



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700
Vol. 12 N°. 2
Diciembre
2022



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO



**Revista
Hábitat
Sustentable**

ISSN 0719-0700
Vol. 12 N°. 2
diciembre
2022



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

RECTOR:

MAURICIO CATALDO MONSALVES

DECANO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO:

ROBERTO EDUARDO BURDILES ALLENDE

EDITORIA RESPONSABLE:

Dra. CLAUDIA MUÑOZ SANGUINETTI / Departamento Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
clmunoz@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 MÁRIA 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. MAUREEN TREBILCOCK KELLY / Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

Dra. M^o 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

FOTOGRAFÍA PORTADA:

JOCELYN VIDAL RAMOS

/ INES Centro de innovación, edificio Estudio Pezo von Ellrichshausen, Universidad del Bío-Bío, Campus Concepción, Región del Biobío, Chile. Edificio de los arquitectos Mauricio Pezo y Sofía von Ellrichshausen, destacados y jóvenes diseñadores, reconocidos internacionalmente. Fotografía Portada Jocelyn Vidal Ramos, septiembre, 2022.

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, JornalOcs 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



- 05 **EDITORIAL**
Claudia Muñoz Sanguinetti
- 08 **INDICADORES DE RESILIENCIA Y SOSTENIBILIDAD PARA LA VIVIENDA URBANA PANAMEÑA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO**
Michelle Alina Ruíz González, Yazmin Lisbeth Mack-Vergara
- 26 **PLACAS AISLANTES DE EPS RECICLADO: FACTORES CRÍTICOS Y POTENCIALIDADES PARA LA VIABILIDAD PRODUCTIVA DE UN EMPRENDIMIENTO EN EL PARTIDO DE LA PLATA**
Laura Elena Reynoso, Graciela Melisa Viegas, Gustavo Alberto San Juan
- 40 **SUFICIENCIA LUMÍNICA DE AMBIENTES INTERIORES EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**
Lucas Arango-Díaz, María Alejandra Garavito-Posada, Juan Sebastian Calle-Medina, Adriana Marcela Murcia Cardona, Olga Lucia Montoya-Flórez, Sebastián Pinto-Quintero
- 52 **ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL RESIDUO DE CAUCHO DE NEUMÁTICO COMO REEMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO FINO EN EL HORMIGÓN**
Luz Adriana Fernandez-Torrez, Joaquin Humberto Aquino-Rocha, Nahúm Gamalier Cayo-Chileno
- 66 **APROVECHAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE POTENCIALIDADES SOSTENIBLES EN EL MODELO DE MOVILIDAD URBANA DEL CENTRO DE LA CIUDAD DE AMBATO**
Andrea Cristina Goyes-Balladares, Roberto Carlos Moya-Jiménez
- 84 **RESPUESTA DE LOS MUROS DE QUINCHA AL RIESGO DE CONDENSACIÓN**
María Guadalupe Cuitiño-Rosales, Alfredo Esteves-Miramont, Laura Elizabeth Najjar
- 98 **IMPACTO DEL CONFINAMIENTO POR COVID-19 EN LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE CO² AL INTERIOR DE LA VIVIENDA DE TIPO SOCIAL EN CHILE**
Roxana Guíñez-Viveros, Ariel Bobadilla-Moreno, Cristián Alberto Muñoz-Viveros

EDITORIAL

Me complace presentar la nueva edición de Revista Hábitat Sustentable V12N2, sostenida por la Facultad de Arquitectura Construcción y Diseño, cuyo valioso y nutrido repertorio de artículos colabora desde la investigación a la sustentabilidad en el ambiente construido, en distintas escalas. A través de significativos aportes a la discusión en ámbitos de la economía circular de recursos materiales y ciclo de vida de los edificios, resiliencia de ciudades y edificaciones frente al cambio climático, confort ambiental, habitabilidad, movilidad urbana y suficiencia lumínica, autores y autoras de Latinoamérica (Panamá, Colombia, Brasil, Bolivia, Argentina y Chile) comparten aquí sus propuestas.

Esta edición es un número especialmente emotivo ya que, después de ocho años a cargo de la Dirección y Edición de la Revista HS, es hora de cerrar este ciclo. Culmino esta valiosa labor, que ha estado plena de aprendizajes, desafíos e importantes logros para nuestra revista, acompañada de un excelente equipo de personas y profesionales con quienes logramos alcanzar indexaciones relevantes para HS, la cual hoy se encuentra en catálogos SCOPUS, SCiELO, ERIHPLUS, y WOS EMERGING SOURCES CITATION INDEX, entre otras.

Desde marzo del 2023, empieza una nueva etapa para HS que, sin duda, vendrá llena de éxitos y logros, de la mano de sus nuevos jefes Editores: Dra. Maureen Trebilcock, fundadora de la revista, y del Dr. Alexis Pérez; ambos destacados académicos e investigadores de la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, quienes, desde su experiencia y visión, continuarán consolidando la calidad de HS hasta posicionarla en las más altas indexaciones y visibilizaciones internacionales.

Por mi parte, quiero manifestar mis agradecimientos al valioso equipo humano que me acompañó profesionalmente en esta cruzada, en primer lugar, a la Ing. Jocelyn Vidal, encargada de la Coordinación Editorial, por su compromiso y disposición permanente al aprendizaje y la colaboración; a la Dra. Olga Ostria por su tremendo profesionalismo en el apoyo en la Corrección de Estilo, más en los intensos tiempos editoriales. Mismo reconocimiento para el Arq. Ignacio Sáez, por poner a disposición su talento y labores de diagramación en esos exigentes cierres, sobre todo los de fines de cada año. Mis agradecimientos también para Kevin Wright, por su impecable labor y compromiso en el apoyo de traducción de artículos; para Karina Leiva por el permanente apoyo en las tareas de soporte informático de la plataforma OJS y marcaciones de nuestros artículos, y para la Arq. María Paz Cid, quien se sumó en el último periodo al equipo HS como apoyo editorial, por su colaboración y compromiso. Finalmente, y de manera muy especial, agradezco al Decano de la Facultad de Arquitectura, Arq. Roberto Burdiles, por su permanente apoyo a la Revista y a todo el equipo; apoyo que ha sido sustancial para conformar el equipo de Revistas FARCODI, ya sea facilitando el acceso a recursos como abriendo el espacio para la gestión e instalación del proyecto editorial de nuestra Facultad.

Por último, cierro esta columna deseándole el mejor de los éxitos a los nuevos jefes editores, al equipo que los acompañará en este nuevo periodo, esperando que HS continúe proyectándose y contribuyendo al conocimiento desde la investigación en ámbitos tan relevantes para las disciplinas del Diseño y Construcción del ambiente construido, de la mano de la sustentabilidad ambiental y social, dimensiones urgentes de abordar transversalmente.

EDITORIAL

I am pleased to present the latest edition of Revista Hábitat Sustentable V12N2, supported by the Faculty of Architecture, Construction, and Design, whose valuable and rich repertoire of articles collaborates with research on sustainability in the built environment, on different scales. Through significant contributions to the discussion on areas of the circular economy of material resources and the life cycle of buildings, the resilience of cities and buildings against climate change, environmental comfort, habitability, urban mobility, and light sufficiency, authors from Latin America (Panama, Colombia, Brazil, Bolivia, Argentina, and Chile) share their proposals here.

This edition is an especially emotional issue since, after eight years in charge of the Direction and Edition of Revista HS, it is time to draw a close to this cycle. I culminate this valuable work, which has been full of lessons learned, challenges, and important achievements for our journal, accompanied by an excellent team of people and professionals with whom we managed to achieve important indexations for HS, which today is in the SCOPUS, SciELO, ERIHPLUS, and WOS EMERGING SOURCES CITATION INDEX catalogs, among others.

From March 2023, a new stage begins for HS that, without a doubt, will be full of successes and achievements, in the hands of its Editors-in-Chief: Maureen Trebilcock Ph.D., founder of the journal, and Alexis Pérez Ph.D.; both outstanding academics and researchers from the Faculty of Architecture, Construction, and Design, who, through their experience and vision, will continue to consolidate the quality of HS, positioning it in the most important international indexations and giving it visibility.

For my part, I want to express my gratitude to the valuable team that accompanied me professionally in this crusade. First of all, to Jocelyn Vidal MEng, in charge of Editorial Coordination, for her commitment and permanent willingness to learn and collaborate; to Olga Ostria Ph.D. for her tremendous professionalism in supporting the Style Correction, especially in the intense editorial periods. The same recognition goes out to Ignacio Sáez M.Arch, for making his design talents available during those demanding releases, especially at the end of each year. My thanks also go to Kevin Wright, for his impeccable work and commitment to the translation of the articles; to Karina Leiva for her permanent IT support with the OJS platform and in tagging our articles, and to María Paz Cid, who joined the HS team for recent editions as editorial support, for her collaboration and commitment. Finally, and most especially, I would like to thank the Dean of the Faculty of Architecture, Roberto Burdiles M.Arch, for his permanent support to the Journal and the entire team; support that has been the key to forming the FARCODI Journals team, either by facilitating access to resources or opening space for the incorporation and running of our Faculty's editorial project.

Finally, I close this column wishing the best of success to the new Editors-in-Chief, and to the team that will accompany them in this new period, hoping that HS will continue to grow and contribute to knowledge from research in areas that are so relevant for the Design and Construction of the built environment, hand in hand with environmental and social sustainability, urgent aspects to address transversally.

EDITORIAL

Tenho o prazer de apresentar a nova edição da Revista Hábitat Sustentable V12N2, realizada pela Faculdade de Arquitetura, Construção e Design, cujo valioso e rico repertório de artigos contribui a partir da pesquisa para a sustentabilidade no ambiente construído em diferentes escalas. Mediante contribuições significativas para a discussão nos campos da economia circular de recursos materiais e do ciclo de vida dos edifícios, da resiliência das cidades e edificações diante das mudanças climáticas, do conforto ambiental, da habitabilidade, da mobilidade urbana e da suficiência lumínica, autores e autoras da América Latina (Panamá, Colômbia, Brasil, Bolívia, Argentina e Chile) compartilham aqui suas propostas.

Esta edição contém uma carga particularmente emotiva para mim, pois após oito anos como responsável pela Direção e Edição da HS Magazine, chegou o momento de encerrar este ciclo. Concluo este valioso trabalho, que esteve pleno de aprendizados, desafios e conquistas importantes para nossa revista, acompanhado por uma excelente equipe de pessoas e profissionais com os quais conseguimos obter indexações relevantes para a HS, que agora está nos catálogos SCOPUS, SCiELO, ERIHPLUS e WOS EMERGING SOURCES CITATION INDEX, entre outros.

A partir de março de 2023 começa uma nova etapa para a HS que sem dúvida estará repleta de sucessos e conquistas, sob a liderança de seus novos editores-chefe: a Dra. Maureen Trebilcock, fundadora da revista, e o Dr. Alexis Pérez; ambos acadêmicos e pesquisadores de destaque da Faculdade de Arquitetura, Construção e Design, que, a partir de sua experiência e visão, continuarão a consolidar a qualidade da HS até posicioná-la nas mais altas indexações e visibilidades internacionais.

Pela minha parte, gostaria de expressar minha gratidão à valiosa equipe que me acompanhou profissionalmente nesta cruzada, principalmente, à Eng. Jocelyn Vidal, responsável pela Coordenação Editorial, por seu empenho e permanente disposição para aprender e colaborar; à Dra. Olga Ostria por seu tremendo profissionalismo no apoio na Correção de Estilo, sobretudo enfrentando os intensos tempos editoriais. O mesmo vale para o Arquiteto Ignacio Sáez, por disponibilizar seu talento e seu trabalho de diagramação nos momentos exigentes de fechamento editorial, especialmente aqueles do encerramento de cada ano. Meus agradecimentos também a Kevin Wright por seu trabalho impecável e seu compromisso com a tradução de artigos; a Karina Leiva por seu apoio permanente nas tarefas de suporte informático da plataforma OJS e na marcação de nossos artigos, e à Arquitecta María Paz Cid, que se uniu à equipe HS no último período como suporte editorial, por sua colaboração e compromisso. Finalmente, e de modo muito especial, gostaria de agradecer ao Decano da Faculdade de Arquitetura, Arquiteto Roberto Burdiles, por seu apoio permanente à Revista e a toda a equipe; apoio que foi substancial na formação da equipe da Revista FARCODI, tanto facilitando o acesso aos recursos como abrindo o espaço para a gestão e instalação do projeto editorial de nossa Faculdade.

Finalmente, encerro esta coluna desejando o pleno sucesso aos novos editores-chefes, à equipe que os acompanhará neste novo período, esperando que a HS continue a projetar e contribuir para o conhecimento a partir da pesquisa em áreas tão relevantes para as disciplinas de Design e Construção do ambiente construído, lado a lado com a sustentabilidade ambiental e social, dimensões urgentes que devem ser abordadas transversalmente.

Claudia Muñoz Sanguinetti
Doctora en Arquitectura y Urbanismo
Profesora Asociada Dpto. Ciencias de la construcción
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-4859-478X>
clmunoz@ubiobio.cl



INDICADORES DE RESILIENCIA Y SOSTENIBILIDAD PARA LA VIVIENDA URBANA PANAMEÑA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

RESILIENCE AND SUSTAINABILITY INDICATORS FOR PANAMANIAN URBAN HOUSING IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE

INDICADORES DE RESILIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE PARA A HABITAÇÃO URBANA PANAMENHA DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Michelle Alina Ruíz González

Ingeniera Civil
Investigadora en el Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
<https://orcid.org/0000-0003-1224-3117>
michelle.ruiz@utp.ac.pa

Yazmin Lisbeth Mack-Vergara

Doctora en Ciencias
Investigadora y Docente Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
<https://orcid.org/0000-0002-1313-9234>
yazmin.mack@utp.ac.pa



RESUMEN

En las últimas décadas, los centros urbanos han enfrentado enormes desafíos, como el aumento de desastres naturales y la imposibilidad de recuperarse de los mismos. En este contexto, el objetivo de esta investigación es proponer indicadores de resiliencia y sostenibilidad para la vivienda urbana panameña en función de los efectos del cambio climático, a través de un extenso análisis sobre la vulnerabilidad del país. Mediante procesos cualitativos fue posible caracterizar una vivienda resiliente y sostenible validada por profesionales nacionales e internacionales para el desarrollo de una propuesta de 29 indicadores que responden a los impactos actuales y futuros producidos por cambio climático: 15 para resiliencia y 14 para sostenibilidad. En este sentido, se logró elaborar una herramienta útil y sencilla para evaluar la resiliencia y sostenibilidad de la vivienda urbana.

Palabras clave

cambio climático, vivienda, desarrollo sostenible, resiliencia

ABSTRACT

In recent decades, urban centers have been facing enormous challenges with the increase in natural disasters, and the impossibility of recovering from them. In this context, the objective of this research is to propose resilience and sustainability indicators for Panamanian urban housing by considering the effects of climate change through an extensive analysis of the country's vulnerability. Using qualitative processes, validated by national and international professionals, it was possible to characterize resilient and sustainable housing and develop a proposal of 29 indicators that respond to current and future climate change-related impacts: 15 for resilience and 14 for sustainability. Thus, building a simple useful tool to evaluate the resilience and sustainability of urban housing.

Keywords

climate change, housing, sustainable development, resilience

RESUMO

Nas últimas décadas, os centros urbanos têm enfrentado enormes desafios como o aumento das catástrofes naturais e a impossibilidade de recuperação dos estragos causados por estas. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é propor indicadores de resiliência e sustentabilidade para a habitação urbana panamenha em função dos efeitos das alterações climáticas mediante uma análise extensiva da vulnerabilidade do país. Esta informação foi analisada por meio de processos qualitativos que permitiram caracterizar uma habitação resiliente e sustentável validada por profissionais nacionais e internacionais. Isto permitiu desenvolver uma proposta de 29 indicadores que respondem aos impactos atuais e futuros das alterações climáticas: 15 para a resiliência e 14 para a sustentabilidade. Neste sentido, obteve-se um instrumento útil e simples para avaliar a resiliência e a sustentabilidade da habitação urbana.

Keywords

mudanças climáticas, habitação, desenvolvimento sustentável, resiliência.

INTRODUCCIÓN

Las ciudades han jugado un papel decisivo en el sostenimiento y la conformación de las principales civilizaciones del planeta desde la antigüedad. Por ello es que a lo largo de la historia ha existido una permanente preocupación por crear y desarrollar ciudades prósperas y sostenibles en el tiempo (Fenollós, 2022). Así lo demuestran recientes estudios que han desarrollado los ideales de las ciudades resilientes y sostenibles: City Resilience Program (World Bank, 2020), City Resilience Index (ARUP y The Rockefeller Foundation, 2014), Resilient Cities and Communities (McCarton, O'Hogain y Reid, 2021), Urban surface uses for climate Resilient and Sustainable Cities: A catalogue of solutions (Croce y Vettorato, 2021), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Organización de las Naciones Unidas, 2018), Estrategia de resiliencia para la ciudad de Panamá (Municipio de Panamá, 2019) y el Programa Ciudades Emergentes y Sostenibles (Banco Interamericano de Desarrollo, 2022).

En este marco, el mundo enfrenta hoy problemáticas sin precedentes, como la planificación deficiente, la contaminación, el aumento de la vulnerabilidad a los desastres y el cambio climático (Aguilar, 2020). El crecimiento poblacional y de las ciudades pareciera no detenerse (Vaca y Cartuche, 2018) y los desafíos, ideas y oportunidades se concentran y demandan soluciones sustentables, justas y democráticas (Lima *et al.*, 2020).

No obstante, las ciudades son también fuente de invenciones, desarrollo de nuevas tecnologías y difusión de conocimientos (Fenollós, 2022), donde la conciencia sobre los recursos, el uso eficiente de estos y la conservación de los ecosistemas, se ha vuelto indispensable (Murillo, 2021). Desde esa perspectiva, se cuenta con la posibilidad de encabezar un cambio que incorpore medidas de adaptación y mitigación del cambio climático en las ciudades, desde su unidad esencial, la vivienda (Cobo y Montoya, 2021). De esta manera, se podrá reducir la exposición al riesgo y vulnerabilidad climática, a través de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mejora en la gestión de residuos, producción de energía limpia y disminución de la huella de carbono (Sodiq *et al.*, 2019), a fin de que las dimensiones urbanas establecidas evolucionen en congruencia con las dinámicas que experimentan (Valdez, 2021).

Sin embargo, antes de identificar las causas y efectos del cambio climático, se debe clarificar qué se entiende aquí por dicho cambio climático. En el año 1992, la urgencia por adoptar medidas internacionales más contundentes respecto al medio ambiente, toma impulso y queda de manifiesto a través de un consenso mundial sobre cooperación en materia de desarrollo y medio ambiente en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Es en su Artículo 1 que se define

el cambio climático como: "cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables" (Naciones Unidas, p. 3-4, 1992).

En base a esa definición, se ha evidenciado cómo el conjunto de sustancias y procesos naturales y antropógenos han alterado la Tierra (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2018), de tal forma que, desde el siglo XIX, constituye un problema crucial en el que las actividades antropogénicas humanas, producto del crecimiento económico y demográfico, son de las más considerables (Mehmood *et al.*, 2020; Bastidas Pacheco & Hernández, 2019). En efecto, aunque el aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera es un proceso natural, en los últimos años ha alcanzado niveles sin parangón (IPCC, 2018).

Más concretamente, el "Estudio de la urbanización en Centroamérica: Oportunidades de una Centroamérica urbana" (María, Acero, Aguilera y García Lozano, 2018) indica que, en Centroamérica, el 59% de la población habita en zonas urbanas y espera que, en la próxima generación, 7 de cada 10 personas vivan en ciudades. El proceso de urbanización de Panamá resultó de la migración interna de miles de personas desde las zonas rurales hacia las cabeceras de provincias o áreas cercanas a la capital en busca de oportunidades de trabajo, educación y salud, de modo que para el periodo de 1950 al 2000 la población en el área urbana aumentó un 26% (Instituto Nacional de Estadística y Censo [INEC], 2020). Ello presenta distintos retos en las regiones en desarrollo donde existe una capacidad limitada para darles respuesta (Quintana Solórzano, 2017).

Asimismo, las Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2020) han identificado a Panamá como un país con alta vulnerabilidad ante el cambio climático, dada su posición geográfica, que evidencia efectos como: aumento del nivel del mar, incremento de la temperatura, variaciones en las precipitaciones y aumento en la ocurrencia de desastres naturales (inundaciones, vientos extremos y deslizamientos de tierra). Esta vulnerabilidad se reconoce como un desafío a nivel global para áreas urbanas en zonas costeras frente al que se deben tomar acciones (Villamil-Cárdenas y Osuna-Motta, 2021).

A su vez, estas Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2020) han trazado los escenarios a futuros del país, siguiendo los lineamientos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2018) que pronostican la agudización de los efectos, al tiempo que señalan la variación de estos por región. Por lo anterior, las medidas deberán responder a las necesidades de cada zona,

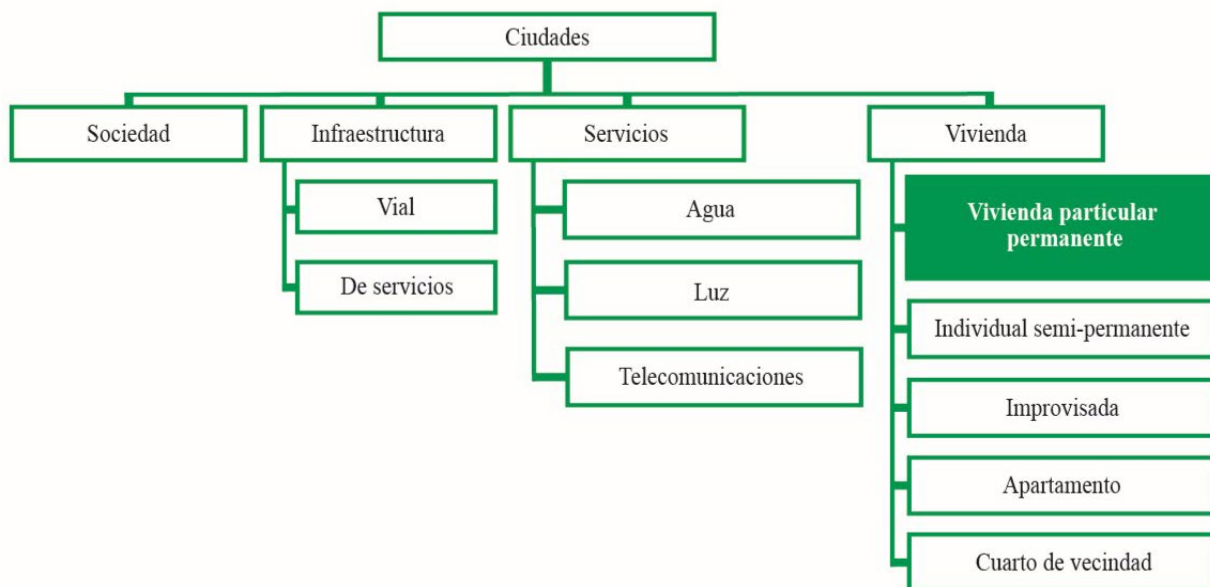


Figura 1. Componentes de una ciudad según el Censo de Panamá de 2010. Fuente: Elaboración de las autoras.

particularmente en términos de vivienda, tema central de esta investigación.

Así, surge la necesidad de contar con herramientas que permitan la evaluación y monitoreo del desempeño de la vivienda, pero que también identifiquen el perfil de la vivienda en términos de resiliencia y sostenibilidad (Adamec, Janoušková y Hák, 2021; Koch y Ahmad, 2018). Se releva, por lo tanto, la importancia de contar con indicadores que permitan encapsular una realidad compleja a través de la medición de las condiciones relacionadas o partes componentes de las características de las viviendas. Ahora bien, es necesario que su aplicación sea rápida y las interpretaciones sean simples, tanto para los tomadores de decisiones como para la sociedad en general (Rivero-Camacho y Ferreira-Sanchez, 2021).

Esta investigación orientó sus esfuerzos a proponer un conjunto de indicadores de resiliencia y sostenibilidad para la vivienda urbana panameña en función de los efectos del cambio climático. El desarrollo de indicadores constituye una piedra angular de evaluación cuantitativa (Mercader, Camporeale y Cózar-Cózar, 2019), como herramienta de información valiosa para conocer el estado actual, en tanto permite generar evidencias en los procesos de decisión y monitoreo de un determinado proceso y evaluar su progreso, ya sea en relación con ciertas metas, cuando estas existen, o con respecto a los niveles observados en un año base (Karis et al., 2019). Se convierte, ciertamente, en un instrumento robusto, práctico y de fácil manejo (González Vallejo, 2018)

cuando se trata de abordar procesos de verificación estandarizados respecto a resiliencia y sostenibilidad en obras de construcción (Canales Valderrama-Ulloa y Ferrada, 2021; Chavez, Trebilcock y Piderit, 2021), que generen información para respaldar cambios en políticas medioambientales hacia un desarrollo sostenible.

METODOLOGÍA

Esta investigación de carácter cualitativo recabó información relevante del cambio climático en el contexto nacional actual y futuro, con miras a lograr una perspectiva más amplia y profunda que permitiera contextualizar la realidad de la vivienda panameña y las viviendas resilientes y sostenibles, de manera de desarrollar una propuesta de indicadores para medir la resiliencia y sostenibilidad de la vivienda en zonas urbanas de Panamá frente al cambio climático. Paralelamente, se realizaron estudios de caso para la evaluación de la manejabilidad de los indicadores propuestos.

UNIDAD DE ESTUDIO

Se abarcaron las consideradas “zonas urbanas” según el INEC (2020), esto es, toda región con una población de por lo menos 1.500 habitantes que cuente con sistemas de servicios básicos. El estudio se enfocó exclusivamente en la vivienda particular permanente, pues según datos del Censo de Vivienda del 2010 (INEC, 2020), correspondía al tipo de vivienda más común y fundamental de la estructura de las ciudades en Panamá (Figura 1).

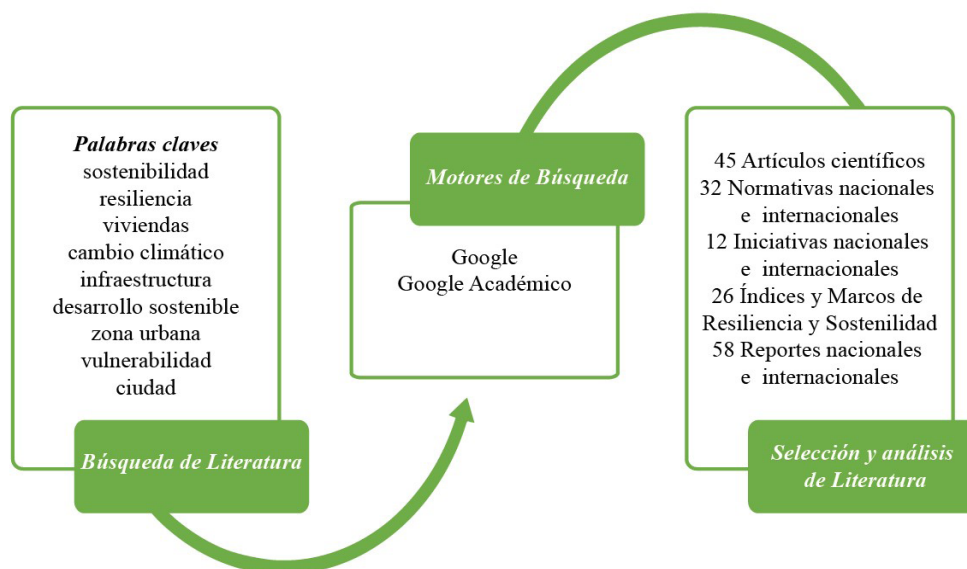


Figura 2. Proceso de revisión de la literatura especializada. Fuente: Elaboración de las autoras.

REVISIÓN DE LITERATURA ESPECIALIZADA

Se realizó una extensa revisión bibliográfica que incluyó documentos nacionales e internacionales, libros, artículos científicos, leyes y normas vigentes, para la cual se utilizó Google Académico como buscador de literatura científico-académica, ya que recaba la mayoría de las publicaciones científicas, y Google como buscador de literatura general. Las palabras claves para la búsqueda de documentos, empleadas en distintas combinaciones, en español e inglés, fueron: sostenibilidad, resiliencia, viviendas, cambio climático, infraestructura, desarrollo sostenible, zona urbana, vulnerabilidad y ciudad.

A partir de lo anterior, se determinaron los antecedentes respectivos a nivel regional y nacional: historia, desarrollo, situación actual y futura, así como las definiciones de cambio climático desde sus inicios, en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Naciones Unidas, 1992), hasta la más reconocida, promulgada por el Panel Intergubernamental (IPCC, 2018). Y bajo este concepto, se identificaron sus causas y efectos a través de diversos informes, artículos y demás documentos.

De esa manera, se llevó a cabo la selección de marcos, artículos científicos e iniciativas de gobiernos que servirían como guías de evaluación y medición del grado en que la vivienda cumple con condiciones de resiliencia y sostenibilidad; **términos que**, a su vez, se definieron y establecieron para el contexto de la investigación. Esta revisión de literatura especializada generó basta información para analizar y discutir (Figura 2), posteriormente codificar y agrupar sistemáticamente. Se conformó, en definitiva, la base del desarrollo de la

propuesta de indicadores de resiliencia y sostenibilidad para la vivienda urbana panameña frente al cambio climático.

ANÁLISIS CUALITATIVO

El análisis cualitativo se utilizó para profundizar, contextualizar y exponer datos e información sobre la vulnerabilidad de vivienda y personas, tras la identificación de las causas del cambio climático y sus efectos actuales y futuros en Panamá. Se trató de un proceso en cadena que sirvió para delimitar los marcos, artículos y documentos que apoyaron el desarrollo de la propuesta de indicadores de la vivienda resiliente y sostenible para la medición y monitoreo del nivel de servicio, calidad, confort y desempeño de la vivienda en zonas urbanas de Panamá. Asimismo, permitió precisar las herramientas con las que se cuentan a nivel nacional e internacional para su aplicación.

Se desarrolló, seguidamente, la citada propuesta para la vivienda urbana panameña en función de características consideradas y validadas por medio de un cuestionario de tipo abierto y de juicio, que incluyó variables sociodemográficas (Tabla 1), tales como: nacionalidad, área de estudio, área de trabajo y experiencia. La muestra utilizada fue de carácter cualitativa no probabilística, pues recayó en un selecto grupo de expertos nacionales e internacionales, quienes, de manera *online*, por medio de la herramienta Microsoft Forms y a través de correo electrónico durante un periodo de un mes (1 de agosto de 2021 a 31 de agosto de 2021), evaluaron la representatividad de esta ante las necesidades del país en materia de vivienda frente a los efectos del cambio climático.

ENCUESTADOS	PAÍS	ÁREA DE ESTUDIO			ÁREA DE TRABAJO			CARGO				INSTITUCIÓN	AÑOS DE EXPERIENCIA
		Ingeniería	Arquitectura	Especialización	Academia	Industria	Otros	Investigador	Docente	Administrativo	Otro		
A	Panamá	x		Ingeniería Estructural	X			x	x			Universidad Tecnológica de Panamá	25
B	Panamá	x		Ciencias Ambientales	X			x				Universidad Tecnológica de Panamá	35
C	Panamá	x		Ingeniería Civil e Ingeniería Geotecnia		x					x	Empresa Privada	14
D	Colombia	x		Cemento y Materiales de construcción	X			x				Universidad Nacional de Colombia	29
E	Panamá	x		Construcción	X				x			Universidad Tecnológica de Panamá	25
F	Panamá	x		Ciencias Ambientales	X				x			Universidad Tecnológica de Panamá	35
G	Panamá	x		Ingeniería Civil		x					x	Empresa Privada	12
H	Panamá	x		Administración de proyectos		x					x	Empresa Privada	11
I	Panamá	x		Sanitaria y Ciencias Ambientales	x				x			Universidad Tecnológica de Panamá	26
J	Panamá	x		Ingeniería Geotecnia	x					x		Universidad Tecnológica de Panamá	26
K	Panamá	x		Ingeniería Civil	x		x		x	x		Universidad Tecnológica de Panamá	45
L	Brasil		x	Ingeniería Civil, Sostenibilidad.	x			x	x			Universidad de la Integración Latino-americana	18
M	Panamá	x		Ingeniería Estructural		x				x		Universidad Tecnológica de Panamá	15
N	Panamá	x		Construcción	x		x	x	x	x	x	Universidad Tecnológica de Panamá	45
Ñ	Panamá	x		Gestión del agua	x			x	x			Universidad Tecnológica de Panamá	4
O	Rusia	x		Construcción Sostenible	x			x				ETH Zúrich	4
P	Alemania	x		Cemento, Aditivos y Construcción sostenible	x			x				BAM Federal Institute of Material Research	16
Q	Brasil	x		Materiales y técnicas de construcción	x			x				Universidad de Sao Paulo	20
R	Brasil	x		Ecología Industrial	x				x			Universidad de Sao Paulo	20

Tabla 1. Perfil de la muestra de expertos. Fuente: Elaboración de las autoras a partir de los datos de la encuesta.



Figura 3. Proceso de análisis de la literatura para el desarrollo de los indicadores de resiliencia. Fuente: Elaboración de las autoras.

En concreto, los indicadores pretenden evaluar y monitorear el grado en que la vivienda cumple con características de resiliencia y sostenibilidad, a través de un cuestionario de valoración que obedece a cada uno de los indicadores de tipo objetivo propuestos. Estos responden a una evaluación binaria, a una de rangos limitados y/o a una combinación de ambas. Se entiende por escala binaria a aquella que se basa en una pregunta que es contestada con un "sí" o un "no", de la cual se obtiene una ponderación de uno o cero, respectivamente. Mientras, los rangos limitados describen escenarios específicos que resaltan los mejores y peores escenarios, asignando puntajes a cada uno y pide a los/as participantes que elijan qué escenario describe mejor la situación actual. Por consiguiente, la valoración del cuestionario ha sido catalogada con valores numéricos para clasificar a la vivienda según sus características.

Estos indicadores fueron validados a través de casos de estudio con la finalidad de evaluar la facilidad y competencia de su uso. Para ello, toda la información fue ubicada en Internet y sirvió para contestar las preguntas de cumplimiento de los indicadores de resiliencia y sostenibilidad (Tabla 2 y Tabla 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de una exhaustiva investigación de diversos marcos, índices y herramientas de medición de resiliencia y sostenibilidad aplicables a viviendas, se propusieron 29 indicadores capaces de responder a los impactos actuales y futuros de Panamá ante el cambio climático, de entre los cuales 15 atienden a temas de resiliencia y 14, a factores de

sostenibilidad. A continuación, se detallan los indicadores propuestos.

INDICADORES DE RESILIENCIA

El marco de indicadores básicos de resiliencia para vivienda fue seleccionado con base en el City Water Resilience Framework (Stockholm International, Water Institute The Rockefeller Foundation, The Resilience Shift y ARUP, 2019), City Resilience Profiling Tool (United Nations Human Settlements Programme, 2018), City Resilient Index (ARUP y The Rockefeller Foundation, 2014) y una serie de artículos científicos e iniciativas de gobiernos que propusieron guías para elevar infraestructuras comunes a resilientes (Figura 3).

Cabe resaltar que estos indicadores contemplaron los principales efectos a considerar a futuro en relación al cambio climático, descritos anteriormente. Así, en la Tabla 2 se exponen los indicadores de resiliencia a aplicar en viviendas de Panamá.

INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD

En este punto, se empleó herramientas que dictan métricas de sostenibilidad para la industria de la construcción como el Sustainable Infrastructure Framework Guidance Manual (Institute for Sustainable Infrastructure, 2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2018) (Figura 4). Se obtuvo un conjunto de indicadores que contemplan los efectos a futuro del cambio climático.

Uso del suelo y zonificación	¿Se ubica la vivienda en un sitio que cuenta con uso de suelo y zonificación establecida?		
	No se consideró o sin información.	No existe un POT en la zona, pero se utilizó el Reglamento Nacional de Urbanizaciones	Existe un POT en la zona y utilizó el Reglamento Nacional de Urbanizaciones.
	0	1	2
Ubicación con respecto a zonas de riesgo de inundación, fuertes vientos o deslizamiento de tierra	¿Se cuenta con datos locales detallados en estudios de modelado y/o cartografía con información de riesgo?		
	No existen datos recopilados y/o actualizados o sin información.	Datos no actualizados, validados y/o con cobertura parcial del sitio.	Los datos están actualizados, validados y cubren todo el sitio.
	0	1	2
	¿Se cuenta con datos sobre la frecuencia de inundación en la zona de la vivienda?		
	No existen datos recopilados y/o actualizados o sin información.	Los datos no actualizados, validados y/o cubren parcialmente el sitio.	Los datos están actualizados, validados y cubren todo el sitio.
	0	1	2
	¿Se cuenta con datos sobre la frecuencia de deslizamientos de tierra en la zona de la vivienda?		
	No existen datos recopilados y/o actualizados o sin información.	Los datos no actualizados, validados y/o cubren parcialmente el sitio.	Los datos están actualizados, validados y cubren todo el sitio.
	0	1	2
	¿Se cuenta con datos sobre la frecuencia de fuertes vientos en la zona de la vivienda?		
	No existen datos recopilados y/o actualizados o sin información.	Los datos no actualizados, validados y/o cubren parcialmente el sitio.	Los datos están actualizados, validados y cubren todo el sitio.
	0	1	2
Características de códigos y normas de construcción con respecto a la resiliencia	Número de acuerdos intergubernamentales dedicados al diseño o planificación resiliente utilizados		
	No existen acuerdos dedicados al diseño o planificación resiliente o sin información.	Existen al menos un acuerdo, pero no se utilizaron en su totalidad	Existen varios acuerdos dedicados al diseño o planificación resiliente y se utilizaron
	0	1	2
Aplicación de los códigos y normas de construcción	¿La vivienda cuenta con planos diseñados y ejecutados por profesionales idóneos?		
	No se cuenta con planos, la vivienda se construyó empíricamente o sin información.	Se cuenta con planos, mas no con los permisos necesarios.	Se cuenta con planos y los permisos necesarios.
	0	1	2

Características de la cimentación	¿Si la vivienda está ubicada en zona de riesgo de inundación, posee cimentación elevada?		
	Está en zona de riesgo, pero no tiene cimentación elevada o sin información.	No está en zona de riesgo.	Está en zona de riesgo y tiene cimentación elevada
	0	1	2
	¿Se cuenta con datos sobre la frecuencia de fuertes vientos en la zona de la vivienda?		
	No existen datos recopilados, actualizados y sistematizados o sin información.	Los datos están actualizados, pero no cubren todo el sitio.	Los datos están actualizados, validados y cubren todo el sitio.
	0	1	2
	Porcentaje de losas, zapatas y cimentaciones protegidas de erosión		
	0% del total o sin información	50% del total	100% del total
	0	1	2
	Accesibilidad y capacidad de evacuación	Número de entradas/salidas en la vivienda	
1 entrada		2 entradas	Más de 3 entradas
0		1	2
¿Se ha empleado características de accesibilidad adecuadas para satisfacer estas necesidades (por ejemplo, características de acceso adecuadas como rampas para todos los usuarios con restricciones de movilidad, entre otras)?			
No se han implementado ninguna característica o sin información		Se han implementado algunas características	Se han implementado varias características
0		1	2
Adaptabilidad a efectos del cambio climático	Porcentaje de revestimientos resistentes al agua		
	0% del total o sin información	50% del total	100% del total
	0	1	2
	Porcentaje del área permeables del espacio construido con materiales porosos y drenantes como porcentaje del área total de terreno de la vivienda		
	0% del total o sin información	50% del total	100% del total
	0	1	2
	Subtotal		
	Porcentaje de equipamiento resistente al agua (puertas y ventanas)		
	0% del total o sin información	50% del total	100% del total
	0	1	2
¿El diseño contempla carga de viento según lo establecido por el REP 2014?			
No	Sí		
0	1		

Energía de respaldo frente a inundaciones y/o fuertes vientos	Porcentaje de energía de respaldo proveniente de fuentes renovables		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
	Número de fuentes de electricidad que proporcionan al menos el 5% de la capacidad total de suministro de energía		
	1 fuente	2 fuentes	Más de 3 fuentes
Capacidad de recuperación del sistema energético frente a inundaciones y/o fuertes vientos	Porcentaje de instalaciones de circuitos separados (con disyuntores)		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
	Porcentaje de instalaciones eléctricas elevadas en el 50% de nivel del suelo		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
Agua de respaldo frente a inundaciones y/o fuertes vientos	Número de fuentes que proporcionan al menos el 5% de la capacidad total de suministro de agua		
	1 fuente	2 fuentes	Más de 3 fuentes
	0	1	2
	Porcentaje de uso de agua procedente del reciclaje de agua		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
Capacidad de recuperación del sistema hídrico frente a inundaciones y/o fuertes vientos	Capacidad de reserva de agua de la vivienda		
	0% del total a utilizar	Hasta el 50% del total a utilizar	Hasta el 100% del total a utilizar
	0	1	2
Confort térmico	¿Existen funciones de sombreado externo que minimicen el sobrecalentamiento de la ganancia solar?		
	No	Sí	
	0	1	
	Porcentaje de la superficie total cubierta por copas de árboles		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
	Porcentaje de la superficie de la vivienda cubierta con materiales de alto albedo que contribuyen a la mitigación de las islas de calor urbanas		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
Áreas permeables	Índice de reflectancia solar (SRI, por sus siglas en inglés) de la vivienda.		
	No se consideró o sin información	0.30 < SRI < 0.60	0.61 < SRI < 1.00
	0	1	2
Áreas permeables	Porcentaje del área verde del total de terreno de la vivienda		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2

Eficiencia de los materiales a inundaciones y fuertes vientos.	Porcentaje de superficie impermeabilizada del total de la vivienda		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
	Porcentaje de materiales resistentes al agua utilizados en la construcción		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
	Porcentaje de equipamiento/mobiliario (puertas, ventanas) doblemente asegurado con respecto al total		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
Manual de la vivienda	Se desarrolla y facilita información detallada de la vivienda: planos, materiales, especificaciones del diseño y mantenimiento		
	No se cuenta con ningún tipo de información sobre la construcción de la vivienda	Se cuenta con los planos y ciertos materiales utilizados para la construcción de la vivienda	Se cuenta con información detallada sobre la construcción y mantenimiento de la vivienda
	0	1	2

Tabla 2. Indicadores de resiliencia relacionados a la vivienda. Fuente: Elaboración de las autoras.



Figura 4. Proceso de análisis de la literatura especializada para el desarrollo de los indicadores de sostenibilidad. Fuente: Elaboración de las autoras.

Selección del sitio	¿La vivienda se ubica en terreno con por lo menos el 75% previamente desarrollado?		
	No se consideró o sin información	Se ubica en un terreno con menos del 75% desarrollado	Se ubica en un terreno con más del 75% desarrollado
	0	1	2
Reducción del consumo de agua	¿Se redujo el consumo total de agua en interiores y exteriores en al menos un 20% con respecto a las prácticas estándar?		
	No se consideró o sin información	Se redujo menos del 20%.	Se redujo más del 20%.
	0	1	2
	Porcentaje de grifos que cuenta con certificación WaterSense o equivalente		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
Uso de fuentes alternas de agua	Porcentaje de agua reciclada in situ gasto total de agua de la vivienda		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
	Porcentaje de agua lluvia recogida en relación con el gasto total de agua de la vivienda		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
Monitoreo del uso de agua	¿Se instaló un medidor para toda la vivienda?		
	No	Sí	
	0	1	
Prácticas, diseño y características de eficiencia energética	Porcentaje de reducción por debajo del presupuesto de energía inicial		
	0% del total o sin información	Hasta el 10% del total	Hasta el 20% del total
	0	1	2
Adopción de energías renovables	Porcentaje de energía total derivada de fuentes renovables, como porcentaje del consumo total de energía		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
Monitoreo del uso de energía	¿Se instaló un medidor para toda la vivienda?		
	No	Sí	
	0	1	
Reducción del efecto de isla de calor	Porcentaje del área con cubierta verde		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
	¿Se proporciona sombra sobre un porcentaje del área de superficie de fachadas y sobre el área de techo?		
	No	Sí	
0	1		

Ventilación	Concentración de partículas finas (PM2.5)		
	No se consideró, sin información o promedio diario de mayor a 75 µg/m3	Promedio diario de hasta 75 µg/m3	Promedio diario menor a 50 µg/m3
	0	1	2
	Concentración de material particulado (PM10)		
	No se consideró, sin información o promedio diario de mayor a 37.5 µg/m3	Promedio diario de hasta 37.5 µg/m3	Promedio diario menor a 25 µg/m3
	0	1	2
	Concentración de dióxido de azufre (SO2)		
	No se consideró, sin información o promedio diario de mayor a 50 µg/m3	Promedio diario de hasta 50 µg/m3	Promedio diario menor a 20 µg/m3
	0	1	2
	Concentración de ozono (O3)		
	No se consideró, sin información o promedio diario de mayor a 160 µg/m3	Promedio diario de hasta 160 µg/m3	Promedio diario menor a 100 µg/m3
	0	1	2
Iluminación	¿La iluminación interna está dividida en zonas para permitir el control de los ocupantes?		
	No	Sí	
	0	1	
	Factor de luz diurna promedio		
	No se consideró o sin información	Alcanza un factor de luz diurna del 1.5%	Alcanza un factor de luz diurna del 2.0%
0	1	2	
Calidad de los materiales	Porcentaje o número de proveedores primarios y secundarios que tienen certificación de abastecimiento/ adquisición/ gestión de sostenibilidad		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
Uso de materiales reciclados	Porcentaje de materiales del proyecto que se reutilizan o reciclan (plantas, suelo, roca y agua no están incluidos)		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
Disponibilidad de materiales de construcción	Porcentaje del total de materiales utilizados que provienen de fuentes locales		
	0% del total o sin información	Hasta el 50% del total	Hasta el 100% del total
	0	1	2
Análisis del ciclo de vida	¿Se analiza el ciclo de vida del cemento?		
	No	Sí	
	0	1	
	¿Se analiza el ciclo de vida del acero?		
	No	Sí	
0	1		

Tabla 3. Indicadores de sostenibilidad relacionados con la vivienda. Fuente: Elaboración de las autoras.



Figura 5. Esquema del proyecto A. Fuente: Elaboración de las autoras en base al esquema original del proyecto.

Figura 6. Esquema del proyecto B. Fuente: Elaboración de las autoras en base al esquema original del proyecto.

Clasificación	Puntos obtenidos en resiliencia	Puntos obtenidos en sostenibilidad
Bueno	42 a 62	26 a 38
Regular	21 a 41	13 a 25
Deficiente	0 a 20	0 a 12

Tabla 4. Clasificación de la vivienda panameña según sus características de resiliencia y sostenibilidad. Fuente: Elaboración de las autoras.

Siguiendo el objetivo de esta investigación, los indicadores de sostenibilidad (Tabla 3) pretenden establecer estándares que permitan la medición y el monitoreo del nivel de servicio, calidad, confort y desempeño en materia de sostenibilidad de la vivienda.

Siguiendo lo descrito en la metodología, estos indicadores hacen uso de evaluaciones binarias, de rangos limitados y/o combinación de estas. A la vez, siguen una tipología objetiva al estar basados en mediciones cuantitativas. No obstante, surgió la necesidad de llevar estos datos a valores numéricos útiles para la generación de un índice. De manera que, considerando cada una de las preguntas dentro de los indicadores, 62 puntos resultaron corresponder a resiliencia y 38, a sostenibilidad; parámetros que, al establecerse en categorías, permitieron clasificar a la vivienda según sus características (Tabla 4).

CASOS DE ESTUDIO

Con la finalidad de estimar la aplicabilidad y facilidad de uso de los indicadores propuestos, se seleccionaron

proyectos al azar y obtenidos desde internet para identificar su ponderación de resiliencia y sostenibilidad.

Proyecto a

El primer proyecto se ubica en La Chorrera, Panamá Oeste. Y el modelo seleccionado tiene un precio aproximado de B/. 80,000.00 y al menos 120m² de terreno, donde aproximadamente 70m² corresponden al área de construcción que se compone de dos habitaciones, un baño, sala-comedor, cocina, área de lavandería y un estacionamiento (Figura 5).

Proyecto b

El proyecto B se ubica en Arraiján, Panamá Oeste y se destaca por contar con una reserva forestal dentro del área de localización. El modelo seleccionado tiene un precio de B/. 120,000.00 y dispone de terrenos desde 200 m² donde el área de construcción abarca aproximadamente 120 m² repartidos en tres habitaciones, dos baños, sala-comedor, cocina, área de lavandería y dos estacionamientos (Figura 6).

Valorización de los proyectos

Al valorizar los proyectos seleccionados con los indicadores de resiliencia y sostenibilidad, el proyecto A obtuvo una puntuación total de 15 puntos, por lo que clasificó como una vivienda deficiente en términos de los señalados indicadores. Mientras, el proyecto B acumuló 23 puntos, registrándose como una vivienda deficiente en términos de resiliencia y regular en términos de sostenibilidad. A manera de resumen, la Tabla 5 presenta los puntos obtenidos en cada indicador.

