 280–293. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.02.017>

Hammersley, M. (2018). What is ethnography? Can it survive? Should it? *Ethnography and Education*, 13(1), 1-17. <https://doi.org/10.1080/17457823.2017.1298458>

Hernandez Sampieri, R.; Fernández Collado, C. & Lucio, P. (1997). *Metodología de la Investigación*. Mc Graw Hill.

Iwarsson, S., & Ståhl, A. (2003). Accessibility, usability, and universal design—positioning and definition of concepts describing person-environment relationships, *Disability and Rehabilitation*, 25(2), 57–66. <https://doi.org/10.1080/dre.25.2.57.66>

ISO (2001) ISO/IEC Guide 71:2001. *Guidelines for standards developers to address the needs of older persons and persons with disabilities*. https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/en/iso_iec_guide_71_2001.pdf

Jeffrey, B., & Troman, G. (2004) Time for ethnography. *British Educational Research Journal*, 30(4), 535- 548. <https://doi.org/10.1080/0141192042000237220>

Jiron, P., & Mancilla, P. (2013). Atravesando la espesura de la ciudad: vida cotidiana y barreras de accesibilidad de los habitantes de la periferia urbana de Santiago de Chile. *Norte Grande Geography Journal*, 56, 53–74. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022013000300004>

Kaufmann, V., Bergman, M., & Joye, D. (2004). Motility: mobility as capital. *International Journal of Urban and Regional Research*, 28(4), 745–756. <https://doi.org/10.1111/j.0309-1317.2004.00549.x>

Krahn, G.L., Walker, D.K., & Correa-De-Araujo, R., (2015). Persons With Disabilities as an Unrecognized Health Disparity Population. *American Journal of Public Health*, 105(S2), S198–S206. <https://doi.org/10.2105/ajph.2014.302182>

Lättman, K., Olsson L., Friman, M., & Fujii, S. (2019). Perceived accessibility, satisfaction with daily travel and life satisfaction among the elderly. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22), 4498-4512. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224498>

Lima, J. P., Da Camara Abitante, J., Pons, N. A. D., & Senne, C. M. (2019). Spatial Fuzzy Multicriteria Analysis of Accessibility: A Case Study in Brazil. *Sustainability*, 11(12), 3407-3425. <https://doi.org/10.3390/su11123407>

Lucas, K., Van Wee, B. & Maat, K. (2016). A method to evaluate equitable accessibility: combining ethical theories and accessibility-based approaches. *Transportation*, 43, 473-490. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9585-2>

Márquez, L., Poveda, J.C., & Vega, L.A., (2019). Factors affecting personal autonomy and perceived accessibility of people with mobility impairments in an urban transportation choice context. *Journal of Transport & Health*, 14, 100583. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100583>

METRO DE SANTIAGO (2020). *Memoria anual 2020*. <https://www.metro.cl/documentos/memoria-anual-2020.pdf>

Olivares, C., Urbano, C., Hidalgo, D., Tinjacá, N., Pérez, J. M. F., Gutiérrez, M. C., Navas, C., Glen, C., Pedraza, L., & Porcel, M. R. (2019). *Mapas de viaje: Metodología para el diagnóstico y propuestas de mejora de la accesibilidad universal en sistemas de transporte público en América Latina y el Caribe*. BID. <https://doi.org/10.18235/0002065>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD: OMS. (2023, March 7). Discapacidad: datos y cifras. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>

Park, K., Esfahani, H. N., Novack, V., Sheen, J., Hadayeghi, H., Song, Z., & Christensen, K. (2022). Impacts of disability on daily travel behaviour: A systematic review. *Transport Reviews*, 43(2), 178–203. <https://doi.org/10.1080/01441647.2022.2060371>

Prasertsubpakij, D., & Nitivattananon, V. (2012). Evaluating accessibility to Bangkok Metro Systems using multi-dimensional criteria across user groups. *IATSS Research*, 36(1), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2012.02.003>

Saéz-González, C. (2020). *Accesibilidad e Inclusión en el Sistema de Transporte Público en la Región Metropolitana*. [Tesina de Magister]. Universidad del Desarrollo, Chile. <https://repositorio.udd.cl/server/api/core/bitstreams/145ab7b3-c9e4-49e2-809b-fec1bdb8e389/content>

Shen, X., Zheng, S., Wang, R., Li, Q., Xu, Z., Wang, X., & Wu, J. (2023). Disabled travel and urban environment: A literature review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 115, 103589. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103589>

Srichuae, S., Nitivattananon, V., & Perera, R. (2016). Aging society in Bangkok and the factors affecting mobility of elderly in urban public spaces and transportation facilities. *IATSS Research*, 40(1), 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2015.12.004>

Sze, N., & Christensen, K. (2017). Access to urban transportation system for individuals with disabilities. *IATSS Research*, 41(2), 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2017.05.002>

Vandenbulcke, G.; Steenberghen, T., & Thomas, I. (2009). Mapping accessibility in Belgium: a tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography*, 17(1), 39-53. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008>

Vecchio, G., Castillo, B., & Steiniger, S. (2020). Movilidad urbana y personas mayores en Santiago de Chile: el valor de integrar métodos de análisis, un estudio en el barrio San Eugenio. *Revista De Urbanismo*, 43, 26-45. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2020.57090>

Wong, R., Szeto, W., Yang, L., Li, Y., & Wong, S. (2017). Elderly users' level of satisfaction with public transport services in a high-density and transit-oriented city. *Journal of Transport & Health*, 7, 209-217. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.10.004>

Wong, S. (2018). Traveling with blindness: A qualitative space-time approach to understanding visual impairment and urban mobility. *Health & Place*, 49, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2017.11.009>

Yun, H. (2019). Environmental Factors Associated with Older Adult's Walking Behaviors: A Systematic Review of Quantitative Studies. *Sustainability*, 11(12), 3253-3297. <https://doi.org/10.3390/su11123253>

FABRICACIÓN DE MORTEROS ALIGERADOS CON PERLITA Y CAL APLICADOS EN PANELES CON MATRIZ DE RESIDUOS DE PAJA DE ARROZ

Recibido 28/08/2023
Aceptado 18/11/2023

MANUFACTURE OF LIGHTENED MORTARS WITH PERLITE AND LIME APPLIED IN PANELS WITH A RICE STRAW RESIDUE MIX

FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS LEVES COM PERLITA E CAL APLICADAS EM PAINÉIS COM MATRIZ DE RESÍDUOS DE PALHA DE ARROZ

Henry Anderson Ramos-Rodríguez

Magíster en Ingeniería Civil, mención Estructuras
Investigador, Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción.
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0001-8981-6345>
haramos3@espe.edu.ec

Luisa Paulina Viera-Arroba

Doctora en Ingeniería Civil
Docente, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas.
Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0003-0434-7979>
lviera@uce.edu.ec



RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo diseñar y caracterizar morteros de revoco a base de perlita y cal producida en Ecuador, con una resistencia mínima a compresión de 6.89 MPa, conforme lo establece el IRC 2018. Esto, con el fin de ser aplicado sobre paneles elaborados con paja de arroz. Para ello, se diseñan 2 mezclas patrón. En la primera se usa arena como árido fino, mientras que para la segunda se usa perlita. De cada una se obtienen 8 mezclas adicionales, en las que se sustituye el cemento por cal (en volumen) en diferentes porcentajes. Se realizan 270 probetas con la finalidad de evaluar la resistencia a compresión y la densidad de los morteros a 1, 3, 7, 28 y 50 días. El mortero elaborado con perlita y compuesto por 50% cal, 50% cemento y aditivo, alcanzó una resistencia de 7.22 MPa, con una densidad de 1.45 g/cm³. Al aplicar esta mezcla sobre los paneles elaborados con paja de arroz, dio como resultado el aumento de su resistencia a compresión hasta un 68%.

Palabras clave

revoco; mortero; paja

ABSTRACT

This research aims to design and characterize plaster mortars based on perlite and lime produced in Ecuador, with a minimum compressive strength of 6.89 MPa, as established by IRC 2018, to be applied on rice straw panels. For this purpose, two standard mixes are designed. In the first, sand is used as fine aggregate, while in the second, perlite is used. Eight additional mixes are obtained from each one, where cement is replaced by lime (in volume) in different percentages. A total of 270 test specimens were made to evaluate the compressive strength and density of the mortars at 1, 3, 7, 28, and 50 days. The mortar made with perlite, comprising 50% lime, 50% cement, and an additive, reached a resistance of 7.22 MPa, with a density of 1.45 g/cm³. When this mixture was applied to the rice straw panels, it resulted in an increase of up to 68% in their compressive strength.

Keywords

plaster, mortar, straw

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é projetar e caracterizar argamassas de reboco à base de perlita e cal produzidas no Equador, com uma resistência à compressão mínima de 6,89 MPa, conforme estabelecido pelo IRC 2018. Isso, para ser aplicado em painéis feitos com palha de arroz. Para isso, foram projetadas duas misturas padrão. Na primeira, a areia é usada como agregado fino, enquanto na segunda, é usada perlita. A partir de cada uma delas, são obtidas 8 misturas adicionais, nas quais o cimento é substituído por cal (em volume) em diferentes porcentagens. Foram feitos 270 corpos de prova para avaliar a resistência à compressão e a densidade das argamassas em 1, 3, 7, 28 e 50 dias. A argamassa feita com perlita e composta por 50% de cal, 50% de cimento e aditivo, atingiu uma resistência de 7,22 MPa, com densidade de 1,45 g/cm³. Quando essa mistura foi aplicada aos painéis feitos com palha de arroz, ela resultou em um aumento de até 68% na resistência à compressão.

Palavras-chave:

reboco, argamassa, palha.

INTRODUCCIÓN

Un estudio realizado por los investigadores Stephan y Athanssiadis (2018) concluyó que, en los últimos 100 años, la población mundial ha aumentado en 4 veces su número, mientras que el consumo de materiales extraídos de la corteza terrestre lo ha hecho en 10 veces, cuyo principal impulsor es la industria de la construcción. De acuerdo con el mismo estudio, el uso de minerales de construcción tuvo un aumento de 42 veces al año 2010 (Stephan & Athanssiadis, 2018). La relación entre estos datos no es al azar, puesto que el crecimiento poblacional deriva en un mayor requerimiento de viviendas e infraestructura, lo que, a su vez, permite el desarrollo del de comercio y de la economía (Mendoza & Vanga, 2021).

En este sentido, tanto el desarrollo industrial, como el incremento de industrias y crecimiento poblacional han derivado también en una mayor generación de desechos de construcción, tales como: cenizas volantes, humo de sílice, vidrio, residuos de concreto, acero, entre otros (Sudharsan & Sivalingam, 2019). Por este motivo, se ha hecho necesario estudiar materiales donde prevalezcan criterios de economía circular y se fomente la creación de nuevos productos (Zhang et al., 2018), a la vez que estén en sintonía con la necesidad de minimizar los residuos y reducir el consumo de energía (Fernández et al., 2020).

En este contexto, varias investigaciones han señalado como una alternativa para construir sustentablemente a los paneles con paja, madera y morteros. En estos, la paja es el principal material, la cual en varias ocasiones es quemada y desechada por los agricultores causando contaminación ambiental por las emisiones de CO₂ (Teslík, 2021). Este desecho agroindustrial, cuando se utiliza en la construcción, aporta soluciones que ofrecen un desarrollo económico de calidad, bienestar social y respeto por el medio ambiente (Cascone et al., 2019). Según datos estadísticos, en Ecuador en el 2010 se produjeron 1.132.267 toneladas de arroz, con una superficie de 382.230 hectáreas (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador, 2022), lo cual genera una gran cantidad de residuo (paja) que podría ser aprovechada.

Por su parte, la elaboración de los paneles de paja se realiza tomando los fardos de paja directamente del productor agrícola o mediante el uso de una enfardadora manual. Luego, son acomodados a rompejuntas dentro de un marco de madera, cuyas dimensiones permiten la constitución de un panel que se acomode al diseño arquitectónico de una vivienda. En cuanto al mortero para revoco, este consiste en una mezcla de agregados (arena o perlita) y conglomerantes (cal y cemento), en proporciones tales que permitan proteger a la paja de agentes externos y mejorar las propiedades estructurales del panel.

La energía requerida para realizar los paneles y edificar con ellos es insignificante debido a su fácil montaje y desmontaje. Además, ofrece una resistencia térmica muy alta, ventilación adecuada, mayor confort y seguridad contra incendios, en comparación con el uso de materiales tradicionales (Muntani et al., 2020). Por esta razón, las edificaciones construidas con paneles de paja de arroz y morteros de recubrimiento consumen muy poca energía, al mismo tiempo que son sustentables dado que, al final de su vida útil, la madera se puede recuperar o incinerar, la paja, compostar y la cal, utilizarla en el suelo para el mejoramiento de los campos agrícolas (Martínez, 2019).

El mortero de recubrimiento o revoco en los paneles cumple varias funciones importantes. Una de estas es controlar la humedad dentro del mismo y así evitar el pudrimiento de la paja (Walker et al., 2020). Asimismo, los protege ante agentes externos como la lluvia, el sol e incluso, de insectos u organismos que puedan alterar su vida útil (Martínez, 2019). Por lo tanto, es primordial estudiar materiales innovadores como alternativas de reemplazo al cemento Portland para la elaboración de estos morteros, ya sea en diferentes proporciones o en su totalidad (Aprianti, 2017).

En este sentido, la cal hidratada o hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) es una alternativa y ha sido estudiada muy poco para estos fines, debido al surgimiento del cemento en la construcción (Apostolopoulou et al., 2021). Este material es considerado sostenible, ya que puede generar un 50% menos de contaminación en comparación con el proceso de industrialización del cemento (Hermida, 2021).

Debido a la reacción que se produce entre este material y los gases de la atmósfera durante el proceso de fraguado, en cuanto a que la cal atrapa CO₂, los tiempos de endurecimiento del mortero tienden a ser más lentos, a diferencia de los aglutinantes hidráulicos (Pahlavan et al., 2018). Sin embargo, con el tiempo este proceso químico permite que las fisuras presentadas en el mortero endurecido se autosellen, brindando una mayor durabilidad y permeabilidad al vapor de agua gracias a que la cal aumenta el contacto entre las partículas del agregado fino (Zhang et al., 2018).

La presente investigación tiene como objetivo principal el diseño y caracterización de un mortero a base de cal y perlita. Esto, con el fin de utilizarlo como revoco en paneles a base de paja obtenida como desecho de la cosecha del arroz que cumplan con parámetros estructurales ideales en la construcción de viviendas. Además, dicho revoco debe aportar al panel una resistencia adecuada y menor peso, con condiciones de sustentabilidad al permitir en su mezcla la mayor cantidad de cal como reemplazo del cemento. Se debe comprobar, por lo tanto, que el uso de cal en vez de cemento en el mortero mantenga los límites de resistencia requeridos de 6.89 MPa, conforme a lo que señala la norma americana de construcción con paja IRC 2018 (Tabla 1) y por las normas ecuatorianas NTE INEN

(Instituto Ecuatoriano de Normalización) e internacionales ASTM (*American Society of Testing and Materials*) para el diseño del mortero.

Tabla 1: Resistencia mínima a compresión de revocos para paredes elaboradas con paja. Fuente: (IRC, 2018)

Tipo de revoco	Resistencia mínima a compresión	
	(PSI)	(MPa)
Arcilla	100	0.69
Suelo - Cemento	1000	6.89
Cal	600	4.14
Cemento - Cal	1000	6.89
Cemento	1400	9.65

Ante la presencia de humedad, y al igual que la madera, la paja se degrada con el tiempo (Yin et al., 2018). Por lo tanto, la investigación de materiales como la cal para el diseño de revocos que controlen la humedad y garanticen la armonía entre la humectación y el secado, aseguran la durabilidad y buen comportamiento de edificaciones realizadas con paja (ESBA, 2021). Aquellos morteros que tienen en su composición mayor cantidad de cal presentan aceptable permeancia y permeabilidad (Pavia & Brennan, 2018), de tal manera que evitan la pudrición de la paja.

En consecuencia, es necesario que los morteros no solo cumplan la resistencia señalada, sino que también la densidad sea la menor posible debido al gran volumen que ocupa en el panel. Por este motivo, se diseñan morteros con arena y otros con perlita. La perlita es un agregado fino de baja densidad, posee una textura porosa y tiene la capacidad de retener agua en su superficie (Artigas et al., 2022).

Actualmente existe pocos estudios sobre el uso de cal y perlita en la elaboración de morteros para los fines indicados. Sin embargo, se puede destacar el realizado por Viera y Acero (2022), que evalúa la resistencia a compresión de morteros elaborados a base de cales producidas y comercializadas en Ecuador, con el fin de utilizarlos como pega en mampostería. Con la cal proveniente de la cantera La Paz, se obtiene la mayor resistencia a compresión, la que es igual a 3.5 MPa a los 28 días. Además, caracteriza 4 cales adicionales (San Juan, San José, Incoreg, Indami), que ofrecen menores resistencias.

En este sentido, para promover el uso de materiales como la perlita, la cal y la paja, es necesario desarrollar estudios que determinen cuáles son sus características tanto

físicas como mecánicas de forma individual y conjunta como es el panel. Además, aporten datos que permitan a profesionales de la construcción efectuar el respectivo modelamiento y análisis estructural de edificaciones con prefabricados de paja. Esta investigación proporciona datos relevantes acerca de la dosificación y resistencia de morteros de baja densidad con contenido de cal y perlita, que al ser aplicados sobre el panel puedan ser una alternativa en la construcciones convencionales y sustentables.

METODOLOGÍA

En el desarrollo de esta investigación se siguieron los procedimientos establecidos en las normas ecuatorianas NTE INEN y las normas internacionales ASTM, las cuales fueron utilizadas en la caracterización tanto de los materiales que componen el mortero, como de la evaluación de sus propiedades en conjunto y también para determinar la resistencia a compresión en los paneles de paja.

En la Figura 1 se resume la metodología llevada a cabo para el desarrollo de la investigación, explicada en detalle en los siguientes apartados. El estudio inicia desde la selección de los materiales y la caracterización de los mismos para proceder con el diseño de dos mezclas patrón MP1 (cemento + arena + agua) y MP2 (cemento + perlita + agua) por el método de la densidad óptima. De cada una de estas mezclas, se obtienen 8 variantes adicionales donde se sustituye el cemento por la cal en porcentajes del 30%, 50%, 70% y 90%. Además, en algunas de estas se añade aditivo.

Se realizaron un total de 270 probetas cúbicas de 50 mm de arista con cada mezcla de estudio, a fin de determinar la densidad y la resistencia a compresión de los morteros a 1, 3, 7, 28 y 50 días. La mezcla seleccionada será aquella que permita la obtención de un mortero de baja densidad, con mayor contenido de cal y una resistencia óptima igual o superior a 6.89 MPa a los 28 días de edad, conforme lo establece el código de construcción con paja IRC 2018 para que este pueda ser utilizado sobre paredes.

Finalmente, la mezcla seleccionada será aplicada en las caras externas de 3 paneles prefabricados con marcos de madera y paja de arroz previamente enfardada. Para luego ser ensayados a compresión y obtener propiedades como carga ultima, resistencia y peso de los mismos. El ensayo a compresión también se ejecuta en 3 paneles adicionales donde no se ha aplicado el recubrimiento, con el objetivo de determinar la funcionalidad y contribución del mortero dentro del panel frente a estas solicitaciones de cargas.

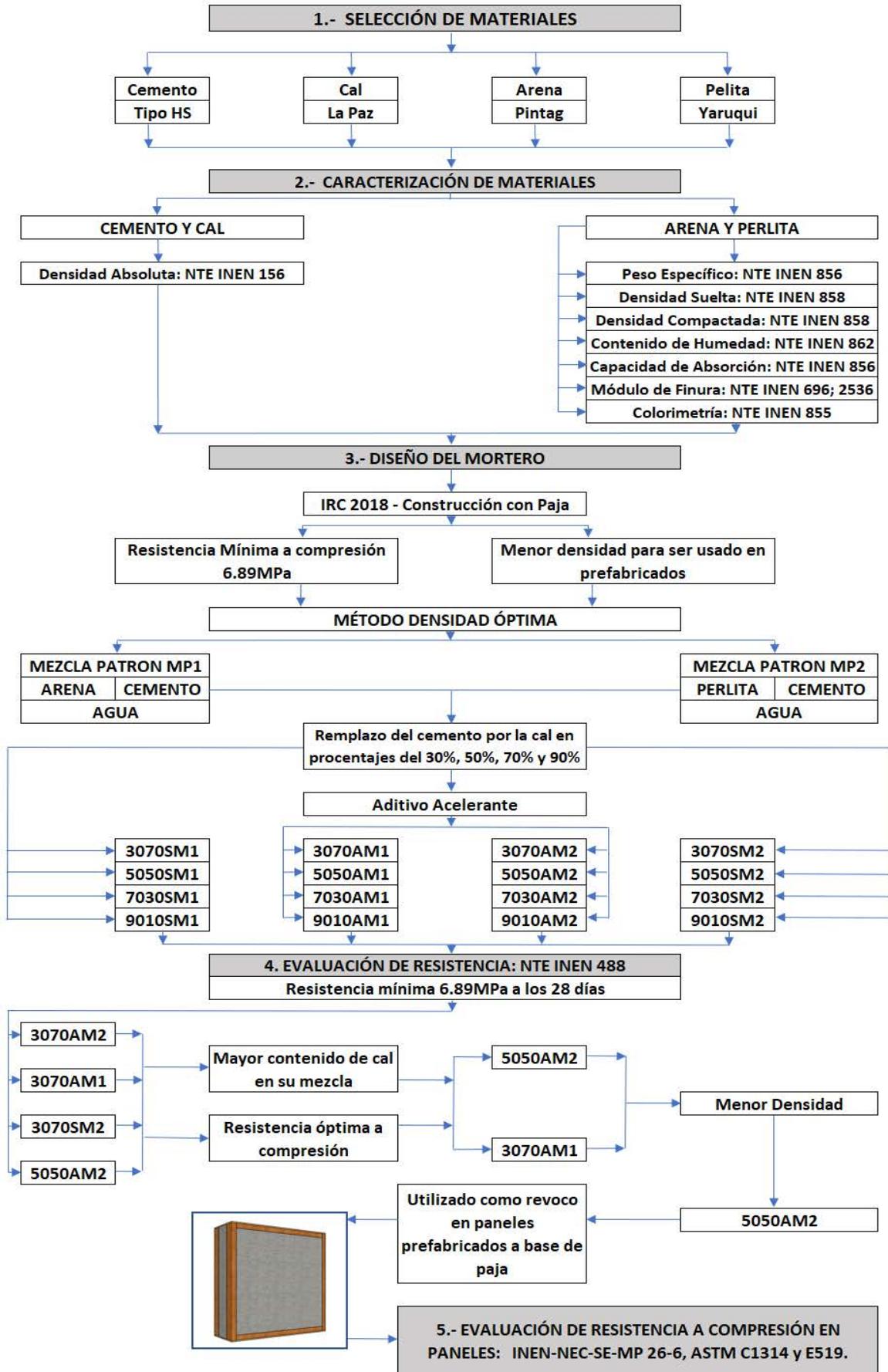


Figura 1: Metodología a seguir para el desarrollo de la investigación. Fuente: Elaboración de los autores.

MATERIALES

Para la realización de las mezclas se utilizó cemento hidráulico de alta resistencia a los sulfatos (HS), cuya densidad absoluta es de 2.80 g/cm³. A continuación, en la Tabla 2, se indican las propiedades físicas del cemento tipo HS, en concordancia a lo que señala la norma NTE INEN 2380 y ASTM C1157.

Tabla 2: Propiedades físicas del cemento. Fuente: (NTE INEN 2380, 2011)

Propiedades Físicas	NTE INEN	ASTM	Cemento Tipo HS
Cambio de longitud por autoclave (%)	200	C-490	0.80
Tiempo de fraguado inicial (min)	158	C-191	≥45≤120
Resistencia a compresión (MPa)	488	C-109	3día = 11 7día = 18 28día = 25
Expansión barra de mortero 14 días (%)	2529	C-1038	0.020
Expansión por sulfatos / Resistencia a sulfatos (%)	2503	C-1012	6 mes = 0.05 1 año = 0.10

Como reemplazo del cemento en diferentes porcentajes (30%, 50%, 70% y 90% en volumen) se utilizó cal hidratada de producción nacional, extraída de la calera La Paz (Carchi – Ecuador), la que, de acuerdo a su uso y según la norma NTE INEN 247, se clasifica como tipo N (Cal normal sin aire incorporado utilizada en morteros y revoques de cemento). Las propiedades físicas-químicas de la cal se indican a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3: Propiedades físicas-químicas de la cal. Fuente: Elaboración de los autores.

Propiedades Físicas - Químicas	NTE INEN	ASTM	Cal Tipo N
Densidad absoluta (g/cm ³)	156	C-144	2.20
Densidad aparente suelta (g/cm ³)	858	C-29	0.82
Densidad aparente compactada (g/cm ³)	858	C-29	0.90
Residuo tamiz N°30 (%)	244	C-110	23.20
Óxidos de calcio (%)	250	C-25-19	36.00
Óxidos de magnesio (%)	250	C-25-19	1.90

En el primer diseño de mezclas para la elaboración del mortero se utilizó arena como agregado fino, procedente de la cantera ubicada en la parroquia de Pintag (Quito – Ecuador), mientras que, para el segundo diseño, se utilizó perlita como agregado fino, procedente de la parroquia Yaruquí (Quito – Ecuador). Ambos materiales cumplen con la granulometría para ser utilizados en morteros según la norma NTE INEN 2536. A continuación, en la Figura 2 y Figura 3 se indican las curvas granulométricas de los agregados.

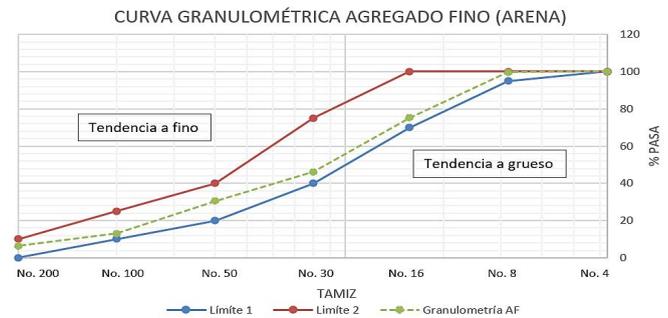


Figura 2: Curva granulométrica de la arena. Fuente: Elaboración de los autores.

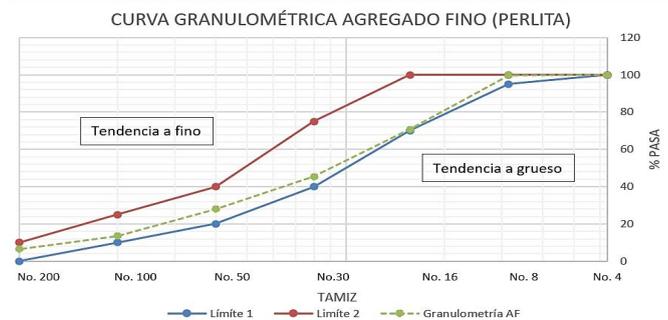


Figura 3: Curva granulométrica de la perlita. Fuente: Elaboración de los autores.

La apariencia de la perlita es similar a las bolitas de poliestireno (como se muestra en la Figura 4) y se utiliza en la construcción cuando se requiere mejorar propiedades térmicas, acústicas y obtener mayor ligereza (El Mir et al., 2020). La incorporación de la perlita en las mezclas permite realizar una comparación de las densidades de los morteros, con el fin de encontrar uno, lo más ligero posible en equilibrio con su resistencia a compresión.

Tanto para la arena como para la perlita, cemento y cal se realizan ensayos con la finalidad de identificar su peso específico, densidad suelta y compactada, contenido de humedad, capacidad de absorción, granulometría, módulo de finura y colorimetría. Lo anterior se muestra en la Figura 5.



Figura 4: Perlita. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 5: Ensayos de laboratorio: a) cemento y cal, b) perlita, c) arena. Fuente: Elaboración de los autores.

Los resultados de los ensayos realizados en la arena y la perlita se muestran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4: Propiedades físicas de la arena y perlita. Fuente: Elaboración de los autores.

Propiedades Físicas Ensayo	NTE INEN	ASTM	Arena	Perlita
Peso Específico (g/cm ³)	856	C-127	2.41	1.44
Densidad Suelta (g/cm ³)	858	C-29	1.41	0.60
Densidad Compactada (g/cm ³)	858	C-29	1.60	0.68
Contenido de Humedad (%)	862	C-127	1.04	3.39
Capacidad de Absorción (%)	856	C-127	2.26	9.55
Módulo de Finura	2536	C-136	2.44	2.43
Colorimetría	855	C-40	SPMO	SPMO

SPMO: Sin presencia de materia orgánica

El uso de la cal en las mezclas de mortero retarda los tiempos de fraguado y disminuye su resistencia a edades tempranas. Por esta razón, ha sido necesario el uso de un aditivo acelerante (Plastocrete 161 HE) con densidad 1.10 kg/dm³. Su dosificación puede variar entre 0.2% y 2.5% del peso del cemento y se lo agrega al agua de amasado de forma manual.

Por su parte, la paja de arroz utilizada para elaborar los paneles es previamente enfardada y sus propiedades físicas se indican en la Tabla 5.

Tabla 5: Propiedades físicas fardos de paja. Fuente: Elaboración de los autores.

Propiedades Físicas	Fardo
Dimensiones (cm)	35x45x120
Densidad absoluta (kg/m ³)	84.00
Contenido de humedad (%)	13.00
Peso (kg)	12.90

DISEÑO DE LAS MEZCLAS

Mediante el método de la densidad óptima, se llevaron a cabo 2 diseños de mezclas patrón, denominadas para estos efectos MP1 y MP2. Ambas contaban con una resistencia de diseño de 12.40 MPa, correspondiente a morteros de cemento y cal tipo S (que tienen mejor adherencia y uso en revestimientos) según la norma NTE INEN 2518. A partir de estas mezclas base, se generaron variantes en las que se sustituyó el cemento por la cal en diferentes proporciones, con el propósito de encontrar el porcentaje óptimo de cal que garantice una resistencia mecánica mínima de 6.89 MPa, de acuerdo con los parámetros del código IRC 2018.

En el diseño MP1 se empleó agua, cemento y arena, mientras que en el diseño MP2 se usó perlita como árido fino, dado que posee baja densidad, es fácilmente accesible en el medio local y tiene un costo similar al de la arena. De cada una de estas mezclas se obtuvieron 8 variantes, en las cuales se les agregó aditivo a 4 mezclas (aditivo acelerante de resistencia al 2.5% del peso del cemento) y a los 4 restantes no se les añadió aditivo. Además, en cada grupo de mezclas se reemplazó el cemento por la cal en proporciones del 30%, 50%, 70% y 90%. La metodología a seguir para obtención de las mezclas se resume en la Figura 6.

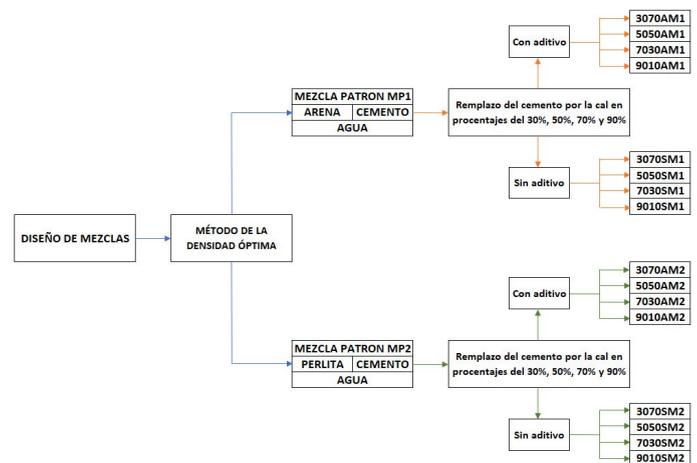


Figura 6: Metodología a seguir para la obtención de las mezclas. Fuente: Elaboración de los autores.

Para las mezclas obtenidas se utilizó la codificación que se indica en la Figura 7, que toma como ejemplo la mezcla 9010AM1.