Indicador	Puntuación		Comentarios
	Proyecto A	Proyecto B	
Indicadores de resiliencia			
Uso del suelo y zonificación	1	1	No existen Planes de Ordenamiento Territorial (POT) en las ubicaciones de los proyectos. Sin embargo, la promotora respetó la zonificación según las normativas.
Ubicación con respecto a zonas de riesgo de inundación, fuertes vientos o deslizamiento de tierra	0	0	No existe información sobre la frecuencia de eventos extremos en las zonas.
Características de códigos y normas de construcción con respecto a la resiliencia	0	0	Actualmente, no hay acuerdos sobre la resiliencia aplicada a viviendas.
Aplicación de los códigos y normas de construcción	2	2	Ambos proyectos cuentan con todos los permisos correspondientes y son ejecutados por personal idóneo.
Características de la cimentación	1	1	Según la información y ubicación recabada, las viviendas se encuentran fuera de zonas de riesgo de inundación.
Accesibilidad y capacidad de evacuación	1	1	Ninguno de los proyectos contempla características de inclusión, pero las viviendas poseen mínimo dos entradas.
Adaptabilidad a efectos del cambio climático	0	0	No brindan información sobre materiales o equipamiento resistente.
Energía de respaldo frente a inundaciones y/o fuertes vientos	0	0	No contemplan ningún tipo de energía renovable o alterna.
Capacidad de recuperación del sistema energético frente a inundaciones y/o fuertes vientos	0	0	No establecen ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Capacidad de agua de respaldo frente a inundaciones y/o fuertes vientos	1	0	El proyecto A cuenta con tanque de reserva de agua, mientras que el proyecto B no posee ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Capacidad de recuperación del sistema hídrico frente a inundaciones y/o fuertes vientos	1	0	El proyecto A cuenta con tanque de reserva de agua; el proyecto B no posee ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Confort térmico	2	0	El proyecto A dispone de aleros en todas las ventanas para evitar la entrada directa de los rayos solares durante las horas de mayor radiación. Además, incorpora el paisajismo de protección en la fachada exterior para bloquear el contacto directo de los rayos solares con la pared, lo que permite una temperatura más agradable. No obstante, el proyecto B no posee ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Áreas permeables	1	1	Inicialmente, ambos proyectos cuentan con terreno con áreas verdes, pero el seguimiento de este dependerá de los dueños. Igualmente, es importante destacar que el proyecto B cuenta con una reserva forestal dentro del área general del proyecto.
Eficiencia de los materiales a inundaciones y fuertes vientos.	0	0	No establecen ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Manual de la vivienda	1	1	Permiten visitas al proyecto y la explicación de los materiales, igualmente indican que están dispuestos a entregar copias de los planos de diseño.
Puntos totales de resiliencia	11	7	De acuerdo con la categorización establecida, ambos proyectos califican como Deficientes.

Indicadores de sostenibilidad			
Selección del sitio	2	2	Se ubican en terrenos con más del 75% desarrollado.
Reducción del consumo de agua	0	0	No establecen ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Uso de fuentes alternas de agua	0	0	No establecen ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Monitoreo del uso de agua	1	1	Consideran como medidor el otorgado por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN). Dicho medidor sólo mide flujo, mas no detecta fallas o fugas en el sistema.
Prácticas, diseño y características de eficiencia energética	1	0	El proyecto A intentó incorporar la eficiencia energética, aunque no se tiene un control establecido de la reducción del consumo eléctrico por el diseño utilizado. En cambio, el proyecto B no estableció ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Adopción de energías renovables	0	0	No definen ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Monitoreo del uso de energía	1	1	Consideran como medidor el otorgado por la empresa distribuidora de energía que sólo monitorea consumo.
Reducción del efecto de isla de calor	2	0	El proyecto A posee con aleros y paisajismo de protección en la fachada exterior para bloquear el contacto directo de los rayos solares. Además, cuenta con una reserva forestal en el área del proyecto. Mientras, el proyecto B no incorpora ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador
Ventilación	2	0	La vivienda del proyecto A incluye la ventilación cruzada alrededor de toda la vivienda para extraer el aire caliente. El Proyecto B no evidencia ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Iluminación	1	1	Ambos proyectos aseguran que sus viviendas cuentan con iluminación por áreas al alcance y control de todos. Sin embargo, el diseño del proyecto A contempló la orientación de la vivienda con respecto al recorrido solar anual.
Calidad de los materiales	1	1	Consideran utilizar concreto de empresas ambientalmente responsables.
Uso de materiales reciclados	0	0	No establecen ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Disponibilidad de materiales de construcción	2	2	Utilizan materiales nacionales en más del 50% de los casos.
Análisis del ciclo de vida	0	0	No definen ninguna estrategia para el cumplimiento de este indicador.
Puntos totales de sostenibilidad	13	8	De acuerdo con la categorización establecida, el proyecto A califica como Regular. Mientras que el Proyecto B califica como Deficiente.

Tabla 5. Valorización por indicador para proyectos del caso de estudio. Fuente: Elaboración de las autoras.

Como se pudo observar, ninguna de las viviendas cumple con todos indicadores de resiliencia y sostenibilidad. Sin embargo, los indicadores que se incumplieron pueden mejorar su puntuación, tal es el caso de la *Adopción de energías renovables*, que pudiera optimizarse con la incorporación de algún sistema de energía renovable como paneles solares, o bien, la *Reducción del consumo de agua*, mediante estrategias como incorporación de equipamiento eficiente. Cuando se trata de indicadores de resiliencia, se podría igualmente incorporar estrategias para aumentar la *Capacidad de respaldo y recuperación de la energía frente a inundaciones y/o fuertes vientos* a través de baterías de almacenamiento, o bien, la

Adaptabilidad a efectos del cambio climático en términos de equipamiento o futuras mejoras a la vivienda.

Cabe añadir que, en cuanto a la manejabilidad de los indicadores, se contempló una prueba de usabilidad que cuestionó la facilidad de aprendizaje, eficiencia de uso, facilidad de recordar cómo funcionan, verificación de errores y nivel de satisfacción. De este modo, los usuarios que aplicaron los indicadores para evaluar los casos de estudio, indicaron que fueron sencillos de usar, pues las preguntas-guías agilizan el proceso de puntuación. Asimismo, sugirieron que, de ser posible, la valorización sea aplicada por varios usuarios para así comparar, discutir y analizar la información y opiniones respecto a

las características que posee el proyecto y converger en la clasificación más real posible. Como herramienta de medición, esta es una buena base para verificar la capacidad de resiliencia y sostenibilidad de la vivienda panameña frente al riesgo presente y futuro del cambio climático. Además, facilita la identificación de las debilidades actuales, al tiempo que permite sugerir los cambios necesarios para robustecer la vivienda.

CONCLUSIONES

Por medio de la investigación, colecta y análisis de datos sobre el cambio climático y la evaluación de la vulnerabilidad en Panamá, se establecieron las bases que permitieron identificar las características de una vivienda resiliente y sostenible para zonas urbanas en Panamá frente al desafío del cambio climático.

Se priorizaron y establecieron 29 indicadores que responden a los impactos actuales y futuros de Panamá ante el cambio climático: 15 de resiliencia y 14 de sostenibilidad. En su conjunto, contemplaron los procesos de ciclo de vida de la vivienda, desde su planeación hasta su puesta en uso, para constituirse en herramientas útiles y sencillas de evaluación y verificación de resiliencia y sostenibilidad de la vivienda. Dichos instrumentos se aplicaron en dos casos de estudio de proyectos ofertados en el mercado inmobiliario panameño, cuyas puntuaciones resultaron, en definitiva, lejanas a un rango positivo: los proyectos ignoraban los efectos del cambio climático desde los aspectos fundamentales de ubicación y diseño, por lo que, si se situaran en zonas consideradas como riesgosas, no habría solución que corrigiera la vivienda.

Con todo, se pudo constatar que los indicadores, como herramienta de medición, constituyen una buena base para verificar la capacidad de resiliencia y sostenibilidad de la vivienda panameña frente al riesgo presente y futuro del cambio climático, a la vez que logran señalar los cambios necesarios para robustecer la vivienda a futuro.

Por consiguiente, los resultados de esta investigación promueven y facilitan un significativo avance en los esfuerzos del país en pro del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, como también permiten incorporar acciones sustentadas en la ciencia.

Se recomienda que las líneas de investigación a seguir deben ser complementadas en campos de economía y finanzas, planificación urbana, gestión ambiental y políticas públicas, de forma que se contribuya a la mejora de los sistemas de seguimiento para garantice la resiliencia y sostenibilidad económica, social y medioambiental de las propias áreas urbanas donde vivirá la mayor parte de la población en las próximas décadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamec, J., Janoušková, S. y Hák, T. (2021). How to Measure Sustainable Housing: A Proposal for an Indicator-Based Assessment Tool. *Sustainability*, 13(3), 1152. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031152>
- Aguilar, H. C. (2020). Vulnerabilidad y gestión del riesgo de desastres frente al cambio climático en Piura, Perú. *Semestre Económico*, 23(54), 85-112. DOI: <https://doi.org/10.22395/seec.v23n54a5>
- ARUP & The Rockefeller Foundation. (2014). *City Resilience Index*. Recuperado de <https://cityresilienceindex.org/#/>
- Banco Interamericano de Desarrollo (2022). *Programa Ciudades Emergentes y Sostenibles. Programa Ciudades Emergentes y Sostenibles (CES)*. Recuperado de <https://www.iadb.org/es/desarrollo-urbano-y-vivienda/programa-ciudades-emergentes-y-sostenibles>
- Bastidas Pacheco, G. A. y Hernández, R. (2019). Cambio climático algunos aspectos a considerar para la supervivencia del ser vivo: Revisión sistemática de la literatura. *Revista Cuidarte*, 10(3). DOI: <https://doi.org/10.15649/cuidarte.v10i3.664>
- Canales, P., Valderrama-Ulloa, C. y Ferrada, X. (2021). Hospitales sustentables: Partidas críticas para su construcción y el rol de la inspección técnica. *Hábitat Sustentable*, 11(2), 22-33. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.02.02>
- Chavez Finol, F., Trebilcock Kelly, M. y Piderit Moreno, M. B. (2021). Diseño de edificios de oficinas sustentables para promover ocupantes sustentables. *Hábitat Sustentable*, 11(2), 34-45. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.02.03>
- Cobo-Fray, C. y Montoya-Flórez, O. L. (2021). Tuhouse: Prototipo de vivienda social sostenible de alta densidad para el trópico. *Hábitat Sustentable*, 11(1), 32-43. <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.01.03>
- Croce, S. y Vettorato, D. (2021). Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: A catalogue of solutions. *Sustainable Cities and Society*, 75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103313>
- Fenollós, J. L. (2022). De Mari a Babilonia: Ciudades fortificadas en la antigua Mesopotamia. *Vínculos de Historia Revista del Departamento de Historia de la Universidad de Castilla-La Mancha*, 11, 15-32. DOI: https://doi.org/10.18239/vdh_2022.11.01
- González Vallejo, P. (2018). Herramienta para la predicción de costes económicos y ambientales en el ciclo de vida de edificios residenciales. Fase de construcción. *Hábitat Sustentable*, 8(2), 32-51. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.02.03>
- Institute for Sustainable Infrastructure (2018). *Sustainable Infrastructure Framework Guidance Manual*. Recuperado de <https://sustainableinfrastructure.org/envision>

Instituto Nacional de Estadística y Censo [INEC] (2020). *XI Censo Nacional de Población y VII de Vivienda 2010*. Recuperado de <https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default.aspx>

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Karis, C. M., Mujica, C. M., Ferraro, R., Karis, C. M., Mujica, C. M. y Ferraro, R. (2019). Indicadores ambientales y gestión urbana. Relaciones entre servicios ecosistémicos urbanos y sustentabilidad. *Cuaderno urbano*, 27(27), 9-30. DOI: <https://doi.org/10.30972/crn.27274117>

Koch, F. y Ahmad, S. (2018). How to Measure Progress Towards an Inclusive, Safe, Resilient and Sustainable City? Reflections on Applying the Indicators of Sustainable Development Goal 11 in Germany and India. En S. Kabisch, F. Koch, E. Gawel, A. Haase, S. Knapp, K. Krellenberg, J. Nivala y A. Zehndorf (Eds.), *Urban Transformations: Sustainable Urban Development Through Resource Efficiency, Quality of Life and Resilience* (pp. 77-90). Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-59324-1_5

Lima, E. G., Chinelli, C. K., Guedes, A. L. A., Vazquez, E. G., Hammad, A. W. A., Haddad, A. N. y Soares, C. A. P. (2020). Smart and Sustainable Cities: The Main Guidelines of City Statute for Increasing the Intelligence of Brazilian Cities. *Sustainability*, 12(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/su12031025>

María, A., Acero, J. L., Aguilera, A. I. y García Lozano, M. (2018). *Estudio de la urbanización en Centroamérica: Oportunidades de una Centroamérica urbana*. The World Bank. Recuperado de <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/26271/9781464812200.pdf?sequence>

McCarton, L., O'Hogain, S. y Reid, A. (2021). Resilient Cities and Communities. En L. McCarton, S. O'Hogain y A. Reid (Eds.), *The Worth of Water: Designing Climate Resilient Rainwater Harvesting Systems* (pp. 173-178). Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50605-6_10

Mehmood, I., Bari, A., Irshad, S., Khalid, F., Liaqat, S., Anjum, H. y Fahad, S. (2020). Carbon Cycle in Response to Global Warming. En S. Fahad, M. Hasanuzzaman, M. Alam, H. Ullah, M. Saeed, I. Ali Khan y M. Adnan (Eds.), *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth* (pp. 1-15). Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_1

Mercader, M., Camporeale, P. E. y Cózar-Cózar, E. (2019). Evaluación de impacto ambiental mediante la introducción de indicadores a un modelo BIM de vivienda social. *Hábitat Sustentable*, 9(2), 78-93. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.07>

Ministerio de Ambiente de Panamá. (2020). *Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). Recuperado de <https://fliphtml5.com/bookcase/iazya>

Municipio de Panamá (2019). *Estrategia de Resiliencia para la Ciudad de Panamá*. Recuperado de <https://resiliencia.mupa.gob.pa/estrategia-de-resiliencia-para-la-ciudad-de-panama/>

Murillo, J. (2021). Innovando las Ciudades del Futuro. *Revista Centroamericana de Administración Pública*, 80, 31-40.

Naciones Unidas (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Recuperado de <https://agenda2030lac.org/estadisticas/indicadores-priorizados-seguimiento-ods.html>

Naciones Unidas (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Recuperado de <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>

Quintana Solórzano, F. (2017). Dinámica, escalas y dimensiones del cambio climático. *Tla-melaua*, 10(41), 180-200.

Rivero-Camacho, C. y Ferreira-Sanchez, A. (2021). Aplicación de la "Footprint Family" para la evaluación ambiental de edificios públicos en España. *Hábitat Sustentable*, 11(1), 72-85. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.01.06>

Sodiq, A., Baloch, A. A. B., Khan, S. A., Sezer, N., Mahmoud, S., Jama, M. y Abdelaal, A. (2019). Towards modern sustainable cities: Review of sustainability principles and trends. *Journal of Cleaner Production*, 227, 972-1001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.106>

Stockholm International Water Institute, The Rockefeller Foundation, The Resilience Shift y ARUP (2019). *The City Water Resilience Approach*. Recuperado de <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/the-city-water-resilience-approach>

United Nations Human Settlements Programme (2018). *Guide to the City Resilience Profiling Tool*. Recuperado de <https://unhabitat.org/guide-to-the-city-resilience-profiling-tool>

Vaca, P. y Cartuche, I. (2018). Relación entre las emisiones de CO2 y el grado de urbanización a nivel global y entre grupos de países: Un enfoque usando técnicas econométricas avanzadas de datos de panel. *Revista Económica*, 5(1), 82-89.

Valdez, D. S. (2021). ¿(In)sostenibles? Confrontando la sostenibilidad urbana a los "barrios pobres" dominicanos. *Revista INVI*, 36(101), 173-199. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-83582021000100173>

Villamil-Cárdenas, V. y Osuna-Motta, I. (2021). Minga: Modelo replicable de renovación urbana sostenible, caso Buenaventura. *Hábitat Sustentable*, 11(1), 58-71. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.01.05>

World Bank (2020). *City Resilience Program*. Recuperado de <https://www.worldbank.org/en/topic/disasterriskmanagement/brief/city-resilience-program>

PLACAS AISLANTES DE EPS RECICLADO: FACTORES CRÍTICOS Y POTENCIALIDADES PARA LA VIABILIDAD PRODUCTIVA DE UN EMPRENDIMIENTO EN EL PARTIDO DE LA PLATA¹

RECYCLED EPS INSULATION PLATES: CRITICAL FACTORS AND POTENTIALITIES FOR THE PRODUCTIVE FEASIBILITY OF A VENTURE IN THE DISTRICT OF LA PLATA

PLACAS ISOLANTES DE EPS RECICLADO: FATORES POTENCIAIS E CRÍTICOS PARA A VIABILIDADE PRODUTIVA DE UM EMPREENDIMENTO NO DISTRITO DE LA PLATA

Laura Elena Reynoso

Diseñadora Industrial

Becaria doctoral, Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Buenos Aires, Argentina

<https://orcid.org/0000-0002-2450-0697>

lauereynoso@gmail.com

Graciela Melisa Viegas

Doctora en Ciencias- Área energías Renovables

Investigadora Adjunta, Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Buenos Aires, Argentina

<https://orcid.org/0000-0001-6248-4678>

gachiviegas@yahoo.com.ar

Gustavo Alberto San Juan

Doctor en Ciencias- Área energías Renovables

Investigador Principal, Director del Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Buenos Aires, Argentina

<https://orcid.org/0000-0001-8924-9918>

gustavosanjuan60@hotmail.com

1 Agradecimientos al proyecto de investigación código PICT 2019-04135 "Plan de mejoramiento integral de viviendas en sectores poblacionales en riesgo socio-territorial localizados en asentamientos informales del Partido de La Plata. Estrategias orientadas a la envolvente edilicia, el saneamiento y el acceso a la energía", financiado por la La Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnología (ANPCyT) Y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina

RESUMEN

Investigaciones previas han permitido desarrollar y caracterizar un material aislante a partir de descartes de poliestireno expandido (EPS) que puede utilizarse para la fabricación de placas, brindando oportunidades laborales a grupos sociales desocupados o vulnerables. Trabajando en articulación con una cooperativa de recicladores local, se determinaron los procesos productivos necesarios para su fabricación en una escala apta para su comercialización. El objetivo de esta investigación es analizar estos procesos productivos e identificar los aspectos críticos para la viabilidad de ejecución y gestión de esta tecnología. La metodología utilizada implica: i. la adecuación del producto; ii. la determinación de los insumos y recursos para su viabilidad; iii. la detección de los procesos productivos con mayor criticidad; y iv. la adecuación al caso particular de aplicación. Se obtiene un conjunto de requerimientos considerados mínimos para el desarrollo de un emprendimiento productivo. Además, se identifican en el contexto local los procesos de mayor criticidad, relativos a la separación y la obtención del EPS y su provisión continua en el tiempo. Los resultados condensan aportes para contribuir a la replicación y la sostenibilidad de esta experiencia.

Palabras clave

aislamiento térmico, materiales alternativos, ingeniería de la producción.

ABSTRACT

Previous research has allowed developing and characterizing an expanded polystyrene waste (EPS) based insulation material that can be used to manufacture plates, providing job opportunities to unemployed or vulnerable social groups. By working together with a local recycling cooperative, the production processes needed for their manufacture on a scale suitable for commercialization were determined. The goal of this research is to analyze these production processes and identify the critical aspects that make the technology's implementation and management viable. The methodology used involves i. the product's adaptation; ii. determining supplies and resources for its feasibility; iii. detecting the most critical production processes; and, iv. adapting to the particular case of application. A set of minimum requirements is obtained to develop a productive venture. In addition, the most critical processes related to the separation and obtaining of the EPS and its continuous supply over time, are identified. The results summarize contributions to replicate and make this experience sustainable.

Keywords

thermal insulation, alternative materials, production engineering

RESUMO

Pesquisas anteriores desta equipe permitiram desenvolver e caracterizar um material isolante a partir de poliestireno expandido (EPS) descartado que pode ser utilizado na fabricação de placas, oferecendo oportunidades de trabalho a grupos sociais desempregados ou vulneráveis. Trabalhando em coordenação com uma cooperativa local de recicladores, foram determinados os processos de produção necessários para sua fabricação em escala adequada para a comercialização. O objetivo desta pesquisa é analisar os processos produtivos envolvidos e os aspectos críticos que tornam viável a execução e gestão desta tecnologia. A metodologia utilizada implica: i. a adequação do produto; ii. a determinação dos insumos e recursos para sua viabilidade; iii. a detecção dos processos com maior criticidade; e iv. a adaptação ao caso particular de aplicação. Obtém-se um conjunto de requisitos considerados mínimos para o desenvolvimento de um empreendimento produtivo. Além disso, são identificados no contexto local os processos mais críticos relacionados à separação e obtenção do EPS e seu fornecimento contínuo ao longo do tempo. Os resultados condensam contribuições que têm por objetivo a replicação e sustentabilidade desta experiência.

Palavras-chave

isolamento térmico, materiais alternativos, engenharia de produção.

INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica, una de cada tres familias habita en viviendas inadecuadas, ya sea por su construcción con materiales precarios o por la falta de servicios básicos (Bouillon, 2012). En 2010, en Argentina, alrededor del 35 % de las viviendas se encontraban en condiciones recuperables con necesidades de mejora en cuanto a la calidad de sus materiales (INDEC, 2010). Es bien conocido que el uso de materiales inadecuados o insuficientes para el cerramiento y la aislación de la vivienda impacta en la habitabilidad y el confort térmico, así como también en el aprovechamiento y el uso racional de la energía (Abu-Jdayil, Mourad, Hittini, Hassan y Hameedi, 2019). Este problema es particularmente acentuado en los barrios populares² donde las viviendas suelen estar elaboradas con paredes de madera simple, con cubiertas de chapa (di Virgilio y Rodríguez, 2018). A nivel local, este déficit cualitativo de la vivienda se manifestó en el Consejo Social de la Universidad Nacional de La Plata³, espacio de articulación entre distintos sectores públicos y la comunidad para debatir y proponer respuestas a las principales problemáticas sociales de la región. El grupo de trabajo del cual deriva el presente artículo ha realizado aportes a esta problemática, uno de ellos referido al desarrollo de materiales de aislamiento térmico.

Los materiales utilizados para el aislamiento térmico se caracterizan por tener una baja conductividad térmica, coeficiente que expresa su habilidad para permitir el flujo de calor. Si bien los materiales tradicionales como las lanas minerales y los plásticos son eficientes en estos términos (Abu-Jdayil et al., 2019; Aditya et al., 2017), el uso de materiales alternativos de origen reciclado o natural han mostrado desempeños térmicos con potencialidad de aplicación en la vivienda (Durakovic, Yildiz y Yahia, 2020; Kumar, Alam, Zou, Sanjayan y Memon, 2020; Hasan, Khan, Akhtar y Kirmani, 2021; Zhao, Zheng, Tang, Sun y Wang, 2022; Meng, Ling y Mo, 2018; Li, Saberian y Nguyen, 2018; Flores-Alés, Jiménez-Bayarri y Pérez-Fargallo, 2018; Steyn, Babafemi, Fataar y Combrinck, 2020). Se destaca, en ese marco, el uso de fibras naturales, provenientes de subproductos de cosecha y el uso de materiales reciclados derivados

de productos industriales de gran demanda, tanto para su incorporación en morteros de cemento como para aplicaciones aislantes. En este sentido, el mencionado grupo de trabajo ha propuesto y caracterizado un material de aislamiento térmico alternativo a partir del reciclaje de los descartes de poliestireno expandido (EPS) que actualmente no tienen un destino post-consumo a nivel local (Viegas, Walsh y Barros, 2016; San Juan, Viegas y Jodra, 2018; Reynoso, Carrizo, Viegas y San Juan, 2021). Ante las necesidades expresadas por los grupos sociales involucrados en esta investigación, surgió la necesidad de buscar alternativas que añadieran valor a dicho residuo.

El poliestireno expandido es un material ampliamente utilizado como aislante y como embalaje para proteger productos frágiles. Se caracteriza por ser sumamente liviano, debido a su composición mayoritaria por aire y solamente un 2% de poliestireno. Debido a su bajo peso y gran volumen es un material poco rentable para su reciclaje, por lo que termina mayormente en el relleno sanitario (Marten y Hicks, 2018; Oliveira, Luna y Campos, 2019). En 2011, el consumo mundial de EPS fue de alrededor de 5.8 Mt (Jang, Shim, Han, Song y Hong, 2018). Según el Instituto Petroquímico Argentino, más de 25.000 toneladas de EPS se consumieron en 2018, lo que significa un consumo anual de alrededor de 570 gr/hab. en el país (IPA, 2018).

Para los recicladores, la venta del material en bruto no es una opción rentable, por lo que es necesario el procesamiento del material para su reinserción en el circuito de mercado y de uso. Desde esta perspectiva, se han podido identificar dos alternativas de procesamiento de poliestireno expandido de descarte en Argentina. Algunas cooperativas trituran los embalajes para su uso como relleno liviano para la construcción o como relleno de almohadones y artículos similares. Estas cooperativas desarrollan, en determinados casos, productos terminados como ladrillos o bloques para la construcción. En este punto, destacan en el país la ONG PuntoVerde y la cooperativa Reciclando Conciencia. Existen otras cooperativas o empresas que se ocupan de reducir el EPS a poliestireno y producen "terminados" a partir del material -útiles escolares, cubiertos, entre otros-, como la empresa Sirplast y la cooperativa Creando Conciencia. Sirplast recicla EPS a nivel industrial, habiendo recuperado en 2018 el 1.2% del total del EPS consumido ese año.

2 Barrios populares donde viven al menos 8 familias y más de la mitad de la población no tiene título de propiedad del suelo ni acceso regular a dos, o más, de los servicios básicos (agua corriente, energía eléctrica y/o red cloacal) (RENABAP, 2020).

3 El Consejo Social de la Universidad Nacional de La Plata está integrado por dependencias del Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, representantes de las cámaras legislativas, los municipios de la Región Capital, centrales sindicales, organizaciones territoriales, cooperativas, organismos de ciencia y tecnología y diferentes actores de la comunidad universitaria. Entre sus objetivos, se propone reunir a todos los actores de la región para analizar las principales problemáticas socio-económicas, políticas, culturales, y ambientales, y discutir conjuntamente posibles estrategias de abordaje mediante políticas locales y nacionales.

Estas cifras exponen lo que se evidencia también en las propias calles, es decir, la gran disponibilidad del material y su potencialidad para proyectos que impliquen su reutilización.

Distintas investigaciones han evaluado el uso del EPS triturado o reciclado mecánicamente en mezclas para la construcción. Algunos estudios proponen su uso como agregado liviano en mezclas de concreto, para el desarrollo de paneles portantes o de cerramiento (Fernando, Jayasinghe y Jayasinghe, 2017; Dissanayake, Jayasinghe y Jayasinghe, 2017; Dixit, Dai Pang, Kang y Moon, 2019; Maaroufi, Belarbi, Abahri y Benmahiddine, 2021). También se han analizado mezclas sugeridas para su uso en morteros, rellenos aislantes o paneles de aislamiento (Laukaitis, Žurauskas y Kerien, 2005; Madariaga y Macia, 2008; Aciu, Manea, Molnar y Jumate, 2015). El material desarrollado, fruto de la investigación de este grupo de trabajo, se distingue por emplear materiales y métodos sencillos para su fabricación, lo que permite dar respuesta a una necesidad concreta de sectores de la economía social y desarrollar un producto evaluado técnicamente mediante distintos ensayos estandarizados. El proyecto en cuestión fue seleccionado en el año 2020 por la Fundación INVAP, por su impacto económico, social y ambiental, en la elaboración de respuestas que acerquen la ciencia y la tecnología a las necesidades reales de la población. La mezcla desarrollada y caracterizada utiliza el EPS triturado en tamaños entre 4 y 10 mm que se aglutinan con una mezcla cementicia (San Juan *et al.*, 2018). El aislante se caracteriza por tener una conductividad térmica de entre 0.0603 y 0.0706 W/ m·K, no presentar riesgos en la propagación de una pequeña llama, resistir el sobrecalentamiento eléctrico a altas temperaturas y poder almacenarse al aire libre sin producir grandes cambios en su capacidad aislante. Además, puede cortarse fácilmente para adaptarse a las superficies a aislar y sus propiedades mecánicas son apropiadas para el desarrollo de aplicaciones que no soportan cargas (Reynoso *et al.*, 2021).

Lo anterior determina la viabilidad del material para la realización de placas de aislamiento de paredes y cavidades interiores aplicables a la vivienda. Los procesos involucrados en la fabricación del material hacen factible tanto su autoproducción como su producción en una escala mayor para su comercialización. Este desarrollo se funda sobre el concepto de economía social y solidaria, que busca conformar sociedades aglutinadas y guiadas por el cuidado del ambiente y la generación de empleos dignos (Coraggio, 2009). Asimismo, el proyecto involucra la reintroducción de los descartes de EPS en las etapas de uso, que busca evitar la generación de nueva materia prima para este fin y potenciar la generación de empleo nuevo a partir de su reutilización. Estas lógicas difieren de la economía lineal basada en el principio de "tomar-hacer-desperdiciar", y se vinculan con la economía circular. La economía circular considera cada etapa del ciclo de vida del producto, antes y después de que llega al consumidor

y privilegia la restauración antes que la caducidad de los productos y materiales (Buren, Demmers, Van der Heijden y Witlox, 2016; Kirchherr, Reike y Hekkert, 2017).

Para llevar adelante una experiencia productiva de mayor escala, la investigación ha requerido un trabajo articulado con la cooperativa de recicladores Sol- Plat, ubicada en el partido de La Plata. La tarea de la cooperativa se enmarca en el programa de gobierno local de gestión de la recolección diferenciada por tipo de residuos. La gestión de los residuos sólidos urbanos generados es un problema ambiental prioritario a nivel global. En el ámbito local, el problema afecta principalmente a los barrios o asentamientos populares, en su mayoría desprovistos de infraestructura óptima para la recolección de residuos, entre otros aspectos clave para una correcta habitabilidad (Esparza, 2021). En este contexto, la cooperativa se dedica a la clasificación y venta de los residuos secos de la bolsa verde separada en origen y provista por el gobierno local. Los materiales que clasifican son: plásticos (PET, PE-LD y PE-HD, PS), materiales celulósicos (papel y cartón), tetrabrick, vidrio, aluminio, metales ferrosos, entre otros. Las instalaciones se componen de dos espacios productivos de 600 m², en uno de los cuales los descartes que ingresan se clasifican en *big bags*. En el segundo espacio productivo, los descartes se compactan mediante una máquina hidráulica, así como también se almacenan parte de los materiales clasificados.

La experiencia de trabajo en la cooperativa supuso la transición de los ensayos en laboratorio y la producción de muestras únicas, a una dimensión más concreta: pensar en cuáles son los ajustes que necesita el producto, cuáles son los procesos involucrados y qué requerimientos se requieren para la conformación de un emprendimiento de producción a escala. En este marco, los antecedentes de la investigación refieren mayormente a análisis cuantitativos de los productos y/o mezclas con EPS triturado, pero escasas investigaciones abordan el estudio de los procesos productivos involucrados para desarrollar una producción a mayor escala. Se detecta, así, la necesidad de abordar no sólo los aspectos técnicos del diseño de nuevos materiales, sino también los factores socio-productivos que pueden otorgarle éxito o fracaso a este tipo de estudios. Concretamente, la investigación que aquí se expone propone determinar, describir y analizar, a partir de la definición del producto, los procesos productivos involucrados en su fabricación, como también identificar los aspectos críticos en términos de viabilidad productiva y de gestión de esta tecnología en una escala apta para su comercialización. Se busca condensar los conocimientos generados desde la experiencia a nivel local, para que puedan servir de base para su replicación en otros contextos. El aporte radica en el esfuerzo de hacer viable un emprendimiento con base en investigación científico-tecnológica, de impacto social, ambiental y económico, en co-construcción con los actores sociales involucrados. La hipótesis postula que el análisis de los procesos productivos permite abordar

soluciones viables que respondan a las necesidades de un sector social con carencias estructurales en cuanto a las condiciones habitacionales y a la generación de trabajo genuino.

METODOLOGÍA

Este trabajo busca articular la tecnología, entendida como producto y como conocimientos involucrados (Thomas, Juárez y Picabea, 2015), y la sociedad, para la generación de empleo para sectores sociales vulnerables o desocupados. Se plantea desde los postulados de la investigación acción participativa, involucrando distintos actores de la economía popular (de Sousa Santos, 2012). Específicamente, se involucra a integrantes de la cooperativa de recicladores Sol-Plat para colaborar, con el grupo de investigación responsable, en el desarrollo de un emprendimiento productivo basado en la producción de placas de aislamiento térmico alternativo. Las tareas realizadas por la cooperativa comprenden, en su mayor parte, la clasificación y la transformación de los materiales para el acopio y la venta de la materia prima. Esta propuesta de emprendimiento se orienta a la fabricación de productos de uso final, abarcando los eslabones finales de la cadena de valor de los residuos, para valorizar los residuos en bruto del EPS (Caló, 2009). Se apunta a fortalecer las capacidades de auto-gestión y co-gestión de los grupos organizados para mejorar sus condiciones económicas y, al mismo tiempo, promover mejoras en el medio ambiente y el hábitat (Enet, Romero y Olivera, 2008).

De acuerdo con las especificaciones técnicas mínimas requeridas para las placas aislantes y en función de la reducción de los costos directos de fabricación, se diseñó el diagrama de flujo del proceso productivo presentado en la Figura 1. Diseñar los procesos implica decidir el modo en que los recursos se transforman en bienes y servicios (Carro Paz y González Gómez, 2013), para lo cual se tienen en cuenta los materiales de entrada, la secuencia de operaciones y su conexión, los métodos y tiempos de trabajo, así como la calidad del producto a obtener.

El proceso comienza fuera de la instalación productiva, con la separación de los descartes de poliestireno expandido. Como vías de separación y acopio se consideran: a. la bolsa verde de recolección domiciliaria; b. los puntos limpios; y c. los grandes generadores del residuo. En la instalación productiva, los procesos iniciales corresponden a la recepción u obtención de las materias primas, esto es, el cemento y los embalajes de EPS en bruto. En caso de ser necesario, se realiza el acondicionamiento de los descartes de EPS, retirando etiquetas o cintas. Posteriormente, los embalajes se pre-trituran en trozos para facilitar su procesamiento en las etapas siguientes. A continuación, se realiza el triturado fino mediante maquinaria de molienda para

obtener una combinación de gránulos entre 4 y 10 mm. Una vez lista la materia prima reciclada, se elabora la mezcla que permitirá el moldeo de las placas. La mezcla aglutinante se compone de cemento y agua, los que se disponen inicialmente, para luego añadir gradualmente el EPS molido. Una vez conseguida una mezcla uniforme, se lleva a cabo la colada en los moldes previamente preparados con dimensiones, que pueden ser de 1 m x 0.50 cm x 0.07 cm, u otras medidas, según el proyecto. La mezcla en húmedo se comprime y se almacena para su secado a temperatura ambiente en un tiempo estimado entre 7 y 10 días. Transcurrido ese periodo, se retiran los moldes y, si las placas no tienen roturas o desperfectos superficiales, se identifican según su lote de producción y se acopian en pallets. En función de los pedidos particulares, se preparan las placas y se realiza su corte en tamaños especiales para su distribución.

La metodología de esta investigación se organiza en las siguientes etapas:

1. Adecuación del producto. A partir del material aislante desarrollado y caracterizado por el grupo de trabajo (Reynoso et al., 2021), se realizan ajustes para su producción en escala y comercialización, analizando los siguientes aspectos:

- a. Los costos directos del producto (C_{dir}) por metro cuadrado que se calculan considerando: los costos derivados del traslado del EPS en bruto necesario durante un mes, desde su origen hasta la instalación productiva; el costo de las materias primas comerciales involucradas y consumidas durante un mes; la mano de obra requerida para la fabricación del producto; y los metros cuadrados de placas aislantes producidas mensualmente (ecuación 1).

$$C_{dir} = \frac{\text{Traslado EPS} + \text{Materias primas comerciales} + \text{Mano de obra}}{\text{Metros cuadrados de material aislante/mes}} \quad (1)$$

- b. Los requerimientos técnicos exigidos, acordes con las especificaciones deseables en aplicaciones de aislamiento térmico.

2. Determinación de los insumos y recursos para la viabilidad de los procesos productivos. En esta etapa se analizan las maquinarias, las herramientas y los servicios pensados para dos casos posibles de disponibilidad del EPS en el contexto donde se inserta la experiencia. Los insumos y recursos planteados tienen estrecha relación con la diagramación de los tiempos de producción y con la mano de obra disponible.

3. Identificación de los procesos más críticos. Esto implica jerarquizar dichos procesos para establecer prioridades en la toma de decisiones (Mendoza, 2000). Se analiza cada uno de ellos a partir de las siguientes variables:

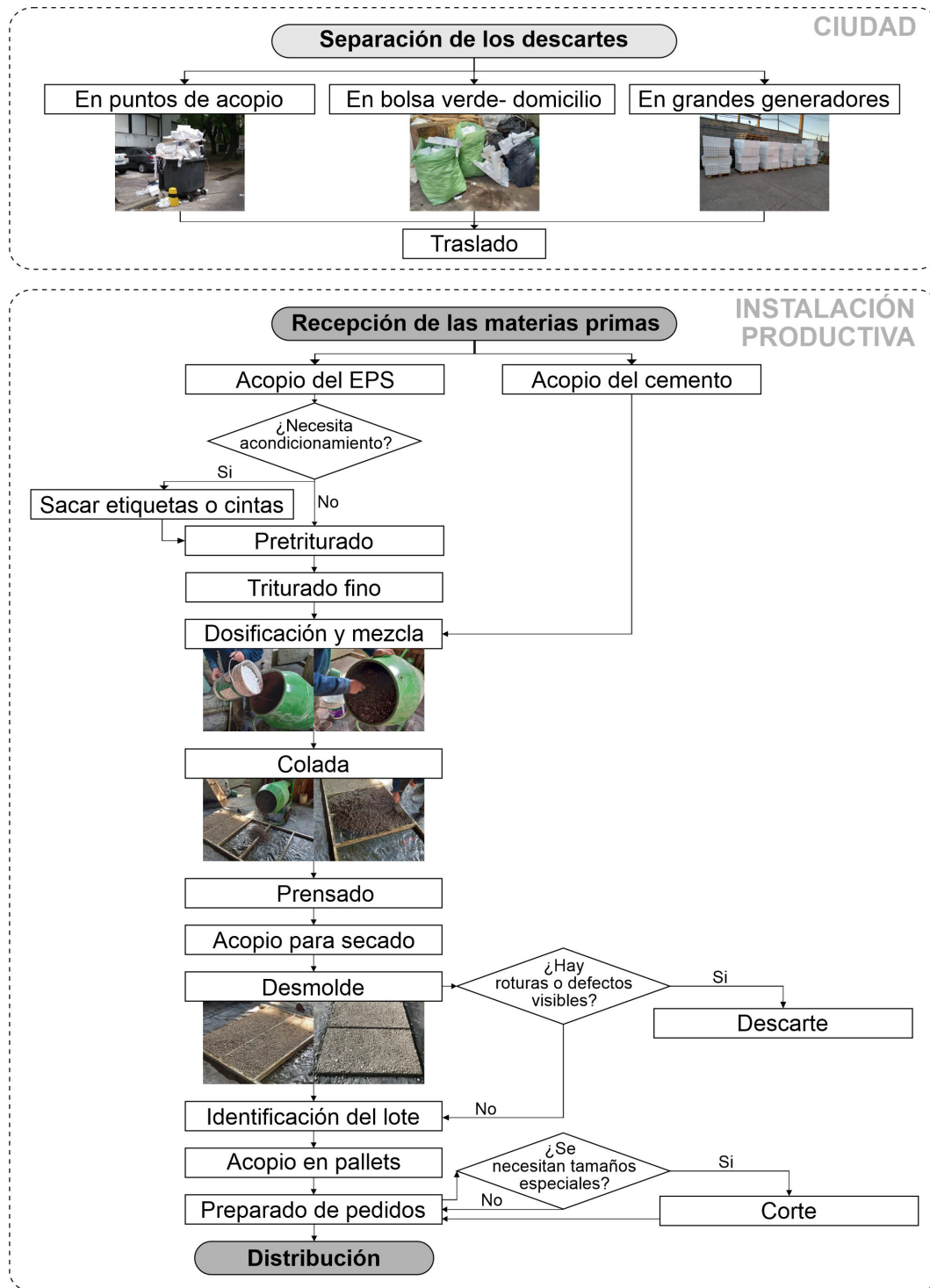


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de producción de las placas de aislamiento térmico alternativo. Fuente: Elaboración de los autores.

- Dependencia en relación a las características técnicas de los productos finales: Evalúa en qué grado el proceso está vinculado con las características finales del producto resultante, acordes con los requerimientos del mercado.
- Dependencia respecto a factores externos: Evalúa en qué grado los responsables de llevar adelante el proceso son actores externos al propio emprendimiento.
- Probabilidad de retrasos, por demoras o fallas: Evalúa en qué grado es posible la ocurrencia de retrasos, considerando diversos motivos (fallos en las máquinas, demoras en las entregas por parte de terceros, retrasos por errores humanos, entre otros).
- Impacto de los retrasos en los procesos posteriores: Evalúa el grado en que los retrasos pueden afectar la continuidad de la cadena productiva y la materialización del producto, en función de las características técnicas esperadas.

	Nivel alto	Nivel medio	Nivel bajo
Dependencia con las características técnicas del producto final	El proceso y su adecuada realización tienen relación directa con la obtención de las características técnicas apropiadas del producto para su comercialización.	El proceso y su adecuada realización afectan en cierto grado a la obtención de las características técnicas apropiadas del producto para su comercialización.	El proceso y su adecuada realización no interfieren en la obtención de las características técnicas apropiadas del producto para su comercialización.
Dependencia de factores externos	El proceso depende en su totalidad de terceros y de actividades de gestión y vinculación, para su concreción.	El proceso depende tanto de terceros como del equipo de trabajo para su concreción.	La realización del proceso depende exclusivamente del equipo de trabajo.
Probabilidad de retrasos, demoras o fallas	El proceso presenta retrasos o demoras regularmente.	El proceso puede presentar retrasos o demoras ocasionalmente.	El proceso puede presentar retrasos o demoras excepcionalmente.
Impacto de las demoras o fallas	Las demoras o fallas del proceso impiden la continuidad de la cadena productiva y/o afectan regularmente a las características técnicas del producto final.	Las demoras o fallas del proceso afectan ciertos procesos de la cadena productiva y/o afectan ocasionalmente a las características técnicas del producto.	Las demoras o fallas no afectan la continuidad de la cadena productiva y/o excepcionalmente afectan a las características técnicas del producto.

Tabla 1. Variables empleadas para el análisis del nivel de criticidad de los procesos. Fuente: Elaboración de los autores.

Cada una de estas variables se clasificó para cada proceso productivo en: nivel alto, nivel medio y nivel bajo, según lo descrito en la Tabla 1. Tomando los niveles más frecuentes obtenidos en las cuatro variables, se determinó el nivel de criticidad resultante del proceso.

4. Adecuación al caso particular de aplicación. Se describe aquí la experiencia iniciada a nivel local, su punto de partida, así como los requerimientos para avanzar en su desarrollo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ADECUACIÓN DEL PRODUCTO

En articulación con la cooperativa de recicladores local, se trabajó para adecuar el material anteriormente desarrollado hacia la conformación de un producto con viabilidad de producción en escala. Dicho material mostró, en investigaciones previas, buenos desempeños en términos de aislamiento: una conductividad térmica de entre 0.0603 y 0.0706 W/m·K, medida en base a la norma ISO 8990 (Reynoso *et al.*, 2021). Adicionalmente, evidenció la capacidad de conservar estas propiedades aislantes luego de almacenarse al exterior. En cuanto a su combustibilidad, los ensayos realizados a partir de la norma ISO 11925-2 revelaron que el cemento actúa como retardador de llama, haciendo que el material no genere riesgos ante la propagación de una pequeña llama. Así también, los ensayos de inflamabilidad con hilo caliente, en función de la norma IEC 60695-2-11, mostraron que el material podría resistir sobrecalentamientos de hasta

960°C sin generar riesgos. Se determinó, de igual forma, el comportamiento de las muestras ante ensayos de compresión y flexión siguiendo los lineamientos de las normas ISO 844 e ISO 1209-1, respectivamente. En este sentido, el material resultó adecuado para aplicaciones que no soportan cargas según los requerimientos mínimos definidos por la norma ISO 4898. Por último, se determinó que el material puede ser fácilmente cortado mediante máquinas y herramientas para adaptarse a las superficies a aislar. Esta caracterización del material (Figura 2 punto a) definió la viabilidad del material para la producción de placas aislantes.

Teniendo en cuenta las variables de costo y los requerimientos técnicos, se realizaron ciertos cambios en la composición del material previamente descrito y en los procesos involucrados para su fabricación, dado que:

- El análisis de costos directos mostró que el aditivo vinílico utilizado en el aglutinante consumía alrededor del 35% de los costos de fabricación. En consecuencia, se advirtió la necesidad de sustituir o eliminar este componente para reducir el costo total del producto.
- Las placas fabricadas en tamaños de 0.5 x 1 x 0.05 m presentaban cierta fragilidad durante su manipulación, por lo que se requería incrementar la resistencia mecánica del producto.

En las pruebas para mejorar la resistencia mecánica de las placas finales, se apuntó a incorporar luego de la colada, el proceso de compresión de la mezcla. En conjunto con integrantes de la cooperativa Sol-Plat, se logró

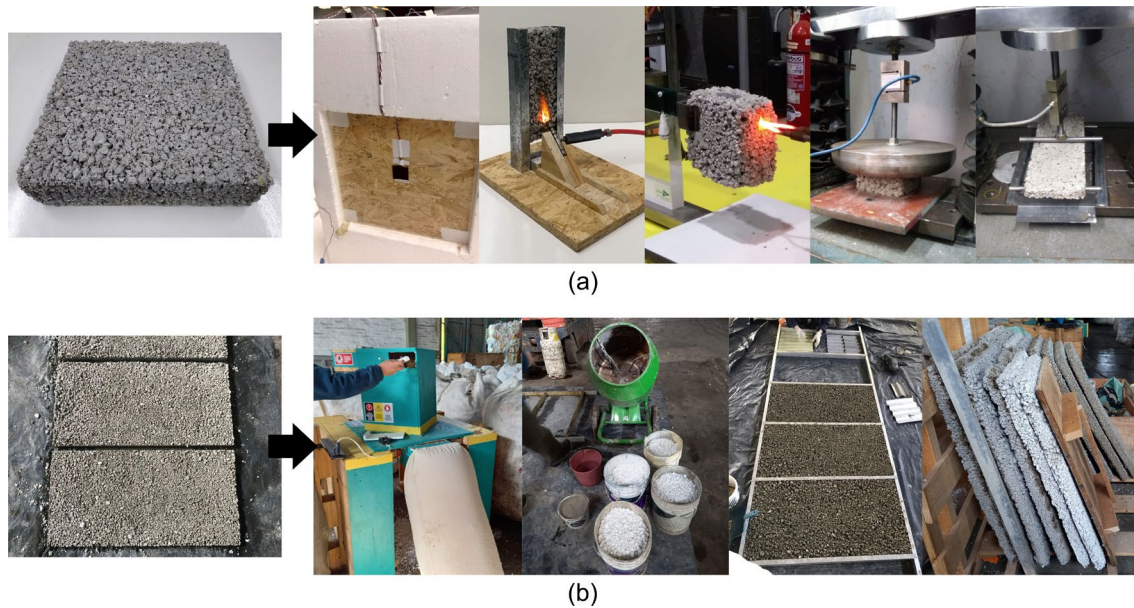


Figura 2. Desarrollos y actividades realizadas en el laboratorio y en la cooperativa: (a) Material aislante y ensayos técnicos basados en normativas internacionales; (b) Producto placa aislante y procesos productivos en mayor escala. Fuente: Elaboración de los autores.

Procesos	Maquinarias/ Herramientas	Servicios
Transporte/recepción de las materias primas	Transporte liviano (propio o tercerizado)	-
Acopio EPS	Elevador manual o hidráulica	-
Acopio cemento	Elevador manual o hidráulica	-
Acondicionamiento y pretriturado EPS	Cortador de hilo caliente o segelín múltiple	Electricidad
Triturado fino EPS	Máquina trituradora: modelo auto-construido (200 kg), o molino comercial (1000 kg) Big bags	Electricidad
Dosificación de componentes y mezcla	Hormigonera eléctrica 120 l (200 kg) y 400 o 600 l (1000 kg) Molde Polietileno Baldes	Agua Electricidad
Colada	Cuchara plana de albañil	Agua
Prensado	Prensa hidráulica	-
Acopio para secado	Estanterías	-
Acopio en pallets	Pallets Elevador manual o hidráulica	-
Preparación de pedidos	Elevador manual o hidráulica Sierra circular	Electricidad
Distribución	Transporte liviano (propio o tercerizado)	-

Tabla 2. Maquinarias/herramientas y servicios necesarias para procesar 200 kg y 1000 kg de EPS en bruto al mes. Fuente: Elaboración de los autores.

determinar que una compactación del material con un peso mayor a 100 kg incrementa su resistencia, mientras que se utiliza como material aglutinante únicamente cemento y agua. Se evaluaron, asimismo, distintos grados de compresión, obteniendo que la relación de compresión (R_c) necesaria debía ser de entre 1.3 y 1.5. Se entiende por al cociente entre el volumen final y el volumen inicial que ocupa el material en el molde. Como resultado se obtuvieron placas aislantes (Figura 2 punto b) que consideran aspectos relevantes para su inserción

en el mercado actual, que tienen una adecuada aislación térmica, un apropiado comportamiento ante el fuego y un desempeño mejorado en términos de resistencia mecánica.

DETERMINACIÓN DE LOS INSUMOS Y RECURSOS PARA LA VIABILIDAD PRODUCTIVA

Los insumos y recursos necesarios se describen en base a dos casos posibles de disponibilidad del EPS en el

Procesos	MES				PERSONAS	
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	(a) 200 kg	(b) 1000 kg
TRITURADO GRUESO	[Barra azul]				2	6
TRITURADO FINO	[Barra verde]				2	6
MEZCLADO Y COLADA		[Barra amarilla]			2	3 / 4
ACOMODADO Y PRENSADO		[Barra morada]			2	8 / 9
DESMOLDE Y PALLETIZADO				[Barra rosa]	2	8 / 9

Figura 3. Diagrama de distribución de los procesos productivos durante un mes. Cantidad de personas encargadas en cada proceso para el caso 1 (a) y el caso 2 (b). Fuente: Elaboración de los autores.

contexto donde se inserta la experiencia. El primero (caso 1) se plantea en función del ingreso de 200 kg de EPS bruto al mes, considerando procesos de menor escala o automatización. El segundo (caso 2), en función del procesamiento de 1000 kg de EPS bruto al mes. Es importante considerar que las maquinarias y las herramientas descritas en cada caso, podrán variar de acuerdo a las posibilidades de inversión y a las potenciales demandas de las placas finales. En la Tabla 2 se presentan las maquinarias, las herramientas y los servicios que se requieren para el procesamiento de la materia prima, identificando modificaciones puntuales dadas por el volumen de EPS disponible mensualmente.

Como resultado del caso 1, se destaca que para esa cantidad de descartes es posible producir aproximadamente 200 m² de placas de 5 cm de espesor y que se requerirían alrededor de 1300 kg de cemento. En relación a las máquinas de trituración, se puede utilizar un modelo autoconstruido de bajo costo, propuesto por la ONG Punto Verde de Tandil (2018), Argentina. Bajo esta modalidad de molienda, se generan 120 l en aproximadamente 20 minutos. Para incrementar el volumen de trituración se puede considerar multiplicar las máquinas autoconstruidas con una baja inversión. En cuanto a la maquinaria de mezclado, se pueden emplear mezcladoras eléctricas de 120 l, que tienen capacidad para mezclar el material aislante necesario para producir un metro cuadrado de placas de 5 cm de espesor por ciclo. Referente a la mano de obra, se requieren como mínimo 4 personas dedicadas a la producción.

Para el caso 2, en función de la disponibilidad de 1000 kg de EPS bruto al mes, se producirían alrededor de 1000 m² de placas de 5 cm de espesor y se requerirían alrededor de 6500 kg de cemento. Estos volúmenes conllevan la necesidad de utilizar para la trituración molinos industriales, e incorporar mezcladoras hormigoneras de 400 o 600 l. En este sentido, se observa que existen opciones comerciales de maquinarias que permiten incrementar el volumen de mezcla con una inversión moderada, en tanto la incorporación de molinos industriales para el triturado, demanda una mayor inversión. Sin embargo, incrementar la capacidad productiva significa también reducir los

tiempos de ejecución y la mano de obra necesaria. Para la producción se estima que serían necesarias 12 personas, entre 3 y 4 personas para realizar la mezcla y la dosificación y entre 8 y 9 personas para realizar el colado en moldes y el prensado.

En ambos casos se requiere adicionalmente de una prensa hidráulica, diseñada para comprimir la mezcla en húmedo de manera uniforme. También se precisa de un cortador de hilo caliente múltiple, para fragmentar los descartes en bruto, y de una sierra circular de banco para cortar las placas, de acuerdo a las demandas específicas.

Respecto a la distribución en el tiempo de las actividades de producción, en ambos casos se plantean de forma que el proceso de molienda del EPS y la producción de placas se desarrollen de manera no simultánea. Esto es, de los 20 días hábiles considerados en un mes, se estima que la molienda del EPS se desarrolle durante los 5 días iniciales del mes y en los 15 días restantes se realice el armado de las placas, que incluye los procesos de mezclado, colada, prensado y acopio. Las placas se desmoldan aproximadamente 10 días después de realizada la colada. En la Figura 3 se presenta el diagrama de la distribución de los procesos en un mes, asignando una cantidad de personas encargadas para cada proceso y considerando necesarias en total 4 personas para el caso 1 y 12 personas para el caso 2.

DETECCIÓN DE LOS PROCESOS DE MAYOR CRITICIDAD

El nivel de criticidad de cada proceso se analizó según las siguientes variables: (a) dependencia con las características técnicas de las placas finales; (b) dependencia respecto a factores externos; (c) probabilidad de ocurrir retrasos, por demoras o fallas; y (d) impacto de estos retrasos en los procesos posteriores. La Figura 4 resume los resultados de cada proceso y su correspondiente nivel de criticidad.

El análisis expone que los procesos de mayor criticidad son la separación de los descartes de EPS en la ciudad y la obtención o recepción de la materia prima. Ambos

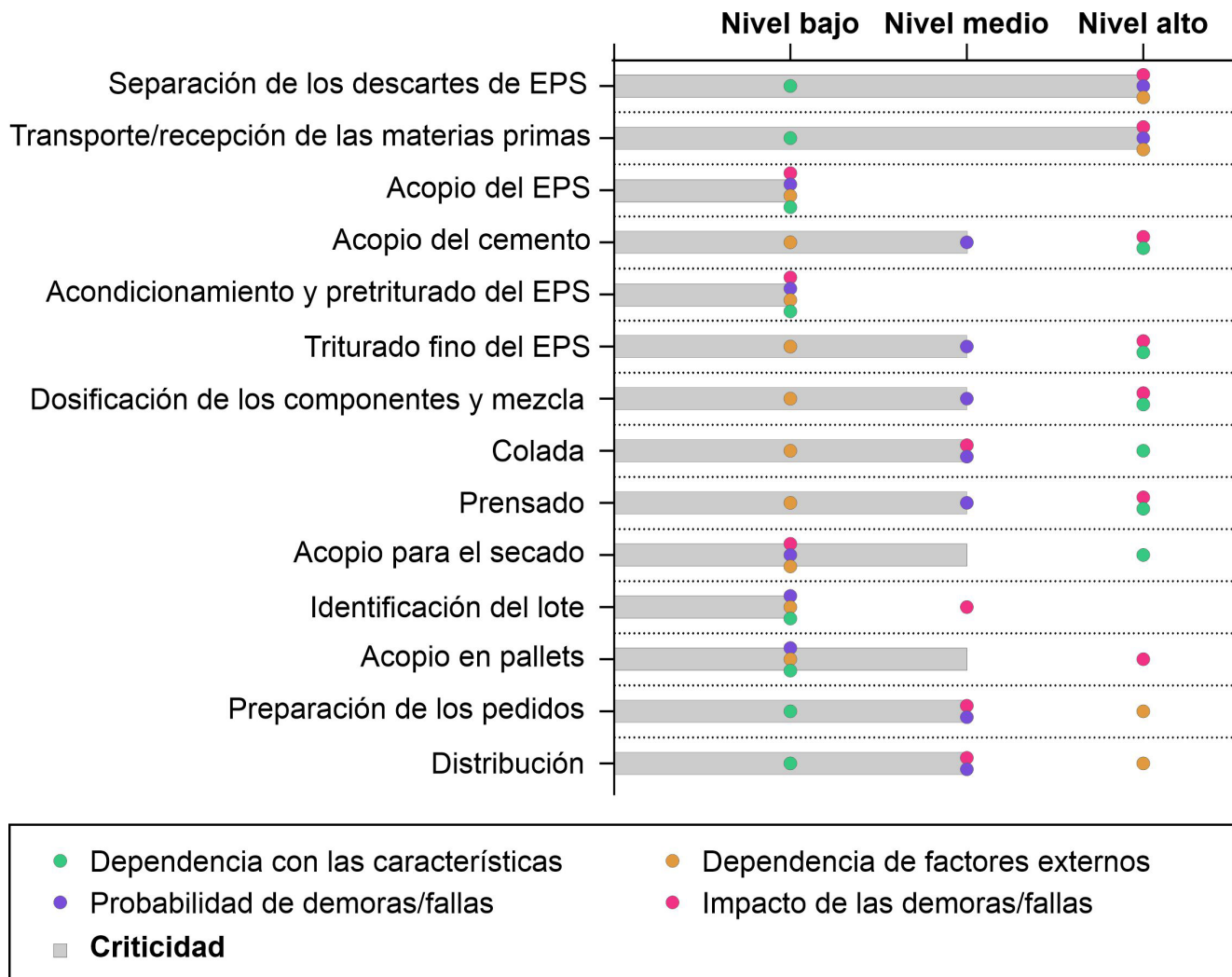


Figura 4. Nivel de criticidad de los procesos involucrados en la fabricación de las placas de aislamiento térmico alternativo. Fuente: Elaboración de los autores.

procesos pueden ser afectados por factores externos y dependen en gran medida de la gestión necesaria para llevarlos adelante. La separación del EPS, en el caso de efectuarse desde la recolección en la bolsa verde, requiere de la gestión con el gobierno de la ciudad en análisis. Para la instalación de puntos limpios es fundamental la vinculación con instituciones privadas o públicas. Es posible que la obtención de la materia prima mediante las dos modalidades anteriores, requiera un proceso de clasificación para separar los materiales que no correspondan al de interés. La tercera de las opciones de obtención del EPS es el contacto con grandes generadores del residuo, provenientes de la industria farmacéutica, de laboratorios, de la industria de electrodomésticos, entre otros. Esta última vía simplifica esfuerzos, permitiendo obtener un gran volumen de materia prima limpia en un sólo transporte.

Los procesos de criticidad media son: el acopio del cemento; el triturado fino del EPS; la dosificación de componentes y su mezcla; la colada; el prensado; el acopio para el secado; el acopio en pallets; la

preparación de pedidos; y la distribución de las placas. Estos procesos pueden dar lugar a demoras capaces de interrumpir procesos posteriores o generar la producción de placas finales que no cumplen las especificaciones requeridas. Por ello, el cemento para el aglutinante debe ser almacenado adecuadamente en el interior para asegurar su durabilidad, así como la calidad de las placas resultantes. Otro aspecto importante es el tamaño de triturado fino del EPS empleado, que determina las características técnicas de las placas. Es fundamental controlar regularmente la granulometría de salida de las máquinas trituradoras empleadas, en especial si se utilizan modelos autoconstruidos. Respecto a la dosificación de los componentes del material y su mezcla, se deben pesar o medir los componentes, los cuales se colocan en orden: agua, cemento y muy gradualmente los granos de EPS. Es preciso que la mezcla se efectúe de manera adecuada para que cada uno de los granos quede cubierto completamente por el aglutinante y se asegure la correcta cohesión y resistencia final. En la colada se debe tener en cuenta que el volumen dispuesto en cada uno de los moldes sea constante. Además, se debe

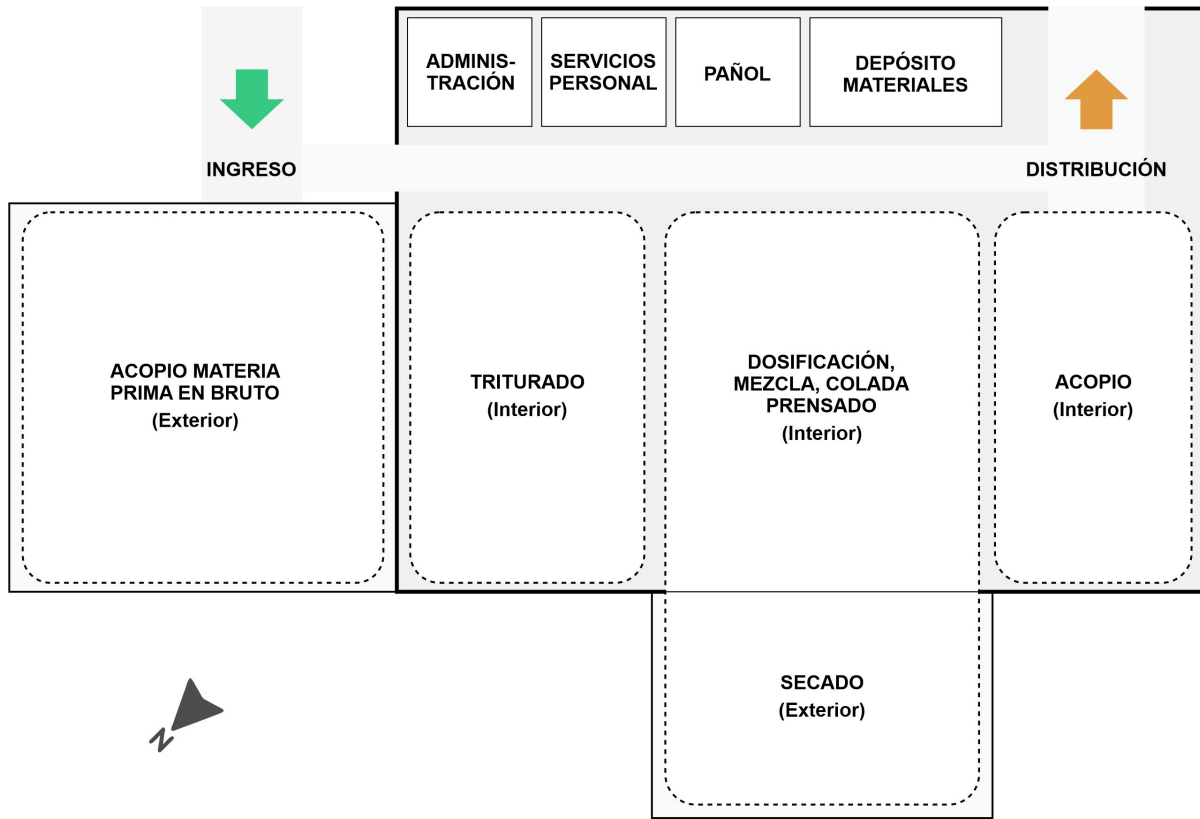


Figura 5. Esquema organizacional de la instalación productiva. Fuente: Elaboración de los autores.

aplicar desmoldante (aceite reutilizado) sobre los moldes, confeccionados en perfilera, que se disponen sobre un film plástico. Las placas se terminan de conformar con el prensado en húmedo; aspecto en el que es muy importante que la relación de compresión (volumen final / volumen inicial) sea la indicada y se mantenga constante. El acopio de las placas para su secado, así como su disposición en pallets, también requieren especial atención. Las placas se deben colocar en posición horizontal y es recomendable evitar grandes apilamientos. Por último, la preparación de los pedidos y su distribución implican la adaptación según cada encargo y su acopio, que deben realizarse apropiadamente para garantizar que las placas lleguen en el mejor estado al usuario final.

Los procesos de menor criticidad son el almacenamiento de los descartes de EPS en bruto, su acondicionamiento y pretriturado, y la identificación de los lotes. En efecto, si estos procedimientos se ven retrasados o no son realizados adecuadamente, se advierten impactos muy bajos o nulos sobre el proceso y producto final.

ADECUACIÓN AL CASO PARTICULAR DE APLICACIÓN

A nivel local, el emprendimiento se ha puesto en marcha en la cooperativa de recicladores Sol-Plat localizada en la ciudad de La Plata, Buenos Aires, Argentina. La actividad de producción de las placas se inserta en uno de los espacios productivos de la cooperativa, donde

se realiza también la compactación de los descartes. A fines de 2020 se inició la diagramación de la producción disponiendo de: a) una máquina trituradora de bajo costo, que replica el modelo difundido por la ONG Punto Verde de Tandil; b) un sistema de moldes de aluminio de 1 m x 0.5 m x 0.05 m fabricados en serie; c) una hormigonera eléctrica de 120 l; y d) el EPS en bruto, que proviene de un laboratorio ubicado en el partido de Gran Buenos Aires, gran generador del residuo, y que provee mensualmente alrededor de 270 kg de descartes. En la actualidad no se cuenta con fuerza de trabajo que esté dedicándose exclusiva y sostenidamente a las tareas productivas, sobre todo porque los ingresos de los miembros de la cooperativa dependen de la venta de los descartes que tradicionalmente se vienen procesando. Es por esto que los avances en las tareas de ejecución son paulatinos, tanto por el grupo investigador como por el grupo de la cooperativa. Este es un factor clave en la gestión del emprendimiento, debido a que los miembros de la cooperativa son actores sociales en estado de vulnerabilidad y que requieren de apoyo estatal. Debido a las características del proceso productivo, se considera la potencialidad de que el emprendimiento pueda ser desarrollado por grupos organizados de mujeres, con lo cual generar emprendimientos con perspectiva de género.

Hasta el momento, se ha podido iniciar la producción de placas a baja escala, determinando un producto mínimo viable, y se ha comenzado a triturar la materia prima

que ha sido recibida en diversas ocasiones, proveniente del gran generador. En función de la materia prima en bruto obtenida hasta el momento y de las posibilidades de inversión actuales, se definió que para continuar con el desarrollo del emprendimiento se requiere: i) la participación de 4 personas responsables de las tareas productivas; ii) el uso de 2 máquinas trituradoras de bajo costo; y iii) el uso de una prensa para la compresión de las mezclas. Bajo estas condiciones se estima que se producirán 270 m² de placas al mes, considerando la distribución de tareas y el diagrama de la instalación productiva que se presenta en la Figura 5. En el diagrama se incluye la realización de ciertas actividades en el interior y exterior de las instalaciones, para maximizar el aprovechamiento de los espacios.

CONCLUSIÓN

Esta investigación presenta un aporte original en cuanto al estudio analítico de los procesos productivos, los factores críticos y las relaciones entre actores necesarios para la generación de un emprendimiento productivo surgido de un desarrollo tecnológico científico-técnico con impacto social y ambiental en una localidad de Argentina. Se han expuesto los resultados en relación a la adecuación del producto para su producción en escala y las actividades y procesos requeridos para la conformación de un emprendimiento basado en la fabricación de placas de aislamiento térmico alternativo. El diseño de los procesos productivos fue resultado del método de investigación acción participativa que involucró a integrantes de una cooperativa de recicladores local. En el intercambio se generaron mejoras y aportes en el producto desarrollado y, por ende, en el proceso productivo. El desarrollo de esta investigación en articulación con los actores locales permitió llegar a las conclusiones que a continuación se exponen.

En primer lugar, se logró realizar las adecuaciones del producto para su fabricación en escala y comercialización considerando aspectos, económicos, técnicos y tecnológicos. Esto supuso hacer modificaciones en el material desarrollado previamente, sustituyendo componentes empleados y modificando procesos productivos para mejorar las prestaciones a un menor costo.

En segundo término, se describieron los insumos, los servicios y los recursos para la viabilidad del emprendimiento, en función de la disponibilidad de EPS en bruto, planteándose dos casos posibles de provisión de descartes. Se identificaron particularmente en cada caso las maquinarias clave, relativas a la trituración y el mezclado, para alcanzar la capacidad de producción requerida. También se observó que, si bien la mano de obra requerida aumenta en función de la provisión de descartes, la diagramación mensual de los procesos productivos podría conservarse. Es importante destacar que, tanto esta diagramación productiva, como los

recursos mencionados, se entienden como una forma de materializar el proyecto, más que como recomendaciones excluyentes para el desarrollo del emprendimiento.

Por otro lado, se planteó una metodología para determinar los niveles de criticidad de los procesos productivos, que puede aplicarse a otros casos y regiones. En el contexto local, y de acuerdo al estudio y la clasificación de cada uno de los procesos productivos, la provisión de materia prima y su sostenibilidad en el tiempo son los procesos de mayor criticidad para el emprendimiento. En ese sentido, se considera que la mejor vía de provisión de materia prima es el contacto con grandes generadores del residuo. Al mismo tiempo, es recomendable el almacenamiento de una cantidad excedente de provisión de materia prima para atenuar los impactos de los períodos de menor recepción de descartes.

El trabajo realizado en la cooperativa local puede considerarse como uno de los modos de comenzar la experiencia productiva a mayor escala. Se situaron las instancias de avance alcanzadas, así como aspectos sobre los que se deberán trabajar y recursos que se requerirán para el crecimiento de la experiencia. En tal contexto, se esquematizó la organización de las instalaciones productivas y se plantearon recursos humanos y materiales necesarios a incorporar en esta instancia de desarrollo.

El emprendimiento en desarrollo a nivel local propone un modo de reutilización del EPS que genera una oportunidad laboral a sectores vulnerables y desocupados a través de la economía social y solidaria. Desde ese enfoque, se entiende que, si bien el producto tiende hacia la búsqueda de una solución innovadora que alcance el paradigma de la economía circular, es deseable la sustitución o eliminación de ciertos componentes y procesos para maximizar la reducción de los impactos en el ambiente.

Lo expuesto en esta investigación supone una serie de insumos para replicar la experiencia, así como también provee aportes relevantes para la organización y generación de instalaciones de producción en otros contextos. Replicar la experiencia en otros contextos, regiones o países donde estas problemáticas sean considerables, significa la generación de empleo, el aporte al mejoramiento de la calidad del hábitat, la reutilización de los descartes de EPS y, en última instancia, la reducción de los impactos ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se enmarca en dos proyectos de investigación: "Problemáticas ambientales del hábitat popular en la periferia del Gran La Plata. Políticas Públicas / Sociales, como respuesta, en el marco de la Producción Social del Hábitat (PSH) y la Tecnología para la Inclusión Social (TIS)" (San Juan y Discoli, 2018), financiado por el CONICET y la UNLP, Argentina; y "Plan de mejoramiento

integral de viviendas en sectores poblacionales en riesgo socio-territorial localizados en asentamientos informales del Partido de La Plata. Estrategias orientadas a la envolvente edilicia, el saneamiento y el acceso a la energía" (PICT 2019- 201904135), financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Nación Argentina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Jdayil, B., Mourad, A-H., Hittini, W., Hassan, M. y Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214, 709-735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>
- Aciu C., Manea D.L., Molnar L.M. y Jumate E. (2015). Recycling of polystyrene waste in the composition of ecological mortars. *Procedia Technology*, 19, (2015) 498-505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.071>
- Aditya, L., Mahlia, T.MI., Rismanchi, B., Ng, S.M., Hasan, M.H., Metselaar, H.SC., Muraza, O. y Aditiya, H.B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1352-1365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>
- Bouillon, B. C. (Ed.). (2012). *Un espacio para el desarrollo. Los mercados de vivienda en América Latina y El Caribe*. New York: Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Un-espacio-para-el-desarrollo-Los-mercados-de-vivienda-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Buren, N.V., Demmers, M., Van der Heijden, R. Witlox, F. (2016). Towards a Circular Economy: The Role of Dutch Logistics Industries and Governments. *Sustainability*, 8(7), 647. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8070647>
- Caló, J. (2009). *La cadena de valor del reciclado de residuos sólidos urbanos (RSU). La dinámica socio-técnica de los procesos de reciclado en las cooperativas de recuperadores urbanos surgidas a partir de los cambios económicos, sociales y tecnológicos de la crisis del 2001*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Quilmes, Argentina. Recuperado de: <https://biblio.unq.edu.ar/Record/1151>
- Carro Paz, R. y González Gómez, D. (2013). *Diseño y selección de procesos*. Colección Administración de las operaciones. Universidad Mar del Plata. Recuperado de: http://nulan.mdpu.edu.ar/1613/1/08_diseno_procesos.pdf
- Coraggio, J.L. (2009). Los caminos de la economía social y solidaria. *Íconos*, 33, 29-38. DOI: <https://doi.org/10.17141/iconos.33.2009.314>
- De Sousa Santos, B. (2012). La universidad en el siglo XXI. Para una reforma democrática y emancipadora de la universidad. En SENESCYT (Ed.), *Transformar la universidad para transformar la sociedad* (pp. 139-193). La Paz: Plural Editores.
- Di Virgilio, M.M., Rodríguez, M.C. (2018). Hábitat, vivienda y marginalidad residencial. En J.I. Piovani y A. Salvia (Coords.), *La Argentina en el siglo XXI* (pp. 183-220). Buenos Aires: Siglo Veintiuno.
- Dissanayake, D.M.K.W., Jayasinghe, C. y Jayasinghe M.T.R. (2017). A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. *Energy and Buildings*, 135, 85-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.044>
- Dixit, A., Dai Pang, S., Kang, S-H. y Moon, J. (2019). Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation. *Cement and Concrete Composites*, 102, 185-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.023>
- Durakovic, B., Yildiz, G., Yahia, M.E. (2020). Comparative performance evaluation of conventional and renewable thermal insulation materials used in building envelopes. *Tehnički vjesnik*, 27(1), 283-289. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20171228212943>
- Enet, M., Romero Fernández, G. y Olivera Gómez, R. (2008). *Herramientas para pensar y crear en colectivo, en programas intersectoriales de hábitat*. Córdoba: CYTED- HABYTED-RED XIV.
- Esparza, J. (2021). Clasificación y afectación por residuos sólidos urbanos en la ciudad de La Plata, Buenos Aires, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37 (2021), 357-371. DOI: <https://doi.org/10.20937/RICA.53758>
- Fernando P.L.N., Jayasinghe M.T.R. y Jayasinghe, C. (2017). Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels. *Construction and Building Materials*, 139, 45-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.027>
- Flores-Alés, V., Jiménez-Bayarri, V. y Pérez-Fargallo, A. (2018). Influencia de la incorporación de vidrio triturado en las propiedades y el comportamiento a alta temperatura de morteros de cemento. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 57(6), 257-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.03.001>
- Hasan, S., Khan, S., Akhtar, I. y Kirmani, S. (2021). Study of natural insulation materials and compared it with no insulation building. *Materials Today: Proceedings*, 46(20), 10692-10697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.452>
- INDEC (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda 2010*. Recuperado de: <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-CensoNacional-999-999-Censo-2010>
- IPA (2018). 38ª Edición de información estadística de la Industria Petroquímica y Química de la Argentina. Instituto Petroquímico Argentino. Informe. 135 pp. Recuperado de: <https://noticiasutnfrn.files.wordpress.com/2020/04/anuario-ipa-2019.pdf>
- Jang, M., Shim, W.J., Han, G.M., Song, Y.K. y Hong, S.H. (2018). Formation of microplastics by polychaetes (*Marphysa sanguinea*) inhabiting expanded polystyrene marine debris. *Marine Pollution Bulletin*, 131 A, 365-369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.017>
- Kirchherr, J., Reike, D. y Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

- Kumar, D., Alam, M., Zou, P.X.W., Sanjayan, J.G. y Memon, R.A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>
- Laukaitis A., Žurauskas R. y Kerien J. (2005). The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 41-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004>
- Li, J., Saberian, M. y Nguyen, B.T. (2018). Effect of crumb rubber on the mechanical properties of crushed recycled pavement materials. *Journal of Environmental Management*, 218, 291-299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.062>
- Maaroufi, M., Belarbi, R., Abahri, K. y Benmahiddine, F. (2021). Full characterization of hygrothermal, mechanical and morphological properties of a recycled expanded polystyrene-based mortar. *Construction and Building Materials*, 301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124310>
- Madariaga G.F.J. y Macia L.J. (2008). Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. *Informes de la Construcción*, 60(509), 35-43. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.2008.v60.i509.589>
- Marten, B. y Hicks, A. (2018). Expanded Polystyrene Life Cycle Analysis Literature Review: An Analysis for Different Disposal Scenarios. *Sustainability*, 11(1) 29-35. DOI: <https://doi.org/10.1089/sus.2017.0015>
- Mendoza, R. H. (2000). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. *Ingeniería Mecánica*, 3(4), 13-19. Recuperado de: <https://ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/364>
- Meng, Y., Ling, T.-C. y Mo, K.H. (2018). Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 298-312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.029>
- Oliveira, C.T., Luna, M.M.M. y Campos, L.M.S. (2019). Understanding the Brazilian expanded polystyrene supply chain and its reverse logistics towards circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 235, 562-573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.319>
- Punto Verde Tandil Asociación Civil (20 de agosto de 2018). TelgoBIT productos. [Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=DrjrU75ausk>
- RENABAP (19 de febrero de 2020). *Barrios populares*. Ministerio de Desarrollo Territorial y Hábitat. Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/barrios-populares>
- Reynoso L. E., Carrizo R. A. B., Viegas G. M. y San Juan, G. A. (2021). Characterization of an alternative thermal insulation material using recycled expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124058>
- San Juan, G. A., Viegas, G. M. y Jodra, J. I. (2018). Aislación térmica alternativa, reutilizando poliestireno expandido de descarte, orientado a las necesidades de cooperativas de reciclado. En *X Congreso Regional de Tecnología en Arquitectura*. La Plata, Argentina (29-31 de agosto).
- Steyn, Z.C., Babafemi, A.J., Fataar, H. y Combrinck, R. (2021). Concrete containing waste recycled glass, plastic and rubber as sand replacement. *Construction and Building Materials*, 269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121242>
- Thomas, H., Juárez, P. y Picabea, F. (2015). *Tecnología y desarrollo ¿Qué son las tecnologías para la Inclusión Social?* Universidad Nacional de Quilmes. Reditsa. IESTC.
- Viegas, G. M., Walsh, C. y Barros, M. V. (2016). Evaluación cuali-cuantitativa de aislaciones térmicas alternativas para viviendas. El caso de la agricultura familiar. *Revista INVI*, 31(86), 89-117. Recuperado de: <https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/62719>
- Zhao, J.R., Zheng, R., Tang, J., Sun, H.J. y Wang, J. (2022). A mini-review on building insulation materials from perspective of plastic pollution: Current issues and natural fibres as a possible solution. *Journal of Hazardous Materials*, 438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129449>

SUFICIENCIA LUMÍNICA DE AMBIENTES INTERIORES EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Recibido 30/08/2022
Aceptado 07/12/2022

DAYLIGHT SUFFICIENCY OF INDOOR ENVIRONMENTS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

SUFICIÊNCIA LUMÍNICA DE AMBIENTES INTERNOS EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA

Lucas Arango-Díaz

Doctor en Arquitectura y Urbanismo
Investigador de la Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-3638-3379>
lucas.arango@usbmed.edu.co

María Alejandra Garavito-Posada

Arquitecta
Estudiante de Máster en Bioclimática, Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-5336-4292>
maria.garavito@tau.usbmed.edu.co

Juan Sebastian Calle-Medina

Conservador-Restaurador de Bienes Muebles
Estudiante de Máster en Bioclimática, Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-3445-4134>
juan.calle212@tau.usbmed.edu.co

Adriana Marcela Murcia-Cardona

Arquitecta Interiorista
Estudiante de Máster en Bioclimática, Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-7969-2542>
adriana.murcia@tau.usbmed.edu.co

Olga Lucia Montoya-Flórez

Doctora en Arquitectura y Urbanismo
Investigadora de la Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Cali, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-2814-0382>
olmontoy@usbcali.edu.co

Sebastián Pinto-Quintero

Magíster en Arquitectura y Urbanismo
Investigador de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de Manizales, Manizales, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-3189-7140>
spinto@ucm.edu.co



RESUMEN

El desempeño bioclimático de edificaciones en escenarios de cambio climático ha sido ampliamente estudiado desde la perspectiva termo-energética, pero escasamente abordado desde la suficiencia lumínica interior. Esta escasez está relacionada con la invariabilidad de los datos de radiación en los archivos climáticos disponibles de escenarios futuros. La presente investigación propone identificar los impactos que, sobre la suficiencia lumínica, tendría la variabilidad de datos de radiación en archivos climáticos de escenarios futuros. La metodología incluye la adaptación de archivos climáticos disponibles y la realización de simulaciones computacionales de luz natural para espacios de trabajo hipotéticos localizados en Medellín, Colombia. Los resultados evidencian diferencias en la métrica Spatial Daylight Autonomy – SDA de hasta 18% en diversos escenarios futuros. Como conclusión, se plantea la necesidad de afinar las predicciones sobre la disponibilidad lumínica exterior que permitan optimizar las evaluaciones de desempeño lumínico en escenarios de cambio climático.

Palabras clave

iluminación natural, cambio climático, radiación solar.

ABSTRACT

The bioclimatic performance of buildings under climate change scenarios has been extensively studied from a thermo-energy perspective but hardly studied at all from the perspective of indoor daylight sufficiency. This shortcoming is related to the invariability of radiation data in the available weather files of future scenarios. This research proposes identifying the impacts that the variability of radiation data in weather files of future scenarios would have on daylight sufficiency in indoor spaces. The methodology includes the adaptation of available weather files and the running of daylight simulations for hypothetical workspaces located in Medellín, Colombia. The results show differences in the Spatial Daylight Autonomy – SDA metric of up to 18% in different future scenarios. In conclusion, the need is outlined to refine predictions of outdoor daylight availability that allow improving daylight performance evaluations under climate change scenarios.

Keywords

daylight, climate change, solar radiation

RESUMO

O desempenho bioclimático de edifícios em cenários de mudança climática tem sido amplamente estudado sob a perspectiva termoenergética, mas dificilmente abordado sob a perspectiva da suficiência lumínica interior. Essa escassez está relacionada à invariabilidade dos dados de radiação nos arquivos climáticos disponíveis de cenários futuros. Esta pesquisa teve como objetivo identificar os impactos que a variabilidade dos dados de radiação em arquivos climáticos de cenários futuros teria na suficiência lumínica em espaços interiores. A metodologia incluiu a adaptação de arquivos climáticos disponíveis e a realização de simulações computacionais de luz natural para espaços de trabalho hipotéticos localizados em Medellín, Colômbia. Os resultados mostram diferenças na métrica Spatial Daylight Autonomy – SDA de até 18% em diferentes cenários futuros. Conclui-se que é necessário refinar as previsões de disponibilidade lumínica exterior para que permitam melhorar as avaliações de desempenho lumínico em cenários de mudanças climáticas.

Palavras-chave

iluminação natural, mudanças climáticas, radiação solar

INTRODUCCIÓN

En nuestro planeta las variaciones del clima producidas por la influencia humana han adquirido un ritmo sin precedentes. Desde 1970 la temperatura de la atmósfera ha aumentado más rápido que en cualquier otro periodo de 50 años, en los últimos 2000 años (IPCC AR6 WG I, 2021). En el más reciente reporte sobre cambio climático (AR6), se llama la atención sobre la necesidad de extremar medidas para garantizar un aumento de la temperatura por debajo de 1.5°C, tal como fue estimado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, COP21 (ONU, 2015).

Para lograr lo anterior, se requeriría reducir de manera inmediata las emisiones de gases efecto invernadero (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021). Rodríguez (2010) ya había planteado que, en caso de que los combustibles fósiles siguieran siendo la principal fuente de energía por lo menos hasta 2030, se generarían aumentos en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que favorecería notablemente el calentamiento global en mayor medida que durante el siglo pasado.

En el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) se actualizan los escenarios de calentamiento global con relación a reportes anteriores. En este se consideran cinco nuevos escenarios climáticos las Trayectorias

Socioeconómicas Compartidas (SSPx-y), que evalúan distintos futuros posibles de las emisiones de gases efecto invernadero, uso de la tierra y los contaminantes del aire. Cada uno de esos escenarios se dividen en tres periodos de tiempo: corto plazo, 2021–2040; mediano plazo, 2041–2060 y largo plazo, 2081–2100 (IPCC AR6 WG I, 2021). Estos fueron considerados a partir de las proyecciones demográficas y económicas.

En la Tabla 1 se muestran los distintos escenarios de cambio climático, el aumento de la temperatura a largo plazo y el pico máximo que alcanzará en el periodo de tiempo desde la actualidad hasta el año 2100. Los últimos 3 escenarios no alcanzarán su punto máximo antes del 2100, ya que presentan constantes tendencias en aumento.

A pesar de la identificación y descripción de estos escenarios, se resaltan dos características del cambio climático escasamente consideradas en los análisis de desempeño bioclimático de edificaciones. Por un lado, es reconocido que el cambio climático, además de generar variaciones graduales en las condiciones climáticas, también significa cambios abruptos en estas (Fan, Chen, Fu y Li, 2020). Por el otro, las variaciones climáticas no se refieren únicamente al aumento de temperatura sino también, entre otras, a variaciones en la radiación, pluviosidad, nubosidad y ventilación natural. Por ejemplo, Wild (2009) relaciona cambios en la radiación solar con el cambio climático y enfatiza en que estos

Escenario	Descripción	Alineado con SSP	Cambio de la temperatura media global °C	
			Pico de calentamiento	Año 2100
C1	Limitar el calentamiento a 1.5°C (>50%) con exceso limitado o nulo		1,6	1,3
C1a	Limitar el calentamiento a 1.5°C con Protocolo de Gases Efecto Invernadero (GHG) Net Zero	SSP1-1,9	1,6	1,2
C1b	Limitar el calentamiento a 1.5°C sin GHG Net Zero		1,6	1,4
C2	Regresando el calentamiento a 1.5°C (>50%), después de sobrepasar el límite superior		1,7	1,4
C3	Limitando el calentamiento a 2°C (>67%)		1,7	1,6
C3a	Limitando el calentamiento a 2°C y empezando acciones al 2020	SSP1-2,6	1.7	1,6
C3b	Limitando el calentamiento cerca de 2°C con Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) hasta 2030		1.8	1,6
C4	Limitando el calentamiento a 2°C (>50%)		1.9	1,8
C5	Limitando el calentamiento a 2,5 °C (>50%)		2.2	2,1
C6	Limitando el calentamiento a 3 °C (>50%)	SSP2-4,5	la temperatura no alcanza su punto máximo en 2100	2,7
C7	Limitando el calentamiento a 4 °C (>50%)	SSP3-7,0		3,5
C8	Exceder el calentamiento de 4 °C (>50%)	SSP5-8,5		4,2

Tabla 1. Categorías de escenarios de calentamiento global, según AR6. Fuente: Elaboración de los autores a partir de información de AR6-WG3 (IPCC AR6 WG III, 2022).

cambios son generados por actividades antropogénicas y no por cambios en el sol. En adición, señala que estas variaciones, en general, son subestimadas en los modelos climáticos. Paralelamente, en el grupo de *The Physical Science Basis, Working Group 1 – WG I*, del AR6, se establece que se han observado cambios no solo en la temperatura, sino también fenómenos meteorológicos y climáticos como fuertes precipitaciones, ciclones tropicales y sequías en muchas regiones del mundo y que, debido al aumento de temperatura, se prevé que el ciclo del agua se intensifique generando aumento en las precipitaciones y su variabilidad en el tiempo (IPCC AR6 WG I, 2021).

PANORAMA ACTUAL DE INVESTIGACIONES SOBRE DESEMPEÑO BIOCLIMÁTICO DE EDIFICACIONES EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Además de investigaciones sobre las amenazas a las que están sometidas comunidades enteras y edificaciones por cuenta de los riesgos de desastres naturales asociados con el cambio climático, existen diversos estudios que se enfocan en evaluar el desempeño bioclimático y la habitabilidad de edificaciones en escenarios de cambio climático. Algunos de ellos se centran en el diseño de edificios que tengan un buen desempeño térmico, pero que a la vez puedan soportar el aumento de la temperatura, lo que conllevaría al mayor consumo de energía (Pajek y Košir, 2021). Otros ven, de manera general, la influencia que tienen en el rendimiento energético de una edificación los efectos del cambio climático y a partir de ello, analizan los posibles mecanismos que pueden llevar a la adaptación o la mitigación de estos efectos (Barea, Victoria, Filippín, Monteoliva y Villalba, 2022; Yassaghi y Hoque, 2019). Existen trabajos que se concentran en establecer qué porcentaje de incertidumbre tienen los modelos que establecen las consecuencias del cambio climático sobre las edificaciones con relación al consumo de energía (Fonseca, Nevat y Peters, 2020), como también aquellos en los que se analiza, en torno al panorama mundial, cómo las condiciones climáticas del exterior de la edificación influyen en los cambios que se producen en temas del confort interior (Congedo, Baglivo, Seyhan y Marchetti, 2021). Distintos esfuerzos se han enfocado exclusivamente en el consumo de energía: Joarder Price y Mourshed (2009), entre otros, advierten que, por cuenta del aumento de temperatura que se ha proyectado, las edificaciones ya construidas corren el riesgo de ser inhabitables en el futuro, en caso de que no usen sistemas de refrigeración adicionales. De otro lado, de acuerdo con Berardi y Jafarpur (2020), el incremento en la temperatura exterior produce un mayor uso de sistemas de refrigeración o calefacción según sea necesario, el que se traduce en un aumento en el consumo de energía. Por último, algunas investigaciones centran su atención en evaluar los efectos a futuro en el desempeño energético de las edificaciones que se encuentran en climas tropicales, con el fin de establecer,

en la etapa de diseño, estrategias más eficientes para enfrentar las variaciones climáticas (Vong, 2016)

Con este panorama, se evidencia que existe una razonable cantidad de estudios abocados al cambio climático y sus vínculos con el desempeño térmico o el consumo de energía en las edificaciones. Sin embargo, en relación a luz natural, se constata cierto vacío en este marco. Dada, entonces, la escasez de investigaciones en las que se relacione cambio climático y suficiencia o desempeño lumínico, aquí se plantea al menos tres posibles enfoques para aproximarse a dicha temática en probables escenarios futuros de cambio climático, concretamente, respecto a la iluminación natural en espacios construidos. El primer enfoque consiste en abordar la luz natural y la salud a partir de la necesidad de optimizar la protección frente al aumento en la exposición a rayos ultravioletas (Joarder et al., 2009) y a partir de las vistas al exterior y la salud de las personas en general (Lee, Szybinska, Geisler Selkowitz y Heschong, 2022).

Otro posible enfoque de abordaje del que no se tiene evidencia bibliográfica, se concentra en las afectaciones a la suficiencia lumínica en edificaciones construidas que se podrían generar tras la aplicación de estrategias para la adaptación que deban realizarse, a fin de optimizar la eficiencia energética asociada al consumo de aire acondicionado, o atender necesidades de confort térmico en escenarios de cambio climático con notable aumento de temperatura.

El tercer enfoque, en el que se centra principalmente el presente trabajo, se aboca a posibles variaciones en la radiación global horizontal, radiación directa normal y radiación difusa horizontal en determinada localidad geográfica, asociadas con el cambio climático, por cambios en la nubosidad, contaminantes y la combinación entre estos factores. Estos cambios implican variaciones en la disponibilidad lumínica exterior. Con relación a este enfoque, existen múltiples investigaciones que enfatizan el rol de la radiación solar sobre la disponibilidad lumínica local desde diferentes perspectivas: (i) generación de tipos de cielo a partir de datos de radiación o relación entre la radiación solar y la disponibilidad lumínica local (Dervishi y Mahdavi, 2013; Fakra, Boyer, Miranville y Bigot, 2011; Perez, Ineichen y Seals, 1990; Perez, Seals y Michalsky, 1993); (ii) diferencias entre los datos de radiación solar de los archivos climáticos, datos de mediciones y datos calculados y su impacto en el desempeño lumínico estimado a través de simulaciones computacionales (Bre, e Silva Machado, Lawrie, Crawley y Lamberts, 2021; Fan, 2022; Monteoliva, Villalba y Pattini, 2017; Wang, Wei y Chen, 2019); y (iii) impacto del archivo climático usado en los resultados de simulaciones computacionales (Arango-Díaz, Parra, Puerta y Salazar, 2021; Arango-Díaz, Piderit y Ortiz, 2022; Bellia, Pedace y Fragliasso, 2015a; Bellia et al., 2015b; González Cáceres y Díaz Cisternas, 2013; Hosseini, Bigtashi y Lee, 2021; Iversen, Svendsen y Nielsen, 2013; Sun, Li y Xiao, 2017).

A pesar de la reconocida importancia del rol de la luz natural en edificaciones y de la necesidad de predecir el desempeño bioclimático de edificaciones en escenarios futuros, no hay evidencia de investigaciones que aborden, en el marco del cambio climático, la variabilidad de la radiación solar y su incidencia en el desempeño lumínico de edificaciones.

ARCHIVOS CLIMÁTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO BIOCLIMÁTICO EN ESCENARIOS FUTUROS

Frente a la importancia de prever el desempeño bioclimático de edificaciones en el marco del cambio climático, tal como lo expone Vong (2016), se vio la necesidad de revisar los archivos climáticos con los que se realizan normalmente las simulaciones termoenergéticas. Actualmente, se dispone de varias herramientas que modifican archivos climáticos con base en los escenarios futuros de aumento de temperatura definidos por la IPCC (Tabla 1).

Belcher, Hacker y Powell (2005) desarrollaron el método denominado *morphing* con el cual se generan datos climáticos que permiten realizar simulaciones térmicas para el proceso de diseño de la edificación teniendo en cuenta cómo podría ser el clima a futuro. Este método utiliza archivos climáticos actuales que, a partir de una serie de algoritmos, transforman los datos medios de temperatura mensuales de forma predictiva. El mismo considera los cuatro escenarios posibles que provienen del reporte especial del IPCC de 2007: escenarios A1 - bajas emisiones; A2 - emisiones medias-bajas; B1 - emisiones medias-altas; y B2 - altas emisiones. Se resalta que *morphing* no considera variaciones perceptibles en la radiación asociadas a los escenarios de cambio climático y, finalmente, que gracias a este método se han desarrollado varias herramientas que facilitan la construcción de archivos climáticos como, por ejemplo, Meteororm y CC World Weather Gen (Vong, 2016).

De acuerdo con Remund Jan *et al.* (2014), Meteororm es una base de datos climatológica global que se emplea para hacer cálculos, simulaciones e investigaciones en torno a la energía solar. Se basa en un sistema estocástico que, en función de la toma de los datos del comportamiento climático anual típico en los diferentes lugares del mundo, da como resultado medias mensuales que se intercalan en los diferentes escenarios futuros. Este procedimiento utiliza entre 1 y 4 modelos para realizar los cálculos, considerando condiciones de cielo despejado y los máximos valores posibles de radiación cada mes. Con relación a la radiación solar, los datos usados por esta herramienta se obtienen de las mediciones realizadas durante 20 años ya que, para periodos más largos, se da entre un 2 y un 3% de diferencia en las mediciones que arrojan todas las estaciones meteorológicas. Los demás parámetros los

recoge de las medias correspondientes a los intervalos 1961 – 1990 y 2000 – 2009.

Por otro lado, CC World Weather Gen fue desarrollado con el objetivo de generar datos a partir de un proceso automatizado, con los cuales se producen archivos climáticos que puedan ser utilizados en escenarios de cambio climático (Jentsch, James, Bourikas y Bahaj, 2013). Para ello, utiliza los datos producidos por el modelo HadCM3 A2 del Centro de Distribución de Datos del IPCC (Jentsch *et al.*, 2013), puesto que posee los parámetros que se requieren para hacer los archivos climáticos. Esta herramienta encierra los promedios meteorológicos de los escenarios climáticos al mismo tiempo que mantiene las secuencias reales del clima (Vong, 2016) y, de esa manera, proyecta los escenarios del cambio climático.

Finalmente, Weather Shift TM, desarrollado como un proyecto colaborativo entre Arup North America Ltda (ARUP) y Argos Analytics LLC, utiliza el método de *morphing*, a partir de la combinación de 14 modelos globales climáticos – GCM que hayan sido simulados actualmente en dos de los escenarios de emisión, 4,5 y 8,5, conocidos como Vías de Concentración Representativas (RCP), y los convierte en funciones de distribución acumulativa (CDF) (Troup y Fannon, 2016). Esto permite que los porcentajes tengan una distribución que mitiga hasta cierto punto la incertidumbre intermodal y el comportamiento estocástico del clima, con la cual se da una probabilidad en la frecuencia, pero esto no quiere decir que genere total confianza en la proyección que se realiza (Troup y Fannon, 2016).

Frente a este contexto, en el cual no se consideran variaciones en la radiación solar de los archivos climáticos para escenarios que permitan también revisar el desempeño lumínico de edificaciones en el futuro, esta investigación se planteó como objetivo identificar los impactos que tendría, sobre la evaluación de la suficiencia lumínica de espacios interiores, el uso de archivos climáticos en los que se alteren los datos de radiación solar debido al cambio climático. En ese sentido, se realizó un comparativo de archivos climáticos existentes para la ciudad de Medellín, Colombia, con los datos oficiales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y se escogió el archivo climático con más similitud. A partir del archivo climático en formato .epw, se efectuó una modificación de la radiación de los archivos para la evaluación de las variaciones de acuerdo con hallazgos descritos por Wild (2009).

METODOLOGÍA

A fin de identificar el impacto sobre el desempeño lumínico de variaciones en la radiación solar de archivos climáticos para escenarios futuros, fueron realizadas comparaciones de resultados de simulaciones computacionales sobre

Criterio	Nombre de archivo climático	Descripción de la modificación
10% de aumento de la radiación solar global	WF-2 ^a	La radiación difusa y la radiación directa aumentan proporcionalmente en un 10%
	WF-2b	La radiación directa aumenta y la radiación difusa permanece igual al WF-1
10% de disminución de la radiación solar global	WF-3 ^a	La radiación difusa y la radiación directa disminuyen proporcionalmente en un 10%
	WF-3b	La radiación directa disminuye y la radiación difusa permanece igual al WF-1

Tabla 2. Modificaciones archivos climáticos de escenarios futuros. Fuente: Elaboración de los autores.

espacios hipotéticos localizados en Medellín (lat. 6,25N, long.75,5O, alt.1450 m.s.n.m), haciendo uso de archivos climáticos intervenidos.