Figura 7: Codificación para las mezclas de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 6: Dosificación en kilogramos para un metro cúbico de mortero. Fuente: Elaboración de los autores.

Id.	Cal (kg)	Cemento (kg)	Agregado Fino (kg)	Agua (kg)	Aditivo (kg)
MP1	0.00	339.63	1446.50	392.29	0.00
9010AM1	240.17	33.96	1446.50	390.29	8.49
9010SM1	240.17	33.96	1446.50	390.29	0.00
7030AM1	186.80	101.89	1446.50	370.75	8.49
7030SM1	186.80	101.89	1446.50	370.75	0.00
5050AM1	133.43	169.82	1446.50	370.29	8.49
5050SM1	133.43	169.82	1446.50	370.29	0.00
3070AM1	80.06	237.74	1446.50	342.86	8.49
3070SM1	80.06	237.74	1446.50	342.86	0.00
MP2	0.00	523.63	552.40	404.88	0.00
9010AM2	370.28	52.36	552.40	408.31	13.09
9010SM2	370.28	52.36	552.40	408.31	0.00
7030AM2	288.00	157.09	552.40	383.05	13.09
7030SM2	288.00	157.09	552.40	383.05	0.00
5050AM2	205.71	261.82	552.40	371.62	13.09
5050SM2	205.71	261.82	552.40	371.62	0.00
3070AM2	123.43	366.54	552.40	360.20	13.09
3070SM2	123.43	366.54	552.40	360.20	0.00

Las cantidades en kilogramos de agua, cemento, cal, arena, perlita y aditivo para un metro cúbico de mortero elaborado con las mezclas patrón MP1, MP2 y sus derivadas se indica a continuación en la Tabla 6.

DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Morteros

Todos los morteros elaborados presentan un flujo de $110\% \pm 5\%$, tal como lo indica la norma NTE INEN 488. Esta propiedad garantiza la manejabilidad de las mezclas sin generar problemas de segregación. Inspirados por la técnica usada por Echeverría et al., (2022) en un estudio similar en cuanto a la elaboración de paneles sostenibles para interiores de viviendas mediante el uso de fibra de plátano y cáscaras de maní, se fabricaron 15 probetas cúbicas (Figura 8) de 50x50x50 mm de arista para cada una de las 18 mezclas, incluyendo las muestras patrón (Echeverría et al., 2022).

Para efectos de este trabajo, se llevó a cabo un total de 270 ensayos de compresión en cubos de mortero para evaluar su resistencia, siguiendo las pautas establecidas por la norma NTE INEN 488. Para cada mezcla, se fabricaron 3 probetas



Figura 8: Elaboración de probetas cúbicas de mortero. Fuente: Elaboración de los autores.

a edades de 1, 3, 7, 28 y 50 días. Las probetas fueron almacenadas en una cámara de curado hasta alcanzar la edad especificada, siguiendo los requisitos indicados en la norma ASTM C511. Debido a la presencia de cal hidratada en las mezclas de mortero, las probetas no fueron sumergidas en agua, sino que estuvieron expuestas al aire libre para interactuar con el CO_2 y fraguar.

El ensayo de compresión de las probetas se realizó utilizando una máquina universal de 200 toneladas (Figura 9), equipada con discos metálicos para una distribución efectiva de la carga sobre el área de aplicación del cubo. La velocidad de carga fue de 0.25 MPa/s y estuvo controlada por un sistema automatizado.

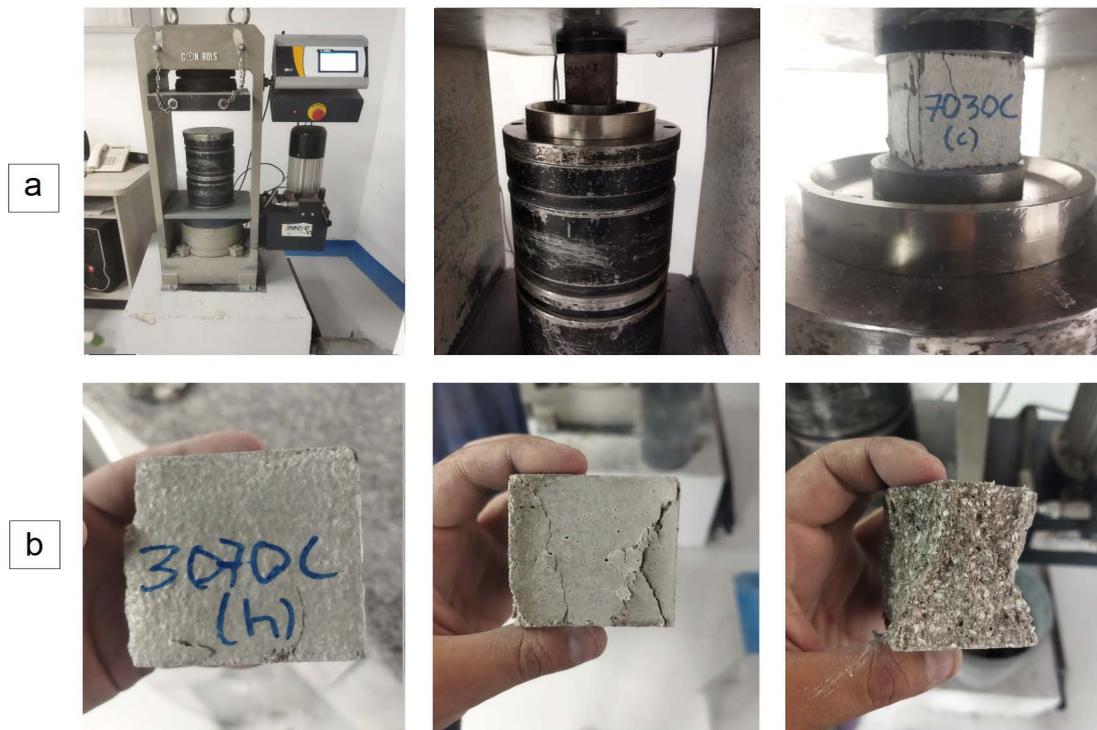


Figura 9: Ensayo a compresión: a) equipos, b) probetas cúbicas. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 10. Construcción de paneles Fuente: Elaboración de los autores.

Paneles

Con respecto a la elaboración de paneles, se construyeron 6 muestras a base de paja y marcos de madera de 1.20 m de largo, 1.20 m de altura y 0.35 m de espesor. Al igual que en el ensayo anterior, el total de muestras se dividió por la mitad, agregándole a 3 de ellos mortero y a los otros 3, no (Figura 10).

En los paneles que incluyen mortero, se aplicó una capa de 2.5 cm de espesor en ambas caras (Figura 11), elaborada con la mezcla 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, perlita,

con aditivo). Esta mezcla cumple con el objetivo de esta investigación al ofrecer condiciones de sostenibilidad y cumplir con las propiedades requeridas, como resistencia y densidad.

Los paneles fueron sometidos a ensayos de compresión, tal como se muestra en la Figura 12, y siguiendo los procedimientos establecidos en las normas INEN-NEC-SE-MP 26-6, ASTM C1314. Para los ensayos se utilizó un sistema de carga compuesto por una celda de 20 toneladas y un cilindro hidráulico de 100 toneladas, los cuales son controlados por una bomba hidráulica de 10000Psi. Se



Figura 11. Aplicación en paneles del mortero elaborados con la mezcla 5050AM2. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 12. Ensayo a compresión de paneles: a) sin mortero, b) con mortero. Fuente: Elaboración de los autores.

colocaron 2 LVDTs (medidores de desplazamientos) sobre el panel, conectados a una caja UPM HBM de 80 canales que registran los datos de carga y desplazamientos. La velocidad del ensayo fue de 0.03 mm/s, conforme a lo que se indica en las normas.

El ensayo de compresión de los paneles se llevó a cabo a fin de determinar la capacidad estructural del conjunto de materiales que los componen (marco de madera, paja y revoco), tal como se utiliza en las edificaciones. Además, se buscó determinar si el mortero previamente diseñado aporta resistencia al panel. Las cargas axiales aplicadas durante el ensayo representaron las solicitaciones reales de cargas muertas y vivas que gobiernan en las estructuras. El valor resultante de la resistencia a compresión del panel permitirá profundizar en el modelamiento estructural de las construcciones donde se utilicen este tipo de prefabricados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 13 se presentan los resultados de la resistencia a compresión a diferentes edades (1, 3, 7, 28 y 50 días) de los morteros elaborados a partir del diseño de mezclas patrón MP1. Se observa que MP1 exhibe valores de resistencias a compresión superiores a las demás mezclas, ya que contiene un aglomerante compuesto al 100% de cemento, calculado mediante el método de la densidad óptima. La inclusión de un aditivo al 2.5% del peso del cemento en las mezclas derivadas de MP1 resulta en un aumento en su resistencia que varía entre un 20.13% y un 51.52%. Estos hallazgos sugieren la conveniencia de incluir aditivos en los morteros de cal para reducir el tiempo de fraguado y lograr mayores resistencias a edades tempranas. En particular, la mezcla 3070AM1 cumple con la resistencia a compresión mínima

requerida de 6.89 MPa a los 28 días de edad, con una resistencia media de 7.19 MPa, superando el objetivo en 0.30 MPa. Esto indica su idoneidad para ser utilizada como revoco en edificaciones elaboradas con paneles de paja.

Además, en la Figura 14 se presentan los resultados de la resistencia a compresión a diferentes edades (1, 3, 7, 28 y 50 días) de los morteros elaborados a partir del diseño de mezclas patrón MP2. Al igual que con MP1, la resistencia a compresión de este mortero es superior a las demás mezclas, debido a su composición con un aglomerante compuesto al 100% de cemento. Es importante destacar que esta mezcla contiene un 54% más de cemento que MP1, ya que se utiliza perlita como agregado fino, cuya densidad es de 0.68 g/cm³. En comparación con la arena, cuya densidad es de 1.60 g/cm³, se observa una reducción del 57.5%, lo que resulta en una mayor cantidad de pasta en la mezcla.

La sustitución de cemento por cal en MP2, en porcentajes del 30%, 50%, 70% y 90%, conlleva a una disminución en la resistencia a compresión. A medida que aumenta el porcentaje de cal en la mezcla y disminuye el porcentaje de cemento, también disminuye la resistencia a compresión, lo cual es un comportamiento similar a lo observado en las mezclas generadas a partir de MP1. La incorporación de un aditivo al 2.5% del peso del cemento da como resultado un aumento en su resistencia que varía entre un 33.33% y un 72.28%. En este caso, la mezcla que cumple con la resistencia a compresión mínima requerida de 6.89 MPa a los 28 días de edad es la 5050AM2, con una resistencia de 7.22 MPa, superando la resistencia objetivo en 0.33 MPa. Esto indica que también puede ser utilizada como revoco en edificaciones elaboradas con paneles de paja.

En la Figura 15 se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a compresión a los 28 días de los morteros estudiados en esta investigación. Se observa que hay 6 mezclas (MP1, MP2, 3070AM1, 3070AM2, 3070SM2, 5050AM2) que muestran una resistencia a compresión por encima del valor requerido de 6.89 MPa. Las demás mezclas obtuvieron valores por debajo de este umbral, por lo que se descartarían para su uso. Sin embargo, de las 6 mezclas seleccionadas, dos corresponden a las mezclas patrón MP1 y MP2, las cuales no contienen cal en su composición y no cumplen con el objetivo de la investigación.

De las 4 mezclas restantes, se observa que las mezclas 3070AM2 (30% cal, 70% cemento, perlita, con aditivo) y 3070SM2 (30% cal, 70% cemento, perlita, sin aditivo) generan morteros con resistencia a compresión de 13.09 MPa y 8.90 MPa respectivamente, superando el valor mínimo requerido en un 89.99% y 29.17%. Por su parte, las mezclas 3070AM1 (30% cal, 70% cemento, arena, con aditivo) y 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, perlita, con aditivo) generan morteros con resistencia a compresión

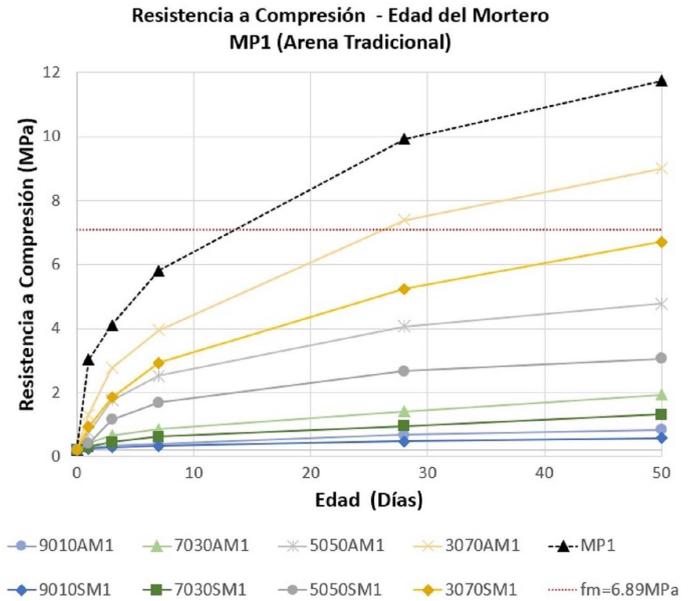


Figura 13. Resistencia a compresión de morteros elaborados con arena (M1). Fuente: Elaboración de los autores.

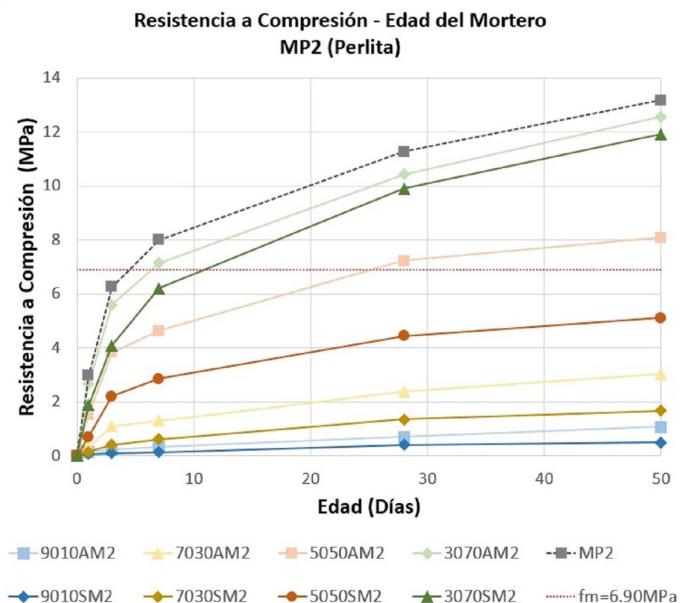


Figura 14. Resistencia a compresión de morteros elaborados con perlita (M2). Fuente: Elaboración de los autores.

de 7.19 MPa y 7.22 MPa respectivamente, superando el valor mínimo requerido en un 4.35% y 4.78%. Por lo tanto, se descartan las mezclas 3070AM2 y 3070SM2, puesto que su resistencia está muy por encima de la requerida y se aceptan a las mezclas 3070AM1 y 5050AM2 como mezclas óptimas preseleccionadas debido a su contenido de cal y resistencia presentada.

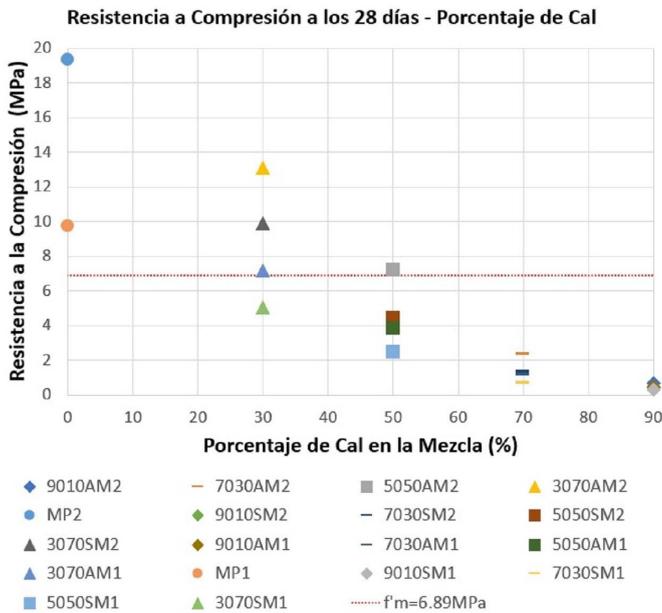


Figura 15. Resistencia a compresión a los 28 días de morteros elaborados con arena (M1) y perlita (M2). Fuente: Elaboración de los autores.

En la Figura 16, se puede observar la tendencia de las curvas obtenidas a partir de los resultados de las mezclas AM1 (cemento + cal + arena + aditivo) y AM2 (cemento + cal + perlita + aditivo), las cuales contienen aditivo y se derivan de las mezclas óptimas preseleccionadas (5050AM2, 3070AM1).

Al realizar el ajuste polinómico de las curvas (resistencia a compresión v/s porcentaje de cal), se obtiene la Ecuación 1. Esta ecuación permite determinar la resistencia a compresión a los 28 días de morteros elaborados a partir de la mezcla AM1 en función del porcentaje de cal que es reemplazado por el cemento.

$$f_m = 0,0016(\%Cal)^2 - 0,3084(\%Cal) + 15,047 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Para la mezcla AM2 se obtiene la (Ecuación 2).

$$f_m = 0,0026(\%Cal)^2 - 0,5237(\%Cal) + 26,553 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

f_m : Resistencia a la compresión en MPa.

$\%Cal$: Porcentaje de cal en las mezclas reemplazado por el cemento.

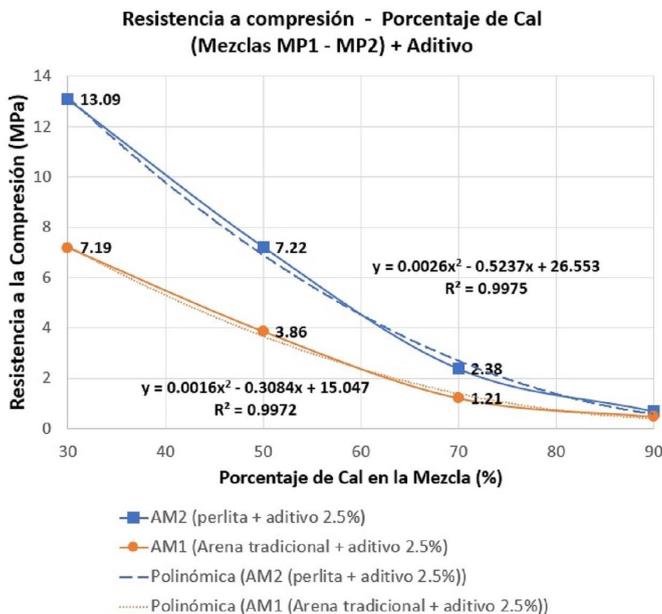


Figura 16. Ajuste polinomial resistencia a compresión vs porcentaje de cal, mezclas MP1 y MP2 con aditivo. Fuente: Elaboración de los autores.

Para evaluar la validez de las ecuaciones, se determina el coeficiente de correlación (R^2), cuyo valor para ambos modelos es de 0.997, similar a 1. Por lo tanto, ambas ecuaciones se ajustan correctamente a los resultados alcanzados, ofrecen estimaciones de resistencia a compresión a los 28 días de edad muy precisas a las obtenidas por medio de la experimentación.

En la Figura 17 se presentan los diagramas de caja y bigote elaborados a partir de los resultados de las densidades de los morteros fabricados con las mezclas óptimas preseleccionadas 5050AM2 y 3070AM1. Los valores de las densidades se tomaron en probetas cúbicas de 50 mm de arista a edades de 1, 3, 7, 28 y 50 días. Se elaboraron 6 probetas por edad, obteniendo valores de densidades para 60 cubos de mortero, es decir, 30 valores por cada mezcla.

Los morteros fabricados con la mezcla 5050AM2 presentan valores de densidades que oscilan entre 1.34 g/cm³ como valor mínimo y 1.55 g/cm³ como valor máximo, con una densidad promedio obtenida de 1.45 g/cm³. Por otro lado, los morteros fabricados con la mezcla 3070AM1 presentan densidades que oscilan entre 1.85 g/cm³ como valor mínimo y 2.02 g/cm³ como valor máximo, siendo estos superiores a los obtenidos con la mezcla 5050AM2,

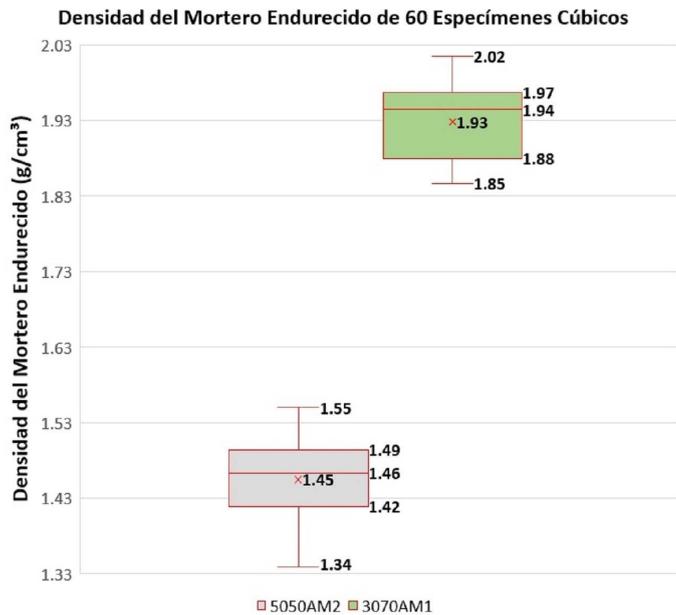


Figura 17. Densidades de morteros elaborados con las 5050AM2 y 3070AM. Fuente: Elaboración de los autores.

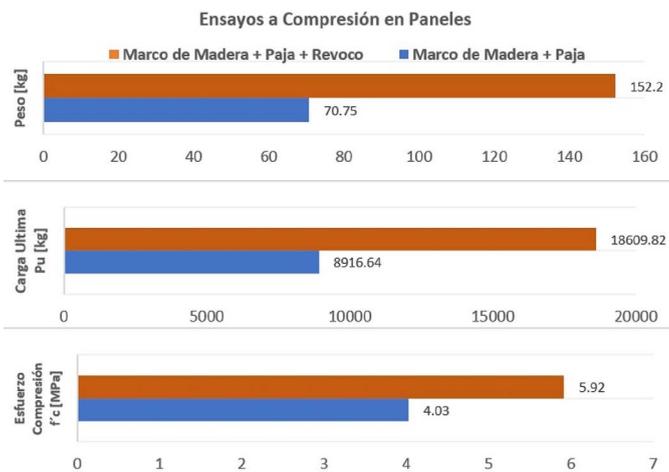


Figura 18. Resultados obtenidos del ensayo a compresión en paneles con y sin revoco. Fuente: Elaboración de los autores.

pues la densidad promedio obtenida es de 1.93 g/cm³. En este sentido, la mezcla final seleccionada a utilizarse como revoco en los paneles con paja es la 5050AM2, debido a que presenta una menor densidad.

En la Figura 18 se dan a conocer los resultados del peso, carga última y resistencia a compresión de los paneles elaborados con paja y marcos de madera. El peso del panel con revoco es de 152.20 kg, mientras que sin revoco tiene un peso de 70.75 kg, lo que indica que el revoco

aporta mayor peso al panel. En cuanto a la carga última, el panel con revoco presenta un valor de 18609.82 kg, mientras que, sin revoco, este valor disminuye a 8916.64 kg. Finalmente, se obtiene un esfuerzo a compresión máximo de 5.93 MPa cuando el panel está revocado y un valor de 4.03 MPa si no lo está. Por lo tanto, el revoco o mortero de recubrimiento no sólo aumenta la carga última, sino que también aporta mayor resistencia al panel.

CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados, se puede concluir que, por una parte, el uso de aditivo acelerante en las mezclas que contienen cal resulta beneficioso, puesto que se demuestra una mayor eficiencia al emplear perlita como árido fino. La baja densidad de la perlita permite una mayor cantidad de conglomerante en las mezclas y, por ende, mayor cantidad de aditivo. Además, permite reducir la densidad de los morteros hasta un 24.87%, en comparación con aquellos morteros en los que se utiliza arena como árido fino.

De este modo, se comprueba que las mezclas elaboradas con perlita presentan mejores resistencias a compresión que aquellas que contienen arena, debido a la alta capacidad de absorción de la perlita, lo que contribuye a reducir los tiempos de fraguado de la cal al absorber el agua de amasado rápidamente, a diferencia de la arena que no cuenta con esta propiedad.

La mezcla 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, perlita, con aditivo) resultó ser la óptima para la fabricación de un mortero, ya que cumple con la resistencia mínima requerida de 6.89 MPa (según el IRC 2018) para ser utilizado como revestimiento en paredes de paja. Esta mezcla contiene mayor cantidad de cal y permite obtener morteros con una resistencia a compresión de 7.22 MPa a los 28 días, con una densidad de 1.45 g/cm³, menor a la densidad característica de los morteros convencionales.

En términos de dosificación de la mezcla 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, aditivo y perlita), para un metro cúbico de mortero de baja densidad a utilizarse como revestimiento en paredes de paja, se requiere 205.71 kg de cal, 261.82 kg de cemento, 552.50 kg de perlita, 371.72 kg o litros de agua y, finalmente, 13.09 kg de aditivo.

En conclusión, los hallazgos de esta investigación respaldan la idoneidad del mortero de recubrimiento elaborado con la mezcla 5050AM2 (50% cal, 50% cemento, perlita, con aditivo). Al aplicarse en ambas caras del panel, no sólo protege y controla la humedad dentro del mismo, sino que también aumenta la carga última y su resistencia a compresión hasta un 47.91% y 68.07% respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Universidad Central del Ecuador y al Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Hormigón (INECYC), especialmente a los ingenieros Alexander Cadena y Jhoanna Mamarandi por el apoyo técnico brindado en el marco de la investigación.

Contribución de Autores: Conceptualización, H.R y L.V.; Curación de datos, H.R.; Análisis formal, H.R.; Adquisición de financiación, H.R y L.V.; Investigación. H.R y L.V.; Metodología, H.R.; Administración de proyecto, H.R.; Recursos, H.R y L.V.; Software, H.R.; Supervisión, H.R y L.V.; Validación, H.R y L.V.; Visualización, H.R.; Escritura - borrador original, H.R y L.V.; Escritura - revisión y edición, H.R y L.V.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APOSTOLOPOULOU, M., BAKOLAS, A. & KOTSAINAS, M. (2021). Mechanical and physical performance of natural hydraulic lime mortars. *Construction and Building Materials*, 290(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123272>

APRIANTI, A. (2017). A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production e a review part II. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4178-4194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.115>

ARTIGAS, V., QUINTANA, M., POSITIERI, M. & OSHIRO, A. (2022). Efectos de la utilización de desecho polvo de perlita natural en hormigones autocompactantes coloreados. *Concreto & Construções*, XLIX(105), 42-47. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2022.105.0003>

CASCONE, S., RAPISARDA, R. & CASCONI, D. (2019). Physical Properties of Straw bales as a construction material. *Sustainability*, 11(12), 1-19. <https://doi.org/10.3390/su11123388>

ECHVERRÍA, M., FLORES, V. & DEL RÍO, J. (2022). Reuse of banana fiber and peanut shells for the design of new prefabricated products for buildings. *Revista de la Construcción*, 21(2), 462-472. <https://doi.org/10.7764/RDLC.21.2.461>

EL MIR, A., NEHME, S. & ASSAAD, J. (2020). Durability of self-consolidating concrete containing natural waste, *Heliyon*, 6 (1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020. e03165>

ESBA. (2021, December 22). *UP STRAW: Interreg Project | ESBA*. <https://strawbuilding.eu/up-straw-interreg-project/>

FERNANDEZ, F., GERMINARIO, S., BASILE, R. & MONTAGNO R. (2020). Development in construction Industry Development of Eco-Friendly and Self-Cleaning Lime-Pozzolan Plasters for Bio-Construction and Cultural Heritage. *Buildings*, 10(10), 172, 1-12. <https://doi.org/10.3390/buildings10100172>

HERMIDA, Á. (2021, February 15). Cemento y crisis climática: cómo el material supremo calienta el planeta. *elconfidencial.com*. https://www.elconfidencial.com/medioambiente/ciudad/2021-02-15/cemento-gases-efecto-invernadero-calentamiento_2944723/

INTERNATIONAL CODE COUNCIL (ICC). (2018). *2018 INTERNATIONAL RESIDENTIAL CODE (IRC)|ICC DIGITAL CODES*. <https://codes.iccsafe.org/content/IRC2018/appendix-s-strawbale-construction>

MARTÍNEZ S., C. (2021). *Estudio y aplicaciones de las construcciones con fardos de paja* [Trabajo final de Grado]. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38967/TFG-A-170.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MENDOZA, J. & VANGA, M. (2021). Realidad y expectativa sobre la construcción sostenible en Ecuador. *Revista San Gregorio*, 1(43), 197-209. <https://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/1116/14-JHON22>

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA DE ECUADOR. (2022). *Sistema de información pública agropecuaria [SIPA]*. sipa.agricultura.gob.ec. <http://sipa.agricultura.gob.ec/>

MUNTANI, G., AZZOLUNO, C., MACRÍ, M. & MANCUSO, S. (2020). Straw Buildings: A Good Compromise between Environmental Sustainability and Energy-Economic Savings. *Applied Sciences*, 10(8), 1-19. <https://doi.org/10.3390/app10082858>

PAHLAVAN, P., MANZI, S., SANSONETTI, A. & CHIARA, M. (2018). Valorization of organic additions in restorative lime mortars: Spent cooking oil and albumen. *Construction and Building Materials*, 181, 650-658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.089>

PAVÍA, S., & BRENNAN, O. (2018). Portland Cement-Lime Mortars for Conservation. In J. Hughes, J. Válek, & C. J. W. P. Groot (Eds.), *Historic Mortars: Advances in Research and Practical Conservation* (pp. 129-142). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91606-4_10

RAMOS, A. P., CHÁVEZ, J. L. G., GUERRERO, L., ESPINOSA, M. Á. S., & SORIANO, A. C. (2021). Optimization of hydrated lime putties and lime mortars using nopal pectin for conservation of cultural heritage. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture*, XVII, 101-111. <https://doi.org/10.2495/str210091>

STEPHAN, A. & ATHANASSIADIS, A. (2018). Towards a more circular construction sector: Estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 248-262. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.022>

SUDHARSAN, N. & SIVALINGAM, K. (2019). Potential Utilization of Waste Material for Sustainable Development in construction Industry. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(3), 3435-2438. <https://doi.org/10.35940/ijrte.c5062.098319>

TESLÍK, J. (2021). Analysis of the fire properties of blown insulation from crushed straw in the buildings. *Materials*, 14(15), 1-12. <https://doi.org/10.3390/ma14154336>.

VIERA, P. & ACERO, M. (2022). Diseño de un mortero a partir de la caracterización de cal producida y comercializada por 5 proveedores en Ecuador, *Novasinerzia*, 5 (2), 158-173, <https://doi.org/10.37135/ns.01.10.09>

WALKER, P., THOMSON, A., & MASKELL, D. (2020). Straw bale construction. In K. A. Harries & B. Sharma (Eds.), *Nonconventional and vernacular construction materials: Characterisation, Properties and Applications*. (2nd Edition, pp. 189–216). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102704-2.00009-3>

YIN, X., LAWRENCE, M. & MASKELL, D. (2018). Straw bale construction in northern China – Analysis of existing practices and recommendations for future development. *Journal of Building Engineering*, 18, 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.04.009>.