En función de correcciones realizadas para un archivo climático actual, fueron construidos cuatro archivos climáticos adicionales, de acuerdo con cuatro criterios de variación de la radiación solar para escenarios futuros. En total, los cinco archivos climáticos fueron usados para realizar simulaciones computacionales en tres espacios hipotéticos con dos orientaciones.

ARCHIVO CLIMÁTICO UTILIZADO

Medellín es una ciudad tropical andina que posee una temperatura promedio de 22°C y un clima estable, con predominio de cielos parcialmente nublados a lo largo del año. En investigaciones previas se han detectado algunas inconsistencias en los archivos climáticos de la ciudad (Arango et al. 2021). Debido a estas inconsistencias, que están relacionadas con los datos de radiación solar global y datos de radiación difusa y directa, fue necesario llevar a cabo ajustes manuales en el archivo climático empleado para la ciudad de Medellín. Dichas inconsistencias hacen referencia a las diferencias, hora a hora, del dato de radiación solar global y de la sumatoria entre radiación directa normal y radiación difusa horizontal. Por lo tanto, el ajuste consistió en garantizar que, para cada hora, la sumatoria de la radiación difusa horizontal y la radiación directa normal de los archivos climáticos fuera igual o muy similar al dato de radiación global de este. Para ello se efectuó, en frecuencia horaria, una sumatoria entre la radiación difusa y la radiación directa del archivo climático.

Posteriormente, se identificó qué porcentaje de ese valor sumado correspondía a la radiación difusa y qué porcentaje, a la radiación directa. Estos porcentajes se usaron para recalcular datos horarios en el archivo climático de la radiación directa normal y la radiación difusa horizontal a partir del dato de radiación global. Este archivo climático, en formato .epw modificado, se

denominó WF1 y sirvió de insumo para construir nuevos archivos climáticos con escenarios futuros de radiación.

ARCHIVOS CLIMÁTICOS DE ESCENARIOS FUTUROS

Debido a que los archivos climáticos disponibles para escenarios futuros no incorporan variaciones en la radiación solar y, en consecuencia, no evidenciarían modificaciones en la disponibilidad lumínica ni en el desempeño lumínico de edificaciones, a partir del 10% de variación en la radiación reportado por Wild (2009) y tomando como base el archivo climático WF1, fueron considerados 2 criterios para la modificación de archivos climáticos. Los criterios y la descripción de los nuevos archivos climáticos se explican en la Tabla 2. Las modificaciones de los datos climáticos se realizaron en Microsoft Excel.

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Para las simulaciones computacionales se usó el software Dynamic Daylighting (Marsh, 2020), que se encuentra validado con Radiance y DIVA/DAYSIM como se describe en la página de internet. Los parámetros de reflexión tomados para los muros fueron de 0,60; para el suelo, una reflexión de 0,40; y en cielo, del 0,70. La grilla de análisis se definió a una altura de 0,75m sobre el nivel de piso, con una distancia de 0,25 entre celdas. Las métricas que se analizaron fueron *Daylight Authonomy* (DA) [300 lx] y *Spatial Daylight Autonomy* (SDA) [300 lx; 50%], considerando un horario de entre las 08 h y las 18 h, en un período de tiempo anual.

MODELO HIPOTÉTICO

Para las simulaciones computacionales fueron contemplados tres ambientes hipotéticos con dos orientaciones diferentes: norte y occidente. La geometría de los modelos corresponde con áreas y alturas típicas de los usos planteados en la ciudad de Medellín. Los tipos de vidrio también se escogieron según los más usados para edificaciones de oficinas. La descripción de los modelos se resume en la Figura 1.

OLT 40	OLT 50 APV °45	HLT 90
Oficina de 8,00 x 6,00 x 2,40m con vidrio de piso a techo, Transmitancia lumínica - TL = 40%	Oficina de 8,00 x 6,00 x 2,40m con vidrio de piso a techo, TL = 50% y ángulo de protección vertical de 45°	Habitación de 3,50 x 3,50 x 3m, con ventana de 1,20 x 1,20m, sillar de 1m vidrio con TL = 90%

Figura 1. Resumen de modelos. Las unidades de medida están en metros (m). Fuente: Elaboración de los autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta investigación los resultados se analizaron desde dos puntos de vista. En primer lugar, se realizó un análisis de los tipos de cielo y la radiación solar en escenarios futuros y, en segundo lugar, se efectuó un análisis comparativo de las simulaciones computacionales.

RADIACIÓN SOLAR EN ESCENARIOS FUTUROS

El resultado de la adaptación de los archivos climáticos se expone a continuación. La Figura 2 muestra la radiación solar global media horaria de los tres archivos climáticos adaptados, WF1, WF2 y WF3, en comparación con los datos oficiales para los años 2016 y 2017 del IDEAM de Colombia (IDEAM, 2019). A pesar de que el promedio de Radiación Solar Global del WF1 es de 172 Wh/m² y el de los datos del IDEAM es aproximadamente 180 Wh/m², se evidencian diferencias de hasta 100 Wh/m² en los datos de radiación para determinados horarios.

Como complemento, la Figura 3 muestra la frecuencia de valores de radiación global, en rangos entre las 07h hasta las 18h para los archivos climáticos manipulados en comparación con los datos oficiales del IDEAM. En esta se evidencia mayor frecuencia de valores altos de radiación solar global para los archivos WF2.

Estas diferencias en los datos de radiación se registran también en los tipos de cielo que, en términos del *Clearness Index* (Perez et al., 1990), se generarían a partir de los archivos climáticos analizados. La Tabla 3 expresa la frecuencia de los tipos de cielo en 3 de los archivos climáticos. Se evidencia que la metodología utilizada para la adaptación de los datos de radiación modifica la frecuencia tiempo con la que se generarían los tipos de cielo, principalmente en los tipos de cielo 1 y 2, que corresponden a cielos cubiertos/nublados. Este hallazgo también se observa en la Figura 4, en la que las diferencias

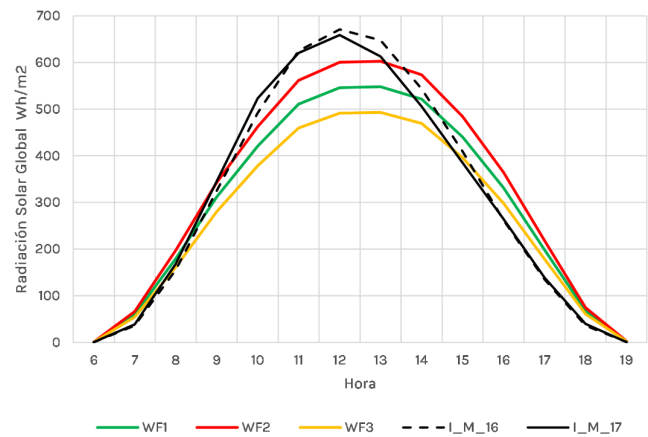


Figura 2. Radiación solar global de archivos climáticos usados vs. datos oficiales del IDEAM de 2016 y 2017. Fuente: Elaboración de los autores.

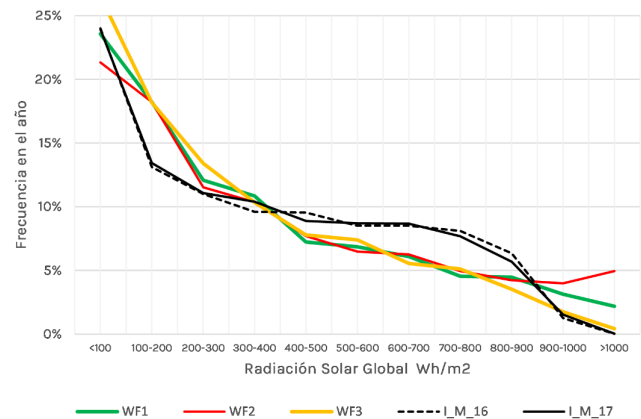


Figura 3. Comparativo de frecuencia de valores radiación solar global por rangos. Fuente: Elaboración de los autores.

Clearness Index								
	1	2	3	4	5	6	7	8
WF1	43%	12%	10%	8%	9%	8%	3%	7%
WF2b	21%	30%	11%	9%	9%	9%	3%	8%
WF3b	50%	9%	8%	7%	9%	7%	3%	6%

Tabla 3. Frecuencia de tipos de cielo en archivos climáticos según *Clearness Index*, que utiliza una escala de 1 al 8, donde 1 corresponde a cielo cubierto/nublado, 4-5 a parcialmente cubierto/intermedio y 8 a cielo despejado/claro. Fuente: Elaboración de los autores.

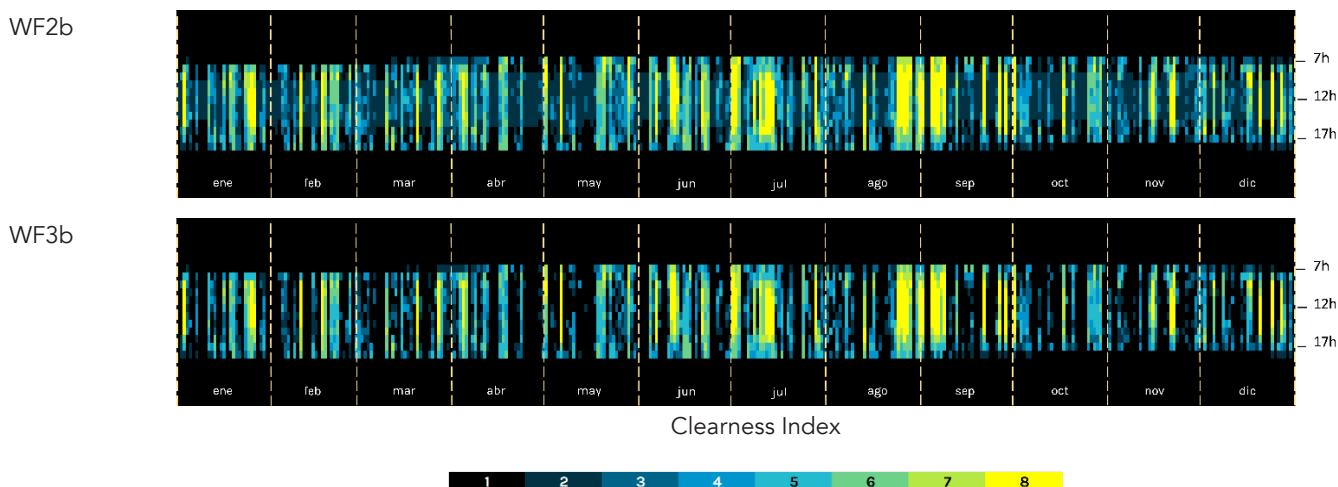


Figura 4. Distribución de tipos de cielo según *Clearness Index* con la escala 1 - 8 para los Archivos WF2b y WF3b.

se advierten con mayor claridad principalmente entre las 09h y las 17h de los días oscuros. El aparente bajo impacto de las modificaciones de los datos de radiación sobre la distribución de frecuencia de los tipos de cielo no necesariamente significa diferencias menores en la disponibilidad lumínica exterior, puesto que con el mismo tipo de cielo podría obtenerse disponibilidad lumínica muy diferente. Sin embargo, se evidencian variaciones, sobre todo, en los tipos de cielo de la mañana y los del final de la tarde, cuando menor disponibilidad lumínica existe para la ciudad de Medellín.

DIFERENCIAS EN LA SUFICIENCIA LUMÍNICA

La Tabla 4 ilustra los resultados de DA y SDA para los 3 modelos hipotéticos en las orientaciones estudiadas. En los resultados se evidencia una variación considerable en los resultados de SDA de cada modelo hipotético en los diferentes escenarios, mientras que los resultados de DA no muestran tanta variación.

El análisis de los resultados de SDA se realizó desde dos enfoques para cada modelo en cada orientación: (i) diferencias entre los valores de SDA para las simulaciones realizadas con archivo climático WF1 y con los otros archivos climáticos, y (ii) máximas diferencias entre los valores de SDA. Con relación al primer enfoque, se

evidencian diferencias de hasta +14% haciendo uso del archivo climático WF2a en el modelo de mejor desempeño lumínico, OLT40, en la orientación Norte, y -14% con el archivo climático WF3a en el modelo HLT90, con ventana de menor tamaño típico de las viviendas en altura en Medellín, con orientación Oeste. Las diferencias menores se registraron en $\pm 4\%$ para las dos orientaciones del modelo OLT50 APV 45°. Estas diferencias sugieren el error que se generaría en la valoración de la suficiencia lumínica de espacios interiores en escenarios de cambio climático cuando se usa un archivo climático actual. Las mismas hacen referencia tanto a aumento del espacio con suficiencia lumínica como a disminución, de acuerdo con el archivo climático usado.

El segundo enfoque, las máximas diferencias entre los valores de SDA para cada caso en cada orientación, remarcan la variabilidad en la valoración anual de suficiencia lumínica que los espacios interiores podrían sufrir en el futuro por cuenta de la variabilidad de la radiación solar. Se registraron diferencias de hasta 22% en el modelo OLT40 orientación Norte, hasta 18% en el modelo OLT40 orientación Oeste, hasta 7% en el modelo OLT50 APV 45° al Norte, hasta 8% en el modelo OLT50 APV 45° al Oeste, hasta 18% en el modelo HLT90 al Norte y hasta 21% en el modelo HLT90 al Oeste.

Código	Orientación	Archivos climáticos	DA (300 lx)	sDA [300lx, 50%]
OLT40	N	WF1	74%	83%
		WF2a	77%	97%
		WF2b	73%	82%
		WF3a	71%	75%
		WF3b	73%	79%
	O	WF1	77%	91%
		WF2a	80%	100%
		WF2b	78%	97%
		WF3a	74%	82%
		WF3b	76%	87%
OLT50 APV 45°	N	WF1	48%	46%
		WF2a	52%	49%
		WF2b	47%	45%
		WF3a	43%	42%
		WF3b	47%	44%
	O	WF1	51%	50%
		WF2a	56%	54%
		WF2b	52%	52%
		WF3a	47%	46%
		WF3b	46%	49%
HLT90	N	WF1	45%	44%
		WF2a	49%	52%
		WF2b	42%	37%
		WF3a	40%	34%
		WF3b	44%	41%
	O	WF1	50%	54%
		WF2a	54%	61%
		WF2b	48%	46%
		WF3a	45%	40%
		WF3b	48%	49%

Tabla 4. Resultados DA y SDA escenarios. Fuente: Elaboración de los autores.

Si bien sería necesario incluir más modelos para confirmarlo, estos resultados sugieren que para espacios con mayor proporción de vidrio en fachada y sin dispositivos de sombra incluidos, es decir, mayormente expuestos a la radiación, así como para espacios con ventanas pequeñas y sin elementos de protección solar en fachada, la variabilidad en la valoración anual de suficiencia lumínica haciendo uso de SDA podría ser mayor. Entretanto, para espacios con elementos de control solar horizontales y un desempeño lumínico menos favorable, las diferencias serían menores.

A pesar de no ser objetivo de esta investigación, si se consideraran las modificaciones que tendrían las edificaciones en el futuro para adaptarse a las condiciones térmicas o para disminuir el consumo de aire acondicionado, se prevería que los valores de SDA podrían disminuir incluso más. Asimismo, la probabilidad

de deslumbramiento podría aumentar en caso de no realizar modificaciones en escenarios de aumento de la radiación solar directa.

En general, el modelo con mayores distancias en los resultados lumínicos con la métrica SDA es el OLT 40, con una diferencia en relación con el caso WF1 de 13,9% y entre los escenarios, de 22,3% (ver Figura 5). Mientras que el espacio con menores variaciones es el OLT 50 APV °45, donde la mayor variación es de 3,9% con respecto al escenario WF1 y entre escenarios es de 7,5%. Estas variaciones entre escenarios, 22,3% y 7,5%, representan las máximas diferencias detectadas y aquellas a las que se podría llegar en el desempeño lumínico, en caso de considerar variaciones en los datos de radiación de los archivos climáticos.

Con relación a los archivos climáticos generados, se

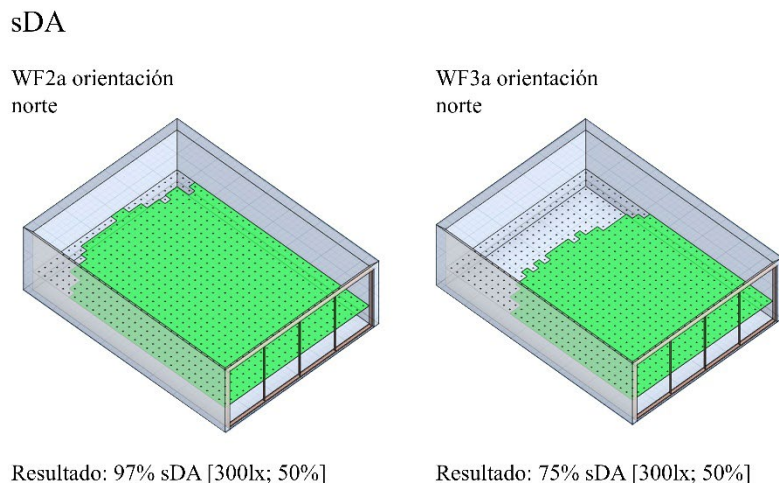


Figura 5. Comparativo de resultados SDA para modelo OLT40. Fuente: Elaboración de los autores.

patentiza que para todos los modelos se presentaron mayores diferencias del caso base con los escenarios de aumento proporcional de radiación directa y difusa WF2a, y disminución proporcional de radiación directa y difusa WF3a con los escenarios en los que la radiación difusa permanecía igual y se aumentaba únicamente la directa, WF2b y WF3b. Esto indica, preliminarmente, que si los cambios en la radiación detectados por Wild (2009) son más o menos proporcionales en la Radiación difusa y la Radiación directa, los cambios en el desempeño lumínico de espacios interiores podrían ser mayores que en otros escenarios. Por consiguiente, para mayor precisión sobre el impacto del cambio climático sobre la variabilidad del desempeño lumínico será necesario definir como se darían los ciclos de *dimming* y *brightening* descritos por Wild (2009).

CONCLUSIÓN

Este artículo abordó la evaluación del desempeño lumínico de ambientes interiores considerando futuros escenarios de cambio climático.

En el proceso no se constataron fuentes o archivos climáticos que se pudieran utilizar para revisar la disponibilidad lumínica interior o exterior a partir de cambios de radiación solar o nubosidad. A pesar de esto, y con los hallazgos de Wild (2009) sobre alteraciones del 10% en la radiación solar global asociadas al cambio climático, se construyeron archivos climáticos modificados con base en datos de archivos climáticos usados actualmente para la ciudad de Medellín. Si bien estos archivos no fueron útiles para predecir cómo sería la radiación solar global en el futuro, sí sirvieron para identificar los cambios en la disponibilidad lumínica local que se podría alcanzar

considerando varios escenarios de cambio en la radiación solar global.

Con los resultados de las simulaciones computacionales se concluyó lo siguiente: por un lado, resultan diferencias de hasta 14% en evaluaciones de SDA, al comparar un escenario actual con un escenario futuro de aumento de radiación solar global, y de 10% cuando ese escenario actual se compara con un escenario futuro de menor radiación, sumado a las diferencias de SDA de hasta 22,3% para todos los casos de un mismo modelo simulado. Esto demuestra el nivel de incertidumbre que se podría generar frente al desempeño lumínico en el futuro con resultados de simulaciones en la actualidad. Evidentemente, estos porcentajes podrían ver ampliada la incertidumbre en otros estudios de caso. Tal incertidumbre se relaciona directamente con imprecisiones en estimativas de consumo energético, suficiencia lumínica y probabilidad de deslumbramiento de edificaciones.

Por otro lado, pese a que no es parte de los objetivos de la investigación, los resultados también permiten prever las variaciones en el desempeño lumínico de edificaciones en los que se efectúen adaptaciones en la fachada para minimizar ganancias térmicas en escenarios de cambio climático. Por ejemplo, si bien una edificación como la OLT 40 posee actualmente un SDA de 91%, en caso de que involucre aleros y cambie sus vidrios para favorecer su eficiencia energética, tal como el caso OLT 50 APV 45°, disminuirá notablemente este valor de acuerdo con el escenario de cambio climático. Frente a este panorama, se advierte sobre la importancia de considerar el desempeño lumínico de espacios interiores en escenarios de cambio climático.

Se resalta de igual forma que, aunque el número de modelos evaluados fue limitado, los resultados permiten concluir preliminarmente que las diferencias entre el desempeño lumínico actual y en el futuro serían más evidentes en ambientes con fachadas vidriadas sin elementos de control solar.

Finalmente, estos hallazgos también llaman la atención sobre la necesidad de profundizar en el estudio de la disponibilidad lumínica exterior en diferentes escenarios de cambio climático en los que se considere modificaciones en la radiación solar, en los tipos de cielo de cada localidad y, por supuesto, en el desempeño lumínico de ambientes interiores. Para esto es fundamental contar con archivos climáticos que incorporen escenarios de cambio climático, no desde el punto de vista térmico sino lumínico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de San Buenaventura Medellín, la Universidad de San Buenaventura Cali y la Universidad Católica de Manizales

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arango-Díaz, L., Parra Correa, E., Puerta Suárez, A. y Salazar, J. H. (2021). Discrepancies in dynamic daylight simulations in the tropic associated with the differences between measured and weather files solar radiation. *Building Simulation*, 8. DOI: [10.26868/25222708.2021.31015](https://doi.org/10.26868/25222708.2021.31015)

Arango-Díaz, L., Piderit, M. B. y Ortiz Cabezas, A. (2022). Estudio de las discrepancias en los tipos de cielo para análisis dinámico de la luz natural según los archivos climáticos disponibles. Caso Colombia. *Revista de Arquitectura*, 24(1), 84–97. DOI: <https://doi.org/10.14718/revarq.2022.24.1.4050>

Barea, G., Victoria Mercado, M., Filippín, C., Monteoliva, J. M. y Villalba, A. (2022). New paradigms in bioclimatic design toward climatic change in arid environments. *Energy and Buildings*, 266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112100>

Belcher, S. E., Hacker, J. N. y Powell, D. S. (2005). Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(1), 49–61. DOI: <https://doi.org/10.1191/0143624405bt1120a>

Bellia, L., Pedace, A. y Fragliasso, F. (2015a). Dynamic daylight simulations: Impact of weather file's choice. *Solar Energy*, 117, 224–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.002>

Bellia, L., Pedace, A. y Fragliasso, F. (2015b). The role of weather data files in Climate-based Daylight Modeling. *Solar Energy*, 112, 163–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.033>

Berardi, U. y Jafarpur, P. (2020). Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109681>

Bre, F., e Silva Machado, R. M., Lawrie, L. K., Crawley, D. B. y Lamberts, R. (2021). Assessment of solar radiation data quality in typical meteorological years and its influence on the building performance simulation. *Energy and Buildings*, 250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111251>

Congedo, P. M., Baglivo, C., Seyhan, A. K. y Marchetti, R. (2021). Worldwide dynamic predictive analysis of building performance under long-term climate change conditions. *Journal of Building Engineering*, 42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103057>

Dervishi, S. y Mahdavi, A. (2013). A simple general luminous efficacy model of global irradiance. En *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association* (pp. 3639–3644). Recuperado de: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_2222.pdf

Fakra, A. H., Boyer, H., Miranville, F. y Bigot, D. (2011). A simple evaluation of global and diffuse luminous efficacy for all sky conditions in tropical and humid climate. *Renewable Energy*, 36(1), 298–306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.042>

Fan, X. (2022). A method for the generation of typical meteorological year data using ensemble empirical mode decomposition for different climates of China and performance comparison analysis. *Energy*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122822>

Fan, X., Chen, B., Fu, C. y Li, L. (2020). Research on the influence of abrupt climate changes on the analysis of typical meteorological year in China. *Energies*, 13(24). DOI: <https://doi.org/10.3390/en13246531>

Fonseca, J. A., Nevat, I. y Peters, G. W. (2020). Quantifying the uncertain effects of climate change on building energy consumption across the United States. *Applied Energy*, 277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115556>

González Cáceres, A. y Díaz Cisternas, M. (2013). Función e impacto del archivo climático sobre las simulaciones de demanda energética. *Hábitat Sustentable*, 3(2), 75–85.

Hosseini, M., Bigtashi, A. y Lee, B. (2021). Evaluating the applicability of Typical Meteorological Year under different building designs and climate conditions. *Urban Climate*, 38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100870>

IDEAM (2019). *Datos climáticos para Colombia*. Recuperado de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

IPCC (2021). *El cambio climático es generalizado, rápido y se está intensificando*. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

IPCC AR6 WG I (2021). *Summary for Policymakers*. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

IPCC AR6 WG III (2022). *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers*. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Iversen, A., Svendsen, S. y Nielsen, T. R. (2013). The effect of different weather data sets and their resolution on climate-based daylight modelling. *Lighting Research and Technology*, 45(3), 305–316. DOI: <https://doi.org/10.1177/1477153512440545>

Jentsch, M. F., James, P. A. B., Bourikas, L. y Bahaj, A. B. S. (2013). Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renewable Energy*, 55, 514–524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>

Joarder, M. A. R., Price, A. y Mourshed, M. (2009). The changing perspective of daylight design to face the challenge of climatechange. En *SASBE 2009, 3rd International Conference on Smart and Sustainable Built Environments*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/48354707>

Lee, E. S., Szybinska Matusiak, B., Geisler Moroder, D., Selkowitz, S. E. y Heschong, L. (2022). Advocating for view and daylight in buildings: Next steps. *Energy and Buildings*, 265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112079>

Marsh, A. (2020). *Dynamic Daylighting Software Details*. AndrewMarch.Com. Recuperado de: <http://andrewmarsh.com/software/daylight-box-web/>

Monteoliva, J. M., Villalba, A. y Pattini, A. E. (2017). Variability in dynamic daylight simulation in clear sky conditions according to selected weather file: Satellite data and land-based station data. *Lighting Research and Technology*, 49(4), 508–520. DOI: <https://doi.org/10.1177/1477153515622242>

ONU (2015). *Acuerdo de París*. Recuperado de: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

Pajek, L. y Košir, M. (2021). Exploring climate-change impacts on energy efficiency and overheating vulnerability of bioclimatic residential buildings under central european climate. *Sustainability (Switzerland)*, 13(12). DOI: <https://doi.org/10.3390/su13126791>

Perez, R., Ineichen, P. y Seals, R. (1990). Modeling Daylight Availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44, 271–289.

Perez, R., Seals, R. y Michalsky, J. (1993). All_Weather model for sky luminance distribution. Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3), 235–245.

Remund, J., Müller, S., Kunz, S., Huguenin-Landl, B., Studer, C., Klauser, D. y Schilter, C. (2014). *Handbook Part I: Software*. METEOTEST.

Rodríguez Roa, A. (2010). *Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de Cambio Climático con el clima presente en Colombia*. Nota Técnica IDEAM, IDEAM-METEO/009-2010. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evaluaci%C3%B3n+de+Modelos+Globales+-+IPCC.pdf/6d9d1816-6ce0-4346-8a69-043f04cbf580>

Sun, J., Li, Z. y Xiao, F. (2017). Analysis of Typical Meteorological Year selection for energy simulation of building with daylight utilization. *Procedia Engineering*, 205, 3080–3087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.303>

Troup, L. y Fannon, D. (2016). Morphing climate data to simulate building energy consumption. En *ASHRAE and IBPSA-USA Building Simulation Conference* (pp. 439–446). Recuperado de: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=simbuild2016_C058

Vong, N. K. (2016). *Climate change and energy use: Evaluating the impact of future weather on building energy performance in tropical regions*. Tesis Doctoral. Universidad de Hawái-Mānoa. ScholarSpace repositorio de la Universidad de Hawái. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10125/45569>

Wang, J., Wei, M. y Chen, L. (2019). Does typical weather data allow accurate predictions of daylight quality and daylight-responsive control system performance. *Energy and Buildings*, 184, 72–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.029>

Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(12). <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>

Yassaghi, H. y Hoque, S. (2019). An Overview of Climate Change and Building Energy: Performance, Responses and Uncertainties. *Buildings*, 9(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings9070166>

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL RESIDUO DE CAUCHO DE NEUMÁTICO COMO REEMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO FINO EN EL HORMIGÓN

ANALYSIS OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WASTE TIRE RUBBER AS A PARTIAL REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE IN CONCRETE

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO FINO NO CONCRETO

Luz Adriana Fernandez-Torrez

Ingeniera Civil
Investigadora, Universidad Privada del Valle, Tiquipaya, Bolivia
<https://orcid.org/0000-0001-6445-6056>
adrirusher223@gmail.com

Joaquín Humberto Aquino-Rocha

Magister en Ingeniería Civil
Investigador, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-3383-6379>
joaquinaquinorocha@gmail.com

Nahúm Gamalier Cayo-Chileno

Ingeniero Civil
Investigador, Universidad Privada del Valle, Tiquipaya, Bolivia
<https://orcid.org/0000-0003-4350-1174>
nahum.cayo.chileno@gmail.com



RESUMEN

El objetivo del presente estudio es evaluar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con residuos de caucho de neumático (RCN) como sustituto parcial a la arena, considerando materiales locales de la ciudad de Cochabamba, Bolivia, a fin de promover una economía circular. Para ello, se sustituyó la arena por RCN (en volumen) en cuatro porcentajes: 0% (referencia), 5%, 10% y 20%, evaluando sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, tracción y flexión) y físicas (masa específica, absorción de agua e índice de vacíos). Los resultados indican que existe una tendencia a la disminución a mayor porcentaje de RCN, tanto para la resistencia mecánica como para las propiedades físicas, a excepción de la mezcla con 5% de RCN, la cual presentó resultados comparables al hormigón con arena natural. El RCN puede ser utilizado en la elaboración local de hormigón hasta en un 5% sin comprometer sus propiedades mecánicas y físicas, y brinda además un enfoque sostenible.

Palabras clave

materiales de construcción, desarrollo sostenible, medio ambiente

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the physical and mechanical properties of concrete with waste tire rubber (WTR) as a partial substitute for sand, considering local materials from the city of Cochabamba, Bolivia, to promote a circular economy. The sand was replaced by WTR (in volume) in four percentages: 0% (reference), 5%, 10%, and 20%, evaluating its mechanical properties (resistance to compression, traction, and bending) and physical properties (specific mass, water absorption, and void index). The results indicate that there is a tendency to decrease with a higher percentage of WTR, both for mechanical resistance and for physical properties, except for the mixture with 5% WTR, which had results comparable to concrete with natural sand. WTR can be used in the local production of concrete up to 5% without compromising its mechanical and physical properties, in addition to having a sustainable approach.

Keywords

construction materials, sustainable development, environment.

RESUMO

O objetivo do presente estudo é avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto com resíduos de borracha de pneus (RCN) como substituto parcial da areia, considerando os materiais locais da cidade de Cochabamba, Bolívia, com o intuito de promover uma economia circular. Para este fim, a areia foi substituída por RCN (por volume) em quatro porcentagens: 0% (referência), 5%, 10% e 20%, avaliando suas propriedades mecânicas (resistência à compressão, à tração e à flexão) e propriedades físicas (massa específica, absorção de água e relação de vazios). Os resultados indicam que há uma tendência à diminuição com uma maior porcentagem de RCN tanto para a resistência mecânica quanto para as propriedades físicas, com exceção da mistura de 5% de RCN, que mostrou resultados comparáveis ao concreto com areia natural. O RCN pode ser usado na produção local de concreto até 5% sem comprometer suas propriedades mecânicas e físicas e proporciona uma abordagem sustentável.

Palavras-chave

materiais de construção, desenvolvimento sustentável, meio ambiente

INTRODUCCIÓN

El residuo de caucho proveniente de neumáticos (RCN) es uno de los desechos más importantes en el mundo. Se estima que 1000 millones de neumáticos entran en desuso cada año (Czajczyńska, Krzyżyńska, Jouhara y Spencer, 2017; Oliveira Neto *et al.*, 2019) y que para 2030 esta cifra alcanzará 1200 millones, totalizándose 5000 millones de neumáticos desechados de manera irregular (Pacheco-Torgal, Dingy y Jalali, 2012). En Bolivia se generan 3 millones de neumáticos residuales por año, de los cuales solo el 5% se recicla (Swisscontact, 2020). Y solo en los vertederos del eje metropolitano de la ciudad de Cochabamba se registran 16 mil toneladas de neumáticos (Vargas, 2017).

La disposición inadecuada de neumáticos genera impactos ambientales negativos que, incluso, atentan contra la salud humana, aumentan el riesgo de incendios accidentales y proporcionan refugio para mosquitos y roedores. En este sentido, la reducción y el reciclaje son actividades esenciales para conservar los recursos naturales y reducir la demanda de espacios en los vertederos, toda vez que, técnicamente, los RCN no se consideran degradables (Derakhshan *et al.*, 2017; Trudsø *et al.*, 2022).

Por otro lado, en la industria de la construcción existe una creciente demanda por áridos, se requieren aproximadamente 48.3 billones de agregados por año (The Freedom Group, 2012). Respecto al agregado fino, se reporta un alto consumo a nivel mundial de arena para la elaboración de materiales a base de cemento, tales como hormigón y morteros. Sin embargo, la arena es un material escaso en varios países; situación que ha llevado a la búsqueda de materiales alternativos para ser utilizados como agregado fino (Kaish, Odimegwu, Zakaria y Abood, 2021; Kangavar, Lokuge, Manalo, Karunasena y Frigione, 2022). Entre una de estas soluciones se encuentra el RCN, ampliamente utilizado (W. Huang, X. Huang, Xing y Zhou, 2020; Ren, Mo, Wang y Ho, 2022).

Al emplear RCN como agregado fino se disminuye el consumo de agregado natural y se reutiliza un residuo, aplicándose así un enfoque sostenible (Thomas y Gupta, 2015; Marques *et al.*, 2020). No obstante, se debe considerar el porcentaje de reemplazo y el tamaño del RCN, puesto que podría afectar negativamente las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los materiales a base de cemento (Bisht y Ramana, 2017). En estado fresco, el uso de RCN tiene un efecto adverso en la trabajabilidad del hormigón, lo que se asocia a la cantidad y tamaño del RCN (Gravina y Xie, 2022), como también a la fricción entre partículas (superficie rugosa del RCN) y a la naturaleza no polar del RCN (Rashid, Yazdanbakhsh y Rehman, 2019).

En cuanto a las propiedades mecánicas, estudios anteriores han demostrado que, en general, la resistencia mecánica del hormigón disminuye con RCN como reemplazo al agregado fino (Aslani, Ma, Wan y Muselin, 2018). Pero esta reducción es variable, por ejemplo, Gurunandan, Phalgun, Raghavendra y Udayashankar (2019) señalaron una disminución de la resistencia a la compresión de 66.93% para 22.5% de RCN, y Silva, Mouta, Costa y Gomes (2019) indicaron una reducción de solo 17.27% con 9% de RCN. La resistencia a la tracción también presenta la misma tendencia: Youssef, Mills y Hassanli (2016) demostraron que 50% de RCN provoca una reducción de 58.5% y Abd-Elaal *et al.* (2019) reportaron una disminución de 61.22% para 40% de RCN. En términos de la resistencia a la flexión, tiende a darse una reducción de ella con el aumento de RCN (Abdelmonem, El-Feky, Nasr y Kohail, 2019; Alwesabi, Bakar, Alshaikh y Akil, 2020), sin embargo, se ha indicado asimismo un aumento en la capacidad de deformación, ya que el bajo módulo de elasticidad del RCN mejora la tenacidad del hormigón, beneficiando a la ductilidad (Hilal, 2017).

La durabilidad del hormigón con RCN igualmente ha sido reportada en la literatura especializada. Bisht y Ramana (2017) demostraron que la incorporación de RCN aumenta la penetración de agua, una vez que las microfisuras producidas por el RCN benefician el transporte del agua en el hormigón. Gurunandan *et al.* (2019) señalan que, a mayores porcentajes de RCN, la profundidad de penetración de iones cloruro aumenta, lo que se atribuye a la formación de una Zona de Transición Interfacial (ZTI) débil entre el RCN y la matriz de cemento. De otra parte, la resistencia al hielo-deshielo presenta un mejor rendimiento, principalmente a bajas cantidades de RCN, lo que se debe a la naturaleza hidrófoba del RCN y a su capacidad de absorción de energía (W. Zhang, Gong y J. Zhang 2018; Pham, Toumi y Turatsinze, 2019).

Si bien se han realizado investigaciones significativas en el área, el RCN no es adoptado en la industria de la construcción, pese a que atiende a diferentes requerimientos, incluso a elementos estructurales (Huang *et al.*, 2020; Ren *et al.*, 2022). En Bolivia no se reportan estudios de la utilización de RCN como agregado fino en materiales a base de cemento, como el hormigón, lo que representaría una solución a problemas locales, como la sobreexplotación de los bancos de agregados y la elevada generación de RCN, con base en una economía circular (Symeonides, Loizia y Zorpas, 2019; Ross, 2020). Desde esta perspectiva, el objetivo del siguiente trabajo es evaluar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con RCN como reemplazo a la arena (0, 5, 10 y 20% en volumen), utilizando materiales y residuos locales de la ciudad de Cochabamba, a fin de verificar su viabilidad técnica para producir hormigón.

Parámetro	Unidad	Cemento IP-40	NB – 011/RM - 261
Pérdida por ignición	%	2.1	≤5.00
SiO ₂	%	25.82	-
Al ₂ O ₃	%	5.05	-
Fe ₂ O ₃	%	2.61	-
CaO	%	58.81	-
MgO	%	5.57	≤6.00
SO ₃	%	2.54	≤4.00
Na ₂ O	%	0.22	-
K ₂ O	%	0.87	-
RI	%	7.55	≤35.00

Tabla 1. Composición química del cemento IP-40. Fuente: Proporcionado por el fabricante (Coboce R. L.)

Parámetro	Unidad	Cemento IP-40	NB – 011/RM - 261
Blaine	cm ² /g	5153	≥2800
Retenido T325	%	2.66	-
Densidad real	cm ³ /g	3.03	-
Densidad aparente	cm ³ /g	1.04	-
Inicio fraguado	h	2.09	≥0.75
Final fraguado	h	4.17	≤7.00
Exp. Le Chatelier	mm	0.93	≤ 8.00
Resistencia 3 días	MPa	30.09	≥17.00
Resistencia 7 días	MPa	36.79	≥25.00
Resistencia 28 días	MPa	41.65	≥40.00

Tabla 2. Características físicas del cemento IP-40. Fuente: Proporcionado por Coboce R. L.

METODOLOGÍA

MATERIALES

Para la elaboración del concreto se utilizaron los siguientes materiales, todo provenientes de la ciudad de Cochabamba (Bolivia): cemento puzolánico IP-40, comercializado en; arena y grava natural, provenientes del banco Parotani; agua potable de la Universidad Privada del Valle; y RCN obtenido de una empresa de reciclaje local (TERRACYCLE).

La composición química y las características físicas del cemento IP-40 se presentan en la Tabla 1 y 2, respectivamente.

Se realizó el ensayo de granulometría del agregado grueso (Figura 1) y fino (Figura 2) siguiendo la normativa ASTM

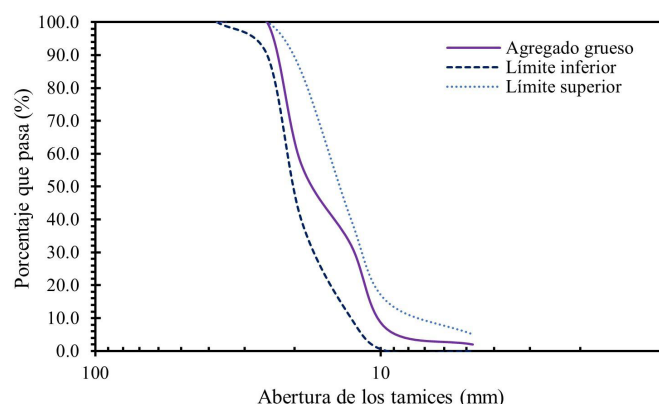


Figura 1. Granulometría del agregado grueso. Fuente: Elaboración de los autores.

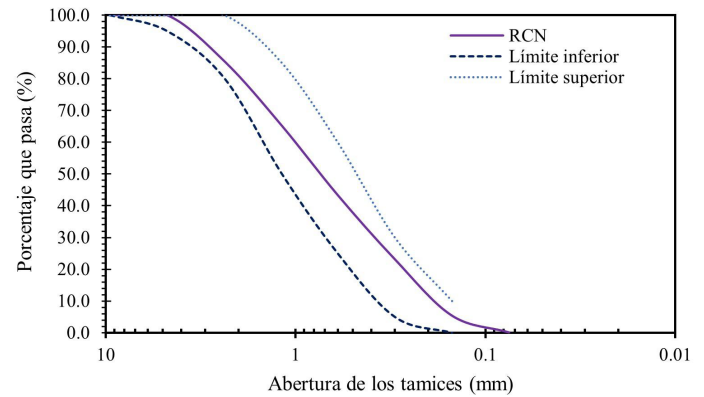
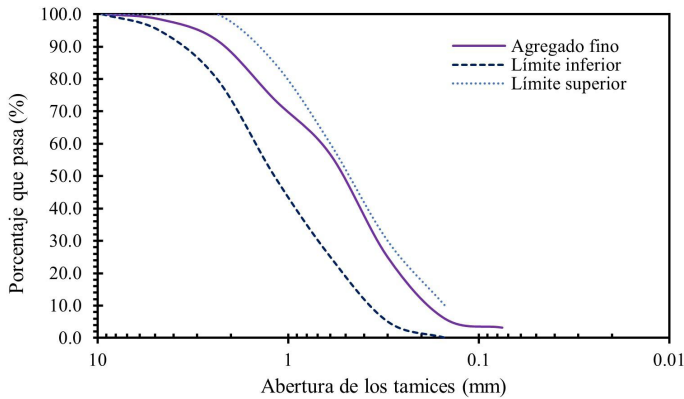
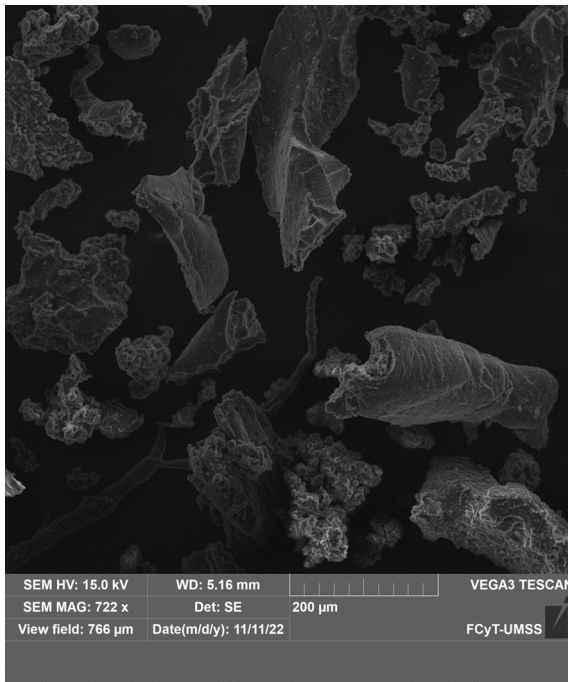
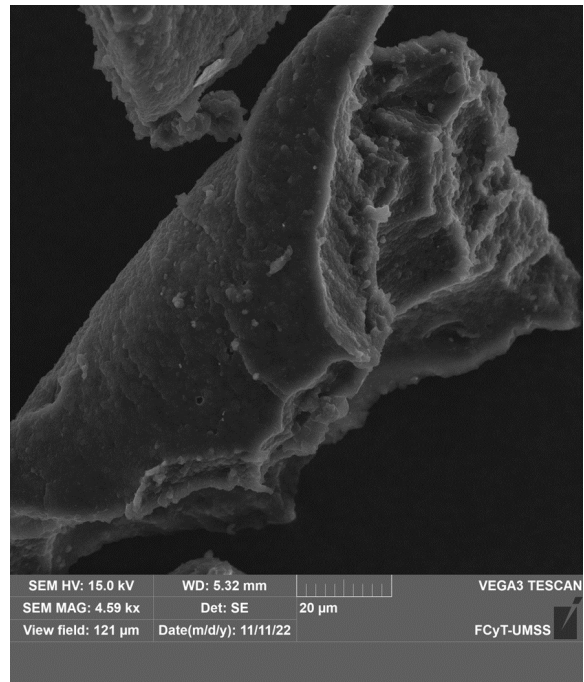


Figura 2. Granulometría del agregado fino. Fuente: Elaboración de los autores.
 Figura 3. Granulometría del RCN. Fuente: Elaboración de los autores.



a)



b)

Figura 4. a) Forma de las partículas de RCN. b) Superficie de las partículas de RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

C136 (ASTM, 2020). El módulo de finura del agregado grueso y fino fue de 7.34 y 2.36, respectivamente, con un tamaño máximo de agregado de 19 mm. La densidad relativa del agregado grueso fue de 2.63 g/cm³, valor determinado por la norma ASTM C127 (ASTM, 2015a). Mientras que el agregado fino tiene una densidad relativa de 2.77 g/cm³ siguiendo la ASTM C128 (ASTM, 2015b).

El RCN proviene del proceso de reciclaje de neumáticos desechados y recolectados en la ciudad de Cochabamba, Bolivia. El RCN presenta una densidad de 1.1 g/cm³ a 25 °C. En la Figura 3 se grafica la curva granulométrica del RCN, tomando en cuenta la norma ASTM C136 (ASTM, 2020).

El RCN se presenta en gránulos de forma irregular (Figura 4a) y superficie rugosa (Figura 4b), características similares del RCN reportado en la literatura (Bisht y Tamana, 2017; Gurunandan et al., 2018; Abd-Elaal et al., 2019; Letelier, Bustamante, Muñoz, Rivas y Ortega, 2021).

La Figura 5 presenta la composición química elemental del RCN (en porcentaje de peso): Carbono (93.1%), Oxígeno (3.6%), Zinc (1.7%), Azufre (1.3%), Fósforo (0.2%) y Potasio (0.1%). La composición química elemental es similar a la señalada por otros autores que utilizaron RCN como agregado fino (Bisht y Tamana, 2017; Ren et al., 2022).

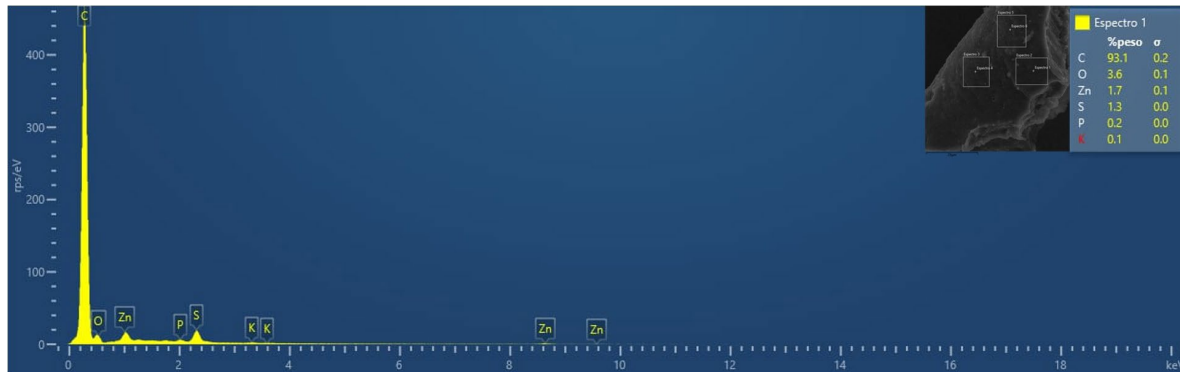


Figura 5. Análisis de energía dispersiva por Rayos X del RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

Mezclas (RCN)	Agua (kg)	Cemento (kg)	Agregado grueso (kg)	Agregado fino (kg)	RCN (kg)
Ref. (0%)	143.64	272.29	1156.91	868.23	0.00
5%	143.64	272.29	1156.91	824.82	17.24
10%	143.64	272.29	1156.91	781.41	34.48
20%	143.64	272.29	1156.91	694.58	67.35

Tabla 3. Cantidad de materiales por 1 m³ de hormigón. Fuente: Elaboración de los autores.

DEFINICIÓN DE MEZCLAS

En este punto, se consideró una resistencia a la compresión de diseño de 21 MPa, dentro del rango establecido para un hormigón estructural (IBNORCA, 1987). Se evaluó el reemplazo de la arena por RCN (volumen) en cuatro mezclas: 0% (referencia), 5%, 10% y 20%. La Tabla 3 exhibe la cantidad de materiales por mezcla para 1 m³.

ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS

El ensayo de asentamiento se realizó siguiendo la norma UNE-EN 12350-2 (Asociación Española de Normalización, 2020), utilizando el cono de Abrams y verificando la consistencia plástica (3-5±1cm) de la referencia (0% RCN). Se determinó la resistencia a la compresión, tracción y flexión del hormigón con RCN para 7 y 28 días. La resistencia a la compresión fue determinada siguiendo las especificaciones de la CBH 87 (IBNORCA, 1987). La resistencia a la tracción fue calculada mediante el ensayo brasileño, NBR 7222 (ABNT, 2011). Para ambas propiedades se utilizaron cuerpos de prueba cilíndricos de 10x20 cm. A fin de determinar la resistencia a la flexión se usaron cuerpos de pruebas prismáticos de 15x15x55 cm, considerando el método estándar de tres puntos, según la ASTM C293 (ASTM, 2016). Cuatro cuerpos de prueba fueron ensayados para cada mezcla estudiada y propiedad mecánica.