ZHANG, D., ZHAO, J., WANG, D., XU, C., ZHAI, M. & MA, X. (2018). Comparative study on the properties of three hydraulic lime mortar systems: Natural hydraulic lime mortar, cement-aerial lime-based mortar and slag-aerial lime-based mortar. *Construction and Building Materials*, 186, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.053>

DISEÑO BIOCLIMÁTICO DE VIVIENDA MEDIA EN LA ÉPOCA DEL AUGUE PETROLERO EN TAMPICO, MÉXICO (1912-1930)¹

BIOCLIMATIC DESIGN OF MIDDLE HOUSING IN THE TIMES OF THE OIL BOOM IN TAMPICO, MEXICO (1912-1930)

PROJETO BIOCLIMÁTICO DE MORADIAS MÉDIAS DURANTE O BOOM DO PETRÓLEO EM TAMPICO, MÉXICO (1912-1930)

Angelica Orozco-Cejudo

Maestría en Diseño Arquitectónico
Estudiante de Doctorado, Docente de horario libre, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
Universidad Autónoma de Tamaulipas, Tampico, México
<https://orcid.org/0009-0001-4070-9351>
aorozco@docentes.uat.edu.mx

Mireya Alicia Rosas-Lusett

Doctora en Arquitectura
Investigadora y Docente tiempo completo, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
Universidad Autónoma de Tamaulipas, Tampico, México
<https://orcid.org/0000-0002-6050-4740>
mrosas@docentes.uat.edu.mx

María López deAsiain-Alberich

Doctora en Arquitectura
Profesora Contratada Doctor, Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Universidad de Sevilla, Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0001-9422-394X>
mlasiain@us.es

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo determinar estrategias bioclimáticas adecuadas para el clima de Tampico y comprobar si fueron aplicadas en la vivienda media construida en la época del auge petrolero en la ciudad. Mediante la caracterización climática de Tampico y la revisión de recomendaciones realizadas por autores de arquitectura bioclimática, se establecen las estrategias aplicables al clima local. Se realiza un catálogo de viviendas de la época con características bioclimáticas, obteniéndose acceso a cinco. Mediante entrevistas a los usuarios, se buscó conocer su percepción sobre el confort interior y para profundizar, se estudiaron exhaustivamente las viviendas en cuanto a la existencia o no de estrategias bioclimáticas. Se concluye que dichas viviendas sí cuentan con estrategias bioclimáticas adecuadas para el clima y que eran las mismas que las utilizadas en las viviendas de la época de referencia (auge petrolero) y que han ayudado en la mejora del confort interior de los edificios. Utilizarlas actualmente ayudará a minorar el calentamiento interior, el uso excesivo de energías no renovables y los altos costos por consumo energético.

Palabras clave

arquitectura bioclimática, clima cálido-húmedo, vivienda, sistemas pasivos, flujo de viento.

ABSTRACT

This paper aims to determine bioclimatic strategies suitable for the climate of Tampico and to confirm whether they were applied in the middle housing built during the oil boom in the city. The strategies applicable to the local climate are established using a climatic characterization of Tampico and a review of the recommendations by bioclimatic architecture authors. A housing catalog of the time with bioclimatic characteristics is made, obtaining access to five. Users are interviewed to know their perception of indoor comfort, studying the housing in depth regarding the existence or not of bioclimatic strategies, concluding that they have climate-appropriate bioclimatic strategies, which are the same as those used in the houses of the time (oil boom), and that have helped to improve the indoor comfort of the buildings. Using them today will help reduce indoor heating, the excessive use of non-renewable energies, and the high energy consumption costs.

Keywords

bioclimatic architecture, hot-humid climate, housing, passive systems, wind flow.

RESUMO

Este artigo tem por objetivo determinar estratégias bioclimáticas adequadas ao clima de Tampico e verificar se elas foram aplicadas nas habitações de médio porte construídas durante o boom do petróleo na cidade. Por meio da caracterização climática de Tampico e da revisão das recomendações feitas por autores de arquitetura bioclimática, são estabelecidas as estratégias aplicáveis ao clima local. Elaborou-se um catálogo de residências da época com características bioclimáticas, obtendo-se acesso a cinco. Por meio de entrevistas com os usuários, buscou-se conhecer sua percepção em relação ao conforto interior e, para aprofundar o estudo das habitações, estudou-se exhaustivamente a existência ou não de estratégias bioclimáticas. Conclui-se que essas residências possuem estratégias bioclimáticas adequadas ao clima, que são as mesmas utilizadas nas residências do período de referência (boom do petróleo) e que ajudaram a melhorar o conforto interno dos edifícios. Usá-las na atualidade ajudará a reduzir o aquecimento interno, o uso excessivo de energia não renovável e os altos custos decorrentes do consumo de energia.

Palavras-chave:

arquitectura bioclimática, clima quente-úmido, habitação, sistemas passivos, fluxo de vento.

INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XX, la ciudad mexicana de Tampico vivía una fuerte actividad petrolera que provocó que personas de todo el mundo llegaran a la zona con necesidad de vivienda (Bartorila & Loredó, 2017). Estas construcciones importadas sumaban propuestas de diseño adaptadas al clima y condiciones del entorno, aun cuando habían sido pensadas para situaciones climáticas diversas (Espuna-Mújica, 2011). En este periodo histórico se pudo observar que la vivienda contaba con sistemas pasivos que podían ser reutilizados y extrapolados para el diseño de la vivienda actual en Tampico, cuyo clima tiene características semejantes a las de la época. Este hecho constituye un hallazgo que añade una nueva dimensión patrimonial vinculada al comportamiento bioclimático de edificaciones que tienen un valor intrínseco como patrimonio cultural (Domínguez Ruiz & Rey Pérez, 2019).

Rubio-Bellido et al. (2015), con su estudio sobre viviendas del casco antiguo de Cádiz en España, y Beltrán-Fernández et al. (2017), con su análisis sobre la casa Jacobs I de Frank Lloyd Wright, entre otros, han identificado el aporte bioclimático que la vivienda histórica ofrece en la actualidad. Los resultados evidencian que, a pesar del calentamiento global y de haber sido construidas cuando no había recursos para la obtención del confort, siguen funcionando para los climas en los que se ubican.

Actualmente, es común observar que se ha dejado de tomar en cuenta el clima en el diseño arquitectónico de viviendas (Van Hoof et al., 2010). En este caso, Tampico cuenta con un clima cálido-húmedo (Cruz-Rico et al., 2015), temperaturas y humedades relativas con promedios de 25.7°C y 75% respectivamente. Esta situación, aunada al incremento de temperaturas por el calentamiento global (Fraser et al., 2018), ha llevado a los habitantes del lugar al uso generalizado de equipos de aire acondicionado (Morgan & Gómez-Azpeitia, 2018) para lograr el confort. En este sentido, autores como De Dear (2004), Olgay (2004) y Givoni (1992), han afirmado que, si se tomaran en cuenta las condiciones climáticas mediante estrategias de diseño pasivo en los edificios, se podría alcanzar confort higrotérmico al interior y exterior de estos.

En relación con esto último, Olgay (2004) y Givoni (1992), pioneros consolidados de la arquitectura bioclimática, han desarrollado métodos e instrumentos para identificar las estrategias adecuadas para el diseño del espacio urbano e interior de un edificio, respectivamente, según las condiciones climáticas del lugar. Por ello, la presente investigación se basa en estos dos métodos consolidados, complementarios y paralelos, para el análisis de los casos de estudio en Tampico, adecuando las fases desarrolladas por los autores al desarrollo de la investigación.

En cuanto al confort, según lo que señala Monroy (2001), para que un edificio o espacio público sea cómodo todo el año, sería suficiente que se comporte adecuadamente en un día típico de invierno y uno de verano. Se ha tomado esta referencia como parte de las hipótesis de investigación, definiendo las condiciones extremas de verano e invierno para Tampico y extrapolando al resto del año los estadios intermedios, dada la escasa variación anual de las condiciones climáticas locales.

Según estudios de adaptación bioclimática, las estrategias más efectivas para un clima cálido-húmedo, como es el caso de Tampico, incluyen la protección solar y ventilación natural (Ahmed et al., 2021). La protección solar es crucial para reducir la carga de enfriamiento en los espacios interiores, mientras que la ventilación natural, como lo investigado por Velasco-Roldán (2011), mejora el movimiento del aire y contribuye al confort higrotérmico.

Por otra parte, es importante considerar tanto la eficacia de estos sistemas en el confort interior y exterior, como la reducción de la temperatura interior y el ahorro de energía, como ha sido demostrado por Hu et al. (2023) y Givoni (2011). En el estudio de Elaouzy y El Fadar (2023) se profundiza en las estrategias de adaptación bioclimática para climas cálido-húmedos, lo que proporciona información valiosa sobre cómo estas estrategias pueden aplicarse de manera efectiva en contextos como Tampico. Por otro lado, Serra Florensa y Coch Roura (1995) ofrecen una visión detallada sobre la utilización de sistemas de ventilación natural como parte de los sistemas de control ambiental o sistemas pasivos, lo que señala los límites y el confort higrotérmico de dichos sistemas.

De manera adicional, Rosas-Lusett et al. (2020) llevó a cabo un estudio en el que destaca estrategias de diseño urbano para lograr un confort higrotérmico en espacios exteriores. Entre las recomendaciones para favorecer un flujo eficaz del viento hacia el interior se encuentran la apropiada integración de la vegetación y su relación con las fachadas, así como la separación entre viviendas, entre otras sugerencias. Estas estrategias son fundamentales para identificar y estudiar las estrategias bioclimáticas adecuadas para el lugar, adaptadas tanto al clima y las condiciones físicas, de acuerdo con su geografía, orografía y morfología urbana (Manzano-Agugliaro et al., 2015), así como también a la realidad cultural y los modos de vida locales de la ciudad de Tampico.

Estas investigaciones se enmarcan en la conexión entre el desarrollo de la vida y las condiciones climáticas de un lugar para el diseño de viviendas, tal como lo destacan autores como Gaytan-Ortiz (2019) y Szokolay (1986). Es fundamental considerar estos enfoques para garantizar un diseño de vivienda que se adapte

de manera efectiva a las condiciones climáticas y a los condicionantes histórico-antropológicos del contexto cultural (López de Asiain, 2001). Por lo tanto, y dado que el objetivo de esta investigación es la identificación y estudio de las estrategias bioclimáticas y sistemas pasivos utilizados en la vivienda media del auge petrolero en Tampico, estas serán identificadas y los elementos y/o sistemas serán reconocidos para cada una de las viviendas, analizando de esta manera su funcionamiento.

METODOLOGÍA

La metodología para identificar los sistemas y estrategias bioclimáticas en las viviendas del auge petrolero en Tampico se basó en una extensa investigación de campo. En primer lugar, caracterización climática de Tampico se realizó en función de su clima cálido-húmedo, con dos periodos climáticos claramente distinguibles (meses más cálidos y meses menos cálidos), utilizando información del SMN (1981-2010) en archivo EPW. A través de un modelo adaptativo psico-fisiológico (Auliciems, 1981), se calculó la temperatura neutra (T_n) y los límites de la zona de confort correspondiente (Szokolay, 2014). Posteriormente, mediante las gráficas psicrométricas de Givoni (interiores) y Olgay (exteriores) se identificaron las estrategias recomendadas para el tipo de clima en dos aspectos: características del conjunto y diseño arquitectónico pasivo de la vivienda. Este análisis se llevó a cabo utilizando programas como Photoshop, WRPlot, Climate-consultant y 2D-Sun Path de Andrew Marsh.

La selección de la muestra para esta investigación no fue probabilística, pues dependía de la obtención de permisos de acceso. La zona de estudio abarcó las colonias Águila y Altavista, donde se realizó un catálogo de veintisiete viviendas de la época del auge petrolero, de las cuales cinco se identificaron como casos de estudio por constituir potencialmente un diseño bioclimático. Estas viviendas se analizaron en profundidad mediante levantamientos planimétricos, fotografías y entrevistas a los usuarios para conocer el origen, las actividades diarias de los ocupantes y la percepción personal sobre el confort térmico, además de determinar el estado actual en relación con el original.

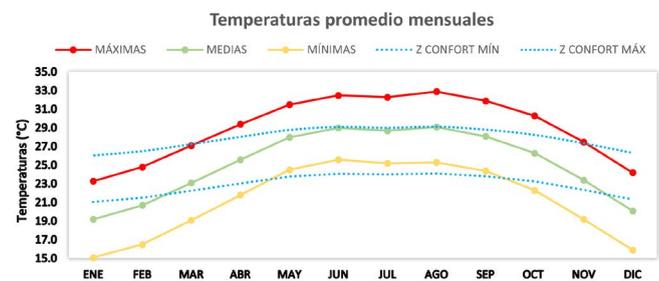
Toda esta información se integró en una ficha tipológica para identificar las estrategias y sistemas bioclimáticos utilizados, corroborando su buen funcionamiento frente al clima de la ciudad. Además, se realizó una revisión de estrategias observando que efectivamente eran utilizadas en el diseño de la vivienda media construida en la época del auge petrolero, identificando los sistemas pasivos utilizados, definiéndolos y caracterizándolos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y ZONA DE CONFORT

Temperatura

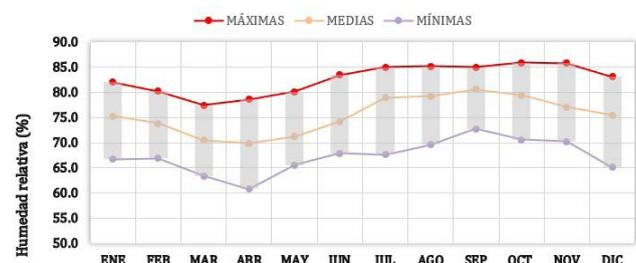
La temperatura media en Tampico es de 25.7°C. En la Gráfica 1 se observa que los meses más cálidos van de marzo a noviembre, con temperaturas promedio de entre 23 y 30 °C. Además, la oscilación térmica en los dos periodos es de entre 7 y 8°C y sus máximas promedio de hasta 33°C. Los meses menos cálidos de diciembre a febrero con temperaturas de 20 a 15°C.



Gráfica 1. Temperaturas mensuales. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos SMN, Estación climatológica Tampico, CONAGUA, 1981-2010.

Humedad relativa

La ciudad de Tampico, México, se caracteriza por su entorno rodeado de vasos lacustres y la proximidad con la costa del Golfo de México. Esta ubicación geográfica influye significativamente en la humedad relativa del área, que se ve afectada por la condensación del vapor de agua y las altas temperaturas. Según la Gráfica 2, se observa que los meses de mayor humedad se extienden de junio a noviembre, alcanzando un 85% de humedad relativa. Por otro lado, los meses con menor humedad comprenden el período de diciembre a mayo, con valores de hasta 60%. Es interesante destacar que los meses de febrero, marzo y abril se caracterizan por una menor humedad que coincide con una mayor velocidad del viento, mientras que los meses con mayor humedad, de julio a noviembre, coinciden con una menor velocidad del viento.



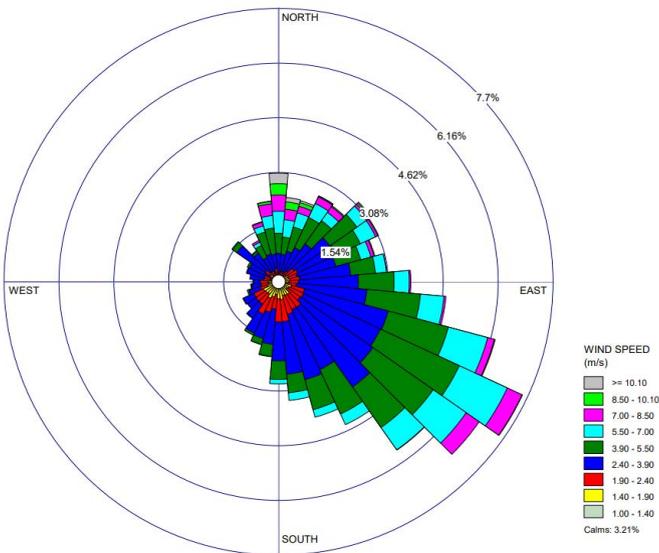
Gráfica 2. Humedades relativas mensuales. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos SMN, Estación climatológica Tampico, CONAGUA, 1981-2010.

Radiación solar

En Tampico, la radiación solar es mayor durante los meses más cálidos, con mayor número de días y horas soleadas. Durante el solsticio de verano, el ángulo más recto a las 12 pm solar alcanza los 83.75°, lo que indica una exposición más directa al sol durante esta época del año.