A partir de los fragmentos generados en los ensayos mecánicos se llevó a cabo el ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), de manera de observar la interacción del RCN con la matriz de cemento. Antes del ensayo se generó un vacío en los fragmentos de hormigón y se recubrieron con una capa de oro para una mejor visualización de la microestructura. El equipo utilizado fue de la marca OXFORD INSTRUMENTS.

La absorción de agua, masa específica (densidad) e índice de vacíos fueron determinados siguiendo la norma ASTM C642 (ASTM, 2021). Se consideraron 3 cuerpos de prueba cilíndricos (10 x 20 cm) por cada mezcla y propiedad física. La edad de ensayo fue de 28 días, según recomienda la ASTM C642 (ASTM, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ASENTAMIENTO

A medida que aumenta el contenido de RCN, el asentamiento del hormigón disminuye (Figura 6). El rango de reducción está entre 37.58 y 91.93% para 5 y 20% de RCN, respectivamente. Rashid et al. (2019) también reportaron reducciones de la trabajabilidad similares, 64% para 10% de RCN y 76.9%, tanto para 20 como 30% de RCN. Eisa, Elshazli y Nawar. (2020) indican una reducción del 2 al 28% para 5 y 20% de RCN, respectivamente. La pérdida de trabajabilidad se explica por la forma irregular de las partículas de RCN (Figura 4a),

la distribución de granulometría más baja que la arena (<3.5 mm) y la superficie rugosa del RCN (Figura 4b), lo cual genera fricción entre las partículas (Gurunandan *et al.*, 2019; Rashid *et al.*, 2019; Eisa *et al.*, 2020; Karunarathna, Linforth, Kashani, Liu y Ngo, 2021). En este sentido, Abdelmonem *et al.* (2019) señalan que el uso de superplastificantes disminuye el efecto negativo del RCN sobre la trabajabilidad del hormigón, obteniéndose una reducción máxima de 8.5% para 30% de RCN.

Concretamente, aquí se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba Tukey, a fin de comprobar si la disminución de las medias del asentamiento era significativa, considerando un α de 0.05. En el primer caso (ANOVA), se concluyó que existe diferencias significativas entre las medias, el p valor fue 1.94E-9 ($<\alpha$). Mediante la prueba Tukey (Tabla 4) se puede afirmar que existen diferencias significativas entre todas las medidas del asentamiento, y que, a mayor porcentaje de RCN, menor trabajabilidad tiene el hormigón.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En la Figura 7 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión para 7 y 28 días. Se puede observar que, para ambas edades, existe una reducción de la resistencia a la compresión a medida que aumenta el reemplazo del agregado fino por RCN, donde solo la mezcla de referencia alcanzó la resistencia a la compresión de diseño (21.51 MPa). La reducción en la resistencia a la compresión del hormigón se debe principalmente a la naturaleza hidrofóbica del RCN, lo que se traduce en una débil zona de transición interfacial (ZTI); el RCN también induce a altas concentraciones de tensión, produciendo una propagación de grietas, y a la baja gravedad específica del RCN que genera una distribución no uniforme de los esfuerzos (Ren *et al.*, 2022; Li, Zhang, Wang y Lei, 2019). Por otro lado, Najim y Hall (2013) y Wu, Kazmi, Munir, Zhou y Xing (2020) han señalado que la gran diferencia del módulo de elasticidad del RCN y la matriz de cemento desarrolla una deficiente unión con la matriz de cemento, generando una menor compacidad en la microestructura y, por lo tanto, una disminución de las propiedades mecánicas (compresión, tracción y flexión).

La Figura 8 presenta la variación porcentual de la resistencia a la compresión con relación a la referencia. Para 7 días, existe una reducción mínima (1.58%) en la mezcla 5% de RCN; sin embargo, para 10 y 20% de RCN la reducción es significativamente mayor, 15.22 y 21.99%, respectivamente. En el caso de los 28 días, se registra una reducción mayor que a los 7 días para 5% de RCN (6.41%), pero para 10 y 20% de RCN los porcentajes de disminución son menores, 8.89 y 14.23%, respectivamente. En ambos casos se advierte una tendencia a la reducción de la resistencia a la compresión, la cual se realza a mayores porcentajes de RCN, situación reportada previamente (Karunarathna *et al.*, 2021; Hilal,

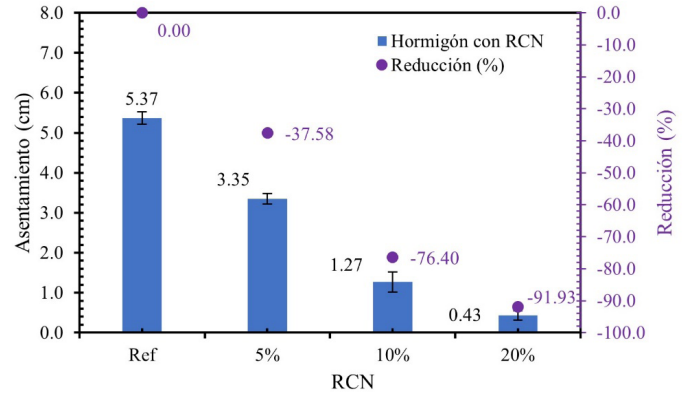


Figura 6. Asentamiento del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

Mezclas (RCN)		p valor
Grupo 1	Grupo 2	
Ref. (0%)	5%	2.5E-06
Ref. (0%)	10%	1.2E-08
Ref. (0%)	20%	4.2E-09
5%	10%	1.9E-06
5%	20%	1.1E-07
10%	20%	0.00153

Tabla 4. Prueba Tukey para asentamiento del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

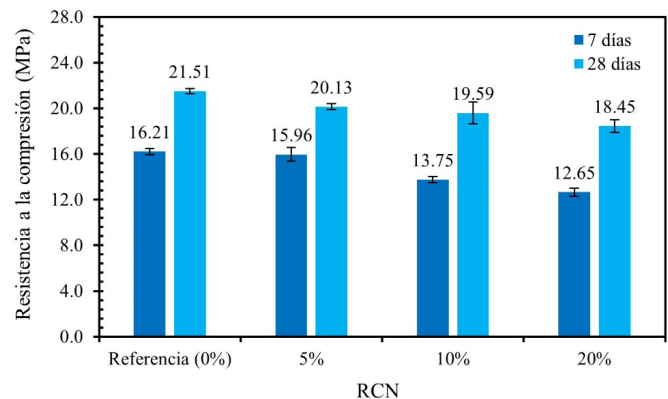


Figura 7. Resistencia a la compresión del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

2017, Ren *et al.*, 2022). Su, Yang, Ling, Ghataora y Dirar (2015) informaron, de igual forma, una reducción en el rango de 9.5-10.6% para un 20% de RCN. Alwesabi *et al.* (2020) indicaron una disminución de 38.9% para 20% de RCN y Gesoğlu, Güneyisi, Khoshnaw e İpek (2014) reportaron reducciones de 7.9 y 38.6% para 10 y 20% de reemplazo de arena por RCN, respectivamente, atribuyendo este comportamiento a la unión del RCN y

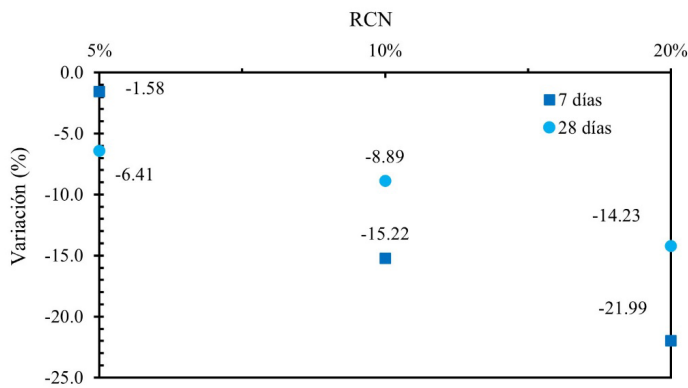


Figura 8. Variación porcentual de la resistencia a la compresión para hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

Mezclas (RCN)		p valor	
Grupo 1	Grupo 2	7 días	28 días
Ref. (0%)	5%	0.80771	0.02728
Ref. (0%)	10%	8.9E-06	0.00295
Ref. (0%)	20%	1.7E-07	4.5E-05
5%	10%	2.7E-05	0.58977
5%	20%	3.8E-07	0.00764
10%	20%	0.01089	0.07131

Tabla 5. Prueba Tukey para resistencia a la compresión a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración de los autores.

la pasta de cemento. Por otro lado, Letelier et al. (2021) evidencian mayores porcentajes de reducción para 10 y 15% de RCN, 37.2 y 51.1%, respectivamente.

Para verificar si la reducción de las medias de la resistencia a la compresión es significativa, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba Tukey, ambas para un α de 0.05. El p valor de ANOVA fue 5.52E-08 y 8.16E-05 para 7 y 28 días, respectivamente, resultando diferencias significativas entre las medias ($p \text{ valor} < \alpha$).

En la prueba Tukey para 7 días (Tabla 5), se observa que no existe diferencia entre la referencia y la mezcla con 5% de RCN, lo cual corresponde al bajo porcentaje de reducción (1.58%); no obstante, también las mezclas de 10 y 20% de RCN son iguales. En caso de 28 días (Tabla 5), existe diferencia entre las medias de la referencia y las mezclas con RCN ($p \text{ valor} < \alpha$), pero entre los distintos porcentajes de RCN no existe diferencia, a excepción de 5 y 20% de RCN. Estos resultados indican que el RCN influye en la resistencia a la compresión de forma negativa; sin embargo, a elevados porcentajes de RCN (10 y 20%), la reducción es estadísticamente igual.

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

La resistencia a la tracción para 7 y 28 días de todas las mezclas se grafica en la Figura 9. A la edad de 7 días, se aprecia una reducción de ella con el aumento de RCN -siendo el valor más alto en la referencia-, pero solo una diferencia mínima respecto a la mezcla de 5% de RCN. Para 28 días, también existe una diferencia mínima entre la mezcla de 5% de RCN y la referencia. Otros porcentajes de RCN manifiestan una reducción mayor.

La reducción porcentual de las mezclas con RCN respecto a la referencia se presenta en la Figura 10. Para 7 días existe mayor disminución cuando se compara con la edad de 28 días. En ambas edades, la reducción es baja para la mezcla de 5% de RCN; mientras que se registran disminuciones de 14.29 y 15.53% para 10 y 20% de RCN a

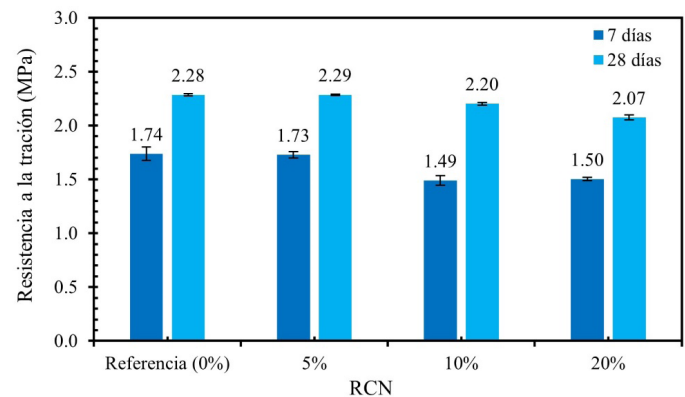


Figura 9. Resistencia a la tracción del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

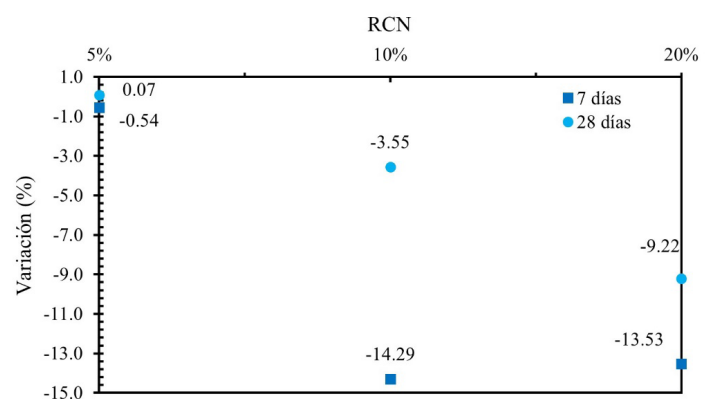


Figura 10. Variación porcentual de la resistencia a la tracción para hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores

los 7 días, respectivamente. A los 28 días, la reducción fue de 3.55% para 10% de RCN y de 9.22% para 20% de RCN. Estos resultados concuerdan con otros trabajos, como el de Su et al. (2015), quienes reportaron una disminución de 8.77% para 20% de RCN, y el de Elchalakani (2015), quien expuso rangos similares de reducción.

Mezclas (RCN)		p valor	
Grupo 1	Grupo 2	7 días	28 días
Ref. (0%)	5%	0.98837	0.99874
Ref. (0%)	10%	1.2E-05	2.6E-05
Ref. (0%)	20%	2E-05	6.8E-10
5%	10%	1.7E-05	2.2E-05
5%	20%	3.1E-05	6.3E-10
10%	20%	0.96844	1.8E-07

Tabla 6. Prueba Tukey para resistencia a la tracción a 7 y 28 días.
 Fuente: Elaboración de los autores

Mediante ANOVA se afirma que existe diferencia entre las medias, el p valor obtenido fue menor a 0.05, 1.06E-06 y 2.82E-10 para 7 y 28 días, respectivamente. En la prueba Tukey (Tabla 6), tanto para 7 como 28 días, no se advierte diferencia entre la referencia y 5% de RCN ($p \text{ valor} > \alpha$), lo que se puede verificar en la Figura 6. Adicionalmente, se observa que, para 7 días, no existe diferencia entre 10 y 20% de RCN. Estos resultados indican que se da una tendencia de disminución al usar RCN, pero, hasta un 5% de RCN, no se produce un impacto significativo en la resistencia a la tracción. En congruencia con esto, Hilal (2017) sugiere que la incorporación de RCN no afectaría la resistencia a la tracción en el hormigón si la granulometría del RCN es continua, como es el caso de la presente investigación (Figura 3), toda vez que las partículas pequeñas de RCN podrían tener un efecto de relleno, mejorando la compacidad en la microestructura y reduciendo la tensión en el interior de los poros.

Por otra parte, la disminución de la resistencia mecánica se relaciona con el tamaño de partícula de RCN, especialmente cuando es mayor a 5 mm (A. Kadhim y H. Kadhim, 2021). En este marco, el bajo impacto del 5% de RCN en la resistencia a la tracción también se puede explicar por el tamaño de partícula utilizado, considerando que el máximo fue de 3.5 mm (Figura 3).

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Los resultados de resistencia a la flexión para 7 y 28 días se ilustran en la Figura 11. De modo similar a las anteriores propiedades analizadas, existe acá una reducción con la sustitución de arena por RCN, siguiendo la tendencia publicada (Thomas y Gupta, 2015; Gurunandan et al., 2019; Ren et al., 2022). Ahora bien, no parece existir una clara diferencia entre las mezclas de 5 y 10% de RCN, puesto que los valores son similares e, incluso, se genera una mejora mínima para 10% de RCN. Alwesabi et al. (2020) atribuyen la reducción de la resistencia a la flexión a la débil unión entre el mortero y el caucho, situación que aumenta la concentración de tensión y acelera la propagación de grietas.

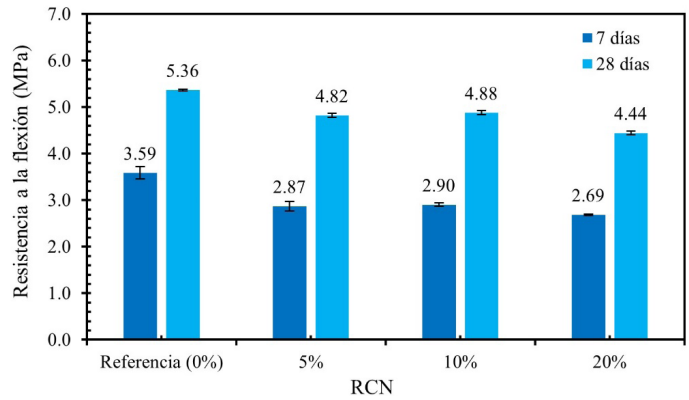


Figura 11. Resistencia a la flexión del hormigón con RCN.
 Fuente: Elaboración de los autores.

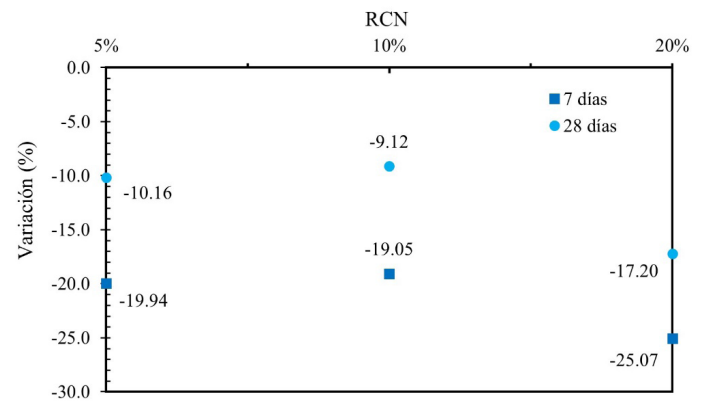


Figura 12. Variación porcentual de la resistencia a la flexión para hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

Mezclas (RCN)		p valor	
Grupo 1	Grupo 2	7 días	28 días
Ref. (0%)	5%	3.1E-07	7E-10
Ref. (0%)	10%	5.1E-07	2.4E-09
Ref. (0%)	20%	2.3E-08	7.1E-13
5%	10%	0.9507	0.21994
5%	20%	0.04466	4.8E-08
10%	20%	0.01776	9.9E-09

Tabla 7. Prueba Tukey para resistencia a la flexión a 7 y 28 días.
 Fuente: Elaboración de los autores.

En la Figura 12 se muestra la reducción con respecto a la referencia. Los valores a 7 días presentan mayor disminución que a 28 días, siendo el máximo de 25.07% para 20% de RCN. A los 28 días, el porcentaje de disminución para 5 y 10% de RCN está en el rango de 10%, a diferencia de 20% de RCN, cuyo valor es 17.20%. Resultados similares fueron encontrados por Hilal (2017): reducción de hasta 40% con 25% de RCN; y Abdelmonem

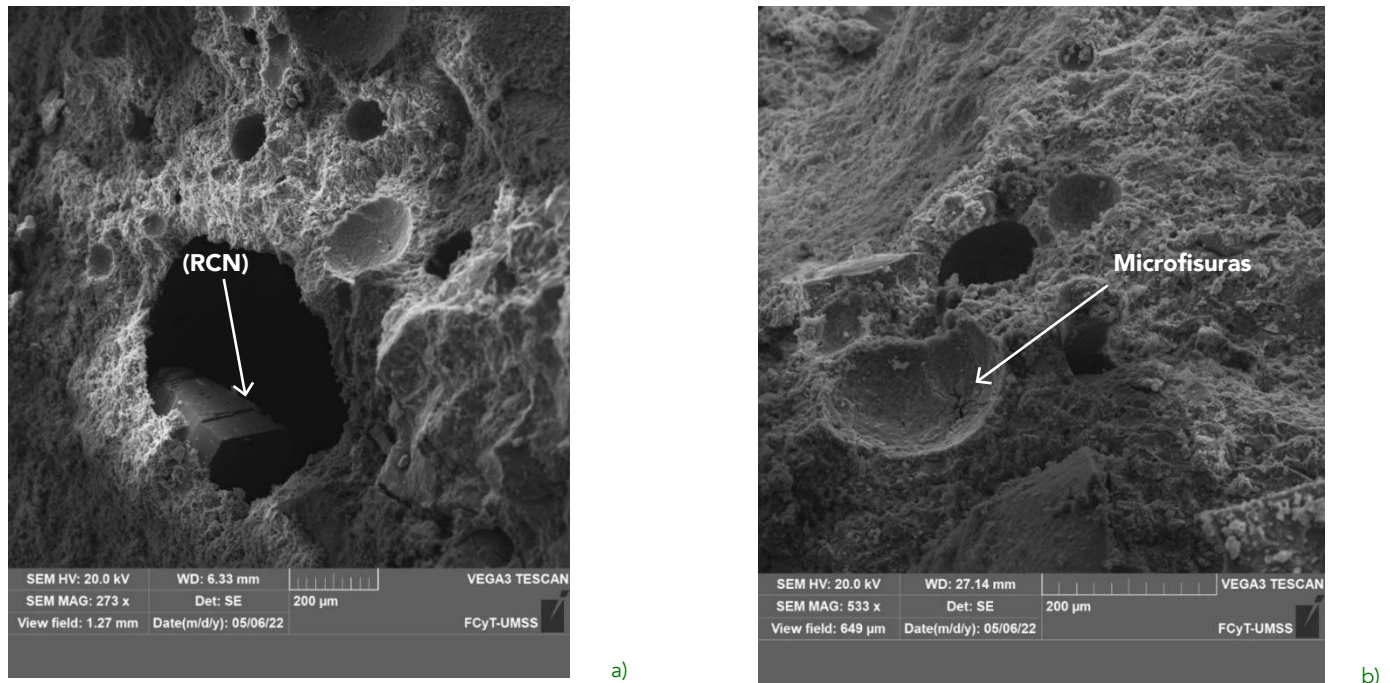


Figura 13. Microestructura del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

et al. (2019): disminución de 27.6% para 30% de RCN. Si bien los presentes resultados están de acuerdo con la literatura, otros pocos estudios han demostrado una tendencia contraria: mayor resistencia a la flexión con la adición de RCN (Yousf et al., 2016) y, RCN con fibras de polipropileno (Shahjalal et al., 2021).

Mediante ANOVA se puede establecer que existen diferencias significativas entre las medias de la resistencia a la flexión, puesto que el p valor ($<\alpha$) resultó de 2.39E-08 y de 3.19E-12 para 7 y 28 días, respectivamente. La Tabla 7 resume lo obtenido a partir de la prueba Tukey, donde se observa que las mezclas de 5 y 10% de RCN no presentan diferencias significativas ($p > \alpha$), como se comentó antes (Figura 8). Por consiguiente, a medida que se aumenta el reemplazo de arena por RCN se producirá una reducción en la resistencia a la flexión. No obstante, este comportamiento es más significativo en porcentajes elevados (20%); en porcentajes menores (5 y 10%) se genera una reducción similar.

MICROESTRUCTURA

La Figura 13 ilustra la microestructura del concreto con RCN. En la Figura 13a se puede observar la interacción del RCN con la matriz de cemento, que muestra adherencia entre los productos de hidratación y RCN, pero también se advierte la presencia de porosidad. En la Figura 13b se evidencia la propagación de microfisuras en el concreto con RCN, situación descrita por Alwesabi et al. (2020). Estos factores influyen en la resistencia mecánica del concreto, como fue analizado en la sección anterior.

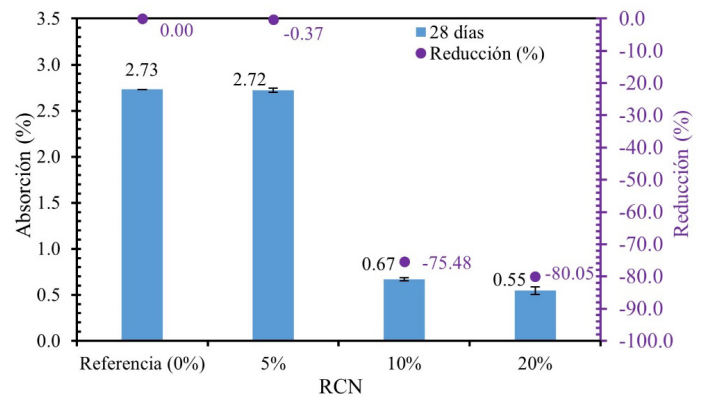


Figura 14. Absorción de las mezclas con RCN a los 28 días. Fuente: Elaboración de los autores.

La reducción de las propiedades mecánicas se puede explicar igualmente por la forma irregular y textura suave de las partículas de RCN (Figura 4), dado que esta condición conduce a una propagación de microfisuras, lo que prueba una débil ZTI (Bisht y Ramana, 2017).

ABSORCIÓN, DENSIDAD E ÍNDICE DE VACÍOS

Los resultados referentes a las propiedades físicas de absorción, densidad e índice de vacíos se aprecian en las Figuras 14, 15 y 16, respectivamente. Mediante ANOVA se puede verificar que existen diferencias significativas entre las medias por propiedad. El p valor ($<\alpha$) fue de 2.24E-19, 1.14E-04 y 7.38E-07 para la absorción, densidad e índice de vacíos, respectivamente. En la Tabla 8 se indican los resultados

de la prueba Tukey para comparar las diferencias entre los grupos estudiados.

Respecto a la absorción (Figura 14), se puede percibir que existe una disminución a medida que aumenta el porcentaje de RCN. Sin embargo, no se evidencia diferencia entre 5% de RCN y la referencia (Tabla 8). Para 10 y 20% de RCN la reducción fue mayor, 75.48 y 80.05%, respectivamente. Los resultados indican que cantidades mayores al 5% de RCN disminuyen de manera considerable la absorción (por encima del 70%). Dichos porcentajes están de acuerdo con la literatura revisada: Thomas y Gupta (2015) y Saloni, Parveen, Pham, Lim y Malekzadeh (2021) señalan que existe una tendencia decreciente de la absorción con la incorporación de RCN, lo que se debe a la naturaleza impermeable del caucho. Por el contrario, la sustitución de arena por RCN de un solo tamaño provocaría el aumento de la porosidad (mayor absorción de agua), pero un RCN de granulometría continua podría mejorar la capacidad de relleno y derivar en una reducción de la absorción de agua (Ren et al., 2022). En este sentido, tanto la naturaleza impermeable como la granulometría continua del RCN disminuyen la absorción de agua de las mezclas con RCN, especialmente para contenidos mayores al 5%.

Al igual que en los estudios de Moustafa y ElGawady (2015), Silva et al. (2019) y Alwesabi et al. (2020), la densidad se reduce con el aumento del porcentaje de RCN (Figura 15), debido a la baja densidad del RCN (1.1 g/cm³), además de que la textura irregular del RCN permite atrapar aire (Taha, El-Dieb, Abd El-Wahab y Abdel-Hameed, 2008). Para 5% de RCN se expresa una diferencia mínima de -1.83% respecto a la referencia, valor no significativo: p valor>0.05 (Tabla 8). Otros dos grupos tampoco presentan diferencias: 5 con 10% de RCN, y 10 con 20% de RCN. Se puede establecer, entonces, que cantidades menores al 5% de RCN no influyen significativamente en la densidad del hormigón, y que mayores porcentajes generan una mayor reducción, a pesar de no existir una clara diferencia entre algunos grupos. Abdelmonem et al. (2019) reportaron esta misma tendencia negativa en la densidad debida al bajo peso unitario del RCN. Asimismo, Moustafa y ElGawady (2015) evidenciaron reducciones similares para 5, 10 y 20% de RCN, 1.91, 2.87 y 5.09%, respectivamente.

El índice de vacíos disminuye a medida que aumenta la sustitución de arena por RCN (Figura 16). Hasta un 5% de RCN no presenta diferencia significativa con la referencia (Tabla 8), reducción de 1.16%, pero para un 20% de RCN la reducción es 29.83%. Este comportamiento puede ser explicado por la mejora de la compacidad de las mezclas (reducción de la porosidad), resultado de la granulometría continua del RCN. Ya el uso de RCN de un solo tamaño aumenta la absorción de agua y el contenido de vacíos (Eisa et al., 2020). Los resultados concuerdan con Silva et al. (2019), quienes también indicaron una reducción de índice de vacíos con 9% de RCN. Si bien

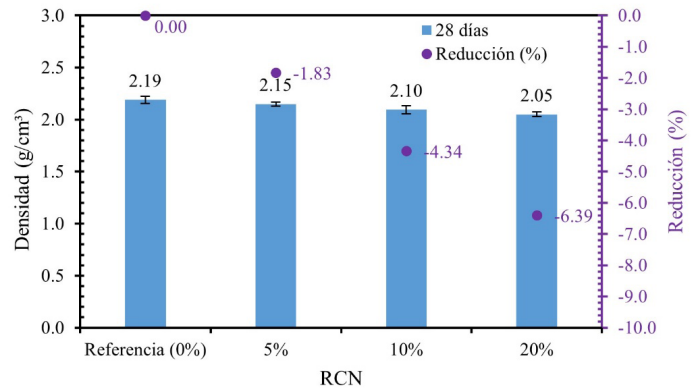


Figura 15: Densidad de las mezclas con RCN a los 28 días. Fuente: Elaboración de los autores.

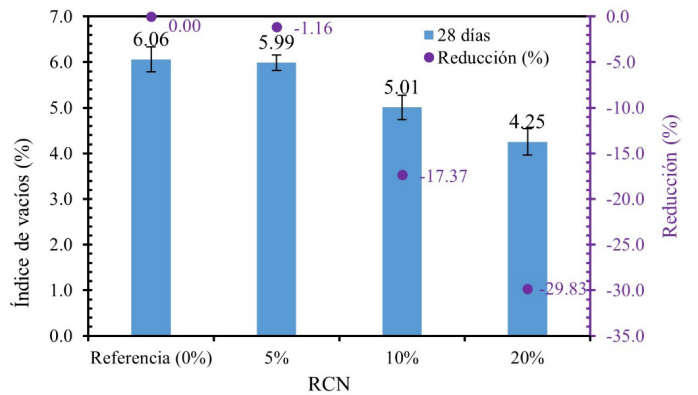


Figura 16. Índice de vacíos de las mezclas con RCN a los 28 días. Fuente: Elaboración de los autores.

Mezclas (RCN)		p valor		
Grupo 1	Grupo 2	Absorción	Densidad	Vacíos
Ref. (0%)	5%	0.96788	0.1915	0.97905
Ref. (0%)	10%	7.4E-15	0.00323	0.00039
Ref. (0%)	20%	7.4E-15	9.4E-05	1.8E-06
5%	10%	7.4E-15	0.1314	0.00072
5%	20%	7.4E-15	0.00264	2.7E-06
10%	20%	0.00045	0.15902	0.00586

Tabla 8. Prueba Tukey para las propiedades físicas. Fuente: Elaboración de los autores.

los resultados son positivos en términos de absorción de agua y contenido de vacíos, propiedades que afectan la resistencia mecánica y durabilidad, se requieren más estudios sobre el comportamiento físico-mecánico a largo plazo, a fin de comprobar las tendencias y compararlas con otras investigaciones (Ren et al., 2022).

Conforme lo mencionado, el reemplazo parcial de la

arena por RCN tiene un impacto positivo sobre el medio ambiente, ya que evita la extracción de materias primas y reduce el descarte de residuos (Rashid *et al.*, 2019), y, según los resultados presentados, el desempeño físico-mecánico es similar al hormigón convencional (RCN 5%). Desde este enfoque, es necesario impulsar un plan de acción para una economía circular en el uso de residuos locales, como es el caso del RCN, introduciendo nuevas materias primas en la economía (Ross, 2020; Trudsø *et al.*, 2022).

Pese a que el uso del RCN no está normado para su incorporación en el hormigón, existen algunas iniciativas al respecto, desde especificaciones técnicas (CEN, 2010) hasta literatura científica para su uso como materia prima secundaria (Oliveira Neto *et al.*, 2019; Alwesabi *et al.*, 2020; Ren *et al.*, 2022). Finalmente, aunque el comportamiento físico-mecánico del hormigón es importante para su aplicación, es fundamental evaluar sus impactos ambientales, principalmente cuando algunos de sus componentes se sustituyen por residuos. Por lo tanto, se recomienda el uso de herramientas y/o metodologías complementarias que permitan evaluar el desempeño ambiental del hormigón con RCN dentro de un contexto sostenible, a lo largo de su ciclo de vida, como el caso de la metodología Evaluación de Ciclo de Vida (ECV) (Gravina y Xie, 2022; Hossein, Azarijafari y Khoshnazar, 2022).

CONCLUSIONES

En el presente estudio se evaluó el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con RCN. Los resultados obtenidos señalan que el reemplazo de arena por RCN tiene un impacto negativo sobre la trabajabilidad y propiedades mecánicas. En el primer caso, la forma irregular y superficie rugosa de las partículas de RCN generan fricción, reduciendo la trabajabilidad de las mezclas con RCN. La pérdida de la trabajabilidad está en el rango de 37.58 y 91.93% para 5 y 20% de RCN, respectivamente, de modo que es más significativa a mayores porcentajes de RCN. Con relación a las propiedades mecánicas, se observa que la resistencia a la compresión, tracción y flexión disminuyen con el aumento de RCN; no obstante, 5% de RCN presentó las menores diferencias con respecto a la referencia: -6.41, 0.07 y -10.16% para la resistencia a la compresión, tracción y flexión, respectivamente. Se resalta que, para 5% de RCN no existe diferencia significativa con la mezcla referencia. La reducción de las propiedades mecánicas se debe a la formación de una débil ZTI entre el RCN y la matriz de cemento, lo que se relaciona tanto con la naturaleza hidrófuga como con el bajo módulo de elasticidad del RCN.

La absorción, densidad e índice vacíos presentaron una mejora debido al RCN: la absorción disminuyó con porcentajes elevados de RCN (10 y 20%), valores por

encima del 75%. El hormigón exhibió menor densidad, presentado reducciones de 1.83 a 6.39% para 5 y 20% de RCN, respectivamente, y el índice de vacíos mostró una tendencia a la disminución. Si bien para 5% de RCN la reducción no fue estadísticamente significativa, para 20% de RCN esta alcanzó un 29.83%. Este impacto positivo en las propiedades físicas se debe a la granulometría continua y la impermeabilidad de las partículas de RCN.

El hormigón con bajo contenido de RCN (hasta 5%) constituye una alternativa técnicamente viable en la industria de la construcción, toda vez que presenta el mismo rendimiento físico-mecánico que un hormigón convencional. Adicionalmente, el uso RCN tiene un impacto sostenible local, en la medida en que se reutilizan residuos y se evita la sobreexplotación de agregados, en este caso, de la arena.

Este trabajo se limitó a la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas a corto plazo (7 y 28 días) del hormigón con RCN y aunque se obtuvieron datos necesarios para el diseño y construcción de estructuras de hormigón, se desconoce el comportamiento físico-mecánico del RCN en el hormigón a largo plazo. Próximos estudios pueden considerar evaluar el hormigón con RCN a edades más avanzadas, mayores a 28 días. El estudio se limitó al uso de RCN no tratado, con miras a evitar impactos ambientales adicionales, sin embargo, se pueden utilizar y/o proponer tratamientos de bajo impacto que mejoren el desempeño mecánico del hormigón con RCN. Por último, la investigación demostró una factibilidad física-mecánica del uso de 5% RCN en el hormigón, pero no se determinó la reducción del impacto ambiental, por consiguiente, se requiere un análisis de los beneficios medioambientales del hormigón con RCN.

Futuros estudios pueden considerar el uso de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) a fin de mejorar el desempeño del hormigón con RCN y permitir un mayor porcentaje de reemplazo de arena por RCN. Paralelamente, es necesario evaluar la durabilidad del hormigón con RCN para garantizar la seguridad y funcionalidad de las edificaciones que consideren este material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Elaal, E. S., Araby, S., Mills, J. E., Youssef, O., Roychand, R., Ma, X., Zhuge, Y. y Gravina, R. J. (2019). Novel approach to improve crumb rubber concrete strength using thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116901>
- Abdelmonem, A., El-Feky, M., Nasr, E. y Kohail, M. (2019). Performance of high strength concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041>
- ABNT (2011). NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

- Alwesabi, E., Bakar, B., Alshaiikh, I. y Akil, H. (2020). Experimental investigation on mechanical properties of plain and rubberised concretes with steel-polypropylene hybrid fibre. *Construction and Building Materials*, 233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117194>
- Aslani, F., Ma, G., Wan, D. L. Y. y Muselin, G. (2018). Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production*, 182, 553-566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.074>
- Asociación Española de Normalización (2020). *UNE-EN 12350-2: Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*. UNE: Madrid, España.
- ASTM (2015a). *ASTM C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. DOI: <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- ASTM (2015b). *ASTM C128-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. DOI: <https://doi.org/10.1520/C0128-15>
- ASTM (2016). *ASTM C293/C293M-16: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. DOI: https://doi.org/10.1520/C0293_C0293M-16
- ASTM (2020). *ASTM C136/C136M-19: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. DOI: https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM (2021). *ASTM C642-21. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. DOI: <https://doi.org/10.1520/C0642-21>
- Bisht, K. y Ramana, P. (2017). Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and building materials*, 155, 811-817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131>
- CEN (2010). *CEN/TS 14243:10. Materials produced from end of life tyres - Specification of categories based on their dimension(s) and impurities and methods for determining their dimension(s) and impurities*. Recuperado de: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/713de38b-eb7a-4a4e-b1b1-fdf10f56a5f8/cen-ts-14243-2010>
- Czajczyńska, D., Krzyżyńska, R., Jouhara, H. y Spencer, N. (2017). Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*, 134, 1121-1131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.042>
- Derakhshan, Z., Ghaneian, M., Mahvi, A., Conti, G., Faramarzian, M., Dehghani, M. y Ferrante, M. (2017). A new recycling technique for the waste tires reuse. *Environmental research*, 158, 462-469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.07.003>
- Eisa, A. S., Elshazli, M. T. y Nawar, M. T. (2020). Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119078>
- Elchalakani, M. (2015). High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers. *Structures*, 1, 20-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2014.06.001>
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G. e İpek, S. (2014). Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>
- Gravina, R. J. y Xie, T. (2022). Toward the development of sustainable concrete with Crumb Rubber: Design-oriented Models, Life-Cycle-Assessment and a site application. *Construction and Building Materials*, 315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125565>
- Gurunandan, M., Phalgun, M., Raghavendra, T. y Udayashankar, B. (2019). Mechanical and damping properties of rubberized concrete containing polyester fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 1-10. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002614](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002614)
- Hilal, N. (2017). Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 191-206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2017.03.001>
- Hosseini, A. H., Azarijafari, H. y Khoshnazar, R. (2022). The role of performance metrics in comparative LCA of concrete mixtures incorporating solid wastes: A critical review and guideline proposal. *Waste Management*, 140, 40-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.01.010>
- Huang, W., Huang, X., Xing, Q. y Zhou, Z. (2020). Strength reduction factor of crumb rubber as fine aggregate replacement in concrete. *Journal of Building Engineering*, 32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101346>
- IBNORCA (1987). *CBH 87: Estructuras de hormigón. Norma Boliviana. Hormigón Armado*. Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). Recuperado de: https://cadecocruz.org.bo/UserFiles/File/CBH_87.pdf
- Kadhim, A. A. y Kadhim, H. M. (2021). Experimental investigation of rubberized reinforced concrete continuous deep beams. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* [en prensa]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.001>
- Kaish, A. B. M. A., Odimegwu, T. C., Zakaria, I. y Abood, M. M. (2021). Effects of different industrial waste materials as partial replacement of fine aggregate on strength and microstructure properties of concrete. *Journal of Building Engineering*, 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102092>
- Kangavar, M. E., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W. y Frigione, M. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00934>
- Karunarathna, S., Linforth, S., Kashani, A., Liu, X. y Ngo, T. (2021). Effect of recycled rubber aggregate size on fracture and other mechanical properties of structural concrete. *Journal of Cleaner Production*, 314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128230>
- Letelier, V., Bustamante, M., Muñoz, P., Rivas, S. y Ortega, J. M. (2021). Evaluation of mortars with combined use of fine recycled aggregates and waste crumb rubber. *Journal of Building Engineering*, 43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103226>

- Li, Y., Zhang, X., Wang, R. y Lei, Y. (2019). Performance enhancement of rubberised concrete via surface modification of rubber: A review. *Construction and Building Materials*, 227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116691>
- Marques, B., Antonio, J., Almeida, J., Tadeu, A., De Brito, J., Dias, S., Pedro, F. y Sena, J. D. (2020). Vibro-acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and recycled rubber granules. *Construction and Building Materials*, 264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120221>
- Moustafa, A. y Elgawady, M. (2015). Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*, 93, 249-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>
- Najim, K. B. y Hall, M. R. (2013). Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Materials and structures*, 46(12), 2029-2043. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0034-4>
- Oliveira Neto, G. C. D., Chaves, L. E. C., Pinto, L. F. R., Santana, J. C. C., Amorim, M. P. C. y Rodrigues, M. J. F. (2019). Economic, environmental and social benefits of adoption of pyrolysis process of tires: A feasible and ecofriendly mode to reduce the impacts of scrap tires in Brazil. *Sustainability*, 11(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/su11072076>
- Pacheco-Torgal, F., Ding, Y. y Jalali, S. (2012). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and Building Materials*, 30, 714-724. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047>
- Pham, N. P., Toumi, A. y Turatsinze, A. (2019). Effect of an enhanced rubber-cement matrix interface on freeze-thaw resistance of the cement-based composite. *Construction and Building Materials*, 207, 528-534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.147>
- Rashid, K., Yazdanbakhsh, A. y Rehman, M. (2019). Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material. *Journal of Cleaner Production*, 224, 396-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.197>
- Ren, F., Mo, J., Wang, Q. y Ho, J. C. M. (2022). Crumb rubber as partial replacement for fine aggregate in concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128049>
- Ross, D. E. (2020). Use of waste tyres in a circular economy. *Waste Management & Research*, 38(1), 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X19895697>
- Saloni, Parveen, Pham, T., Lim, Y. y Malekzadeh, M. (2021). Effect of pre-treatment methods of crumb rubber on strength, permeability and acid attack resistance of rubberised geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102448>
- Shahjalal, M., Islam, K., Rahman, J., Ahmed, K. S., Karim, M. R. y Billah, A. M. (2021). Flexural response of fiber reinforced concrete beams with waste tires rubber and recycled aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123842>
- Silva, L., Mouta, J., Costa, M. y Gomes, L. (2019). Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0676>
- Su, H., Yang, J., Ling, T., Ghataora, G. y Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- SWISSCONTACT (2020). Reciclaje de llantas, productos verdes con valor agregado. *Swisscontact*. Recuperado de: <https://www.swisscontact.org/es/noticias/reciclaje-de-llantas-productos-verdes-con-valor-agregado>
- Symeonides, D., Loizia, P. y Zorpas, A. (2019). Tire waste management system in Cyprus in the framework of circular economy strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(35), 35445-35460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05131-z>
- Taha, M., El-Dieb, A., Abd El-Wahab, M. y Abdel-Hameed, M. (2008). Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 20(10), 640-649. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:10\(640\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:10(640))
- The Freedonia Group (2012). Global demand for aggregates to exceed 48 billion metric tons in 2015. *Concrete construction*. Recuperado de: https://www.concreteconstruction.net/business/global-demand-for-construction-aggregates-to-exceed-48-billion-metric-tons-in-2015_o
- Thomas, B. y Gupta, R. (2015). Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 102, 78-87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.072>
- Trudsø, L. L., Nielsen, M. B., Hansen, S. F., Syberg, K., Kampmann, K., Khan, F. R. y Palmqvist, A. (2022). The need for environmental regulation of tires: Challenges and recommendations. *Environmental Pollution*, 311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119974>
- Vargas, J. (2017). Llantas en botaderos, una bomba de tiempo. *Los tiempos*. Recuperado de: <https://www.lostiempos.com/actualidad/local/20170620/llantas-botaderos-bomba-tiempo>
- Wu, Y. F., Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Zhou, Y. y Xing, F. (2020). Effect of compression casting method on the compressive strength, elastic modulus and microstructure of rubber concrete. *Journal of Cleaner Production*, 264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121746>
- Youssf, O., Mills, J. E. y Hassanli, R. (2016). Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 175-183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040>
- Zhang, W., Gong, S. y Zhang, J. (2018). Effect of rubber particles and steel fibers on frost resistance of roller compacted concrete in potassium acetate solution. *Construction and Building Materials*, 187, 752-759. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.244>

APROVECHAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE POTENCIALIDADES SOSTENIBLES EN EL MODELO DE MOVILIDAD URBANA DEL CENTRO DE LA CIUDAD DE AMBATO¹

USE AND PRESENTATION OF SUSTAINABLE POTENTIALITIES IN THE AMBATO CITY CENTER URBAN MOVEMENT MODEL

APROVEITAMENTO E APRESENTAÇÃO DE POTENCIALIDADES SUSTENTÁVEIS NO MODELO DE MOBILIDADE URBANA DO CENTRO DA CIDADE DE AMBATO

Andrea Cristina Goyes-Balladares

Ingeniera Civil
Docente Investigadora
Universidad Técnica de Ambato , Ambato, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-8765-8686>
ac.goyes@uta.edu.ec

Roberto Carlos Moya-Jiménez

Diseñador
Docente Investigador
Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-3918-2935>
rc.moya@uta.edu.ec

1 Se agradece a la Universidad Técnica de Ambato y especialmente a la Facultad de Diseño y Arquitectura.

RESUMEN

El proceso de urbanización intensificado de las últimas décadas deja en evidencia la necesidad de planificar las ciudades, considerando una adecuada movilidad de personas. El objetivo de este documento es realizar un análisis de las condiciones de movilidad del centro de la ciudad de Ambato desde un enfoque de sostenibilidad. La metodología utilizada se basó en una revisión teórica y un análisis de documentos e instrumentos oficiales, visitas de campo y fichas de observación. Los resultados se obtuvieron a partir del examen de variables objetivas y técnicas que muestran las potencialidades y debilidades del área de estudio para el desarrollo de los modos de transporte activos y menos contaminantes. Se presenta una reflexión sobre las características de peatones, ciclistas y transporte público masivo con el fin de proponer estrategias de gestión encaminadas a fortalecer el modelo de movilidad actual.

Palabras clave

medios de transporte, movilidad urbana, movilidad sostenible, mejoramiento urbano.

ABSTRACT

The intensified urbanization process of recent decades has highlighted the need to plan cities, suitably considering people's mobility. The goal of this article is to analyze the mobility conditions of Ambato city center using a sustainability approach. The methodology used was based on a theoretical review and analysis of official documents, fieldwork, and observation records. The results were obtained by analyzing objective and technical variables that show the study area's potentialities and weaknesses to develop active and less polluting modes of transport. A reflection on the characteristics of pedestrians, cyclists, and mass public transport is presented to propose management strategies that aim at strengthening the current mobility model.

Keywords

means of transport, urban mobility, sustainable mobility, urban improvement.

RESUMO

O processo de urbanização intensificado das últimas décadas evidencia a necessidade de planejar as cidades considerando uma mobilidade adequada das pessoas. O objetivo deste documento é realizar uma análise das condições de mobilidade do centro da cidade de Ambato a partir de uma abordagem de sustentabilidade. A metodologia utilizada baseou-se em revisão teórica e análise de documentos e instrumentos oficiais, visitas de campo e registros de observação. Os resultados foram obtidos a partir da análise de variáveis objetivas e técnicas que evidenciam as potencialidades e fragilidades da área de estudo para o desenvolvimento de modos de transporte ativos e menos poluentes. Apresenta-se uma reflexão sobre as características dos pedestres, ciclistas e transporte público de massa com o objetivo de propor estratégias de gestão que visem fortalecer o modelo de mobilidade atual.

Palavras-chave

meios de transporte, mobilidade urbana, mobilidade sustentável, melhoria urbana.

INTRODUCCIÓN

La incuestionable necesidad del desplazamiento dentro de los asentamientos urbanos caracteriza el dinamismo propio de la cotidianeidad ciudadana. Es la movilidad el derecho social que satisface el deseo de moverse y permite el acceso al trabajo, la vivienda, la salud, la educación, el ocio, etc. Ello ocasiona altos índices de movilidad de personas y mercancías en los centros urbanos. Bajo este contexto, se entiende como movilidad a "la suma de desplazamientos individuales" (Miralles-Guasch, 2002) y, por ende, al modo en que se lleva a cabo el desplazarse dentro de un área específica; definición que contempla no solo a aquellas modalidades que involucran el dispendio de energía (Herce, 2009). Las ciudades se alimentan, cambian y se reproducen a partir de la movilidad de sus habitantes (Kaufmann, 2008).

El modelo general de movilidad urbana asocia los modos de transporte motorizado y no motorizado con la dimensión territorial, la configuración urbana y la concentración de oportunidades y/o servicios, pues es su morfología y estructura la que condiciona el tipo y cantidad de flujos generados (Romero Renau, 2011). Sin embargo, el rápido crecimiento urbano y la desconexión de los factores de planificación desencadena un modelo deficiente reflejado en congestión vehicular, baja calidad en los servicios de transporte, falta de accesibilidad al transporte público, espacios inapropiados para peatones y ciclistas, así como también impactos en el medio ambiente (Kamran, Farhan, Shujaat y Shah, 2019). Problemas que son el resultado de una incompatibilidad del tejido urbano y las infraestructuras recientes que se acoplan a la vida contemporánea (Elserafi, Elkerdany y Shalaby, 2017).

Por lo tanto, resulta necesario un modelo de movilidad eficiente y adecuado que responda a las necesidades de la población, un sistema accesible que facilite la realización de las actividades propias de las urbes (Obregón-Biosca y Betanzo-Quezada, 2015). En razón de que las ciudades son cuerpos dinámicos y a pesar de que los lugares sean parecidos y posean una población cuyas condiciones puedan considerarse similares, estas nunca van a ser iguales, ni siquiera en el mismo territorio de un país (Gibson, Jolly, Vilches y Parra, 2011).