Vientos

La velocidad promedio del viento en Tampico es de alrededor de 4.17 m/s, siendo los meses de mayor velocidad en febrero, marzo y abril. Por el contrario, el mes de menor velocidad es en agosto. La dirección predominante del viento generalmente es del sureste con cambio estacionales durante el año. De este modo, en junio, julio y agosto se observa mayor presencia de vientos del sureste con menor velocidad (Gráfica 3), mientras que en diciembre y enero predominan los vientos del norte y en marzo, abril y mayo, la dirección predominante es del este y con mayor velocidad.



Gráfica 3. Rosa de los vientos de Tampico, Tamaulipas, año 2020.
 Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos SMN, Estación climatológica Tampico, CONAGUA, 2020

Geometría solar

En Tampico, se observa un patrón claro en la duración de los días a lo largo del año, con el día más largo en junio (13 horas y 30 minutos) y el más corto en diciembre (10 horas y 46 minutos). En la Figura 1 se observa la relación del sol con las temperaturas diarias por mes.

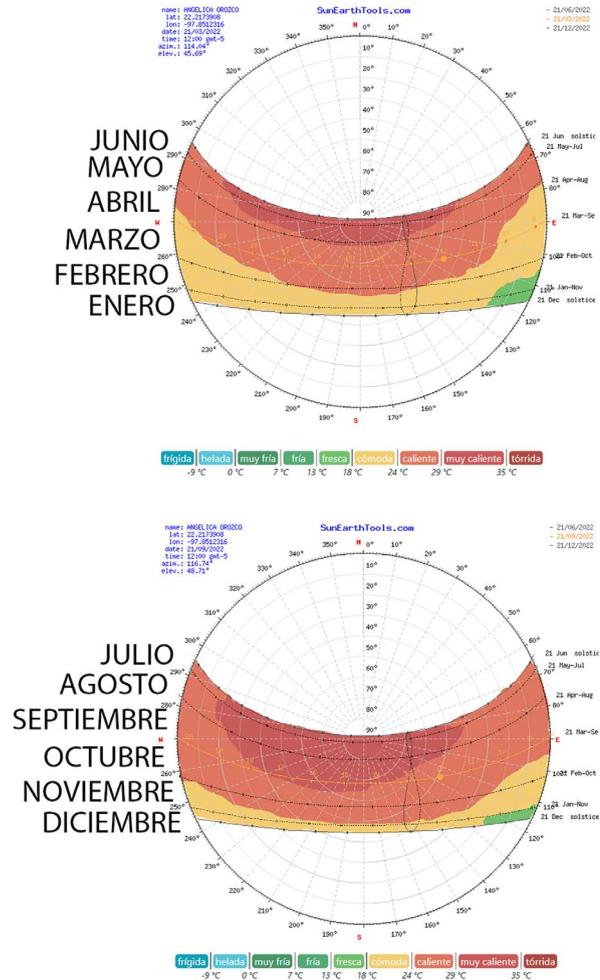


Figura 1. Gráfica solar estereográfica + Temperatura horaria para los meses del año en Tampico. Fuente: Elaboración de los autores con datos de la estación meteorológica de Tampico, SMN.

Zonas de confort y temperatura neutra

El análisis distingue dos periodos climáticos importantes en Tampico: los meses menos cálidos (diciembre a febrero) y los meses más cálidos (marzo a noviembre). Por su parte, a través de un modelo adaptativo, se determinan las zonas de confort.

En otro ámbito, la temperatura neutra (T_n) se calcula mediante un modelo psico-fisiológico de percepción térmica propuesto por Auliciems (1981), cuya la fórmula es la siguiente: $T_n = (T_m * 0.31) + 17.60$, donde (T_m) es la temperatura media de cada mes (T_m) obtenida de la caracterización climática. La zona de confort se establece con base en los límites propuestos por Szokolay, con aceptación del 90%, +2.5°C límite superior y -2.5 límite inferior.

DETERMINACIÓN DE ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS PARA LA CIUDAD DE TAMPICO SEGÚN GIVONI Y OLGAY

A partir de la caracterización climática, se obtuvieron los datos de un día típico de cada mes del año 2020, utilizando como guía las temperaturas medias máximas y mínimas. Estos datos fueron graficados en los diagramas bioclimáticos de Iivoni (interior) y de Olgay (exterior), de acuerdo con lo señalado en Ribeiro et al. (2015).

En el diagrama de Givoni (Figura 2), se puede observar que en los horarios fuera de las zonas de confort para los meses de diciembre, enero y febrero, se recomienda calefacción solar e inercia en invierno. Por su parte, los meses de marzo, abril, septiembre, octubre y noviembre se sitúan dentro de la zona de confort o en la zona cuya estrategia recomendada es la ventilación. Los horarios de mayo, junio, julio y agosto están en su mayoría fuera de la zona de confort y dentro de la estrategia de aire acondicionado.

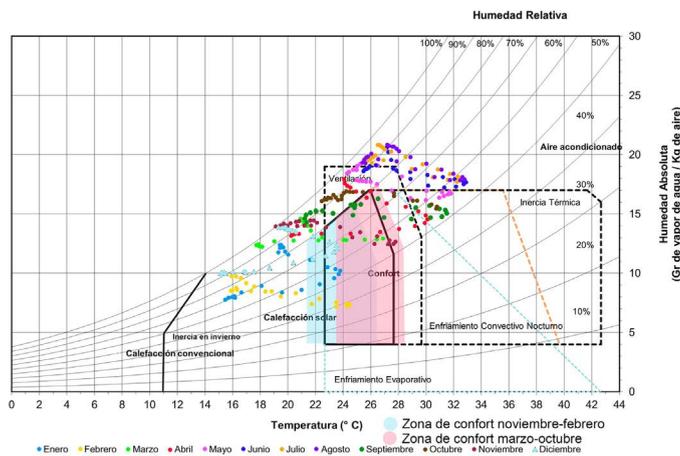


Figura 2. Diagrama Psicrométrico de Givoni. Fuente: Elaboración de los autores.

En cuanto a la gráfica de Olgay (Figura 3), se observa que la mayor parte de los meses del año se ubican dentro de la zona de la estrategia de ventilación lo que sugiere que el movimiento del aire es una estrategia efectiva en estos meses. Sin embargo, el mes de agosto supera los límites hacia el calor, lo que indica un menor efecto de la estrategia de ventilación y la necesidad de considerar otras estrategias, como la radiación, para contrarrestar el exceso de calor en este mes con menor velocidad de viento.

La estrategia bioclimática más destacada tanto en interior como exterior es el movimiento del aire. Además, se indica la necesidad de tener en cuenta la radiación solar para los meses menos cálidos, ya que el sol regula los altos niveles de humedad en interiores.

Este análisis de estrategias se complementa con la propuesta de Olgay (2004) para el diseño arquitectónico en regiones cálido-húmedas, enfocándose en dos ámbitos fundamentales: las características del conjunto y

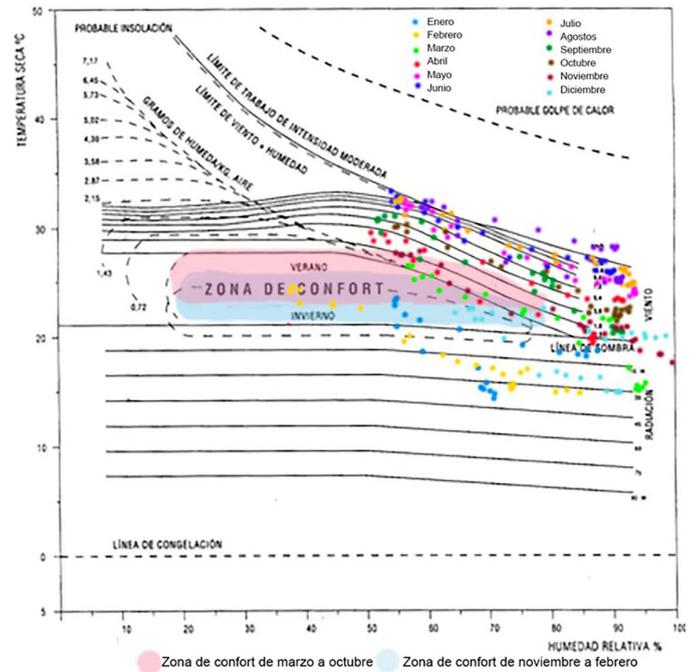


Figura 3. Gráfica de Olgay. Fuente: Elaboración de los autores.

entorno inmediato y el diseño arquitectónico pasivo de la vivienda.

Características del conjunto

- Emplazamientos en altitudes elevadas para capturar la mayor cantidad de viento.
- Viviendas separadas de las colindancias para aprovechar los movimientos del aire y dirigirlo más fácilmente al interior.
- Árboles de ramas altas ubicados hacia el oeste para proporcionar sombreado sin obstaculizar el movimiento del aire.

Diseño arquitectónico pasivo de la vivienda

- Priorización del flujo de aire hacia el interior mediante espacios interiores conectados entre sí.
- Forma del edificio ligeramente alargada en el eje este-oeste, en forma de L, U o con patio central para favorecer el paso de los vientos y el movimiento de aire al interior. Áticos, plafones, espacio entre terreno natural y piso interior, evitarán que el calor se adentre al espacio habitable. Estos espacios deberán ser ventilados en verano y controlar su ventilación en invierno. Alturas interiores mayores a 2.60 mts para que el aire caliente suba y no permanezca a la altura de los usuarios.
- Combinaciones de tamaño y ubicación en aberturas y ventanas que permitan favorecer la ventilación cruzada, conservar o empujar el viento para obtener

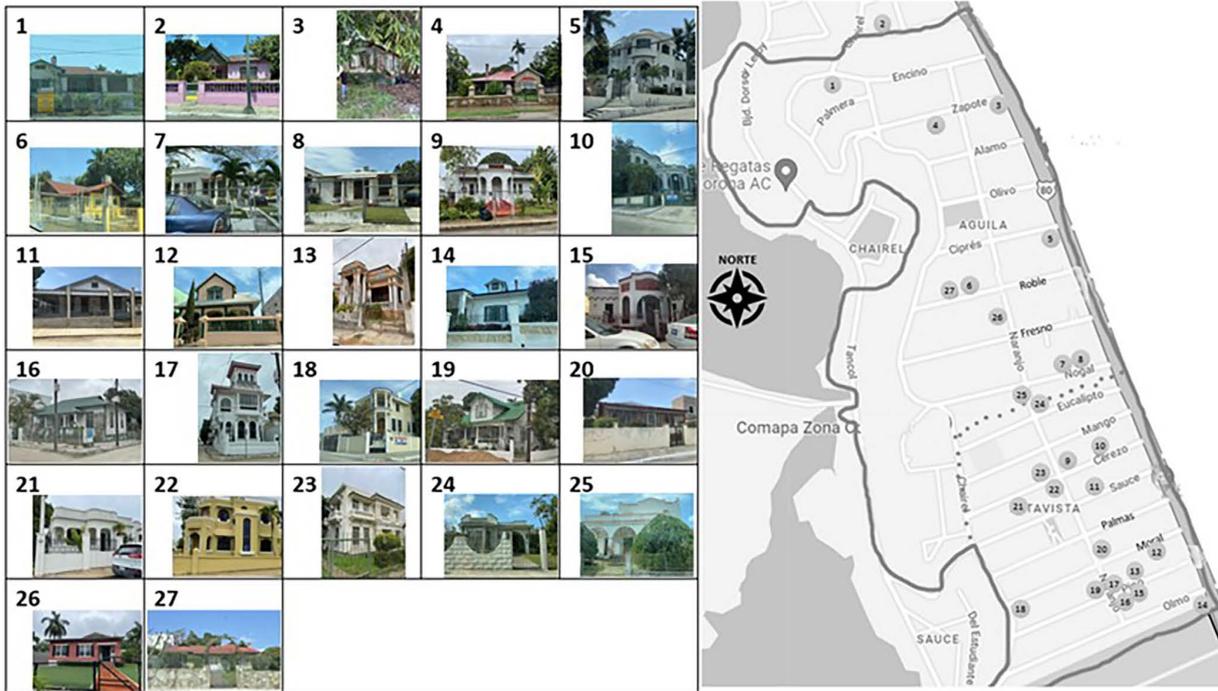


Figura 4. Catálogo total de viviendas seleccionadas en colonias Águila y Altavista. Fuente: Elaboración de los autores

mejores resultados con la ventilación que es necesaria la mayor parte del año. Celosías, persianas, mallas, para disminuir la radiación y permitir que el aire fluya dentro de los espacios.

- Elementos de protección solar hacia este y oeste. Aleros o extensiones de losa que ayuden al sombreado. Pórticos, terrazas o balcones que alejen el sol de la construcción y permitan aprovechar el viento de la zona.
- La orientación más adecuada es norte-sur.
- Colores claros que aseguren la reflectancia en interior y exterior.

con todos los criterios de selección. Las viviendas que constituyen la muestra de casos de estudio de la investigación son las siguientes (Figura 5):

CASOS DE ESTUDIO Y ANÁLISIS

Para la selección de las viviendas de estudio, se realizó un catálogo de veintisiete viviendas utilizando el siguiente criterio (Figura 4):

1. Viviendas construidas en la época de estudio (1912-1930).
2. Viviendas habitadas en la actualidad.
3. Viviendas en muy buenas condiciones.
4. Viviendas que no han sufrido modificaciones significativas.
5. Viviendas que son ventiladas de naturalmente en la mayoría de sus espacios.

Se solicitó el acceso a las veintisiete viviendas y solo se obtuvo el permiso para cinco, confirmando que cumplen

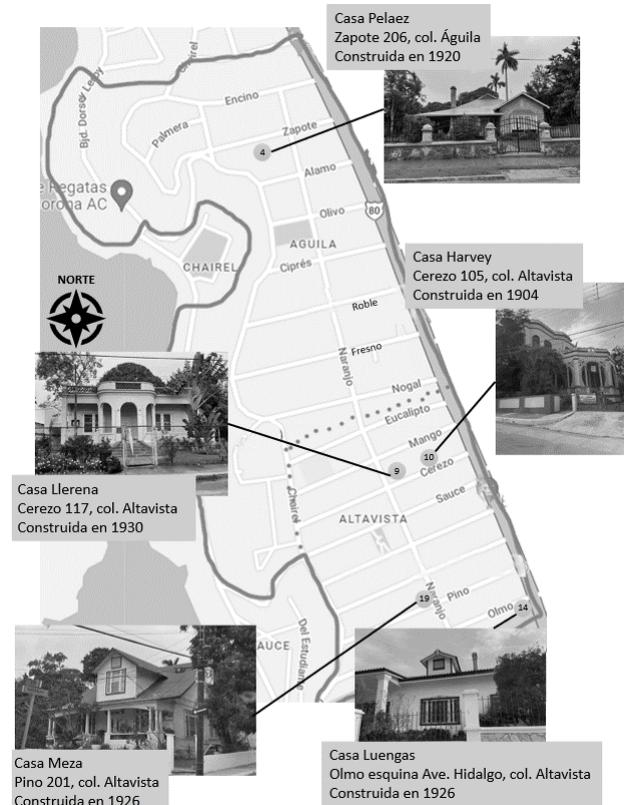


Figura 5. Ubicación de viviendas caso de estudio. Fuente: Elaboración de los autores

El detalle de las viviendas se explica a continuación:

1. Casa Harvey, ubicada en calle Cerezo 105, col. Altavista. Construida en 1914 y restaurada en 2004, ha tenido varios dueños. Habitada por una pareja joven con un niño (Figura 6).

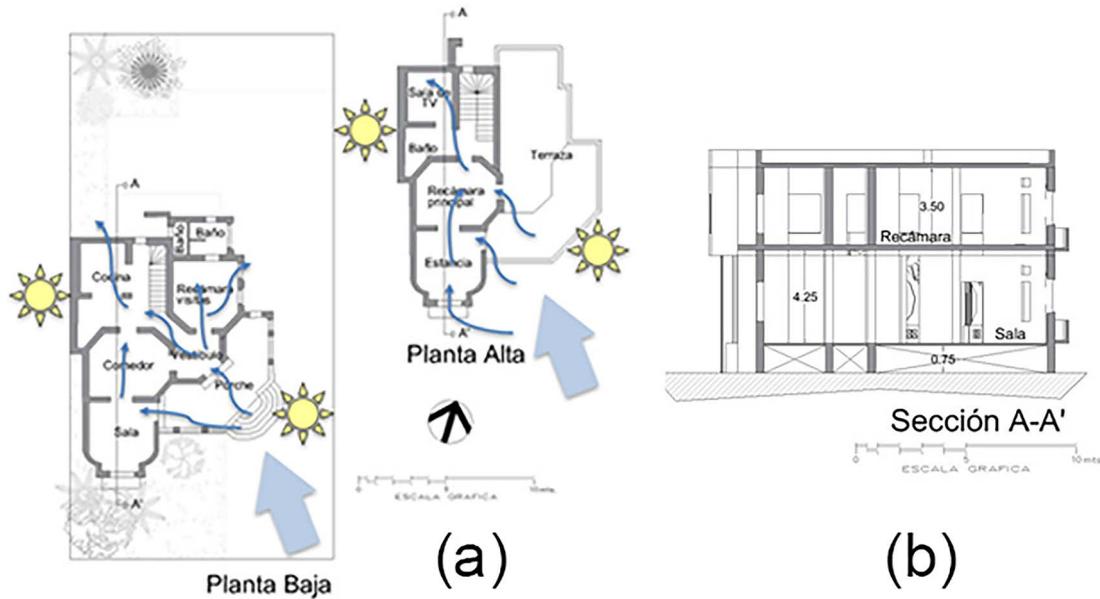


Figura 6. (a) Plantas arquitectónicas (b) Corte. Fuente. Elaboración de los autores

2. Casa Peláez, ubicada en calle Zapote 206, col. Águila. Construida en los años 1920's por la compañía El Águila. Pertenece al dueño actual desde 1940. Habitada por una persona de la tercera edad y una persona joven (Figura 7).

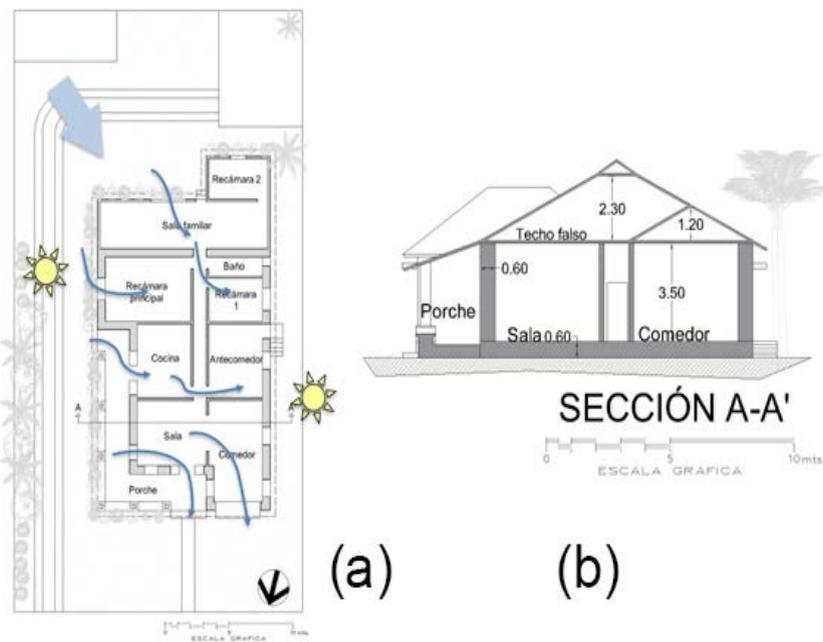


Figura 7. (a) Plantas arquitectónicas (b) Corte. Fuente. Elaboración de los autores.

3. Casa Meza ubicada en calle Pino 201, col. Altavista. Construida en 1926. Pertenece al dueño actual desde 1930. Habitada por una pareja de personas adultas (Figura 8).

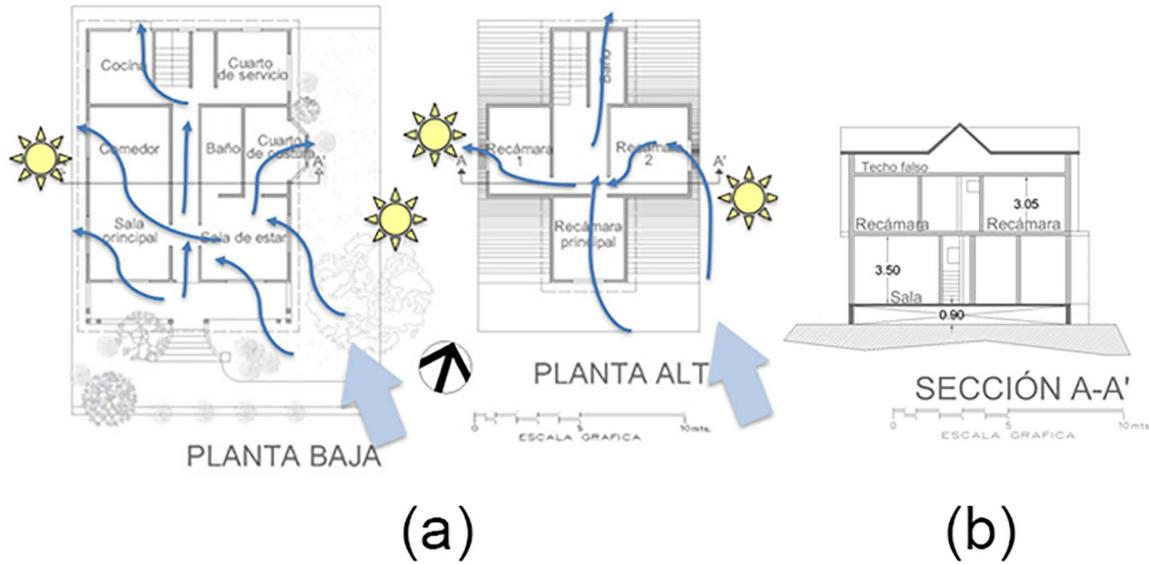


Figura 8. (a) Plantas arquitectónicas (b) Corte. Fuente. Elaboración de los autores

4. Casa Llerena ubicada en calle Cerezo 117, col. Altavista. Construida en 1929. Pertenece a los dueños actuales desde 1936. Habitada por una persona adulta (Figura 9).

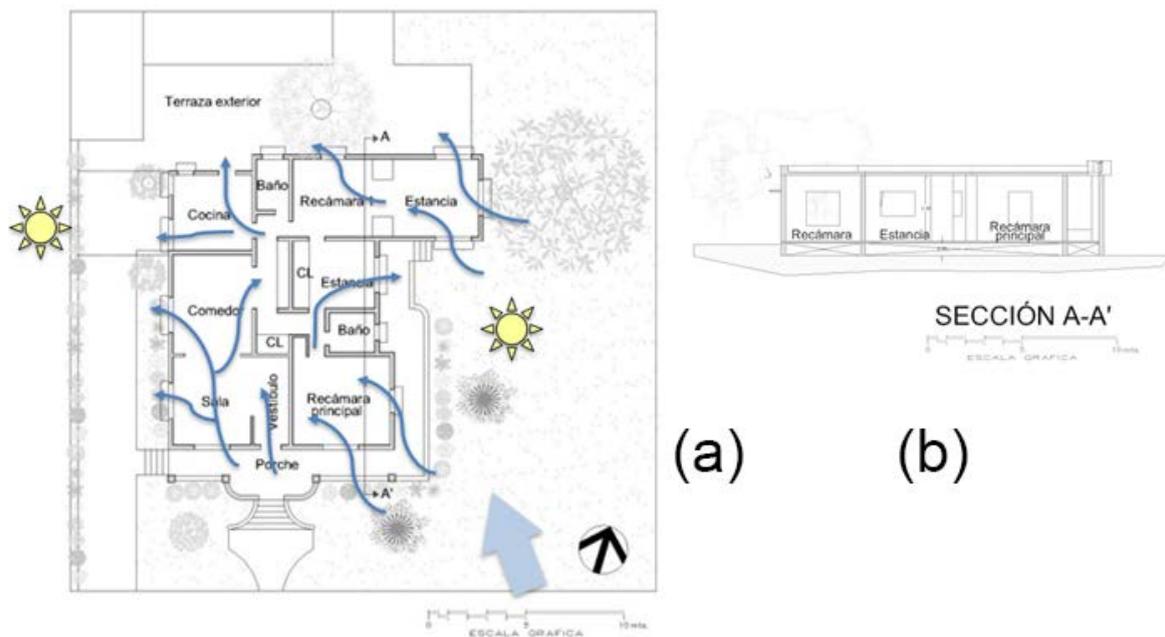


Figura 9. (a) Planta arquitectónica (b) Corte. Fuente. Elaboración de los autores

5. Casa Luengas en avenida Hidalgo, col. Altavista. Construida en 1926. Pertenece a los dueños actuales desde 1938. Habitada por un adulto mayor y una persona joven (Figura 10).

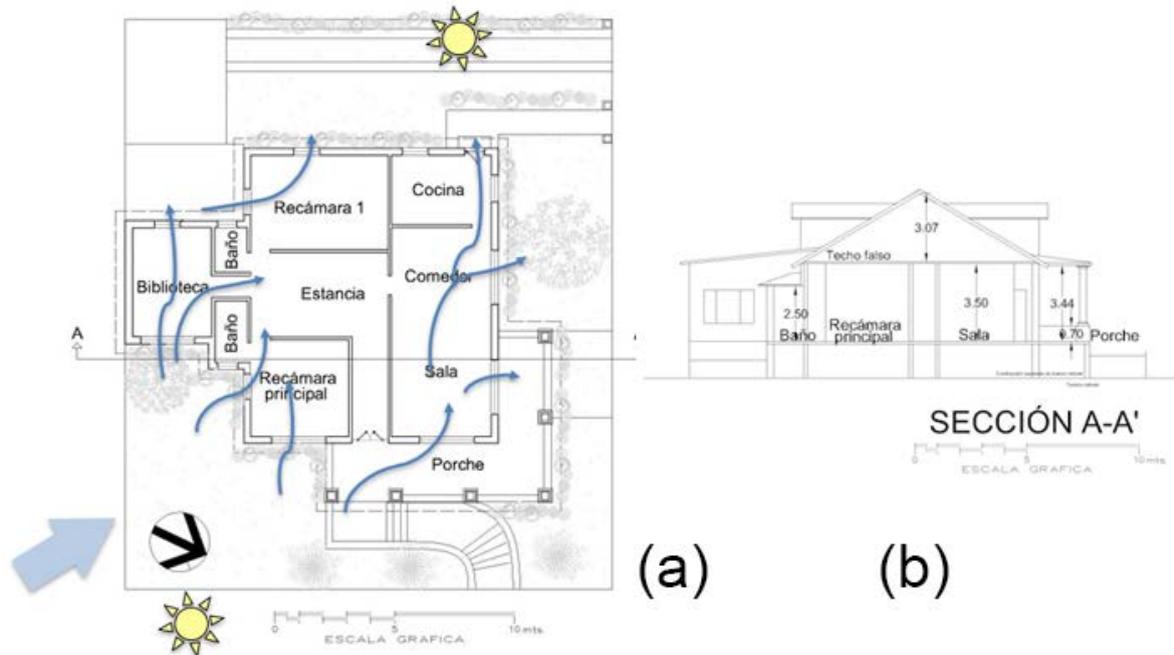


Figura 10. (a) Planta arquitectónica (b) Corte. Fuente. Elaboración de los autores

Características y entorno inmediato del conjunto

Según las características del entorno inmediato de las colonias Águila y Altavista en Tampico, se observa que estas áreas cuentan con una altitud promedio de 20msnm, con terrenos orientados de norte-sur y una superficie de 500-1000m². La presencia de suficiente vegetación en los predios favorece el sombreado de las fachadas y entorno cercano, lo que contribuye al buen funcionamiento bioclimático y al confort interior de las viviendas. Lo mismo sucede con la disposición hacia el centro de las viviendas en el terreno, dado que permite un flujo de viento óptimo, lo cual es beneficioso para el confort térmico en el interior de las estas.

Estas condiciones proporcionan un ambiente favorable para la implementación efectiva de estrategias bioclimáticas y sostenibles, brindando confort y eficiencia energética a los habitantes. En nuevas urbanizaciones se recomienda priorizar estas condiciones favorables, incluyendo suficiente vegetación para sombreado, espacios abiertos y una distribución eficiente de las viviendas para favorecer el movimiento del aire. En aquellos casos donde no se pueda replicar estas condiciones, se deben considerar recomendaciones complementarias, como estrategias de sombreadamiento y diseño de paisajes para garantizar el confort interior y el funcionamiento efectivo de las estrategias bioclimáticas.

DISEÑO ARQUITECTÓNICO DE LAS VIVIENDAS

El objetivo del estudio fue identificar las estrategias y/o sistemas bioclimáticos incorporados en el diseño arquitectónico de cada una de las viviendas de estudio, en relación con las estrategias bioclimáticas recomendadas para el clima de la ciudad de Tampico. Este proceso implicó la identificación y descripción de las estrategias y sistemas bioclimáticos identificados en las viviendas estudiadas. Todo lo anterior se resume de manera concisa en la Tabla 1.

Al comparar los hallazgos del presente estudio, se puede observar que las viviendas caso de estudio han incorporado, de manera generalizada, criterios de diseño que se alinean con estrategias bioclimáticas definidas en la investigación. Dichas estrategias representan elementos y sistemas que han perdurado al paso del tiempo, gracias a su buen funcionamiento en términos de confort para los ocupantes.

En cuanto al diseño de vivienda, se observa la existencia de casos de estudio que presentan una forma semicompacta, la cual no es recomendada. No obstante, al presentar características de porosidad (aberturas en todas las fachadas), en conjunto con las aberturas interiores, los entresijos altos y las losas dobles ventiladas, se favorece la ventilación cruzada y el movimiento del aire al interior.

En general las estrategias se cumplen, derivándose los sistemas pasivos de la Tabla 2.

Tabla 1. Elementos identificados para estrategias de ventilación, movimiento del aire y sombreadamiento. Fuente: Elaboración de los autores.

Estrategias bioclimáticas para el clima de Tampico	Casa Harvey	Casa Peláez	Casa Meza	Casa Llerena	Casa Luengas
Espacios interiores abiertos. VENTILACIÓN	Ventilación cruzada en recámaras y zona social. Bardas bajas con herrería favoreciendo el paso del viento al terreno.	Espacios interiores con accesos enfrentados favoreciendo el flujo del viento. Barda baja con herrería favoreciendo el paso del viento al terreno.	Espacios interiores con accesos enfrentados favoreciendo el flujo del viento. Barda muy baja con herrería favoreciendo el paso del viento al terreno.	Espacios amplios con dos ventanas o más favoreciendo la ventilación cruzada. Barda muy baja favoreciendo el paso del viento al terreno.	Espacios amplios con dos ventanas favoreciendo la ventilación cruzada. Barda de malla favoreciendo el paso del viento al terreno.
Forma MOVIMIENTO DEL AIRE	Construcción semi compacta y porosa Relación 1:1.30, elevada del piso +0.75m. Entrepisos de 3.50m de alto.	Construcción alargada norte-sur. Relación 1:1.80, elevada del piso +0.45m. Cuenta con ático, techo falso y aberturas para sacar el aire caliente. Entrepisos de 3.50m de alto.	Construcción semi compacta y porosa Relación 1:1.50, elevada del piso +0.90m. Cuenta con ático, techo falso, y aberturas para sacar aire caliente. El piso está separado del terreno natural y cuenta con aberturas en el perímetro. Entrepisos de 3.50m de alto.	Construcción semi compacta y porosa. Relación 1:1.25, elevada del piso +0.90m. Entrepisos de 3.50m de alto.	Construcción semi compacta y porosa Relación 1:1.20, elevada del piso +0.30m. Cuenta con ático, techo falso, y aberturas para sacar aire caliente. Entrepisos de 3.50m de alto.
Aberturas y ventanas VENTILACIÓN	Porcentaje de vanos: Sureste 13.13%; Noroeste 18.91%; Este-norte: 12.58%; Oeste-sur: 9.29%	Porcentaje de vanos: Sureste 35.16%; Noroeste 27.41%; Este-norte: 15.73%; Oeste-sur: 15.09%	Porcentaje de vanos: Sureste 29.42%; Noroeste 12.84%; Este-norte: 22.44%; Oeste-sur: 17.10% *No se consideró el techo.	Porcentaje de vanos: Sureste 17.11%; Noroeste 13.25%; Este-norte: 13.38%; Oeste-sur: 15.85%	Porcentaje de vanos: Sureste 8%; Noroeste: 18.21%; Este-norte: 21.44%; Oeste-sur: 12.21%
Elementos de protección solar SOMBREAMIENTO	Pórtico techado orientado al sureste de 3.15 mts de ancho por 10.8m de desarrollo.	Aleros perimetrales de 40 cm de ancho. Pórtico techado en forma de "L" orientación Noroeste y Este-Norte, de 3.5m ancho promedio.	Aleros perimetrales de 40 cm de ancho. Pórtico techado con orientación Sureste, de 1.74mts de ancho.	Aleros anchos de ventanas de 50 cm. Pórtico techado en forma de "L" orientación Sureste y Este-Norte, de 1.6m ancho promedio	Aleros perimetrales de 40 cm de ancho. Pórtico techado en "L" con orientación Oeste de 2 mts de ancho promedio.
Orientación VENTILACIÓN Y MENOR RADIACIÓN PERPENDICULAR	 Sur 23°Este	 Norte 14°Oeste	 Sur 26°Este	 Sur 23°Este	 Este 22° Norte
Colores reflectantes en interior y exterior. ASEGURAR LA REFLECTANCIA	Pintura color gris claro en exteriores, blanca en interiores. Techo color blanco.	Acabado de piedra aparente color amarillo claro en exteriores, color beige en interiores. Cubierta inclinada color rojo.	Pintura color blanco en exteriores, blanca en interiores. Cubierta inclinada color verde.	Pintura color gris claro en exteriores, blanca en interiores. Techo color blanco.	Pintura color blanco en exteriores, beige en interiores. Cubierta inclinada color verde.