La sostenibilidad en movilidad urbana se fundamenta en la priorización del peatón, del ciclista y del transporte público, y se plantea como objetivo principal el favorecer la intermodalidad y la integración de estos modos de transporte (Tanikawa-Obregón y Paz-Gómez, 2021) pues, suponen un menor nivel de congestión en el viario y contribuyen en la disminución de la contaminación ambiental. Tradicionalmente, la sostenibilidad se ha enfocado solo en los impactos en

el medio ambiente, sin embargo, en años recientes se han incluido factores como equidad, impacto económico, seguridad, salud y calidad (Hipogrosso y Nesmachnow, 2020); se comienzan a reutilizar las calles para acomodar mejor las soluciones de movilidad, las actividades comunitarias, los modos activos, las instalaciones de recarga, espacios verdes y actividades comerciales (Tsavachidis y Petit, 2022).

Se ha advertido que la implementación de estrategias para mejorar las condiciones de movilidad del transporte no motorizado tiene un impacto positivo en la intensidad y diversidad de las funciones urbanas, mejorando la seguridad de las calles y entornos peatonales (Orellana, Hermida y Osorio, 2017). En efecto, el proporcionar una mayor calidad de espacio destinado a las personas está directamente relacionado con el aumento de individuos en las calles, lo cual genera una sensación de comunidad y conexión entre viandantes y ciclistas (Kuo y Sullivan, 2001, p. 359). Se incide, además, en un mejoramiento de la calidad ambiental y paisajística por la reducción del transporte motorizado (Säumel, Weber y Kowarik, 2016, p. 25). Tal es el caso de Curitiba en Brasil y su proceso de descongestionamiento y peatonización del centro, en el que se ejecutó intervenciones exitosas en las principales vías comerciales, Calle XV de noviembre y la Rua de las Flores. La primera de ellas fue cerrada por completo para el tránsito vehicular y transformada exclusivamente para uso peatonal, se instaló mobiliario urbano de sombra y reposo, iluminación diferenciada, paisajismo, creando nuevos puntos de encuentro y espacio de libre convivencia urbana. En la segunda vía se adaptó el mobiliario urbano y el pavimento para personas con movilidad reducida, con deficiencias visuales e invidentes (Velásquez, 2015). De esta manera, se implementó un nuevo sentido al trasladarse, orientado no solo a moverse de un punto a otro, sino también a descubrir, identificarse y apropiarse de la ciudad (Suárez Falcón, Verano y García, 2016). Martos, Pacheco-Torres, Ordóñez y Jadraque-Gago (2016) establecen, en este sentido, que los barrios son las mejores zonas de trabajo para la aplicación de estrategias sostenibles en la ciudad; el intervenir a nivel local permite identificar las necesidades específicas que son el reflejo de las condiciones a nivel ciudad.

Lizárraga (2006), por su parte, menciona que la principal limitación en la implementación de un modelo nuevo y sostenible es la sociedad, en su conjunto, pues es partícipe del proceso de modificación del comportamiento de consumo y modelo de movilidad. Por esto, tanto la ciudadanía, como el gobierno, las empresas públicas y privadas deben promover acciones, políticas y programas que contribuyan con la nueva perspectiva de sostenibilidad. Sin embargo, para lograr el objetivo mencionado se debe optimizar los canales de comunicación entre los diferentes

niveles del proceso de planificación para garantizar una colaboración fluida entre las partes interesadas (Kamargianni, Georgouli, Tronca y Chaniotakis, 2022). España, a través del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [MITMA], demuestra cómo el cambio de paradigma de la administración pública fortalece los canales de comunicación, llevando a cabo un Diálogo Abierto de Movilidad para considerar a todos los actores sociales implicados. A través de estrategias se vincula, regula y delimita el campo de acción de cada uno, estableciendo objetivos integradores y metas futuras a alcanzar. En el documento "Estrategia de Movilidad 2030: segura, sostenible y conectada" se plantea ejes de acción estratégica y se destaca la aplicación de nuevas políticas inversoras, estructuradas en función de criterios de rentabilidad social de los proyectos, priorizando una programación en las inversiones a partir de las necesidades fundamentales de la ciudad, los recursos disponibles y el consenso social (MITMA, 2021, p. 65). Además, se muestra el eje de aspectos sociales y laborales, el que aborda los retos profesionales del sector del transporte y movilidad, dado que los nuevos modelos de negocio no pueden suponer una amenaza al equilibrio del sistema (MITMA, 2021, pp. 73-74).

La participación pública se vuelve esencial para fomentar la sostenibilidad en los países en desarrollo (Martos *et al.*, 2016). Las intervenciones deben ser orientadas a todo nivel, desde la reglamentación de conductas grupales, hasta la regulación de costumbres en el transporte de individuos, contemplando, adicionalmente, un mecanismo de promoción de buenas prácticas y concientización social en materia de sostenibilidad (Uribe Bedoya, Valencia y Ramos y Yovera, 2020).

En este marco, se afirma que la movilidad urbana:

Es el resultado de un conjunto de políticas de transporte y circulación que busca proporcionar el acceso amplio y democrático al espacio urbano, a través de la priorización de los modos no motorizados y colectivos de transporte, de forma efectiva, socialmente inclusiva, ecológicamente sostenible, basado en las personas y no en los vehículos. (Boareto, 2003, p. 49)

En tal dirección, es necesario hacer referencia a las medidas más populares para contribuir a la sostenibilidad en la movilidad urbana. Yan, Levine y Marans (2019) sostienen que las políticas de estacionamiento, estrategias sobre costo y disponibilidad, son eficientes para regular el uso del vehículo privado. Aunque el automóvil fue el protagonista en el siglo pasado en temas de movilidad, la planificación urbana contemporánea ha introducido políticas para disminuir los viajes individuales y fomentar otras formas de transporte, aplicando días de restricción y libre circulación como

en Bogotá, Bruselas, Chengdu, Copenhague, Dublín, Milán y París (Richter, Hagenmaier, Bandte, Parida y Wincent, 2022). Cabe señalar la necesidad de un cambio fundamental en los patrones de inversión de transporte público basado en el principio de evitar o reducir viajes a través de la integración del uso del suelo y la planificación del transporte (Charan y Venkataraman, 2017). De acuerdo con Kamargianni *et al.* (2022), es esencial mejorar el transporte público y su infraestructura, promover la movilidad activa y los modos energéticamente eficiente, optimizar la accesibilidad de las áreas relegadas a la periferia al cuerpo urbano dinámico, como el caso del metrocable en Medellín (Bocarejo *et al.*, 2014).

Con el fin de aterrizar el contexto de estudio a la realidad sudamericana, se menciona a Santiago de Chile como uno de los mayores ejemplos en aplicar iniciativas que favorecen los modos activos de movilidad. La estrategia de aumentar el ancho de las aceras, eliminando el estacionamiento de automóviles y reduciendo el ancho del pavimento, obtuvo numerosos premios que antes habían sido otorgados a ciudades desarrolladas como Nueva York, Londres y París (Herrmann-Lunecke, Mora y Sagaris, 2020). Si bien al inicio causó preocupación por parte de los comerciantes, conductores y residentes, la peatonización de calles se ha extendido por las principales ciudades de Chile. Arellana, Saltarín, Larrañaga, y Álvarez (2019) destacan el potencial de los mapas de caminabilidad como una herramienta de planificación y gestión, que permite evaluar la infraestructura peatonal e identificar los problemas que enfrentan los peatones a transitar.

Referente al desarrollo socioeconómico, la movilidad urbana sostenible incide en la notable transformación del entorno urbano revitalizando el comercio, las plazas, los paseos, en sí, la vida en la ciudad. Su papel en la economía no se refiere únicamente a los desplazamientos de personas hacia su trabajo, sino de ciudadanos que viven, no solo transitan, y son parte del contexto en el que se desarrollan. Al mejorar la conexión de la ciudad y facilitar el acceso a la movilidad se potencializa la economía local, se incrementa el acceso a las oportunidades, se abre las puertas a la educación, al trabajo, a la salud, no solamente a los habitantes del área urbana, sino también, de la ruralidad. Tal es así que, cada vez más las ciudades europeas incorporan estos criterios para lograr un equilibrio entre las necesidades de movilidad y accesibilidad, posibilitando el disfrute de la ciudad mediante desplazamientos seguros que favorecen la cohesión social y el desarrollo económico (Mataix, 2010).

En resumen, los sistemas de transporte están bajo la gran presión de los sistemas socioeconómicos y ambientales. El primero requiere el rápido crecimiento del transporte, mientras que, el segundo necesita que el sistema que no excedan la capacidad ambiental. (Ling, Ma y Jia, 2022, p. 17)

Aunque lo anterior pone de manifiesto la intervención de los planificadores y autoridades de una manera técnica, debe a su vez entenderse la movilidad como el derecho territorial a desplazarse, relegando la visión esquemática de los modos de transporte e infraestructura para introducir el paradigma de que son un medio y no, en sí, el fin de un plan de movilidad (Gibson et al., 2011). Pues, a pesar de tener un sistema accesible con un abanico de alternativas de movilización, como es el caso de Madrid, predomina la preferencia por el vehículo privado, lo que muestra la falta de competitividad del transporte público, ocasionada principalmente por la insuficiente cobertura a nivel interurbano, y a deficiencias relativas a la velocidad de desplazamiento, las frecuencias, la fiabilidad y la interconexión (Muñoz, Simón de Blas y Jiménez, 2014).

Al hablar de indicadores que permitan medir la eficiencia del sistema de movilidad, hay que destacar varias propuestas que evalúan diversos factores sociales, medioambientales y económicos. Quiroga (2009), por ejemplo, hace referencia a un componente ambiental y a otro como desarrollo sostenible. El primero identifica los estados de la dinámica ambiental en los centros urbanos; mientras que el segundo evalúa interrelación de las medidas económicas, sociales, ambientales. Gaviria (2013) propone la identificación, priorización y construcción de indicadores de sostenibilidad a partir de revisión bibliográfica, realización de encuestas, lluvia de ideas, comparación con otras áreas, análisis del conocimiento adquirido en intervenciones anteriores. Jiménez (2008), entretanto, señala la construcción de indicadores mediante definición de estrategias, establecimiento de aspectos relevantes y medibles, formulación y validación de indicadores, metas y periodicidad de medición. Asimismo, Rodríguez (2016) analiza indicadores de movilidad en ámbitos del transporte, medio ambiente, desarrollo socio económico, urbanismo, empleo, vivienda y optimización de espacio público. Los autores mencionados coinciden en que para que un indicador de movilidad sostenible pueda ser implementado debe ser medible, verificable, reproducible y relevante. No obstante, se requiere evitar la proliferación de indicadores desorganizados, la desproporción, el oportunismo y la medición de situaciones sociales o ambientales en base a indicadores económicos (Caniffi, 2022).

El presente caso de estudio se enfoca en Ambato, la cuarta ciudad más poblada del Ecuador que, por su rol industrial y comercial, es considerada un polo de desarrollo económico para la región. El casco urbano posee una definición urbana centralizada, concentrando edificaciones de instituciones públicas y financieras, zonas comerciales y arquitectura histórica, por lo que los viajes que se realizan dentro de la urbe tienen como destino el centro de la misma. El

proceso de urbanización intenso y la alta dependencia del automóvil han conducido a que la movilidad se proyecte hacia escenarios insostenibles. Las políticas públicas y la planificación urbana han favorecido el desarrollo de un modelo de ciudad funcionalista, a través de grandes avenidas que han sido pensadas en base al uso constante del automóvil. Cuando, en realidad, se debería tratar de alcanzar la accesibilidad mediante espacios urbanos seguros, igualitarios y autónomos (Guevara, J. Flores y M. Flores, 2022), que proporcionen a los residentes, independientemente del modo de transporte, certeza del servicio público, infraestructura adecuada que favorezca la movilidad de las personas con algún tipo de limitación, espacios de encuentro ciudadano, para convertir el acto de trasladarse en una experiencia ciudadana agradable, económica, eficiente y segura. Los centros urbanos están llenos de actividades, usos de suelo que generan diferentes tipos y modos de movilidad, originándose así una relación compleja entre estos que involucra un alto grado de organización para poder gestionar el movimiento y lograr satisfacer a todos los usuarios (Elserafi et al., 2017).

Por todo lo descrito, el objetivo de esta investigación es caracterizar las condiciones actuales de movilidad de peatones, ciclistas y transporte público, desde la perspectiva de sostenibilidad. A partir de un análisis técnico de variables objetivas, se evidencia las potencialidades y debilidades del modelo regente. El aporte se centra en ofrecer acciones que requieran la menor inversión pública, es decir, que a partir de estrategias de gestión se promueva un cambio modal efectivo en patrones de desplazamiento cotidianos, donde prime la movilidad activa y los medios menos contaminantes.

METODOLOGÍA

Para lograr el objetivo propuesto se aplicó un enfoque mixto, fundamentado en investigación bibliográfica y de campo. Se delimitó como área de estudio el casco comercial del centro urbano. Partiendo del plano catastral y visitas *in situ*, se identificó y clasificó el tipo de equipamiento existente, estableciendo las zonas en función de servicios ofertados (comercial, gubernamental, histórica, de servicios y recreación). Se configuró un polígono cerrado delimitado por avenidas y calles principales, procurando abarcar las manzanas completas. Se analizaron los radios de cobertura a fin de establecer la dimensión del área, mediante herramientas digitales, determinando las condiciones topográficas para conocer las pendientes máximas y mínimas.

Los actores involucrados en la investigación fueron peatones, ciclistas y transporte público masivo. En cuanto a peatones, se levantó, mediante fichas de

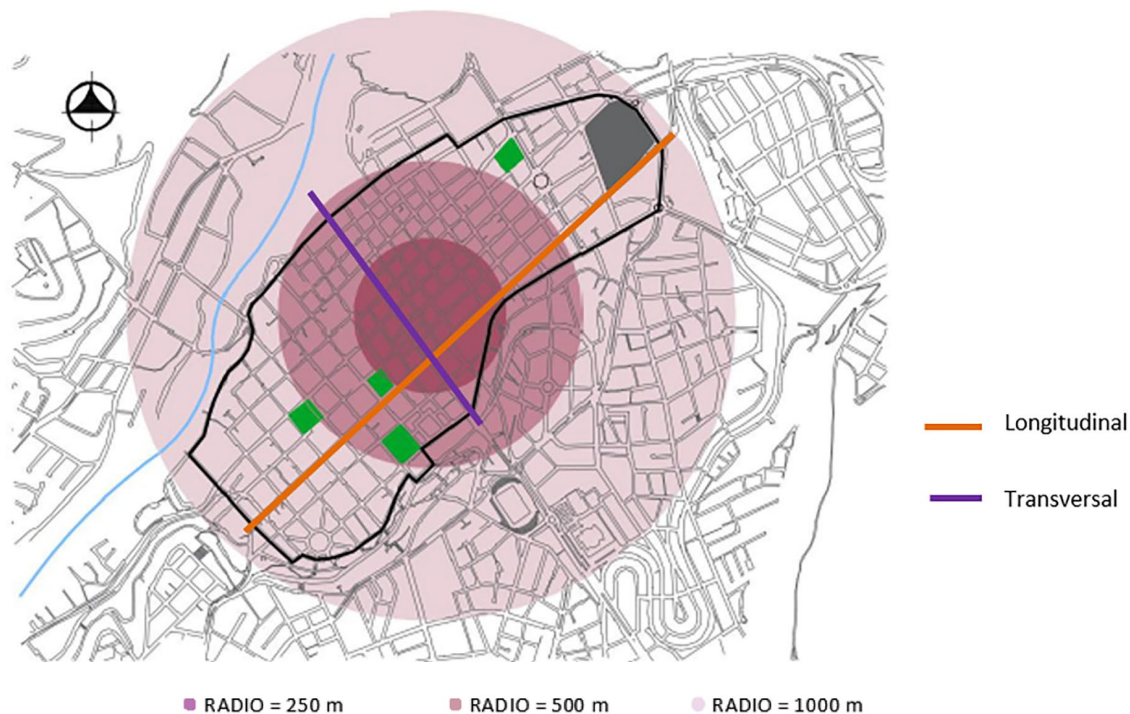


Figura 1. Delimitación del área de estudio, distancias referenciales y radios de cobertura. Fuente: Elaboración de los autores.

observación, información referente a la infraestructura, como ancho de la acera, continuidad de la red, estado, accesibilidad y nivel de servicio. Para la Intensidad Peatonal, se tomó como base “El Plan de Movilidad Urbana Sostenible (SUMP) Ambato”, el cual establece, en las conclusiones estructurales, que el día lunes concentra mayor cantidad de viajes y que los lugares con mayor dificultad de movilidad corresponden a mercados y plazas (Fundación Ciudad Humana, 2021). Dicha información condujo a escoger las aceras aledañas a los cinco mercados existentes en la zona de estudio. Existen tres franjas horarias marcadas durante el día, las cuales son consideradas como las de mayor afluencia vehicular: 06h00 a 08h00, 12h00 a 14h00 y 17h00 a 19h00. Esta última es considerada como la más crítica debido a la culminación de horarios laborales y el cierre de comercios (Goyes, 2018, p. 31). Consecuentemente, se realizó el conteo peatonal, durante un mes, en las aceras aledañas a los mercados, y en las condiciones que presentan mayores inconvenientes: los días lunes desde 17h00 hasta las 19h00. El aforo se realizó cada 15 minutos (I15). Se midió el ancho de la acera sin bordillo (At) y se restó el espacio ocupado por puestos informales, obteniéndose el ancho efectivo (Ae). Con estos datos se determinó la intensidad peatonal unitaria (I) en cada acera mediante la fórmula (1) expuesta en el “Highway Capacity Manual 2000” (Transportation Research Board, 2000).

$$I = \frac{I15}{15 \cdot Ae} = \text{peatón/minuto/metro} \dots\dots\dots(1)$$

En lo referente al modo ciclista, se realizó un análisis sobre las condiciones del área de estudio para fomentar su desarrollo ya que actualmente no se oferta la infraestructura necesaria.

Respecto al transporte público masivo, se analizaron rutas, frecuencias, horarios, estado de las unidades, accesibilidad universal, capacidad, ocupación por línea de servicio, horas pico, promoción del servicio, a partir de informes y documentos oficiales proporcionados por la Municipalidad de Ambato.

Una vez recolectada y analizada la información, se plantearon reflexiones sobre las condiciones actuales de los modos no motorizados y el transporte público masivo, desde una perspectiva conceptual de sostenibilidad en la movilidad urbana. Bases fundamentales que sirvieron de insumo para la propuesta de estrategias que pretenden aprovechar de manera eficiente las condiciones propias de la ciudad y los medios para movilizarse en ella.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La configuración urbana está establecida por un trazado reticular que correspondía al damero del modelo indiano, con una plaza central como el corazón del pueblo, rodeada por la iglesia, el cabildo y la residencia del cacique (Jurado, 2004). El área de estudio tiene un área de 1.15 km². En la Figura 1 se aprecia la dimensión territorial del casco urbano analizado que, longitudinalmente, tiene una distancia de 1.8 km con

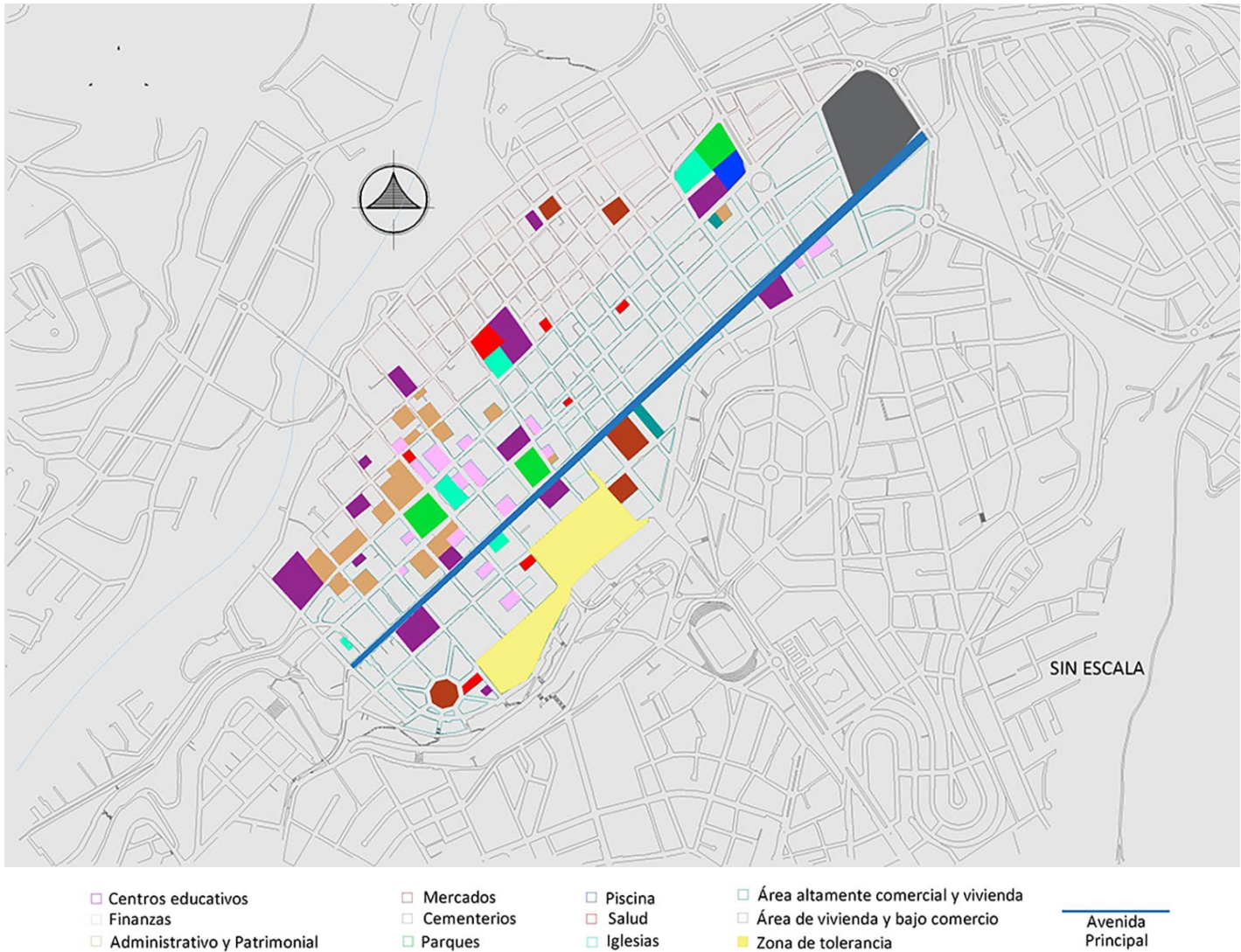


Figura 2. Tipología del equipamiento. Fuente: Elaboración de los autores.

una pendiente media entre 1.2% a 3.1% y una máxima de 7.2%; transversalmente, tiene una distancia de 0.84 km con una pendiente media entre 1.4% a 3.4% y una pendiente máxima de 10%. Dichos valores máximos no superan los 100 metros de recorrido. Para un mejor entendimiento de la dimensión territorial se muestran radios de cobertura, que abarcan totalmente el área con un radio de 1 km.

En términos de equipamiento, la Figura 2 evidencia que aproximadamente 60% del área de estudio corresponde a infraestructura comercial, en su totalidad o combinada. La mixticidad de las edificaciones se presenta, principalmente, como comercio en planta baja y en los niveles superiores vivienda o servicios. La avenida principal de la centralidad, además de albergar en su totalidad comercio, es la entrada principal a la ciudad desde la parte norte. En el área se encuentran alrededor de 12 unidades educativas repartidas aleatoriamente,

más de 15 instituciones financieras ubicadas en calles principales y secundarias; las tipologías de salud se encuentran distribuidas en toda la zona sin ningún patrón establecido; las plazas y mercados implantados muy cercanos unos de otros; las instituciones gubernamentales se ubican en la zona patrimonial rodeando el Parque Montalvo. En todo el polígono de análisis se desarrolla el área de servicios particular, sin embargo, es justamente en el sur oeste en donde existe mayor concentración. También está presente la arquitectura religiosa, concretada en 5 iglesias localizadas en calles representativas de la ciudad. Los 4 parques existentes son altamente transitados, fundamentalmente por su valor histórico y su ubicación en las calles principales del corazón urbano. Cabe mencionar que existe una zona de tolerancia ubicada en una de las avenidas principales, junto al parque 12 de noviembre, en donde se constata concentración de hostales y hoteles de paso. Todos los equipamientos públicos se localizan próximos

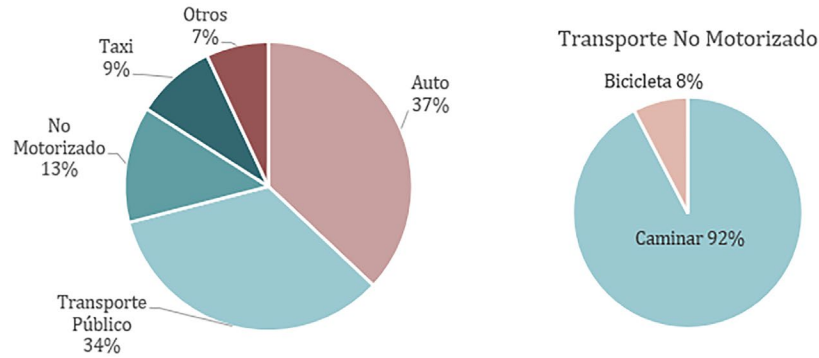


Figura 3. Reparto modal. Fuente: Fundación Ciudad Humana (2021).

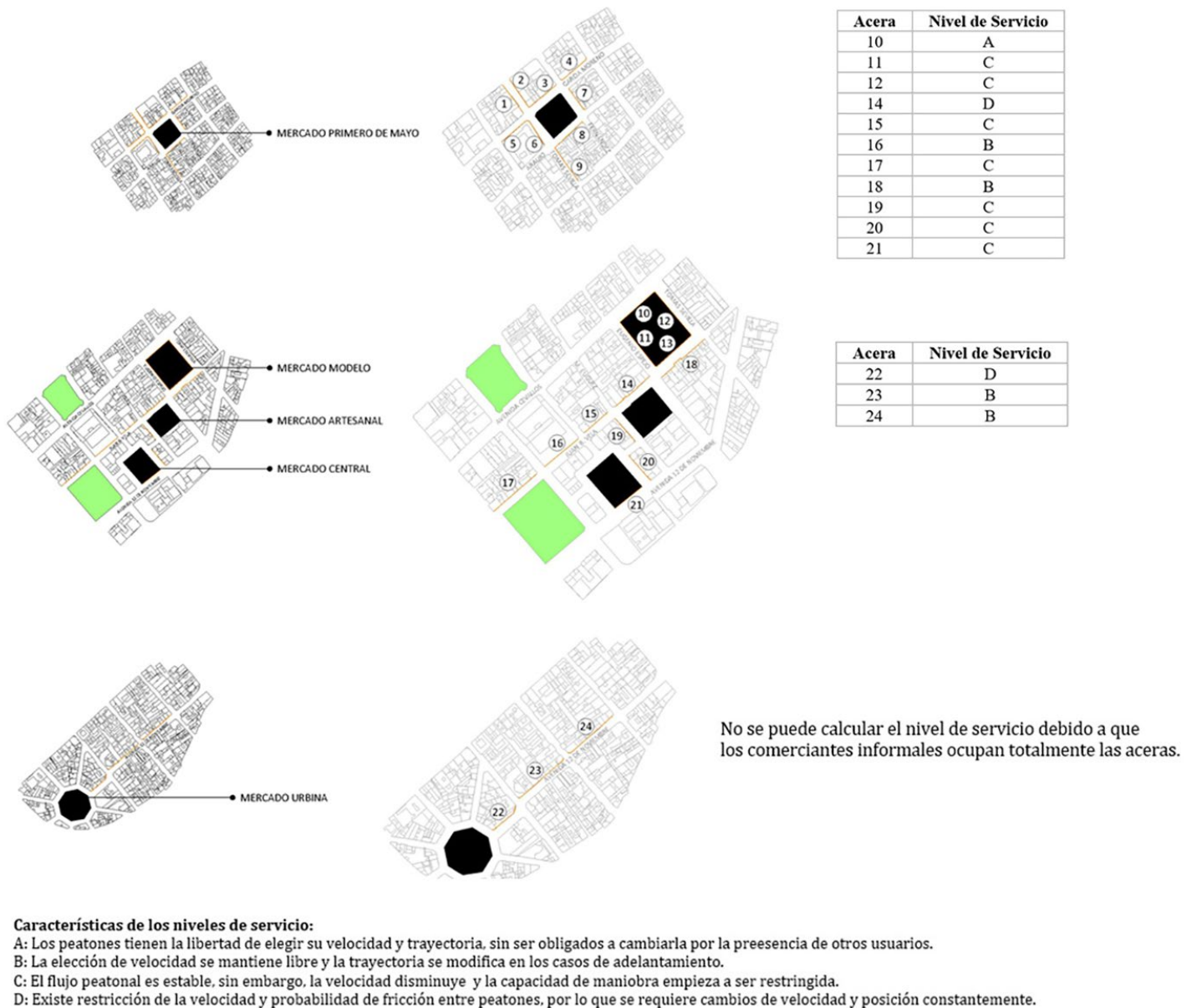


Figura 4. Niveles de servicio en aceras críticas. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 5. Recorrido de transporte público y tipología de unidades. Fuente: Elaboración de los autores.

uno de otros, lo que, de la mano de la accesibilidad que ofrecen, puede mejorar la satisfacción de la comunidad local (Billones et al., 2021).

Reparto modal. En la Figura 3 se observa que el modo más usado es el auto, con 37%, seguido del transporte público, con un 34%. Un 13% utiliza el transporte no motorizados, un 9%, taxis, y un 7%, otros modos de transporte, como buses escolares y vehículos informales. De lo correspondiente al transporte no motorizado, un 92.31% se desarrolla caminado y un 7.69% en bicicleta.

Peatones. El casco central presenta una red peatonal con aproximadamente 668 aceras. El 77.7% tiene un ancho mayor a 1.60 m (mínimo recomendado), el 19.6% no cumple esta condición y el 5.4 % no presenta acera, total o parcialmente. La continuidad de la red se ve afectada sobre todo por la presencia de edificaciones patrimoniales, ya que la línea de fábrica sobrepasa la actual y obliga a los usuarios a transitar por la calzada vehicular. El 99.8% de las aceras son de hormigón y el 0.2%, de adoquín decorativo. No se presentan defectos constructivos y el 100% de las aceras se encuentran en condiciones transitables. Los atravesamientos dan continuidad a la red peatonal;

en el casco urbano están delimitados por “paseo” en las vías principales como avenidas y, a su vez, son complementados con semáforos peatonales que ayudan a transitar a personas con algún tipo de discapacidad visual o auditiva. Las aceras de las vías principales presentan rampas con cambio de pendiente que permiten la incorporación rápida del flujo peatonal a la red, y cumplen con los parámetros establecidos según la norma NTE INEN 2855 (Accesibilidad de las personas al medio físico. Vados y Rebajes de cordón).

Intensidad peatonal. En la Figura 4 se aprecia el análisis del Mercado Modelo, Artesanal, Central, Urbina y Primero de Mayo con los respectivos niveles de servicio en sus aceras, desde el nivel A hasta el D. La acera número 10 es la única con un nivel de servicio A, considerado ideal, dada la gran superficie que oferta, la cual permite a los peatones la libertad de elegir su velocidad y trayectoria, sin ser obligados a cambiarla por la presencia de otros usuarios. Las aceras 16, 18, 23, 24 presentan un nivel de servicio B, considerado adecuado, ya que la elección de velocidad se mantiene libre y la trayectoria se modifica en los casos de adelantamiento. Las aceras 11, 12, 15, 17, 19 20 y 21 exhiben un nivel de servicio

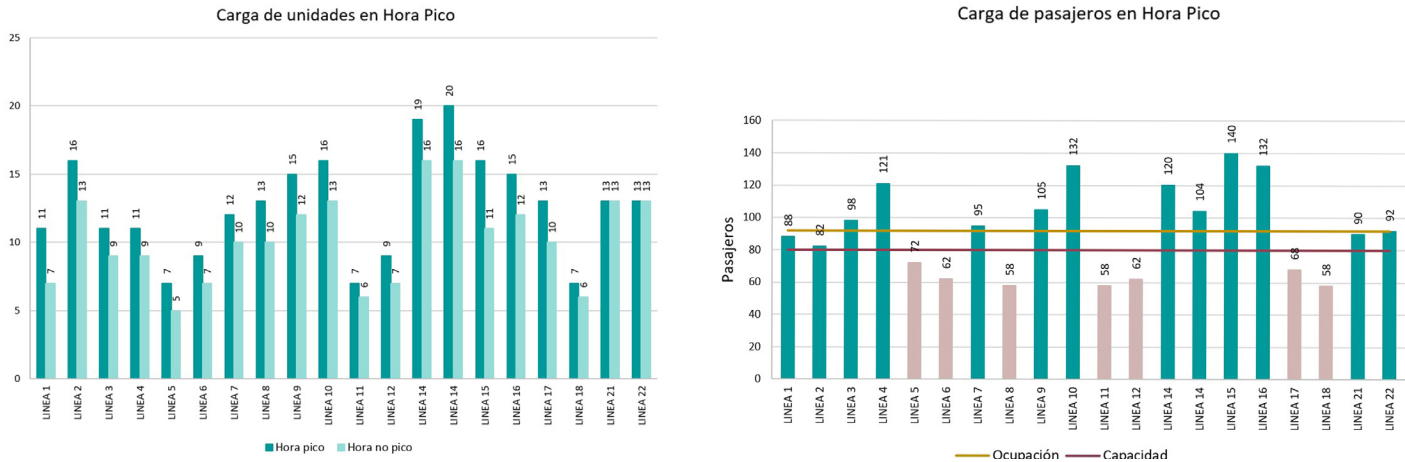


Figura 6. Carga de pasajeros y unidades de transporte público en el área de estudio. Fuente: Aldás (2017, pp. 45 y 67).

C, manteniendo un flujo peatonal estable que, sin embargo, se ve afectado por la interacción con otros usuarios, por lo que la velocidad disminuye y la capacidad de maniobra comienza a ser restringida. Las aceras 14 y 22 son las más críticas, con un nivel de servicio D: presentan restricción en la velocidad y se da la probabilidad de fricción e interacción entre peatones, de modo que se requiere cambios de velocidad y posición constantemente. De las 14 aceras analizadas (10-24) aledañas al mercado central, artesanal y modelo tienen niveles de servicio aceptables, aún en las horas pico. A pesar de alcanzar niveles D, la capacidad de aceras cubre la demanda de peatones. En cuanto a las aceras aledañas al Mercado Primero de Mayo (1-9), se encuentran totalmente ocupadas por puestos de comerciantes informales, obligando a los peatones a transitar por la calzada vehicular. Se establece, así, como una zona altamente crítica por la elevada afluencia peatonal y la inseguridad que representa transitar siendo peatón. No fue posible calcular el nivel de servicio de las aceras.

En relación a la infraestructura para ciclistas, no existe un espacio específico para su desarrollo, los pocos ciudadanos que acuden al centro urbano en bicicleta transitan en la calzada vehicular sin ningún tipo de protección ni prioridad.

El transporte público masivo es el segundo modo más utilizado para moverse. Está a cargo de 392 unidades de buses distribuidas en 5 cooperativas de carácter privado. Se registran 22 rutas que cubren la urbe ambateña, pero no existe un carril exclusivo para su operación. Dentro del área de estudio transitan 21 rutas, sin embargo, 14 de ellas se movilizan por las periferias del equipamiento y solo 7 atraviesan el casco central por las vías principales. El horario de servicio es desde las 06:00 hasta las 22:30 horas de

lunes a domingo, aunque esto depende de cada línea. Las frecuencias varían de entre 2 a 14 minutos (Rivera, Mayorga, Vayas, C. Freire y L. Freire, 2017). Los lugares destinados a la carga y descarga de pasajeros se encuentran ubicados a una distancia máxima de 300 m unos de otros. Zellner, Massey, Shifan, Levine y Arquero (2016) mencionan que cuando la conexión inicial y final del sistema es muy distante es fuertemente castigada por los usuarios, volviéndose poco probable su elección. La señalización de las paradas está dispuesta de manera horizontal en la calzada y mediante letreros verticales. Ninguno de estos lugares posee el equipamiento adecuado para informar sobre horarios o frecuencias, ni para brindar protección a las inclemencias del clima. Cabe agregar que el Parque 12 de noviembre es el punto de concentración de todas las líneas, es la parada universal, en la cual se puede acceder a cualquier recorrido. Las horas pico del transporte público están establecidas en 3 franjas: en la mañana de 06h00 – 07h45; a medio día de 11h30 a 13h30; y en la tarde de 17h00 a 19h00 (Aldás, 2017).

La tipología del transporte público es el autobús (Figura 5) y las unidades tienen menos de 10 años de servicio, con una capacidad de 80 pasajeros aproximadamente: 41 sentados y 39 parados. El 96.9% de las unidades cuentan con cámaras conectadas al sistema de seguridad público, el 6% no cuenta con señalización para asientos preferenciales y el 100% no cuenta con rampas de acceso entre acera y unidad (Rivera et al., 2017). La ocupación promedio de las unidades, en hora pico, es de 92 pasajeros aproximadamente, lo cual excede la capacidad máxima establecida.

El 35% de las líneas están por debajo de la capacidad por unidad, mientras que, el 65% sobrepasan dicho valor (Figura 6). Las líneas con mayor demanda registran

140 pasajeros (Aldás, 2017). El número máximo de unidades por líneas presentes en el centro de la ciudad es de 19 a 20, durante la hora pico. El mínimo de unidades es de 5 a 7. Al realizar el conteo de todas las rutas en análisis, se estableció que existen 253 unidades en servicio transitando durante la hora pico en el casco urbano y 205, durante el resto del día, es decir, existe un aumento del 23% en la cantidad de unidades durante las horas críticas.

El área de estudio comprende el centro dinámico de la ciudad, el cual concentra el equipamiento suficiente para definir una zona altamente transitada. La configuración de la malla urbana conformada por manzanas muestra una implantación lógica y ordenada, que favorece la orientación al momento de desplazarse. Las calles poseen pendientes moderadas, beneficiando el desarrollo de la caminata, pues la extensión longitudinal no supera los 2 km y transversalmente alcanza 1 km. De acuerdo a Bañón Blázquez y Beviá García (2000), la velocidad media de un peatón es de 4km/h y el tiempo máximo que una persona estaría dispuesta a caminar no excede los 30 minutos, en condiciones climáticas favorables. Por consiguiente, el recorrer el corazón de la urbe tomaría aproximadamente 30 minutos de manera longitudinal y 15 minutos transversalmente. Teniendo en cuenta que la temperatura media del lugar se encuentra alrededor de los 14.6°C, es posible indicar que el centro de la ciudad presenta un alto potencial para la implementación de estrategias que favorezcan al peatón y ciclistas. El análisis del asentamiento urbano y modos de transporte vigente hace referencia a una ciudad que aún no ha integrado la planificación de uso de suelo con la planificación de movilidad.

Los peatones son la base fundamental de la pirámide de movilidad, de forma que estos constituyen la prioridad, pues cualquier desplazamiento requiere caminar, ya sea para alcanzar el transporte público o el automóvil. En Ambato, el 92% del transporte no motorizado corresponde a desplazamientos peatonales. La red presenta condiciones aceptables para el tránsito, tanto en ancho, continuidad y estado de servicio. La intensidad peatonal en las aceras críticas presenta niveles de servicio de A, B, C y D; estos últimos altamente afectados por el comercio informal que se adueña del espacio público peatonal y desplaza a los ciudadanos a transitar conjuntamente con los vehículos. Por consiguiente, el principal problema que afecta este modo es la informalidad que existe en el comercio y la escasa regulación del ente administrativo. De las aceras analizadas se puede establecer que, en condiciones adecuadas, cubren la demanda peatonal, no obstante, no se ha evidenciado la aplicación de medidas que pretendan potenciar esta modalidad. Tal es el caso del ensanchamiento de la acera y la eliminación de espacios de estacionamientos, como en Santiago

de Chile, así como también de la peatonización de calles. No se observa ningún sistema tecnológico, como mapas de caminabilidad, que intenten compilar información a fin de poder establecer la mejor estrategia para la ciudad.

La bicicleta tan solo representa el 7.69% de los desplazamientos, puesto que no existe infraestructura para su desarrollo, evidenciándose la carencia de una mejor distribución de espacio público para la implementación de una ciclo vía. A pesar de la pequeña dimensión territorial en la que se implanta el casco urbano, y de las características topográficas y climáticas favorables, la inseguridad y carente cultura de prioridad hacia este modo hace que los ciudadanos se sientan amenazados, debido a su vulnerabilidad frente al transporte motorizado. Ello limita su uso a actividades netamente recreativas y lo vuelve problemático como un medio cotidiano de transporte en el área urbana. Es importante destacar que facilitar el desarrollo de esta modalidad es prioridad para alcanzar la sostenibilidad en el modelo actual, pues, es un vehículo moderno, accesible, eficaz para distancias cortas y presenta mayor eficiencia frente al automóvil ya que es menos ruidoso, no produce contaminación, la superficie destinada a su uso es reducida, los aparcamientos requieren menos espacio, disminuye los embotellamientos, tiene mayor accesibilidad a los equipamientos y mejora la salud de los usuarios. Sin embargo, al igual que cualquier modo de transporte, demanda de servicios y de la aplicación de políticas públicas que garanticen una infraestructura segura, cómoda, que cubra la demanda, así como también, aparcamiento público, conexión con el transporte masivo y con los otros medios.

La movilización en automóvil representa el 37% que, en contraste con el 13% del transporte no motorizado, refleja un comportamiento altamente dependiente del auto particular. En efecto, para el 2018, la provincia alcanzó el primer lugar, a nivel nacional, en la tasa de motorización, con 186 vehículos por cada 1000 habitantes (INEC, 2019). Es evidente que la preferencia se debe a la comodidad, seguridad, flexibilidad, privacidad y libertad que ofrece, sin embargo, carece de eficiencia, ya que transporta menor cantidad de personas, ocupa mayor espacio público, empeora la congestión vehicular, contamina más el medio ambiente, considerando el número de personas transportadas, ocasiona ruido y accidentes de tránsito.

La ocupación vehicular muestra que el 40% de los automóviles transporta solo un pasajero (Fundación Ciudad Humana, 2021, p. 46). Los motivos de viaje apuntan a realizar actividades cotidianas como: ir al trabajo y/o centros de estudio, acceder a equipamiento de salud o de ocio, aun cuando las distancias son relativamente cortas entre el origen y

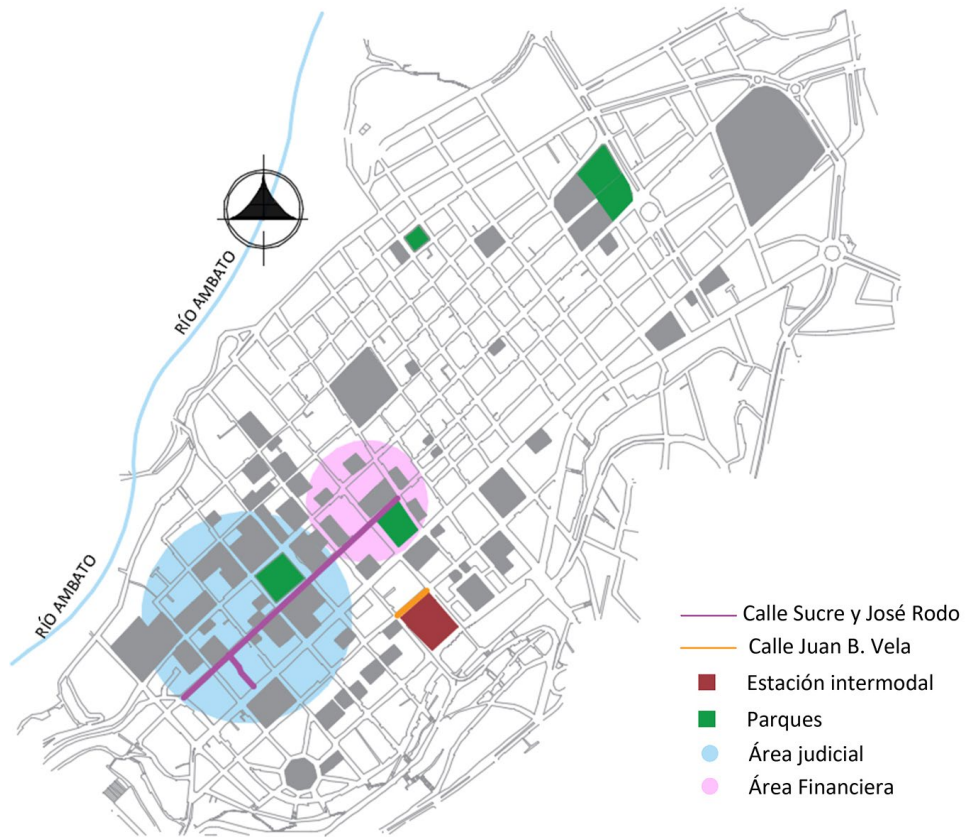


Figura 7. Áreas potenciales de peatonización. Fuente: Elaboración de los autores.

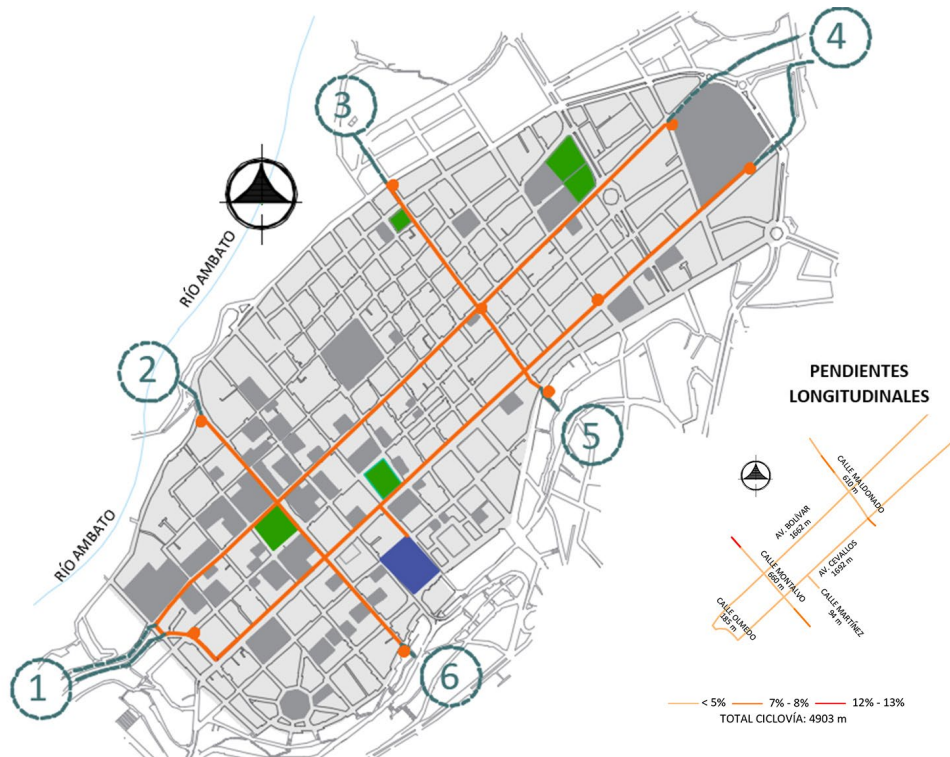


Figura 8. Propuesta de ciclovía. Fuente: Elaboración de los autores.

el destino, pues no existen alternativas sostenibles que permitan enfrentar esta preferencia con modos eficientes. Además, las condiciones actuales favorecen la entrada del automóvil al centro urbano mediante la dotación de espacio público para su circulación y una oferta de estacionamiento bastante amplia, pese a que se ha demostrado la eficiencia de estrategias de costo y disminución de disponibilidad de aparcamientos para reducir el uso del vehículo privado.

El transporte público masivo, protagonizado por los autobuses, encabeza la distribución modal. La eficiencia del sistema está directamente relacionada con la capacidad y tiempo de movilizar pasajeros, en condiciones de seguridad y comodidad. Si bien no se analizaron los tiempos de recorrido de cada línea, fue posible establecer la existencia de rutas saturadas en la medida en que su ocupación rebasa en un 75% de la capacidad máxima en horas pico, lo cual es totalmente inaceptable, inseguro y carente de calidad. Un servicio público debe mantenerse atractivo hacia posibles usuarios, pero no existe información sobre rutas y frecuencias de manera física o digital, no se detalla el recorrido que realiza la unidad, esta no transita por un carril exclusivo, el equipamiento de las paradas no resguarda a los ciudadanos ante las condiciones del clima, solo se puede pagar el servicio con efectivo y no se dispone de tarjetas semanales o mensuales. Respecto a inclusión social, ninguna unidad posee las rampas que facilite el acceso a personas con limitación de movilidad. Se debe añadir que el sistema es administrado por instituciones privadas que manejan el servicio desde una perspectiva netamente económica. A pesar de que lo mencionado se refiere a las debilidades actuales del sistema, se evidencian algunas fortalezas como: una flota relativamente nueva, las paradas de buses se encuentran correctamente distribuidas para acceder al equipamiento urbano y se da una distancia máxima entre ellas de 300 metros (Figura 5), que facilita el rápido cambio de línea.

Existe una "parada universal" en el parque 12 de Noviembre (Figura 5), por donde el 85.71% de líneas realizan su recorrido, estableciéndose como un punto con elevado potencial para ser implementado como una estación intermodal, ya que su ubicación estratégica en una de las principales avenidas de la ciudad, su dimensión y su importancia simbólica para los ciudadanos, ha hecho de este lugar el más conocido y usado para acceder al transporte público masivo. Sin embargo, por estar anexo a la zona de tolerancia, su imagen urbana es decadente, pues representa un lugar altamente inseguro.