Tabla 2. Elementos y /o sistemas identificados. Fuente: Elaboración de los autores.

Estrategias recomendadas para el clima de la ciudad	Sistemas identificados en las viviendas de estudio
Espacios interiores abiertos para favorecer ventilación.	Espacios con aberturas interiores coincidentes entre sí. Puertas con aberturas que permiten el paso del viento. Ventilación cruzada en recámaras y espacios sociales.
Espacios exteriores abiertos para favorecer ventilación.	Uso de bardas bajas o mallas para favorecer el paso del viento al interior del terreno.
Formas que permitan disminuir la radiación al interior	Viviendas con áticos y techos dobles con ventilación para sacar el aire caliente. Viviendas sobre el nivel del terreno natural. En vivienda separada del terreno natural se cuenta aberturas para movimiento de aire y disminución de la humedad.
Formas que favorecen el movimiento de aire	Techos altos que favorecen el movimiento del aire y permiten que el aire caliente suba y no esté al nivel de los usuarios.
Aberturas y ventanas que favorecen la ventilación con sistemas de sombreado y disminuyen la radiación al interior	Grandes claros en fachadas sur y norte. Aleros perimetrales en cubiertas. Aleros individuales por ventana. Porches orientados al sur, al este y oeste.
Elementos de protección solar que evitan la radiación al interior de las aberturas	Porches que impiden el paso de la radiación al interior. Aleros por ventana y perimetrales.
Orientación que favorece la ventilación.	Ventanas orientadas hacia los vientos dominantes de tamaño considerable, lo cual puede no provocar grandes presiones de aire, pero si permite el paso del viento al interior.
Colores reflectantes en interior y exterior para disminuir la transferencia de calor.	En muros se observan colores claros en general, tanto en interior como en exterior. En cubiertas, algunas viviendas de color blanco, 2 de color verde y una de color rojo.
Vegetación dentro del predio para favorecer el sombreado	Las viviendas cuentan con vegetación de mediana a grande. Arboles colocados en fachadas este y oeste que ayudan al sombreado.

Tras el análisis de los resultados, se demuestra que las estrategias pasivas bioclimáticas definidas en el diagrama psicrométrico de Givoni se aplican en las viviendas objeto de estudio en su diseño original. Asimismo, se evidencia que la estrategia más importante en el interior es la ventilación natural, sobre todo en los meses cálidos, corroborando las conclusiones de Velasco-Roldán (2011) La observación de sistemas de diseño sencillo en estas viviendas, como ventanas de gran tamaño con orientación a barlovento y puertas interiores con ventanas superiores, favorecen la ventilación cruzada y el paso del aire entre espacios. Estos sistemas pueden ser extrapolados en diseños de vivienda actual, ya que pueden proporcionar una mejora significativa del confort higrotérmico interior.

Con relación a las estrategias definidas mediante la gráfica de Olgyay para exteriores, y corroboradas por los

estudios de Rosas-Lusett et al. (2020), se puede concluir que son adecuadas en función del mayor confort en el entorno inmediato de los edificios, lo que puede influir positivamente en la temperatura del aire antes de ingresar a la vivienda, mejorando también el confort interior.

Finalmente, se demuestra que el seguimiento de los criterios definidos por Szokolay (2014) y López de Asiain (2001) en relación con el proceso metodológico y enfoque estratégico de análisis del contexto físico y cultural-antropológico, ha producido resultados significativos que permiten afirmar que las viviendas estudiadas y construidas durante el auge petrolero en Tampico pueden ser una referencia importante para la mejora en términos de diseño bioclimático de las viviendas actuales en la zona, además de destacarse como un patrimonio cultural y ambiental que merece reconocimiento (Domínguez Ruiz & Rey Pérez, 2019).

CONCLUSIONES

El presente estudio destaca la importancia de los ejemplos de arquitectura de viviendas construidas durante el auge petrolero en Tampico, dado que se evidencia que el hecho de contar con estrategias y sistemas bioclimáticos adaptados localmente logra brindar mejores y adecuadas condiciones de confort a las viviendas (Espuna-Mújica, 2011). A pesar de que estos diseños originales fueron importados de otros contextos, se pudieron adaptar al contexto climático local, demostrando que las estrategias bioclimáticas eran necesarias y potencialmente utilizables para Tampico.

Estos sistemas, caracterizados tanto de manera genérica en los estudios de Serra Florensa y Coch Roura (1995), como específica en los de Manzano-Agugliaro et al. (2015), han sido validados como adecuados para enfrentar el clima cálido-húmedo. Así mismo, se confirman las expectativas iniciales sobre el aporte de la vivienda histórica de una ciudad con un clima específico, que podrían resultar claves para la vivienda actual que se construye en la misma ciudad. Estos aportes deberán ser estudiados y cuantificados en su extrapolación a la vivienda actual en Tampico en futuras investigaciones.

Se concluye que, aun cuando estas viviendas a pesar de su interés estético-histórico-constructivo no han sido catalogadas como patrimonio cultural, pueden realizar un gran aporte en términos medioambientales y de comportamiento bioclimático, por lo que podrían considerarse patrimonio ambiental, según las propuestas de autores como Rey (2017). Sin embargo, la presente investigación no permite determinar en términos cuantitativos el potencial de mejora en confort de los diseños estudiados. En este sentido, se puede plantear este trabajo como una primera parte de una investigación más integral, en la que se ha logrado identificar las estrategias y sistemas bioclimáticos utilizados para el diseño arquitectónico de las viviendas. De esta manera, para continuar profundizando en este estudio, será necesario realizar mediciones y/o simulaciones de dicho comportamiento para comprobar los rangos de efectividad en términos de confort de las viviendas y así conocer con precisión los beneficios de implementar en el diseño actual las estrategias y sistemas que se presentan en esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación (CONAHCYT). Agradecimiento a la Universidad Autónoma de Tamaulipas y a la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Agradecimiento a las familias Meza, Llerena, Luengas y Peláez por sus valiosas aportaciones al presente estudio.

Contribución de los autores: Conceptualización, A.O.C.; Curación de datos, A.O.C. y M.L.A.A.; Análisis formal, M.L.A.A.; Adquisición de financiación, A.O.C.; Investigación, A.O.C.; Metodología, A.O.C., M.L.A.A. y M.R.L.; Administración de proyecto, A.O.C. y M.L.A.A.; Recursos; Software; Supervisión; Validación, A.O.C., M.L.A.A. y M.R.L.; Visualización; Escritura – borrador original, A.O.C.; Escritura – revisión y edición, A.O.C., M.L.A.A. y M.R.L.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, T., Kumar, P., & Mottet, L. (2021). Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110669. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110669>
- Auliciems, A. (1981). Towards a psycho-physiological model of thermal perception. *International Journal of Biometeorology*, 25(2), 109-122. <https://doi.org/10.1007/BF02184458>
- Bartorila, M. Á., & Loredó, R. I. (2017). La Industria Petrolera y la Modernidad: Transformaciones Urbanas en Tampico-Madero, Tamaulipas, México. *CONTEXTO. Revista De La Facultad De Arquitectura De La Universidad Autónoma De Nuevo León*, 11(14), 43-61. <https://contexto.uanl.mx/index.php/contexto/article/view/63>
- Batres-González, J. J., Marín-Yáñez, T., & Iduarte Márquez, O. (2014). La Urbanización de las Ciudades Metropolitanas Costeras del Golfo de México y su Impacto Ambiental: Caso la Zona Metropolitana de Tampico. *Cuadernos de Arquitectura y Asuntos Urbanos*, 3(3), 9-26. http://cuadernos.uanl.mx/pdf/num3/002_Batres_Marin_Iduarte_La%20Urbanizacion.pdf
- Beltrán-Fernández, M., García-Muñoz, J., & Dufrasnes, E. (2017). Analysis of the bioclimatic strategies used by Frank Lloyd Wright in the Jacobs I house. *Informes de la Construcción*, 69(547), 213. <https://doi.org/10.3989/ic.16.156>
- Cruz-Rico, J., Rivas, D., & Tejeda-Martínez, A. (2015). Variability of surface air temperature in Tampico, northeastern Mexico. *International Journal of Climatology*, 35(11), 3220-3228. <https://doi.org/10.1002/joc.4200>
- De Dear, R. (2004). Thermal comfort in practice. *Indoor Air*, 14(1), 23-39. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00270.x>
- Gaytan-Ortiz, I. (2019). Diseño bioclimático en la arquitectura de hoy. *Artificio* 1(1), 14-23. <https://revistas.uaa.mx/index.php/artificio/article/view/2296>
- Domínguez Ruiz, V., & Rey Pérez, J. (2019). Vernacularmente: patrimonio cultural y retos de sociedad. *revista PH*, 97, 15-16. <https://doi.org/10.33349/2019.97.4375>
- Elaouzy, Y., & El Fadar, A. (2023). Sustainability of building-

- integrated bioclimatic design strategies depending on energy affordability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179, 113295. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113295>
- Espuna-Mújica, J. A. (2011). *Evolución de la vivienda inglesa en Tampico: La influencia del modelo de vivienda inglesa en la Costa del Golfo de México*. Editorial Académica Española.
- Fraser, A. M., Chester, M. V., & Eisenman, D. (2018). Strategic locating of refuges for extreme heat events (or heat waves). *Urban Climate*, 25, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.04.009>
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11–23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)
- Givoni, B. (2011). Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar Energy*, 85(8), 1692–1726. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.003>
- Hu, M., Zhang, K., Nguyen, Q., & Tasdizen, T. (2023). The effects of passive design on indoor thermal comfort and energy savings for residential buildings in hot climates: A systematic review. *Urban Climate*, 49, 101466. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101466>
- López de Asiain, J. (2001). *Arquitectura, ciudad, medio ambiente*. Universidad de Sevilla.
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). Review of Bioclimatic Architecture Strategies for Achieving Thermal Comfort. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 49, 736-755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- Monroy, M. M. (2001). Claves del diseño bioclimático. *Basa*, 23, 170-179. <https://topodata.com/wp-content/uploads/2019/10/urbanismo-bioclimatico1.pdf>
- Morgan, N., & Gómez-Azpeitia, G. (2018). Development of a Mexican Standard of Thermal Comfort for Naturally Ventilated Buildings. *Proceedings of 10th Windsor Conference: Rethinking Comfort*, 596–608. https://windsorconference.com/wp-content/uploads/2019/04/W18_PROCEEDINGS-compressed.pdf
- Olgay, V. (2004). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Editorial GG
- Rey, J. (2017). From heritage as an architectural object to the heritagization of the landscape: A review of the International Charters and Textos of cultural heritage. *Estoa. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism*, 6(10), 35–48. <https://doi.org/10.18537/est.v006.n010.04>
- Ribeiro, A. S., Alves e Sousa, J., Cox, M. G., Forbes, A. B., Matias, L. C., & Martins, L. L. (2015). Uncertainty Analysis of Thermal Comfort Parameters. *International Journal of Thermophysics*, 36(8), 2124-2149. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-1888-1>
- Rosas-Lusett, M., Calzada, J. R., & Roura, H. C. (2020). Buildings in warm humid weather. Tampico, Tamaulipas case. Mexico. *Architecture, City and Environment*, 15(44), 1–24. <https://doi.org/10.5821/ace.15.44.5667>
- Rubio-Bellido, C., Pulido-Arcas, J. A., & Cabeza-Lainez, J. M. (2015). Adaptation strategies and resilience to climate change of historic dwellings. *Sustainability*, 7(4), 3695-3713. <https://doi.org/10.3390/su7043695>
- Serra Florensa, R., & Coch Roura, H. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Edicions Upc. <http://nicolasdiruscio.com.ar/archivos/Libros/Arquitectura%20y%20energia%20natural.pdf>
- Szokolay, S. (2014). *Introduction to Architectural Science*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315852409>
- Szokolay, S. V. (1986). Climate analysis based on the psychrometric chart. *International Journal of Ambient Energy*, 7(4), 171-182. <https://doi.org/10.1080/01430750.1986.9675499>
- Van Hoof, J., Mazej, M., & Hensen, J. L. (2010). Thermal comfort: Research and practice. *Frontiers in Bioscience*, 15(2), 765–788. <https://doi.org/10.2741/3645>
- Velasco-Roldán, L. (2011). *El Movimiento del Aire Condicionante de Diseño Arquitectónico*. <http://luisvelascoroldan.com/wp-content/uploads/libro-final.pdf>



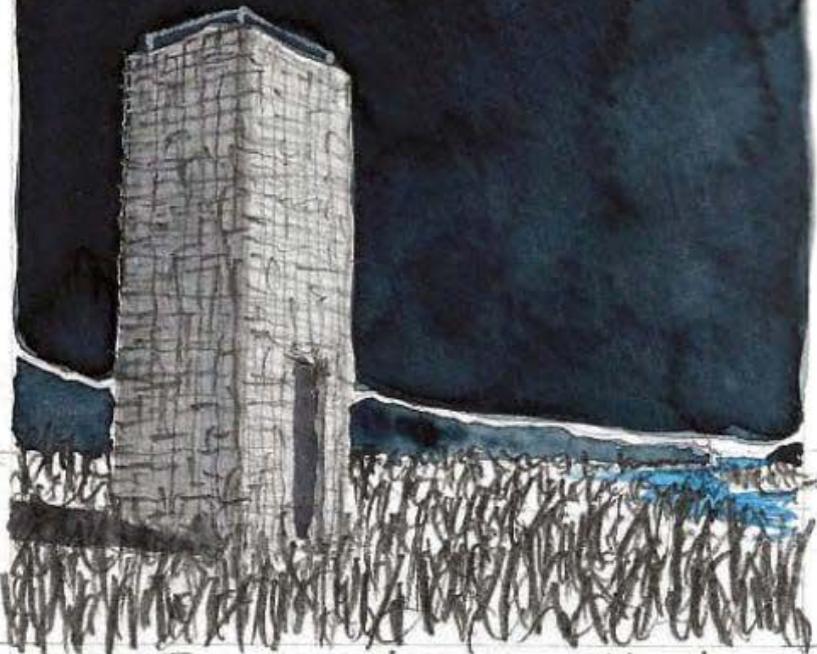
**Revista
Hábitat
Sustentable**

ISSN 0719-0700
Vol. 13 N°. 2
diciembre
2023



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

Don Torres y
Una Senda
Agencia Cultural
2016



BARRIA 2022

Objeto singular Barra Monte