En virtud de lo expuesto, se proponen las siguientes estrategias de gestión para fomentar la sostenibilidad en el modelo de movilidad urbana en Ambato:

- Creación de vías exclusivas para peatones. La peatonización es una alternativa que promueve equidad social y rehabilitación del espacio público: se devuelve la ciudad a las personas. Son las personas y no los vehículos las que dinamizan el centro urbano, estas se relacionan, interactúan, descubren y exploran el área, pero deben movilizarse de una manera cómoda, autónoma y sin restricciones. El hecho de establecer vías completamente peatonales, aumenta el nivel de seguridad de los viandantes mediante la eliminación del contacto con el tráfico motorizado; además disminuye el volumen vehicular debido al cambio modal de las vías. Esta intervención debe responder a una lógica de conexión del equipamiento y servicios públicos de transporte, configurando una red peatonal continua. En la Figura 7 se muestra las posibles áreas de intervención en las calles Juan Benigno Vela, José Rodo y Sucre, dada la presencia constante de peatones, durante todo el día. Al tratarse de la zona judicial y financiera, existen edificios destinados exclusivamente a oficinas, restaurantes y locales comerciales, lo cual define el recorrido del sector con los servicios necesarios de la cotidianidad de las personas que laboran en la urbe. Cabe señalar que las vías se encuentran a cerca de 200 m de distancia de la estación general de autobuses; potencial que permite mantener la conexión entre los distintos modos de desplazamiento con el resto del equipamiento.
- Ciclovía. Si bien no se cuenta con la infraestructura para el desarrollo de esta modalidad, se puede ofrecer el espacio necesario mediante la restructuración del viario existente, implementando una red básica, lógicamente conectada, que tenga la capacidad de mostrar la demanda esperada para una futura inversión a gran escala en toda la ciudad. En la Figura 8 se aprecia la preconfiguración de la ciclovía, con dos tramos longitudinales: por la Avenida Cevallos y por la Calle Bolívar, debido a su alto nivel comercial, en donde se concentra todo tipo de negocios, hoteles, restaurantes, mercados, parques o áreas recreativas, el área jurídica, financiera, etc. La conexión entre los dos tramos se realiza a través de 2 calles transversales: la Calle Montalvo y Calle Maldonado, que atraviesan el centro de la ciudad desde el área altamente comercial hasta el área de viviendas y bajo comercio. La propuesta conecta el área de estudio con el resto de la ciudad en 6 puntos, los cuales son las entradas/salidas hacia las diferentes plataformas territoriales de planificación, abarcando el norte, sur, este y oeste.

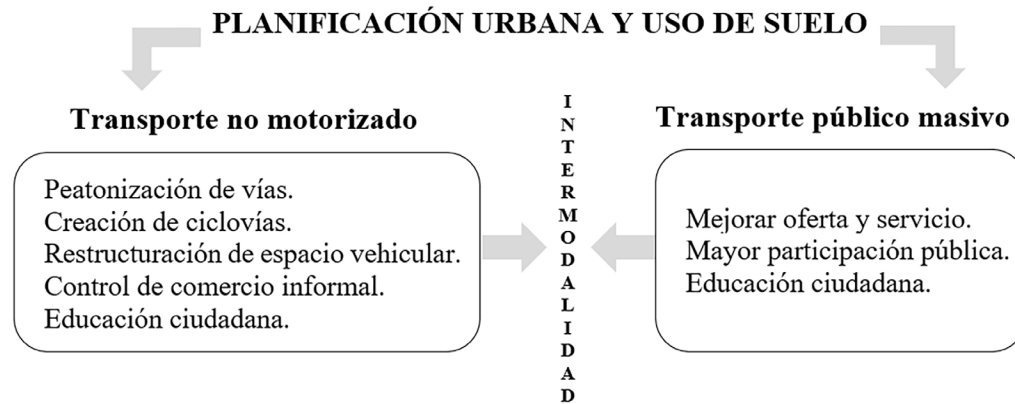


Figura 9. Mapa de la base generadora de estrategias de gestión para fomentar la sostenibilidad en el modelo de movilidad urbana en Ambato.
 Fuente: Elaboración de los autores.

- Control de comercio informal en las zonas aledañas a los mercados. Establecer un mecanismo de regulación del comercio informal, no con el objetivo de eliminarlo, más bien, con el enfoque de organizarlo en espacios adecuados que no afecten al tránsito peatonal, para desarrollar la actividad comercial de una manera dignificante.
- Fortalecimiento del transporte público masivo. Evaluar la operación de las líneas de transporte en toda la ciudad, corrigiendo el recorrido, frecuencias y horarios en función de la demanda, a fin de mejorar la eficiencia del servicio y, a su vez, disminuir la congestión vehicular en las vías por la elevada presencia de unidades. Restablecer el recorrido de las unidades por el centro de la ciudad en aras de que transiten por las vías más amplias, o bien, establecer un carril exclusivo para su movilización. Mejorar el método, ya que actualmente consume más tiempo del que debería, ofreciendo servicios diarios, semanales o mensuales. La conexión con los medios no motorizados debe priorizarse.
- Mayor participación pública en la oferta de transporte público masivo. Aunque el servicio es ofertado por la empresa privada y regulado por la municipalidad, es indispensable que la responsabilidad sobre la calidad y eficiencia del sistema sea asumida por el Estado, porque solo este, como ente controlador y regulador, puede garantizar la inclusión social, accesibilidad universal y seguridad que los ciudadanos requieren.
- Implementación de una estación intermodal en el Parque 12 de Noviembre para integrar los medios de movilización más eficientes de una manera coherente, facilitando el cambio modal de una manera rápida. La multimodalidad es necesaria ante la complejidad urbana, sin embargo, requiere un alto consumo de espacio urbano, obligando a considerar el impacto social del sistema sobre la estructura existente (Murata, Delgado y Suárez, 2017). La planificación separada de los modos de transporte no permite una integración del servicio, generando que el transporte público no sea atractivo para los usuarios (Agarwal, Kumar y Zimmerman, 2019).
- Reestructuración del espacio vehicular en las calles principales de la zona altamente comercial. Se deben diseñar rutas para los automóviles que conecten al centro con el resto de la ciudad, no obstante, es necesario restablecer el espacio otorgado a los automotores y a los peatones. Si se oferta más espacio a las personas estas irán habitándolo consecutivamente, provocando una descongestión automotriz paulatina. La sostenibilidad en el transporte implica no solo administrar el transporte desde una perspectiva ecológica, sino también establecer una planificación efectiva del sistema para garantizar la seguridad vial (Balasubramaniam, Paul, Hong, Seo y Kim, 2017).
- Planificación urbana y uso de suelo. El hecho que exista una zona de tolerancia tan cerca del equipamiento importante degrada la imagen urbana y suprime la atracción por caminar en el sector. Por ello es necesario la reubicación de esta zona a partir de planes de uso y gestión de suelo que establezcan las actividades apropiadas a desarrollarse en un centro urbano que pretende enfocar su planificación hacia la sostenibilidad.
- Sensibilización, información y educación ciudadana. El comportamiento ciudadano es el mayor reto a superar en la implantación de un nuevo modelo, por lo que necesario desarrollar programas de sensibilización que eduquen a las personas sobre el beneficio personal y colectivo de alcanzar la sostenibilidad en la movilidad urbana. Será fundamental transformar la cultura de movilidad a partir del respeto de las normas,

y no en función del castigo, para construir una comunidad que contribuya a la reducción de accidentes de tránsito, promueva el uso sostenible del automóvil y de los medios de transporte (Gibson *et al.*, 2011). El papel que se les atribuye a los ciudadanos, actualmente, es más bien marginal, ya que deben ser considerados actores y no solamente beneficiarios, consumidores o generados de datos (Franco, 2021).

CONCLUSIÓN

El presente documento evidencia el punto de partida de una ciudad que apunta hacia un proceso de transición enfocado en una movilidad urbana sostenible. Se ha dejado de manifiesto el estado actual: un modelo caduco basado en la planificación en función del vehículo privado y sus principales efectos sobre el ambiente construido y el hábitat sustentable. En este contexto, se expuso el análisis de las condiciones vigentes previo a la toma de decisiones para iniciar un proceso de cambio inminente, propio, que obliga a construir un camino experimental de falla y error, que se irá perfeccionando con una movilidad más humana, social y ambientalmente eficiente.

La principal contribución de este artículo es entender la realidad de la movilidad urbana en las ciudades intermedias en Latinoamérica, a partir del análisis de variables objetivas comunes, que permiten profundizar en el contexto de la región para futuros estudios y aplicación de medidas.

Una segunda contribución hace referencia a propuestas para fomentar la sostenibilidad que requieran menor inversión pública, de manera que, a partir de un mejoramiento en la gestión, reestructuración de los existentes y planificación, se fortalezca los modos de transporte más eficientes.

Así, se presentó aquí el análisis de movilidad del corazón de la urbe Ambateña, desde una perspectiva de sostenibilidad, destacando la potencialidad que posee el área de estudio para la implementación de estrategias que favorezcan el desarrollo a gran escala de la peatonalización y el ciclismo. Sin embargo, se vuelve imprescindible el analizar cómo y por qué se desplazan los ambateños, desde un enfoque multidisciplinar que incluya la sociología, economía, planificación y diseño urbano, incluyendo la participación de la administración pública como ente organizador y contralador.

Se plantearon, asimismo, reflexiones sobre el transporte público masivo que recaen sobre estrategias que mejoren el sistema, capaces de mejorar la calidad, eficiencia y confiabilidad del servicio a partir de una gestión integral entre la administración pública y

privada. Y junto con ello, coadyuvar a disminuir la predilección por el automóvil en los desplazamientos urbanos de corta distancia. La columna vertebral de una ciudad con enfoque sostenible es un sistema de transporte público masivo eficiente, pues es este el que permite disminuir la contaminación ambiental, descongestionar las carreteras y reducir tiempos de desplazamiento, es decir, encaminar el escenario actual hacia un hábitat sustentable.

Sería inconcebible establecer a los peatones y ciclistas como los únicos modos de transporte urbano, sin embargo, deben ser priorizados como alimentadores y distribuidores del transporte público masivo. Su eficiencia y óptima interconexión son factores esenciales para enfrentar a la congestión vehicular. Solo cuando el transporte masivo sea más rápido, seguro, cómodo y económico que el vehículo particular, alcanzará mayor acogida en los ciudadanos. No se pretende la eliminación del automóvil, sino su correcta su utilización para desplazamientos de larga distancia.

Ciertamente, el papel de la administración pública está directamente relacionado con el éxito o fracaso de cualquier intervención que pretenda mejorar los hábitos de movilidad de una sociedad, puesto que son estas entidades las encargadas de planificar, gestionar, ejecutar y monitorear el sistema urbano. Los planes desarrollados deben tener un enfoque integral que contemple el rol de la ciudad e implemente medidas para la movilidad peatonal, ciclística, el transporte público masivo, el transporte de mercancías, así como, la utilización de tecnologías limpias. En el caso del área de estudio, el control del comercio informal es advertido como una prioridad ya que se evidencia como la principal problemática que afecta al transporte no motorizado.

La tarea que queda para la agenda investigativa enmarca un análisis del transporte privado y transporte de mercancías, a fin de evidenciar el nivel de servicio de la red vial y los índices de congestión vehicular existente. De la misma manera, se requiere un análisis de demanda y capacidad para el diseño de la infraestructura ciclística.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agarwal, O. P., Kumar, A. y Zimmerman, S. (2019). Chapter 5 - Network planning: from segment to whole trip. En *Emerging paradigms in urban mobility. Planning, financing and management* (pp. 101-122). Elsevier. Recuperado de: <https://www.elsevier.com/books/emerging-paradigms-in-urban-mobility/agarwal/978-0-12-811434-6>

Aldás, D. (2017). *Estudio de rutas y frecuencias para un sistema óptimo de transporte público urbano en la Ciudad de Ambato*. Tesis de Maestría. Universidad Técnica de

Ambato. Recuperado de: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/25548>

Arellana, J., Saltaín, M., Larrañaga, A. M. y Álvarez, V. (2019). Urban walkability considering pedestrians' perceptions of the built environment: a 10-year review and a case study in a medium-sized city in Latin America. *Transport Reviews*, 40(2), 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1703842>

Balasubramaniam, A., Paul, A., Hong, W., Seo, H. y Kim, J. H. (2017). Comparative Analysis of Intelligent Transportation Systems for Sustainable Environment in Smart Cities. *Territorios*, 9(1120), 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9071120>

Bañon Blázquez, L. y Beviá García, J. (2000). Comportamiento Peatonal. En *Manual de carreteras. Volumen I: elementos y proyecto*. Alicante: Ortiz e Hijos. Recuperado de: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/1788>

Billones, R. K. C., Guillermo, M. A., Lucas, K. C., Era, M. D., Dadios, E. P. y Fillone, A. M. (2021). Smart Region Mobility Framework. *Sustainability*, 13(6366), 1–29. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13116366>

Boareto, R. (2003). A mobilidade urbana sustentável. *Revista dos Transportes Públicos*, (25), 45-56. Recuperado de: http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/01/10/15FBD5EB-F6F4-4D95-B4C4-6AAD9C1D7881.pdf

Bocarejo, J. P., Portilla, I., Velásquez, J. M., Cruz, M., Peña, A. y Oviedo, D. (2014). An innovative transit system and its impact on low income users: the case of the Metrocable in Medellín. *Journal of Transport of Geography*, 39, 49–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.018>

Caniffi, S. (10 de noviembre de 2022). 5 observaciones a la medición de la movilidad sostenible. *Geo Innova*. Recuperado de: <https://geoinnova.org/blog-territorio/medicion-de-la-movilidad-sostenible/#>

Charan, A. S. y Venkataraman, H. (2017). Greening the Economy: A Review of Urban Sustainability Measures for Developing New Cities. *Sustainable Cities and Society*, 32, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.009>

Elserafi, T., Elkerdany, D. y Shalaby, A. (2017). Challenges for sustainable urban Mobility in Zamalek District. *Open House Internacional*, 4, 13–07.

Franco, I. D. (2021). Las smart cities en la agenda del planeamiento y la gobernanza urbana en América Latina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30(2), 280–296. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n2.89479>

Fundación Ciudad Humana (2021). Plan de Movilidad Urbana Sostenible (SUMP) Ambato, Ecuador. Recuperado de: <https://cff-prod.s3.amazonaws.com/storage/files/gacWdCuWW5Tk3UJLYB2e03WdUBdpu49DompFTb.pdf>

Gaviria, P. (2013). *Diseño de un sistema de indicadores de sostenibilidad como herramienta en la toma de decisiones para la gestión de proyectos de infraestructura en Colombia*.

Tesis de Grado. Universidad de EAFIT. Recuperado de: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/1250>

Gibson, C. D., Jolly, J. F., Vilches, A. M. y Parra, F. R. (2011). Algunas reflexiones sobre la movilidad urbana en Colombia desde la perspectiva del desarrollo humano. *Papel Político*, 16(2), 485–514.

Goyes, A. (2018). *La Movilidad Urbana Sostenible en el centro de la ciudad de Ambato. Tesis de Maestría*. Instituto Politécnico de Leiria. Recuperado de: <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/3580>.

Guevara, L., Flores, J. y Flores, M. (2022). Analysis of the conditions of pedestrian mobility due to territorial fragmentation. Case: Las Lajas neighborhood, Atlixcáyotl Territorial Unit, Puebla, México. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 11(21), 169–181. DOI: <https://doi.org/10.18537/est.v011.n021.a14>

Herce, M. (2009). *Sobre la movilidad en la ciudad. Propuestas para recuperar un derecho ciudadano. Propuestas para recuperar un derecho ciudadano*. Barcelona: Reverté.

Herrmann-Luncke, M. G., Mora, R. y Sagaris, L. (2020). Persistence of walking in Chile: lessons for urban sustainability. *Transport Reviews*, 40(2), 135-159. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1712494>

Hipogrosso, S. y Nesmachnow, S. (2020). Analysis of Sustainable Public Transportation and Mobility Recommendations for Montevideo and Parque Rodó Neighborhood. *Smart Cities*, 3, 479–510. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities3020026>

INEC (2019). *Anuario de Estadísticas de Transporte 2018*. Recuperado de: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica_de_Transporte/2018/2018_ANET_PPT.pdf

Jiménez, R. (2008). *Planificación Estratégica y Construcción de Indicadores en el Sector Público de Costa Rica "Metodología para la Construcción de Indicadores"*. CEPAL. Recuperado de: <https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/4/34184/PresentacionIndicadores.pdf>

Jurado, C. (2004). Las reducciones toledanas a pueblos de indios: aproximación a un conflicto. El repartimiento de macha (charcas), siglo XVI. *Cahiers Des Amériques Latines*, 47, 123–137. DOI: <https://doi.org/10.4000/cal.7814>

Kamargianni, M., Georgouli, C., Tronca, L. P. y Chaniotakis, M. (2022). Changing transport planning objectives during the Covid-19 lockdowns: Actions taken and lessons learned for enhancing sustainable urban mobility planning. *Cities*, 131(May). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103873>

Kamran, M., Farhan, A., Shujaat, S. y Shah, A. (2019). An assessment of sustainable urban transportation system in Pakistan. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 14(6), 470–483. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.12.00032>

Kaufmann, V. (2008). Mobilité y qualité de la vie en ville en Vivre en ville. En Damon, J., (Dir.), *Observatoire mondial des modes de vie urbains* (pp. 119–140). París: Presses Universitaires de France.

Kuo, F. y Sullivan, W. (2001). Does Vegetation Reduce Crime? *Environment and behavior*. *SAGE Journals*, 33(3), 343-367. DOI: <https://doi.org/10.1177/0013916501333002>

Ling, S., Ma, S. y Jia, N. (2022). Sustainable urban transportation development in China: A behavioral perspective. *Front. Eng. Manag.*, 9, 16–30. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42524-021-0162-4>

Lizárraga, C. (2006). Movilidad urbana sostenible: un reto para las ciudades del siglo XXI. *Economía, Sociedad y Territorio*, VI(22), 1–35.

Martos, A., Pacheco-Torres, R., Ordóñez, J. y Jadraque-Gago, E. (2016). Towards successful environmental performance of sustainable cities: Intervening sectors. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 479–495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.095>

Mataix, C. (2010). *Movilidad urbana sostenible: un reto energético y ambiental*. Recuperado de: <https://www.fenercom.com/publicacion/movilidad-urbana-sostenible-un-reto-energetico-y-ambiental-2010/>

Ministerio de Transportes [MITMA] (2021). *Estrategia de Movilidad 2023. Segura, sostenible, conectada*. Recuperado de: https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/esmovilidad/ejes/211223_es.movilidad_accesibilidad_BAJA_vf.pdf

Miralles-Guasch, C. (2002). *Ciudad y transporte. El binomio imperfecto*. Bogotá: Ariel Geografía.

Muñoz, J. P., Simón de Blas, C. y Jiménez, C. (2014). Estudio empírico sobre la utilización del transporte de movilidad sostenible. *Cuadernos de Economía*, 37(104), 112-124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cesjef.2013.12.001>

Murata, M., Delgado Campos, J. y Suárez Lastra, M. (2017). ¿Por qué la gente no usa el Metro? Efectos del transporte en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 1 Why the people don't use the Subway? The impact of the transportation system on Mexico City's structure. *Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía*, (93), 158–176. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.56661>

Obregón-Biosca, S. A. y Betanzo-Quezada, E. (2015). Análisis de la movilidad urbana de una ciudad media mexicana, caso de estudio: Santiago de Querétaro. *Economía, Sociedad y Territorio*, xv, 61–98.

Orellana, D., Hermida, C. y Osorio, P. (2017). Comprendiendo los patrones de movilidad de ciclistas y peatones. Una síntesis de literatura. *Revista Transporte y Territorio*, 16, 167–183.

Quiroga, R. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible*. Comisión económica para América Latina y el Caribe. Recuperado de: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5502>

Richter, M. A., Hagenmaier, M., Bandte, O., Parida, V. y Wincent, J. (2022). Technological Forecasting & Social Change Smart cities, urban mobility and autonomous vehicles: How different cities needs different sustainable investment strategies. *Technological Forecasting & Social Change*, 184(June). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121857>

Rivera, L., Mayorga, F., Vayas, T., Freire, C. y Freire, L. (2017). El sistema de transporte público en el cantón Ambato. Frecuencias, productividad y velocidad. *Boletín de Coyuntura*, 13, 7–10.

Rodríguez, H. (2016). *Indicadores cualitativos y estrategias para una movilidad sostenible en la ciudad de Hermosillo, Sonora. (México)*. Tesis de Grado. Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100163/TFM-Hector%20Rodriguez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Romero Renau, L. (2011). La explosión de la movilidad urbana en ciudades pequeñas: un problema creciente. análisis a partir del municipio metropolitano de aldaya (Valencia). *Revista Transporte y Territorio*, 4, 133–147.

Säumel, I., Weber, F. y Kowarik, I. (2016). Toward livable and healthy urban streets: Roadside vegetation provides ecosystem services where people live and move. *Environmental Science & Policy*, 62(C), 24-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.11.012>

Suárez Falcón, H., Verano Tacoronte, D. y García Santana, A. (2016). La movilidad urbana sostenible y su incidencia en el desarrollo turístico. *Gestión y Ambiente*, 19(1), 48–63. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169446378003>

Tanikawa-Obregón, K. y Paz-Gómez, D. M. (2021). El peatón como base de una movilidad urbana sostenible en Latinoamérica: una visión para construir ciudades del futuro. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 50(febrero-agosto), 29–34.

Transportation Research Board (2000). *Highway Capacity Manual*. United States: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.

Tsavachidis, M. y Petit, Y. (2022). Re-shaping urban mobility – Key to Europe's green transition. *Journal of Urban Mobility*, 2(December 2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2022.100014>

Uribe Bedoya, H., Valencia Arias, A. y Ramos y Yovera, S. (2020). Tendencias y evolución investigativa sobre la movilidad sostenible: una aproximación bibliométrica. *Producción + Limpia*, 14(2), 42–60. DOI: <https://doi.org/10.22507/pml.v14n2a5>

Velásquez, C. (2015). *Espacio público y movilidad urbana. Sistemas Integrados de Transporte Masivo (SITM)*. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona. Recuperado de: <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/67821>

Yan, X., Levine, J. y Marans, R. (2019). The effectiveness of parking policies to reduce parking demand pressure and car use. *Transport Policy*, 73, 41-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.10.009>

Zellner, M., Massey, D., Shiftan, Y., Levine, J. y Arquero, M. J. (2016). Overcoming the last-mile problem with transportation and land-use improvements: An agent-based approach. *International Journal of Transportation*, 4(1), 1–26. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.14257/ijt.2016.4.1.01>

RESPUESTA DE LOS MUROS DE QUINCHA AL RIESGO DE CONDENSACIÓN¹

RESPONSE OF WATTLE AND DAUB WALLS TO CONDENSATION PROBLEMS

RESPOSTA DAS PAREDES DE QUINCHA AO RISCO DE CONDENSAÇÃO

Maria Guadalupe Cuitiño-Rosales

Doctora en Ciencias Exactas
Investigadora Asistente de CONICET
Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria – UNCuyo, Profesora de Trabajos Prácticos de la Universidad de Mendoza
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), San Rafael, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-0021-5648>
gcuitino@mendoza-conicet.gob.ar

Alfredo Esteves-Miramont

Doctor en Arquitectura
Director de la Diplomatura en Arquitectura Sustentable, Investigador principal del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía,
Profesor de la carrera de Arquitectura de la Universidad de Mendoza,
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-5212-9293>
aesteves@mendoza-conicet.gob.ar

Laura Elizabeth Najjar

Master en Ingeniería ambiental
Profesora de la carrera de Ingeniería química
Universidad Nacional de Cuyo, San Rafael, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-4049-4503>
lnajar@fcai.uncu.edu.ar

1 Se expresa especial agradecimiento a la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación y al Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT), proyecto joven PICT 04500, por el apoyo recibido para la realización de este artículo de investigación.

RESUMEN

La respuesta de los muros de tierra frente a la humedad es un tema de relevancia al momento de evaluar la condensación superficial e intersticial. Por ello, en el siguiente artículo se analizó el comportamiento frente a la humedad de tres construcciones con muros de quincha, teniendo en cuenta las diferentes capas de revoque de barro y de cañas de Castilla. Primero, se evaluó respecto de la Norma Iram 11.625 y con los datos de temperatura exterior de diseño, la temperatura interior de diseño y las propiedades térmicas de los materiales. Se obtuvieron los valores de temperatura superficial y de rocío para cada caso. Se observó que, en ningún caso, se produjo condensación superficial y que en la capa cercana a la caña exterior existía, en todos los casos, la posibilidad de condensación intersticial, la cual puede ser optimizada mediante el uso de una aislación por la cara exterior o interior según la condición climática. A partir de mediciones in situ con dataloggers hobo, se tomaron registros de temperatura y humedad relativa interior y exterior para invierno. Se trazaron las curvas de temperatura superficial y de rocío y se advirtió que en todos los casos los valores de la temperatura de rocío son menores a la temperatura superficial, verificándose la falta de condensación superficial.

Palabras clave

quincha, humedad relativa, condensación superficial, condensación intersticial.

ABSTRACT

The response of earthen walls to humidity is a relevant issue when evaluating surface and interstitial condensation. This article analyzed the behavior against the humidity of three buildings with wattle and daub walls, taking into account the different layers of mud plaster and Castilla reeds. First, these were evaluated using the Iram 11.625 Standard and with the outdoor design data temperature, the indoor design temperature, and the thermal properties of the materials, obtaining the surface and dew temperature values for each case. It was observed that surface condensation did not occur in any case and for interstitial condensation, in all cases, in the layer close to the exterior reed there was the possibility of condensation, which can be optimized by using insulation on the outer or inner face depending on the climatic conditions. Based on in situ measurements with hobo dataloggers, indoor and outdoor temperature and relative humidity records were taken for winter. Surface and dew temperature curves were plotted and it was observed that in all cases the dew temperature values are lower than the surface temperature, verifying the lack of surface condensation.

Keywords

wattle and daub, relative humidity, surface condensation, interstitial condensation.

RESUMO

A resposta das paredes de terra à humidade é uma questão relevante ao avaliar a condensação superficial e intersticial. Por este motivo, no presente artigo foi analisado o comportamento com relação à humidade de três edifícios com paredes de quincha, levando em consideração as diferentes camadas de reboque de barro e de canas-do-reino (*Arundo donax*). Primeiramente, foram avaliadas, em relação ao Padrão Iram 11.625 e com os dados de temperatura externa de projeto, a temperatura interna de projeto e as propriedades térmicas dos materiais. Foram obtidos os valores de temperatura superficial e de orvalho para cada caso. Observou-se que em nenhum caso ocorreu condensação superficial e que na camada próxima da cana exterior existia em todos os casos a possibilidade de condensação intersticial, a qual pode ser otimizada mediante a utilização de isolamento na face externa ou interna, dependendo das condições climáticas. Com base em medições *in situ* com dataloggers hobo, foram realizados registros de temperatura e umidade relativa interior e exterior para o inverno. Foram traçadas curvas de temperatura da superfície e temperatura do orvalho e observou-se que em todos os casos os valores da temperatura do orvalho são inferiores à temperatura da superfície, verificando a ausência de condensação superficial.

Palavras-chave

quincha, umidade relativa, condensação superficial, condensação intersticial.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los muros de tierra frente a la humedad del ambiente es un cuestionamiento recurrente al momento de considerar tanto los revoques interiores como los exteriores, debido a que existe la suposición de que los muros de tierra respiran, absorbiendo y liberando la humedad del ambiente (Hung Anh y Pásztor, 2021).

La respuesta de los materiales de construcción frente a la humedad es un recurrente tema de estudio, que busca determinar cómo esta puede afectar tanto en forma positiva como negativa (Berger, Guernouti, Woloszyn, & Buhe, 2015) (del Río *et al.*, 2021) ya sea al confort del ambiente interior o a la durabilidad de dichos materiales (Arundel, Sterling, Biggin y Sterling, 1986; Hamdaoui, Benzaama, Mendili y Chateigner, 2021). Diversos autores han analizado a la tierra cruda desde un punto de vista higrotérmico, considerando que se comporta como un regulador térmico (Costa-Carrapiço, Croxford, Raslan y González, 2022; Allassaad, Touati, Levacher y Sebaibi, 2021) e higrométrico que frena y atenúa las olas de calor y estabiliza la humedad relativa interior más rápido que otros materiales de construcción, donde las paredes y el techo de la construcción deben entrar en acción como estabilizadores del ambiente (Giada, Caponetto y Nocera, 2019; Eshoj y Padfield, 1993; Padfield, 1998). Gernot Minke fue uno de los pioneros en investigar sobre la capacidad amortiguadora de los muros de tierra frente a la humedad (Minke, 2005; Colinart *et al.*, 2020). Otros trabajos se enfocan en el análisis higrotérmico de las construcciones con tierra mediante simulaciones con programas como el Energy Plus (McGregor, Heath, Shea y Lawrence, 2014; Rode y Grau, 2008; Abadie y Mendoca, 2009; Ramos y Freitas, 2011). Investigaciones realizadas en ladrillos de tierra cruda muestran la tendencia de la densidad aparente para alcanzar la humedad de equilibrio, donde a mayor densidad aparente del adobe, mayor es el porcentaje del contenido de humedad de equilibrio (Zhang, Sang y Han, 2020; Liuzzi, Hall, Stefanizzi y Casey, 2013). De acuerdo a Hall y Allinson (2009a), los materiales de tierra apisonada estabilizada la densidad seca y la porosidad aparente están inversamente relacionadas y, por lo tanto, una mayor porosidad da como resultado un aumento de la absorción capilar y de la permeabilidad al vapor de agua. Sin embargo, la capacidad total de almacenamiento higroscópico parece variar poco como resultado de los parámetros de mezcla y la granulometría de suelos (Hall y Allinson, 2009b; Hall y Casey, 2012). En el estudio realizado por Labat, Magniont, Oudhof y Aubert, (2016) sobre mezclas de paja y arcilla, se observó que presentan un efecto amortiguador de la humedad relativa. En simulaciones relacionadas a la absorción de la humedad relativa y secado de muros (Labat *et al.*, 2016; Asphaug, Andenas, Geving, Time y Kvande,

2022; Fouchal, Gouny, Maillard, Ulmet y Rossignol, 2015) se evidenció la influencia favorable de los revoques interiores de tierra (Nematchoua, Tchinda, Orosa y Andreasi, 2015).

Es así que la humedad del ambiente interior cumple un rol importante en el confort y la preservación de los materiales. En términos de confort, la humedad relativa interior debe permanecer entre 20% y 80% para cualquier condición de temperatura interior (Miranda, 2007), como también para preservar los materiales de construcción susceptibles de cambios físicos como madera y aglomerados, entre otros (Coscollano Rodríguez, 2002).

Generalmente, se trata de mantener el control sobre la temperatura, siendo esta considerada como el parámetro más importante para establecer el confort, pero es importante apuntar que cuando la humedad absoluta es constante, la humedad relativa del aire varía acorde a la temperatura reinante. De esta forma, es necesario igualmente controlar la humedad relativa de los ambientes, ya que las personas presentan una mejor tolerancia frente a una baja humedad relativa. Ahora bien, cuando la humedad relativa disminuye por debajo del 20%, se secan las mucosas y por debajo del 30% suelen producirse descargas eléctricas debido a la electricidad estática (Gea-Izquierdo, 2022). En cambio, cuando los valores de la humedad relativa de los ambientes interiores son elevados favorecen al desarrollo de organismos como son los mohos y ácaros del polvo, que pueden provocar reacciones alérgicas. Efectivamente, esta es una de las principales causas que producen afecciones de las vías respiratorias, al igual que altera el bienestar y confort de los usuarios (Martínez, Sarmiento y Urquieta, 2005).

Las humedades extremas son, así, muy perjudiciales tanto para la salud de los habitantes como para el confort térmico. En la Figura 1 se aprecia que el rango entre el 30% y el 60% de humedad relativa (para una temperatura del aire de 20°C–22°C) es el que provee las mejores condiciones ambientales, debido a que el crecimiento tanto de las bacterias como de los organismos biológicos y la velocidad a la cual ocurren las interacciones químicas se minimizan. Con una humedad relativa del 50% el promedio de la mortalidad de ciertos microorganismos aumenta; valor que disminuye si ese porcentaje cambia, ya sea hacia arriba o hacia abajo (Cárdenas Llamas y Hernández Mendoza, 2003; Style, 2022).

El efecto que produce la humedad ambiental en la salud de las personas, puede afectar la nariz, la garganta, los ojos y también se ha registrado un aumento de los problemas de asma, todos relacionados, principalmente, con las vías respiratorias, como se aprecia en la Figura 1. Adicionalmente, la humedad favorece la proliferación de las bacterias

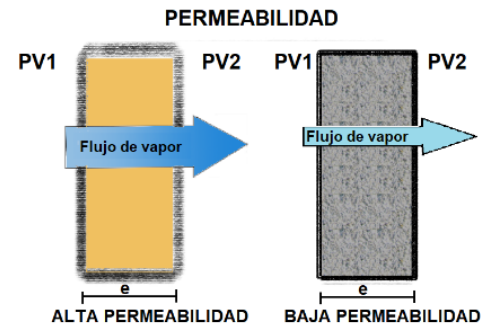
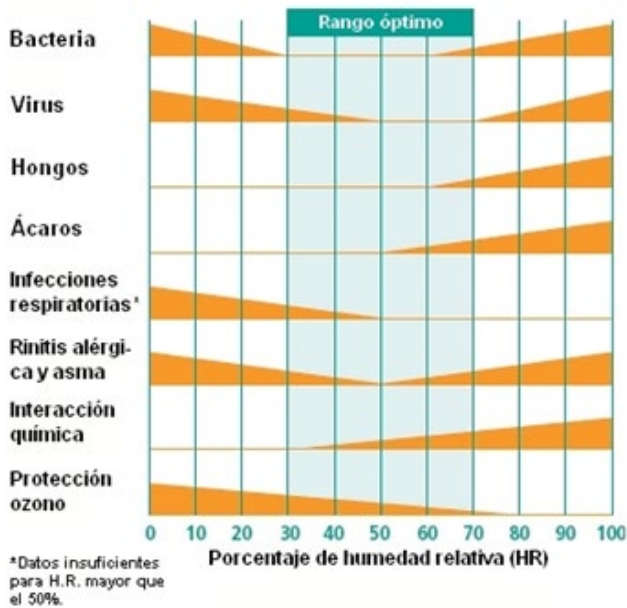


Figura 1. Rango óptimo de la humedad relativa para un ambiente sano. Fuente: Fisair, 2022, p. 2.

Figura 2. Permeabilidad y permeancia de los materiales Fuente: Elaboración de los autores a partir de Fresno (2021).

en el aire, convirtiendo al aire del interior de la vivienda en perjudicial para la salud. La única forma de solucionar estos problemas es por medio de la estabilización de la humedad relativa y la mejora de la calidad del aire del ambiente interior, para lo cual es necesario deshumidificar, en caso de que el aire sea muy húmedo y, en caso de que sea muy seco, se requiere humidificar (Cardoso, Puzhi y Zhinin, 2016). Esta es una de las razones por la que el control de la humedad relativa en el interior de las viviendas se está convirtiendo en una parte importante del análisis de la calidad del aire interior y del confort térmico.

Durante el invierno, se registran temperaturas menores del aire exterior, es decir que el aire es más frío y húmedo. Cuando este aire ingresa al interior de la vivienda, comienza a calentarse, causando la pérdida de humedad. En el interior, el aire seco absorbe humedad para alcanzar su equilibrio, instancia en la que no gana ni pierde humedad, y el aire seco absorbe la humedad de los materiales que se encuentran en el entorno inmediato como es el caso de los materiales empleados en los muros de cerramiento, causando el resecamiento de los muros, razón por la cual no es conveniente que la humedad relativa varíe rápidamente (Cárdenas Llamas y Hernández Mendoza, 2003).

CARACTERÍSTICAS DE LA HUMEDAD

Son numerosas las formas en las que la humedad se puede manifestar en una vivienda según su ubicación y procedencia: puede provenir de la construcción, del suelo, de la atmósfera, y producirse por condensación

y/o accidentalmente (Martínez *et al.*, 2005; Sanfulgencio Tomé, 2017; Romero Alonso, 2022).

En la Figura 2, se relaciona la permeabilidad que considera el diámetro que tienen los poros de los materiales de construcción y la geometría de los huecos, mismos que son responsables de otorgar al material la capacidad de permitir el paso de vapor de agua al momento de producirse una diferencia de presión entre sus caras. Cuando se relaciona la permeabilidad con el espesor del material, se puede obtener el valor de permeancia (Fresno, 2021).

Se considera a la condensación como el fenómeno que permite que el vapor de agua presente en la atmósfera se transforme en agua líquida al enfriarse. Es importante comprender algunas definiciones asociadas a la humedad, tales como la humedad relativa y el punto de rocío. La humedad relativa (HR) es la cantidad de agua que se encuentra en el aire a una determinada temperatura, con respecto a la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede contener a esa temperatura en condiciones de saturación. Si se tiene una cierta cantidad de vapor de agua en el ambiente a una cierta temperatura, el "punto de rocío" viene a ser aquella temperatura mínima a la cual el ambiente se satura de vapor de agua. Por lo tanto, mientras la temperatura del aire se mantenga por sobre la de rocío no habrá condensación, no obstante, si la temperatura del aire baja habrá condensación (Corporación de Desarrollo Tecnológico y Cámara Chilena de la Construcción, 2012).

De acuerdo con Minke (2005), el barro tiene la capacidad de adsorber y liberar humedad más

Nombre del proyecto		
CARACTERISTICAS DEL LUGAR		
Nombre de la localidad:		Mendoza
Altura sobre el nivel del mar:	m	823
Zona bioambiental: (x)		4
Tipo de cerramiento:		M
Temperatura interior de diseño invierno: (x)	°C	18
Temperatura exterior de diseño invierno: (x)	°C	-0.3
Humedad relativa interior de diseño :	%	69
Humedad relativa exterior de diseño:	%	90
Presión de vapor interior:	kPa	1.59
Presión de vapor exterior:	kPa	0.60
CARACTERISTICAS DEL CERRAMIENTO		
Denominación		
Resistencia de cámara de aire invierno:	m ² .K/W	
Resistencia superficial interior invierno:	m ² .K/W	0.17
Resistencia superficial exterior invierno:	m ² .K/W	0.04
Coefficiente absorción (color) sup.exterior:		0.75
Resistencia de cámara de aire verano:	m ² .K/W	
Resistencia superficial interior verano:	m ² .K/W	
Resistencia superficial exterior verano:	m ² .K/W	

Figura 3. Datos generales para la verificación del riesgo de condensación. Fuente: Elaboración de los autores a partir de Gonzalo, Ledesma, Nota y Martínez (2000, p. 2).

rápidamente y en mayor cantidad que los demás materiales de construcción. Según estudios realizados por el Laboratorio de Construcciones experimentales de la Universidad de Kessel, cuando la humedad relativa interior se encuentra entre 50% y 80%, luego de dos días, los bloques de barro son capaces de adsorber 30 veces más de humedad que los ladrillos cocidos en iguales condiciones. Los morteros de arcilla tienen la propiedad de regular la humedad relativa del aire y la temperatura ambiente, como todo producto de tierra cruda, pero la capacidad de absorción de humedad puede variar bastante dependiendo de la técnica y de la composición del material empleado e, incluso, de los aditivos que se incorporen a la masa como estabilizantes (Castilla, 2004). Estos morteros, por estar compuestos básicamente con tierra arcillosa, son vulnerables a la acción directa del agua. Es el caso de los muros revocados con mezclas de arcillas que son propensos a absorber el agua de lluvia por capilaridad. Así también, la humedad absorbida es eliminada como vapor de agua durante el secado. Está comprobado que este producto busca permanentemente el equilibrio con la humedad relativa del aire del ambiente donde se usa como revestimiento y que permite la respirabilidad del muro que recubre, por eso es importante valorar, en términos experimentales, la capacidad de paso de vapor de agua o la permeabilidad que pueden presentar los cerramientos de tierra (González Serrano, 2015)

A partir de la premisa de que los muros de tierra son propensos a ser afectados por la humedad ambiental

y que también tienen la capacidad de absorber y liberar humedad de acuerdo con los requerimientos del ambiente interior hasta lograr un equilibrio higrotérmico, resulta necesario medir *in situ* el comportamiento real de viviendas con muros de tierra. En este trabajo, se presenta la respuesta de los muros de quincha frente a la humedad relativa ambiental y la posibilidad de la condensación intersticial y superficial de acuerdo con la normativa vigente en Argentina y su comparación con registros experimentales de humedades relativas.

METODOLOGÍA

En una primera etapa de estudio, para el análisis de la condensación superficial e intersticial de los muros de quincha, se realizó un análisis teórico en base a datos suministrados por la normativa IRAM 11625 (2000) para la verificación del riesgo de condensación en muros. Los datos utilizados para el análisis fueron: la temperatura de diseño interior para invierno, la temperatura exterior de diseño para invierno, la humedad relativa interior y exterior de diseño y la resistencia superficial interior y exterior para invierno, como se muestra en la Figura 3. Luego, se completaron los datos relativos a las propiedades térmicas de los materiales que componen el muro de cerramiento que, en este caso, corresponde al muro de quincha, compuesto principalmente por barro y cañas. Los datos requeridos fueron: el espesor de cada capa del

PLANILLA PARA LA INCORPORACION DE DATOS PARA CADA CAPA DEL CERRAMIENTO																
											VERIFICA K		SI/NO		VERIFICA QUE NO CONDENSA	
											MINIMO	NO VERIFICA	SUPERFICIAL	SI VERIF.		
											RECOMEN.	NO VERIFICA	INTERSTICIAL	SI VERIF.		
											ECOLOGICO	NO VERIFICA				
Nº	CAPAS	Espe- sor	Conduc- tividad	Resist. térmica	Peso Espec.	Peso Unit.	Permea- bilidad	Per- meancia	Resist. vapor tot.	Presión vapor	Temp. real	Temp. rocío				
Elem.		m	W/m.K	m ² .K/W	Kg/m ³	Kg/m ²	g/m.h.KPa	g/m ² .h.kPa	m ² .h.kPa/g	kN/m ²	(°C)	(°C)				
	AIRE INTERIOR									1.59	18.00	0.00				
	R.S.I.			0.170												
1	Revoque de barro	0.0200	1.200	0.017	1200	24.0	0.157		0.13	1.59	12.48	12.19				
2	Cañas	0.0200	0.125	0.160	550	11.0	0.030		0.67	1.51	11.94	11.44				
3	Cañas	0.0200	0.125	0.160	550	11.0	0.030		0.67	1.10	6.74	6.60				
4	Revoque de barro	0.0200	1.200	0.017	1200	24.0	0.157		0.13	0.68	1.54	-0.21				
										0.60	1.00	-1.79				
	R.S.E.			0.040						0.60	-0.30					
	AIRE EXTERIOR									0.60	-0.30					
	Esesor Total:	0.080		Res.Ter.T	K=1/Rt	Peso Total			Resis.paso	vapor tot.						
				0.563	1.775	70.00			1.588							

Figura 4. Planilla de cálculo de la temperatura superficial y temperatura de rocío. Fuente: Elaboración de los autores a partir de Gonzalo et al., 2000, p. 2.

muro, la conductividad térmica de los materiales y la permeabilidad (Figura 4).

Con los datos de ambas planillas se obtuvo, para cada caso, la verificación del riesgo de condensación superficial y las curvas de condensación intersticial para cada capa del muro.

Los datos de entrada para realizar el cálculo de la condensación son los siguientes: la temperatura exterior de diseño, correspondiente con la temperatura mínima de diseño expresada en la Norma IRAM 11603 (2012) de las localidades analizadas que, en este caso, son las ciudades argentinas de Mendoza capital, Uspallata y Malargüe. Para la humedad relativa exterior, se utilizó un valor del 90%. En los casos de estudios en que el destino de la construcción es para una vivienda, la temperatura interior de diseño es de 18°C, y la humedad relativa interior estará en función de la temperatura exterior de diseño correspondiente a cada localidad. Otro parámetro que se debe tener en cuenta es la resistencia térmica superficial para muros que la IRAM fija en 0.17 m²K/W para el interior y 0.04m²K/W para el exterior (Norma IRAM 11601, 2002).

Dentro de las características térmicas de los materiales involucrados en el cerramiento, influyen la conductividad térmica, la permeabilidad y la permeancia, de cada una de las capas de los muros de quincha. En este trabajo las capas están compuestas de un entramado interno de cañas de Catilla (*Arundo donax*) de diámetros entre 2cm a 3cm, relleno con una mezcla de barro conformado por arena-arcilla y paja,

de lo cual se obtiene muros terminados de un espesor entre 7cm para el primer caso y 30cm dependiendo del caso analizado y la técnica de relleno utilizada.

En segunda instancia, a partir de datos de temperatura y humedad relativa, interior y exterior, registrados con el uso de dataloggers, para las tres construcciones analizadas y las propiedades térmicas superficiales de los materiales de los muros de quincha, se determinó la temperatura superficial del muro y la temperatura de rocío, las que luego se plasmaron en dos curvas, para comparar su respuesta respecto del análisis teórico realizado en base a la Norma IRAM 11.625.

CARACTERÍSTICAS BIOCLIMÁTICAS

Ciudad de Mendoza

Mendoza se presenta como una provincia mediterránea y continental, localizada en una zona templada de clima árido a semiárido, formando parte de la región árida conocida como "Diagonal Árida Sudamericana" (Bernabeu, 2019). La causa de la aridez en Mendoza es la presencia de la Cordillera de los Andes, que actúa como una barrera que no deja pasar la humedad proveniente desde el Océano Pacífico. El efecto de esta condición orográfica es conocido como "Desierto de Sombra" (Secretaría de Medio Ambiente, 2009). Las temperaturas presentan una importante oscilación anual: en verano es cálido y las temperaturas medias están por encima de los 25 °C y, algunos días, la mínima alcanza ese valor. El invierno es frío y seco, con temperaturas medias por debajo de los 10°C, heladas nocturnas ocasionales y escasas precipitaciones. De

acuerdo con los datos recopilados por el Servicio Meteorológico Nacional (2022), para el periodo de 1991 – 2000, se puede observar cuáles son las temperaturas máximas y mínimas para cualquier época del año. La Figura 5 muestra los valores de temperatura registrada durante la década 1991- 2000 en la Estación Meteorológica Mendoza Observatorio. Para la época invernal se registró una temperatura mínima absoluta de -5.5°C y, en la época estival, el registro de la temperatura máxima absoluta fue de $39,4^{\circ}\text{C}$ (Figura 5) (longitud: $68^{\circ}52'47''$ O; latitud: $32^{\circ}53'29''$ S; altitud: 750 msnm).

Ciudad de Malargüe

La ciudad de Malargüe se encuentra a 421 Km al Sur de la ciudad de Mendoza. Corresponde a la zona bioclimática IVb y V templado-frío a frío (Norma IRAM 11.603, 2012). Tiene un clima árido de tipo continental, con precipitaciones medias de 200 mm. Malargüe se caracteriza por tener hacia el Oeste con la Cordillera de los Andes, el centro Este es ocupado por el macizo volcánico de la Payunia y el área central por la zona hundida de la Laguna del Llanquanelo, formando un humedal (EcuRed, 2021). Los veranos son frescos, con temperaturas medias entre los 19°C de $20,6^{\circ}\text{C}$, y los inviernos son fríos, con temperaturas medias de 4°C .

La Figura 6 ilustra los valores de temperatura registrados durante la década 1991- 2000 en la Estación Meteorológica Malargüe Aeropuerto: temperatura mínima absoluta de -17.2°C para la época invernal y, para la época estival, temperaturas máximas absolutas de 36°C (longitud: $69^{\circ}35'$ O; latitud: $32^{\circ}3'$ S; altitud: 1425 msnm).

Ciudad de Uspallata

Se encuentra a 110 kms de la ciudad de Mendoza, según el IRAM 11.603 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación) pertenece a la zona bioclimática V con características de clima frío. Al igual que Malargüe, Uspallata es zona de montaña con veranos frescos y temperaturas medias de 19°C , y con inviernos fríos y temperaturas medias de 4°C . La Figura 7 exhibe los valores de temperatura registrada durante la década 1991- 2000 en la Estación Meteorológica Uspallata: temperatura mínima absoluta de -15°C para la época invernal y, para la época estival, temperaturas máximas absolutas de $36,4^{\circ}\text{C}$ (longitud: $69^{\circ}33'$ O; latitud: $32^{\circ}6'$ S; altitud: 1891 msnm).

RESULTADOS

A partir de los datos teóricos obtenidos anteriormente, se completó la planilla del programa CEEMACON.xls (Gonzalo et al., 2000) y se determinaron las curvas de la

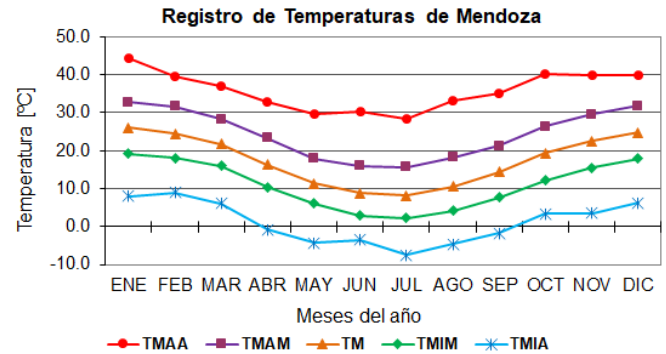


Figura 5. Temperaturas máximas y mínimas absolutas y medias mensuales para Mendoza. Fuente: (Esteves Miramont, 2017). TMAA = Temperatura máxima absoluta ($^{\circ}\text{C}$). TMAM = Temperatura máxima media ($^{\circ}\text{C}$). TM = Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$). TMIM = Temperatura mínima media ($^{\circ}\text{C}$). TMIA = Temperatura mínima absoluta ($^{\circ}\text{C}$). Fuente: Esteves Miramont (2017, p. 185).

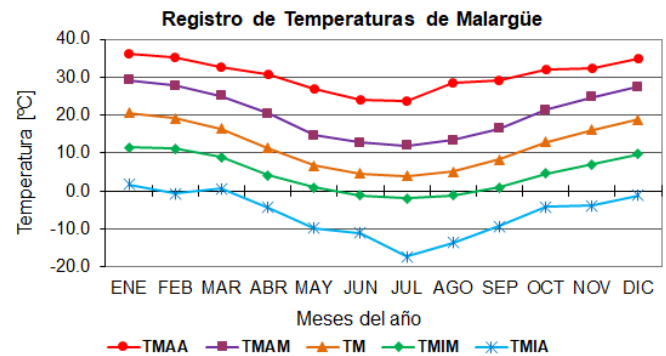


Figura 6. Temperaturas máximas y mínimas absolutas y medias mensuales para Malargüe. Fuente: Esteves Miramont (2017, p. 185).

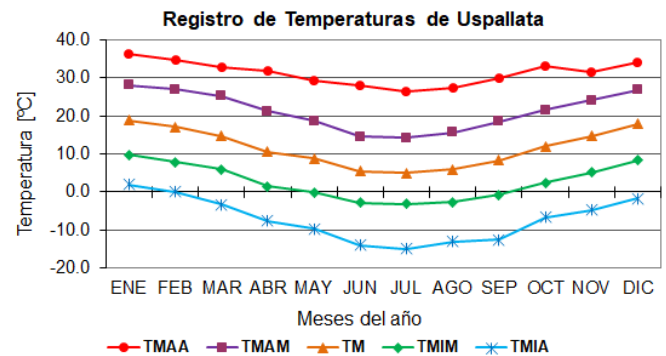


Figura 7. Temperaturas máximas y mínimas absolutas y medias mensuales para Uspallata. Fuente: Esteves Miramont (2017, p. 185).

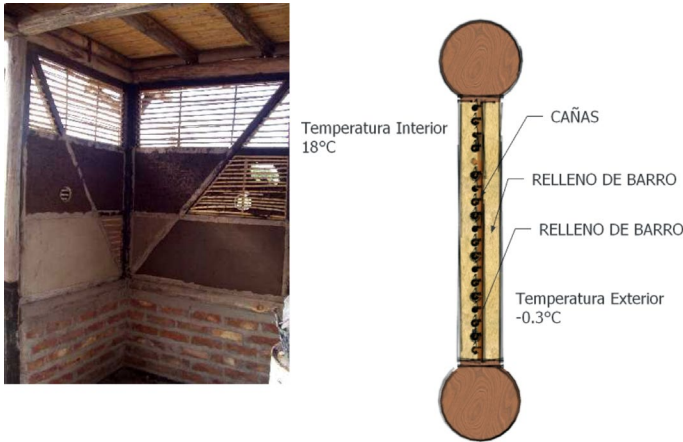


Figura 8. Taller experimental en etapa de construcción. Detalle de armado del muro de quincha. Fuente: Elaboración de los autores.

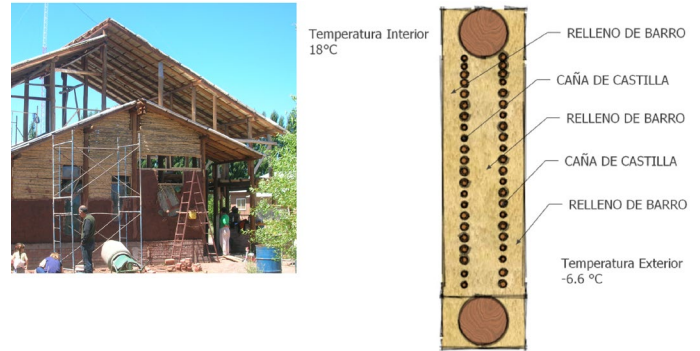


Figura 10. Eco Hostel Internacional de Malargüe, en la etapa de construcción. Fuente: Elaboración de los autores.

VERIFICACION CONDENSACION SUPERFICIAL TALLER

CONDICIONES SUP. INT.	UNIDAD	VALOR	VERIFICACION
Presión de vapor interior	kPa	1.59	
Presión de vapor exterior	kPa	0.60	
Diferencia de temperatura (Ti-Te)	°C	18.30	
Resistencia superficial interior	m ² .K/W	0.17	
Caída de temperatura en la sup. int.	°C	5.52	
Temperatura de la superficie interna	°C	12.48	
Temperatura de rocío sup. int.	°C	12.19	NO CONDENSA

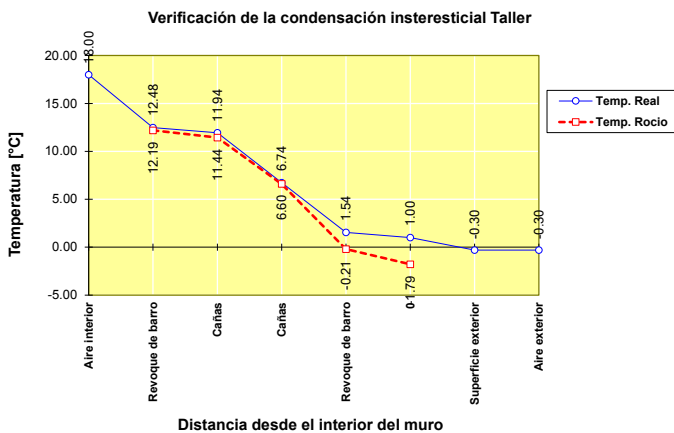


Figura 9. Verificación de condensación superficial y de condensación intersticial del taller experimental. Fuente: Elaboración de los autores.

temperatura de rocío y la temperatura real de cada capa, definiéndose así la presencia de riesgo de condensación superficial y/o intersticial.

ANÁLISIS TEÓRICO: VERIFICACIÓN DE LA CONDENSACIÓN SUPERFICIAL E INTERSTICIAL

Caso 1: Taller experimental (T.E)

Para el caso del Taller experimental construido con quincha y emplazado en la ciudad de Mendoza, se observa el muro de quincha analizado, que está constituido por

un entramado de cañas de Castilla en el medio del muro, y luego se rellena con una mezcla de barro, compuesto por arena – arcilla y paja, para obtener un muro de 0,075m de espesor (Figura 8).

Con los datos de las propiedades del aire interior, del aire exterior y de los materiales del muro, se obtuvo la verificación del riesgo de la condensación superficial y las curvas de condensación intersticial (Figura 9). Se verificó que no se producía condensación superficial, debido a que la temperatura superficial del muro es siempre mayor a la temperatura de rocío. Asimismo, no hay condensación intersticial en ninguna de las capas del muro, sin embargo, se advierte que, en la zona cercana a la caña cercana al exterior, la temperatura real es muy cercana a la temperatura de rocío, con el riesgo que conlleva si llegara a condensar. Por lo tanto, para evitar que se produzca alguna condensación intersticial, se podría pensar en mejorar el comportamiento del muro por medio de la incorporación de un material aislante o elemento que trabaje como barrera de vapor sobre la cara interior (Fernández y Esteves, 2004; Beinhauer, 2009).

Caso 2: Eco Hostel Internacional de Malargüe

El segundo ejemplo corresponde al Eco Hostel Internacional, en el Departamento de Malargüe, al Sur de la provincia de Mendoza. Para la construcción del mismo, se emplearon materiales de la zona, entre ellos, arcilla, cañas, madera y paja. Los muros de quincha están conformados con un entramado de cañas de Castilla a modo de encofrado. Después, se relleno con barro entre las cañas y como terminación de los muros, se cubrieron con la misma mezcla de barro (Figura 10), para alcanzar un espesor de muros entre 0.20m y 0.30m de espesor. Para este análisis se consideró un espesor medio de 0,25m de espesor.

VERIFICACION CONDENSACION SUPERFICIAL HOSTEL

CONDICIONES SUP. INT.	UNIDAD	VALOR	VERIFICACION
Presión de vapor interior	kPa	1.47	
Presión de vapor exterior	kPa	0.38	
Diferencia de temperatura (Ti-Te)	°C	24.60	
Resistencia superficial interior	m ² .K/W	0.17	
Caída de temperatura en la sup	°C	5.38	
Temperatura de la superficie int	°C	12.62	
Temperatura de rocío sup. int.	°C	10.15	NO CONDENSA

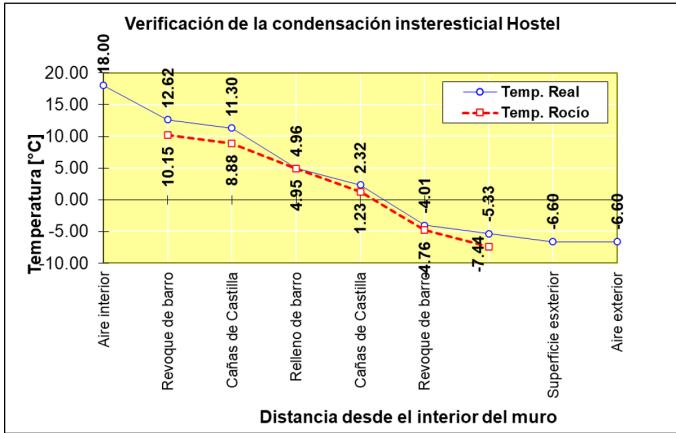


Figura 11. Verificación de condensación superficial e intersticial del Eco Hostel Internacional de Malargüe. Fuente: de los autores.

A partir de los datos climáticos del lugar, según la Norma IRAM 11603 y las propiedades térmicas de los materiales que constituyen el cerramiento, se obtuvo el comportamiento frente a la condensación del muro de quincha para la zona fría de Malargüe y se verificó que, en teoría, no se produce condensación superficial y tampoco condensación intersticial (Figura 11). Sin embargo, en la capa cercana a relleno de barro se aprecia la posibilidad de que exista condensación. En tal situación es necesario recurrir al agregado de una barrera de vapor. Es recomendable aislar los muros por la cara exterior para disminuir el riesgo de condensación intersticial, debido que el muro estará a una temperatura más cercana a la temperatura interior, lo que contribuye a que no se alcance la temperatura de rocío en la parte interior. Si se toma la opción de aislar por la cara interior, el muro será más frío y el riesgo de condensación intersticial aumentará, por lo que se requerirá emplear una barrera de vapor por el lado interno de la vivienda para eliminar la posibilidad de condensación intersticial (Corporación de Desarrollo Tecnológico y Cámara Chilena de la Construcción, 2012).

Caso 3: Salón de Usos Múltiples (SUM)-Uspallata

El tercer análisis que se presenta corresponde a un Salón de Usos Múltiples (SUM) en la localidad de Uspallata al Norte de la provincia de Mendoza. Aquí los muros utilizados son de 0.30m de espesor, casi tres veces más ancho que los empleados en T.E. Los muros de quincha están conformados por cañas de 2,5cm o 3cm en forma horizontal, y se dispusieron separadamente en dirección vertical cada 10cm, clavados de columna a columna, tanto en la cara exterior como en la interior del muro (Figura 1). Luego, se

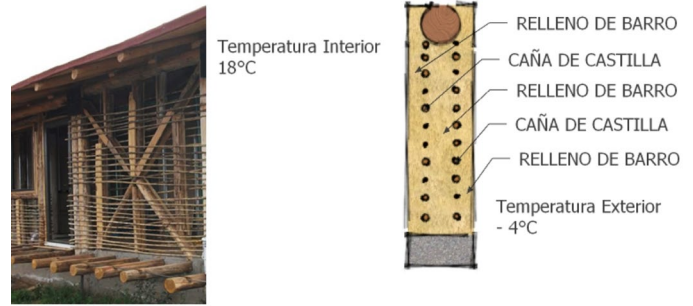


Figura 12. Salón de Usos Múltiples en etapa de construcción. Detalle de armado del muro de quincha. Fuente: Elaboración de los autores.

VERIFICACION CONDENSACION SUPERFICIAL HOSTEL

CONDICIONES SUP. INT.	UNIDAD	VALOR	VERIFICACION
Presión de vapor interior	kPa	1.47	
Presión de vapor exterior	kPa	0.38	
Diferencia de temperatura (Ti-Te)	°C	24.60	
Resistencia superficial interior	m ² .K/W	0.17	
Caída de temperatura en la sup	°C	5.38	
Temperatura de la superficie int	°C	12.62	
Temperatura de rocío sup. int.	°C	10.15	NO CONDENSA

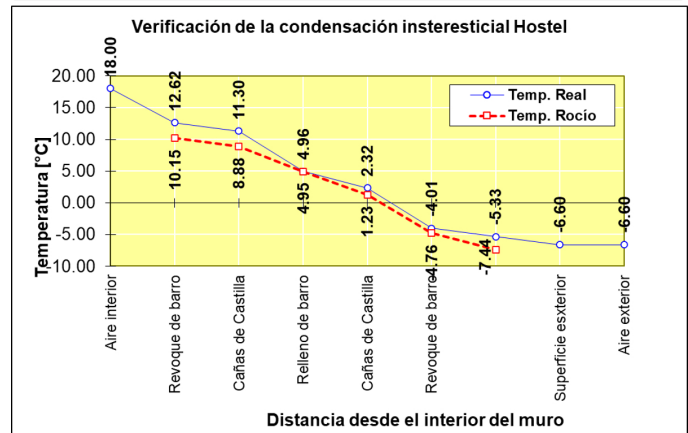


Figura 13. Verificación de condensación superficial y de condensación intersticial del Salón de Usos Múltiples. Fuente: Elaboración de los autores.

procedió al llenado del muro con la misma mezcla de barro del caso anterior, arena – arcilla y paja, hasta cubrir toda la estructura de madera y lograr el espesor de 30cm.

Se verificó que no existe riesgo de condensación superficial y tampoco de condensación intersticial, como se ve en la Figura 13. Sin embargo, al igual que en los casos anteriores, existe la posibilidad de condensación superficial y, como se indicó, es necesario recurrir al agregado de una barrera de vapor que deberá colocarse siempre en el lado más cálido del cerramiento: aquí debería ser en la parte interior del muro.

DISCUSIÓN

Para corroborar el comportamiento de los muros de quincha de las tres construcciones analizadas en el punto

anterior, frente a la condensación superficial y poder comprar los resultados teóricos obtenidos a partir de la Norma IRAM, con los valores de mediciones *in situ* se dispusieron dataloggers tipo Hobo modelo H08-003-02 -que tiene un rango de medición de la humedad relativa del 25% al 95% (Onset, 2022)- para la medición de la temperatura y humedad del Taller experimental y, para el Ecohostel Internacional de Malargüe y el Salón de Usos Múltiples se emplearon dataloggers tipo Hobo U12, que registran datos de temperatura y humedad relativa exterior e interior, con una frecuencia de 15 minutos. La experiencia se realizó en los meses de invierno. Como se vio previamente, la humedad producida por la condensación es causada cuando el aire saturado de vapor se pone en contacto con superficies frías, como ocurre con los muros interiores de la vivienda, provocando que descienda la temperatura hasta llegar al punto de rocío. Para calcular el punto de rocío, es preciso relacionar la temperatura del aire interior con la presión de vapor y la presión de saturación. Estas tres variables están relacionadas por la ecuación 1, ecuación 2, ecuación 3 y ecuación 4 (Martínez et al., 2005).

$$T_{PR} = [6,54 + 14,526 * a + 0,7389 * a^2 + 0,09486 * a^3 + 0,4569 * (P_{v_i})^{0,1984}] \quad (1)$$

Donde:

T_{PR} : Temperatura del punto de rocío [°C]

a: Logaritmo natural de la presión de vapor.

P_{v_i} : Presión de vapor [KPa]

Los datos con los que se cuenta para determinar la temperatura de rocío son las mediciones *in situ* de la temperatura y humedad relativa del ambiente interior y exterior, con los cuales se pueden obtener las variables de presión de vapor y de saturación.

$$a = \ln(P_v) \quad (2)$$

$$P_v = H_R * P_s \quad (3)$$

$$P_s = a(b + T_i / 100)^n \quad (4)$$

Donde:

H_R [%]: Humedad relativa interior medida *in situ*

P_s [KPa]: Presión de saturación

T_i [°C]: Temperatura del aire interior medida *in situ*

a, b, n: Constantes.

Para $0^\circ\text{C} \leq T_i \leq 30^\circ\text{C}$ (a = 288,68 Pa - b = 1,098 - n = 8,02)

Para $-20^\circ\text{C} \leq T_i \leq 0^\circ\text{C}$ (a = 4,689 Pa - b = 1,486 - n = 12,30)

En la figura 14, figura 15 y figura 16 se pueden distinguir los datos de temperatura tanto exterior como interior registrados, para el estudio del Taller Experimental, del Eco Hostel de Malargüe y del Salón de Usos Múltiples.

La Figura 14 expone la respuesta higrotérmica del Taller experimental, cuyo comportamiento está asociado al uso

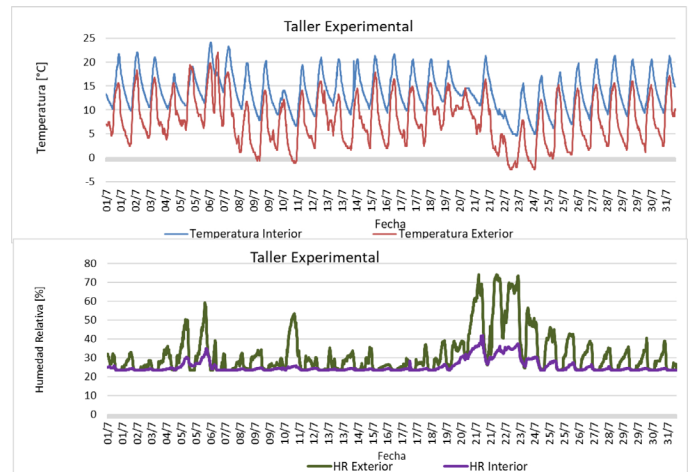


Figura 14. Medición *in situ* de temperatura y humedad relativa interior y exterior del Taller Experimental. Fuente: Elaboración de los autores.

específico del mismo, diurno exclusivamente, y relativo a tareas de armado de hornos solares, biodigestores, destiladores solares y otras propias de un taller. Durante la mañana, hay una apertura casi permanente de la puerta de ingreso, que favorece la renovación del aire interior; como consecuencia, al medio día, las temperaturas en el interior del taller se asemejan a las temperaturas en el exterior. A partir de las 16h, se concluyen las actividades y se cierra el taller, para permanecer vacío hasta la próxima jornada laboral, y es en esta instancia donde se puede observar la capacidad de aislamiento térmico de los muros de quincha.

El estudio de la respuesta higrotérmica del taller, evidenció que el datalogger empleado en la medición presentaba un valor base de partida del 25%. En el examen de las amplitudes térmicas, se pudo apreciar que la variación diaria fue entre 0,3% y 15,5%, donde la humedad relativa máxima registrada en el interior fue de 42% y respecto de la máxima exterior para el mismo instante fue de 74%. Se pudo apreciar, de esta manera, que en el interior la humedad relativa está dentro del rango óptimo de humedad. En el análisis de la temperatura interior la máxima amplitud térmica diaria fue de 12,8°C y respecto de la amplitud térmica exterior tomado en el mismo momento fue de 15°C. Para el periodo registrado se midió en el interior del taller una temperatura mínima y máxima de 4,5°C y 24°C y, en el mismo instante, los valores en el exterior fueron de -1.9°C y 19°C, respectivamente.

El Eco Hostel de Malargüe está emplazado en una región de muy bajas temperaturas donde se debe contar con inercia térmica en los muros para mejorar su comportamiento. El sensor interior se ubicó en la sala de estar, que corresponde a un área de uso compartido y dentro de la distribución arquitectónica está localizada en una zona media. La Figura 15 muestra las curvas de temperatura y humedad relativa interiores y exteriores, de lo que se infiere que en el interior se alcanzan temperaturas con baja amplitud térmica, con variaciones

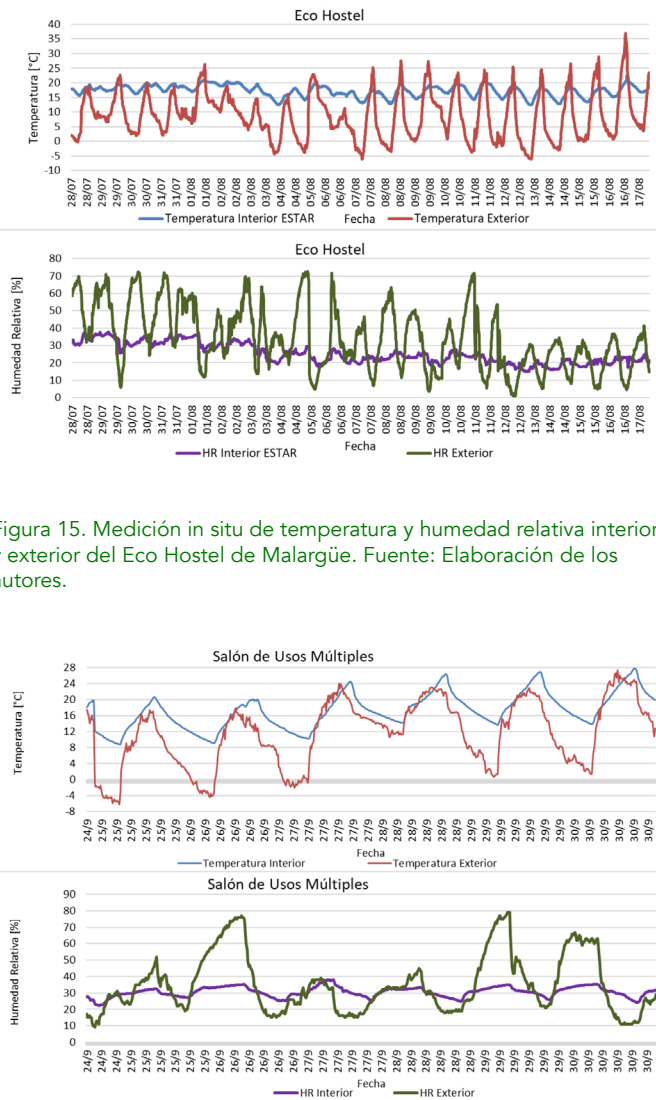


Figura 15. Medición *in situ* de temperatura y humedad relativa interior y exterior del Eco Hostel de Malargüe. Fuente: Elaboración de los autores.

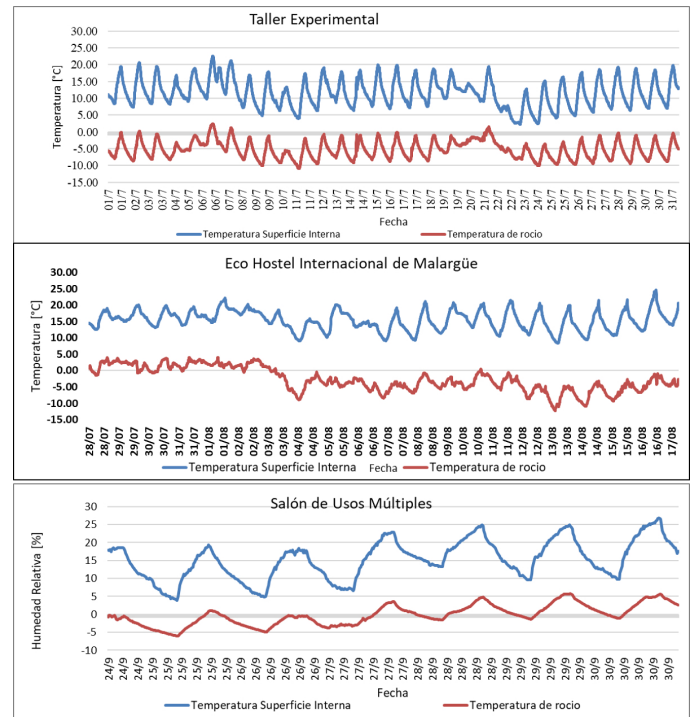


Figura 17. Temperatura de la superficie interior y temperatura de rocío del Taller Experimental, Eco Hostel y Salón de Usos Múltiples. Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 16. Medición *in situ* de temperatura y humedad relativa interior y exterior del Salón de Usos Múltiples. Fuente: Elaboración de los autores.

de entre 2,5 y 5°C, respecto de las amplitudes térmicas exteriores que varían en un rango diario entre 19°C y 30°C, con una mínima interior registrada en todo el período de 12°C, para una exterior en ese mismo momento de -5.8°C aproximadamente, y una máxima registrada en todo el período de 22°C, para una exterior simultánea de 33°C; esto producido seguramente por un viento zonda ocasional. Respecto de la humedad relativa también se aprecia una estabilidad higroscópica. Así, la amplitud diaria promedio de la humedad relativa tiene una variación entre 4,5% a 13,2%, respecto del exterior que muestra una variación diaria de la amplitud entre 28% y 56%, respectivamente. Se advierten valores máximos y mínimos interiores para todo el periodo medido de 37,9% y 14,8%, respectivamente, y para el mismo instante en el exterior se registraron 66,8% y 24%.

En el último caso, la construcción del Salón de Usos Múltiples, los sensores fueron puestos en el área de

uso común del salón, el cual es utilizado para realizar actividades de reuniones, de yoga, y también todas actividades diurnas. En cuanto a la temperatura exterior (Figura 16), se registró una mínima de -6,3°C y máximas de 17,3°C, de lo cual resulta una amplitud térmica diaria de 23,6°C, mientras que en el interior, simultáneamente, se registró una temperatura mínima y máxima de 8,8°C y 19°C, respectivamente, y una amplitud diaria de 10,2°C (dicha amplitud diaria es estable en 13°C durante el periodo de medición). Se debe aclarar que, durante la medición, no se estaba haciendo uso del lugar y este no contaba con ningún sistema de calefacción. Respecto de la humedad relativa exterior, se registró un valor mínimo y máxima diaria del 19% y 60%, respectivamente, y en el mismo instante en el interior del Salón se apuntaron valores de 27,4% y 33,2%, con oscilaciones de entre 6,7% y 12,7%, respecto del exterior cuyas oscilaciones fueron de entre el 24% y el 62%.

Para cada uno de los datos medidos *in situ* de temperatura y humedad relativa y con el uso de las ecuaciones 1 a 4 (Martínez *et al.*, 2005), se obtuvo la temperatura superficial interior (Aria Jiménez y Bobadilla Moreno, 2017) de los muros de quincha y el de la temperatura de rocío, que se ve graficada en las curvas de la Figura 17.

En todos los casos se aprecia que la temperatura de rocío se mantuvo por debajo de la temperatura superficial, corroborando la falta de la condensación superficial (Fabbri y Morel, 2016). A pesar de que los resultados teóricos basados en los datos de la Norma IRAM 11.625,

los valores de temperatura superficial interior y los datos de temperatura de rocío son casi iguales, al compararlos con los obtenidos a partir de mediciones reales, existen diferencias que permiten afirmar que los muros de quincha tienen una buena respuesta frente a la humedad relativa, al absorber humedad cuando la humedad ambiental es elevada y liberándola cuando el ambiente es más seco, logrando de esta forma una estabilidad ambiental (Bruno, Gallipoli, Perlot y Kallel, 2020) (Lee, Ozaki y Cho, 2018).

CONCLUSIONES

Los muros de quincha se caracterizan por su entramado interior de caña o de listones de madera y su relleno de barro, que otorga espesores variables de acuerdo con la técnica empleada y a la zona de emplazamiento. El comportamiento de los muros de quincha respecto de la humedad del ambiente siempre había presentado una incógnita (Indekeu, Feng, Janssen y Woloszyn, 2021). A partir de este estudio se pudo verificar, tanto en forma teórica como experimental, que los muros tienen una respuesta favorable frente a condensación superficial o intersticial (Vereecken, Gelder, Janssen y Roels, 2015). En concreto, se abordó tres casos de estudio: el Taller experimental para trabajo diurno, el Hostel con uso habitacional permanente y el SUM, medido sin ser ocupado por personas.

Los tres casos analizados están emplazados en la provincia de Mendoza, Argentina. En capital el clima es templado frío y Malargüe y Uspallata es zona fría de montaña. En la zona de montaña fue necesario trabajar con espesores de muros de 30cm, y en la zona templada fría, se pudo trabajar con un espesor de muro de 7,5cm, debido a que el destino de la obra como taller de trabajo no requería de espesores mayores. El análisis mostró que existe estabilidad de la humedad relativa interior, con un rango promedio de valores entre el 15% y el 40% (Hall y Allinson, 2009a), que favorece al confort higrotérmico y se mantiene alejado del rango que favorece la proliferación de mohos, ácaros e infecciones respiratorias (Sedlbauer, 2002).

En términos del comportamiento de los muros frente a la condensación intersticial, se aprecia que, en todos los casos, en la capa cercana a la caña exterior se presenta la posibilidad de la condensación intersticial (Janssen y Roels, 2009). Comúnmente, en una construcción tradicional la solución, ante lo anterior, sería incorporar en la cara externa del muro un material aislante con baja conductividad térmica (Romero Alonso, 2022; Colinart, y otros, 2020; Hung Anh y Pásztor, 2021), debido a que esto aleja el riesgo de condensación intersticial. El material a utilizar puede ser una placa de poliestireno expandido (conductividad térmica 0.035 W/mK) sujeta con una malla metálica y revocada con una mezcla cementicia o también. La aislación se puede realizar con espuma de poliuretano proyectado (conductividad térmica 0.027 W/mK) sobre la fachada exterior y la terminación, con placas de yeso.

En el caso de que se optara por disponer la aislación en el medio del muro, sería necesario la incorporación de una barrera de vapor con la finalidad de disminuir el riesgo de condensación intersticial; proceso que debería ser estudiado en detalle para incorporar materiales que fueran compatibles con la tecnología natural y sustentable planteada aquí.

Efectivamente, se promueve el uso de materiales de origen natural (Lee *et al.*, 2018) en la construcción de los muros, donde la tierra, la paja y la caña o listones de madera son los principales materiales que conforman los muros de quincha, y una de las principales características que se pretende preservar es la capacidad del muro de absorber y "desorber" la humedad ambiental (Hendry, 2001), para trabajar como el "pulmón natural" de la vivienda. Con esta premisa establecida, a fin de optimizar el cerramiento de los muros, ya sea que estén construidos o en etapa de proyecto, la opción más recomendable sería incorporar un material aislante lo más cercana a la cara exterior del muro. Como solución, se optó por una capa de mezcla de barro aligerado en la cara externa para que trabajara como aislante natural. De acuerdo al trabajo desarrollado por Minke (2005), el barro alivianado (densidad de 750 Kg/m³) presenta un valor de conductividad de referencia de 0,20W/mK y la permeabilidad es de 0,225 g/m h KPa, la cual se puede incorporar en forma sencilla humedeciendo la base de tierra del muro existente para que se produzca la fusión entre el barro existente y el que se aplicará con el propósito de mejorar la aislación térmica del muro. La terminación del muro debe efectuarse con un revoque de cal.

A futuro, sería interesante medir la capacidad que tienen los distintos materiales de los muros de absorber humedad del aire y entregarla posteriormente, frente a condiciones propicias, al aire interior.

AGRADECIMIENTOS

Se expresa agradecimiento especial a la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación y al Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT), proyecto joven PICT 04500, por el apoyo recibido para la realización de este artículo de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abadie, M. y Mendoca, K. (2009). Moisture performance of building materials: from material characterization to building simulation using the moisture buffer value concept. *Building Environment*, 44(2), 388-401.
- Alaassad, F., Touati, K., Levacher, D. y Sebaibi, N. (2021). Impact of phase change materials on lightened earth hygroscopic, thermal and mechanical properties. *Journal of Building Engineering*, 41, 1-11.

- Aria Jiménez, N. y Bobadilla Moreno, A. (2017). Evaluación experimental y análisis de la mejora con aislamiento para el caso del puente térmico en el frente de forjado. *Informes de la Construcción*, 69(546), 1-14.
- Arundel, A., Sterling, E., Biggin, J. y Sterling, T. (1986). Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental Health Perspectives*, 65, 351-361.
- Asphaug, S., Andenas, E., Geving, S., Time, B. y Kvande, T. (2022). Moisture-resilient performance of concrete basement walls – Numerical simulations of the effect of outward drying. *Building and Environment*, 222, 1-20.
- Beinhauer, P. (2009). *Atlas de detalles constructivos. Rehabilitación*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Berger, J., Guernouti, S., Woloszyn, M. y Buhe, C. (2015). Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation. *Journal of Building Engineering*, 3, 1-15.
- Bernabeu, M. (2019). La urbanización del agua en el Área Metropolitana de Mendoza. *Estudios Sociales Contemporáneos*, (21), 176-197.
- Bruno, A., Gallipoli, D., Perlot, C. y Kallel, H. (2020). Thermal performance of fired and unfired earth bricks walls. *Journal of Building Engineering*, 28, 1-17.
- Cárdenas Llamas, R. y Hernández Mendoza, C. (2003). *Construcción de un prototipo de humidificación adiabática de aire para ensayos en el laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de tecnológica de Bolívar*. Cartagena de Indias: Facultad de ingeniería mecánica - Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar. Recuperado de: <http://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/1969/0018980.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cardoso, G., Puzhi, M. y Zhinin, S. (2016). Simulación de los Procesos Psicrométricos. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, (15), 25-39. Recuperado de: <https://publicaciones.ucuena.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1613/1266>
- Castilla Pascual, F. (2004). *Estabilización de morteros de barro para la protección de muros de tierra*. Tesis doctoral. Madrid: E.T.S. Arquitectura (UPM). Recuperado de: <https://oa.upm.es/8826/>
- Colinart, T., Vincelas, T., Lenormand, H., Hellouin De Menibus, A., Hamard, E., y Lecompte, T. (2020). Hygrothermal properties of light-earth building materials. *Journal of Building Engineering*, 29, 101-134.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción. (2012). *Humedad por Condensación en Viviendas. Prevención y Soluciones*. Chile: Área Comunicaciones, CDT.
- Coscollano Rodríguez, J. (2002). *Ahorro energético en la Construcción y Rehabilitación de Edificio*. Madrid: Thomson - Paraninfo.
- Costa-Carrapiço, I., Croxford, B., Raslan, R., y González, J. (2022). Hygrothermal calibration and validation of vernacular dwellings: A genetic algorithm-based optimisation methodology. *Journal of Building Engineering*, 55, 1-19.
- Del Río, J., Canivell, J., Torres-González, M., Albea, E., Hernández, R., Ochoa, J. y Sánchez, F. (2021). Analysis of the materials and state of conservation of the medieval rammed earth walls of Seville (Spain). *Journal of Building Engineering*, 44, 1-15.
- EcuRed (18 agosto 2021). *Malargüe (Argentina)*. Recuperado de: [https://www.ecured.cu/index.php?title=Malarg%C3%BCe_\(Argentina\)&oldid=4001273](https://www.ecured.cu/index.php?title=Malarg%C3%BCe_(Argentina)&oldid=4001273)
- Eshoj, B. y Padfield, T. (1993). The use of porous building materials to provide a stable relative humidity. En *ICOM-CC Conference* (pp. 605-609), Washington DC. Recuperado de: <https://www.icom-cc-publications-online.org/2817/The-Use-of-Porous-Building-Materials-to-Provide-a-Stable-Relative-Humidity>
- Esteves Miramont, A. (2017). *Arquitectura Bioclimática y Sustentable. Teoría y Práctica de la conservación de la energía, sistemas solares pasivos y enfriamiento natural de edificios*. Mendoza: Esteves Alfredo.
- Fabbri, A. y Morel, J. (2016). Earthen materials and constructions. En Kent, H. y Bhavna, S. (Eds.), *Nonconventional and Vernacular Construction Materials* (pp. 273-299). Elsevier.
- Fernández, E. y Esteves, A. (2004). Conservación de energía en sistemas autoconstruidos. El caso de la Quincha mejorada. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8(1), 121-125.
- Fisair (2022). *Fisair*. Recuperado de: <https://fisair.com/es/control-de-humedad-en-hospitales/>
- Fouchal, F., Gouny, F., Maillard, P., Ulmet, L. y Rossignol, S. (2015). Experimental evaluation of hydric performances of masonry walls made of earth bricks, geopolymer and wooden frame. *Building and Environment*, 87, 234-243.
- Fresno, M. (2021). *Arquiteutu Tecnico Na Rede*. Recuperado de: <https://arquiteututechnico.com/2015/02/23/gestion-del-vapor-de-agua-en-muros-de-paja/>
- Gea-Izquierdo, E. (2022). *Ambiente térmico en la investigación y docencia universitaria. Pensar, vivir y hacer la educación: Visiones compartidas. Vol. 3*. Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Giada, G., Caponetto, R. y Nocera, F. (2019). Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review. *Sustainability*, 11(19), 1-21.
- González Serrano, A. (2015). *Revocos de tierra cruda: Especificaciones técnicas para el empleo de morteros preparados de arcillas en construcción*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. Recuperado de: <https://idus.us.es/handle/11441/38210>
- Gonzalo, G., Ledesma, S., Nota, V. y Martínez, C. (2000). Rediseño y actualización del programa computacional para verificación del riesgo de condensación en cerramientos exteriores. *Avances en Energías Revables y Medio Ambiente*, 4(1).
- Hall, M. y Allinson, D. (2009a). Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, 29(4), 740-747.

- Hall, M. y Allinson, D. (2009b). Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, 44(9), 1935-1932.
- Hall, M. y Casey, S. (2012). Hygrothermal behaviour and occupant comfort in modern earth buildings. En M. Hall, R. Lindsay y M. Krayenhoff (Eds.), *Modern earth buildings. Materials, engineering, construction and applications* (pp. 17-40). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Hamdaoui, M. A., Benzaama, M. H., Mendili, Y. y Chateigner, D. (2021). A review on physical and data-driven modeling of buildings hygrothermal behavior: Models, approaches and simulation tools. *Energy and Buildings*, 251, 3-11.
- Hendry, E. (2001). Masonry walls: materials and construction. *Construction and Building Materials*, 15(8), 323-330.
- Hung Anh, L. y Pásztor, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 44, 1-12.
- Indekeu, M., Feng, C., Janssen, H. y Woloszyn, M. (2021). Experimental study on the capillary absorption characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 283, 1-13.
- Janssen, H. Roels, S. (2009). Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures. *Energy and Buildings*, 41(4), 382-394.
- Labat, M., Magniont, C., Oudhof, N. y Aubert, J. E. (2016). From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. *Building and Environment*, 97, 69-81.
- Lee, H., Ozaki, A. y Cho, W. (2018). Evaluation of Anti-condensation Performance of External Walls with Fibrous Insulation. *Earth and Environmental Science*, 238(1), 1-9.
- Liuzzi, S., Hall, M., Stefanizzi, P. y Casey, S. (2013). Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. *Building and Environment*, 61, 82-92.
- Martínez, P., Sarmiento, P. y Urquieta, W. (2005). Evaluación de la humedad por condensación al interior de las viviendas sociales. *Revista INVI*, 20(055), 154-165.
- McGregor, F., Heath, A., Shea, A. y Lawrence, M. (2014). The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, 82, 599-607.
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción con tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Kassel: Fin de Siglo.
- Miranda, A. (2007). *Técnicas de climatización*. Barcelona. México: Alfaomega-Marcombo.
- Nematchoua, M., Tchinda, R., Orosa, J. y Andreasi, W. (2015). Effect of wall construction materials over indoor air quality in humid and hot climate. *Journal of Building Engineering*, 3, 16-23.
- Norma IRAM 11.625 (2000). *Aislamiento térmico de edificios – Verificación de sus condiciones higrotérmicas*. 41. Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11.601 (2002). *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo*. 52. Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11.603 (2012). *Condicionamiento térmico de edificios Clasificación bioambiental de la República Argentina*. 43. Buenos Aires, Argentina.
- Onset (9 junio 2022). Onset. Recuperado de: <https://www.onsetcomp.com/datasheet/H08-003-02>
- Padfield, T. (1998). *El papel de los materiales de construcción absorbentes en la moderación de los cambios de la humedad relativa*. Dinamarca: Universidad Técnica de Dinamarca - Departamento de Ingeniería de Estructuras y Materiales.
- Ramos, N. y Freitas, V. (2011). The evaluation of hygroscopic inertia and its importance to the hygrothermal performance of buildings. *Heat Mass Transfer Porous Media*, 13, 25-45.
- Rode, C. y Grau, K. (2008). Moisture buffering and its consequence in whole building hygrothermal modeling. *Building Physics*, 31(4), 333-360.
- Romero Alonso, J. (23 mayo 2022). *¿Cuál es la mejor forma de aislar tu vivienda? Los 8 mejores aislantes térmicos*. Arrevol. Recuperado de: <https://www.arrevol.com/blog/cual-es-la-mejor-forma-de-aislar-tu-vivienda-casa-los-8-mejores-aislantes-termicos>
- Sanfulgencio Tomé, J. (16 mayo 2017). Tipos de humedades, cómo identificarlas y solucionarlas. Arrevol. Recuperado de: <https://www.arrevol.com/blog/tipos-de-humedades-como-identificarlas-y-solucionarlas>
- Secretaría de Medio Ambiente (2009). *Cartilla de contenidos mínimos ambientales para aprobar el examen de Conservación del Medio Ambiente*. Mendoza: Gobierno de Mendoza.
- Sedlbauer, K. (2002). Prediction of mould growth by hygrothermal calculation. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 25(4), 321-336.
- Servicio Meteorológico Nacional Argentina. (2022). Recuperado de: <https://www.smn.gob.ar/>
- Style, O. (febrero 2022). *caloryfrio.com*. Recuperado de: <https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/ventilacion-y-calidad-aire-interior/humedad-y-calidad-del-aire-cual-es-nivel-optimo-como-medirla.html>
- Vereecken, E., Gelder, L., Janssen, H. y Roels, S. (2015). Interior insulation for wall retrofitting – A probabilistic analysis of energy savings and hygrothermal risks. *Energy and Buildings*, 89, 231-244.
- Zhang, L., Sang, G. y Han, W. (2020). Effect of hygrothermal behaviour of earth brick on indoor environment in a desert climate. *Sustainable Cities and Society*, 55, 1-9.

IMPACTO DEL CONFINAMIENTO POR COVID-19 EN LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE CO2 AL INTERIOR DE LA VIVIENDA DE TIPO SOCIAL EN CHILE

Recibido 11/07/2022
Aceptado 26/12/2022

THE IMPACT OF THE COVID-19 CONFINEMENT ON THE CONCENTRATION LEVELS OF CO2 INSIDE SOCIAL HOUSING IN CHILE

IMPACTO DO CONFINAMENTO POR COVID-19 NOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE CO2 DENTRO DE HABITAÇÕES SOCIAIS NO CHILE

Roxana Guíñez-Viveros

Magíster Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética
Egresada Magíster Hábitat, Sustentable y Eficiencia Energética, Escuela de Ingeniería en Construcción
Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-5054-0502>
guinezroxana@gmail.com

Ariel Bobadilla-Moreno

Doctor en Ciencias de la Ingeniería
Director Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC).
Escuela de Ingeniería en Construcción, Departamento de Ciencias de la Construcción
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-2781-5325>
abobadil@ubiobio.cl

Cristián Alberto Muñoz-Viveros

Magíster en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética
Estudiante de Doctorado, Arquitecto e Investigador Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC).
Departamento Diseño y Teoría, Escuela de Arquitectura, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-0241-7796>
cmunoz@ubiobio.cl

RESUMEN

Más que nunca, hasta ahora, la crisis de COVID-19 y la necesidad de permanecer más tiempo en nuestros lugares de residencia ha puesto de manifiesto la necesidad de mejorar la calidad del aire interior (IAQ) y la ventilación, con el objetivo de reducir los riesgos de transmisión de virus en el aire. Haga clic o pulse aquí para escribir texto.. A la necesidad de mejorar progresivamente el desempeño energético de nuestras edificaciones para alcanzar la carbono neutralidad, se suma esta nueva exigencia, del todo contrapuesta, que obliga a replantear la problemática de la ventilación, de sus estándares y soluciones tecnológicas para mejorar la IAQ y limitar los riesgos de contagio al interior de nuestras viviendas, sin perder de vista las metas que nos impone el cambio climático. Haga clic o pulse aquí para escribir texto. Haga clic o pulse aquí para escribir texto. Chile se encuentra en la búsqueda de estrategias para generar viviendas sustentables, eficientes energéticamente y confortables, que deben ser replanteadas producto del Covid-19. La mayor permanencia al interior del hogar dejó de manifiesto la precariedad en los modos de vida que enfrentan las familias más vulnerables, al exponerse en ocasiones a ambientes riesgosos para su salud. Esta investigación tuvo por objetivo estimar el impacto del Covid-19 en las concentraciones de CO₂ en el aire interior, dada la intensidad de uso (ocupación) de la vivienda, considerando envolventes con distintos niveles de hermeticidad. Mediante metodología experimental, basada en simulaciones con el software DesignBuilder, se cuantificaron las concentraciones de CO₂ de cuatro tipos de viviendas de carácter social, emplazadas en la comuna de Coronel, región del Biobío, Chile. Los resultados arrojaron que el confinamiento elevó en un 16,4% los niveles de CO₂, mientras que el cambio de la condición original de la envolvente a niveles más herméticos generó un alza de más de un 83% en régimen de uso normal y en un 97% para periodos en confinamiento.

Palabras clave

contaminación del aire, vivienda de interés social, calidad ambiental, simulación energética.

ABSTRACT

More than ever before, the COVID-19 crisis and the need to spend longer periods of time in our places of residence, have highlighted the need to improve indoor air quality (IAQ) and ventilation to reduce the risks of airborne virus transmission. Added to the need to progressively improve the energy performance of our buildings to achieve carbon neutrality is this completely contrary new requirement, which forces reconsidering the ventilation issue, its standards, and technological solutions to improve IAQ and limit the risks of contagion inside our homes, without losing sight of the goals that climate change imposes on us. Chile is seeking strategies to generate sustainable, energy-efficient, and comfortable housing, which must be reconsidered in light of Covid-19. Greater permanence inside the home revealed the precariousness of the lifestyles the most vulnerable families face; sometimes exposing them to environments that are risky for their health. The objective of this research was to estimate the impact of Covid-19 on CO₂ indoor air concentrations, as a result of the intensity of use (occupation) of the home, considering envelopes with different levels of airtightness. Using an experimental methodology, based on simulations with the DesignBuilder software, the CO₂ concentrations of four types of social housing, located in the commune of Coronel, Biobío, Chile, were quantified. The results showed that confinement increased CO₂ levels by 16.4%, while the change from the original condition of the envelope to more airtight levels generated an increase of more than 83% in normal use and 97% for periods of confinement.

Keywords

air pollution, social housing, environmental quality, energy simulation

RESUMO

Mais do que nunca, a crise da COVID-19 e a necessidade de permanecer mais tempo em nossos locais de residência trouxeram à tona a necessidade de melhorar a qualidade do ar interior (IAQ) e a ventilação, com o objetivo de reduzir os riscos de transmissão do vírus pelo ar. Além da necessidade de melhorar progressivamente o desempenho energético de nossos edifícios para alcançar a neutralidade de carbono, surge esta nova exigência, totalmente oposta, que nos obriga a repensar a questão da ventilação, seus padrões e soluções tecnológicas para melhorar o IAQ e limitar os riscos de contágio dentro de nossas casas, sem perder de vista os objetivos impostos pelas mudanças climáticas. O Chile está em busca de estratégias para gerar moradias sustentáveis, energeticamente eficientes e confortáveis, que devem ser repensadas em consequência do Covid-19. A maior permanência dentro do lar revelou a precariedade dos estilos de vida enfrentados pelas famílias mais vulneráveis, que às vezes estão expostas a ambientes perigosos para sua saúde. Esta pesquisa buscou calcular o impacto do Covid-19 sobre as concentrações de CO₂ no ar interior, dada a intensidade de uso (ocupação) da residência, considerando envelopes com diferentes níveis de estanqueidade ao ar. Usando metodologia experimental, baseada em simulações com o software DesignBuilder, foram quantificadas as concentrações de CO₂ de quatro tipos de habitação social, localizadas no município de Coronel, região do Bío-Bío, Chile. Os resultados mostraram que o confinamento aumentou os níveis de CO₂ em 16,4%, enquanto a mudança da condição original do envelope para níveis mais herméticos gerou um aumento de mais de 83% no uso normal e 97% para períodos de confinamento.

Palavras-chave

poluição do ar, habitação social, qualidade ambiental, simulação energética.

INTRODUCCIÓN

En Chile, zonas como el Gran Concepción destinan un 49,4% de la energía consumida a calefacción, porcentaje excesivamente alto considerando la climatología local, que se explica más por la deficiente calidad energética de su parque residencial (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2019). Alrededor de un 66% de las viviendas no cuentan con estándares mínimos de aislación térmica (Ministerio de Energía, 2020). A esto se suman los problemas asociados a la calidad del aire interior: recintos con problemas de infiltración de aire y una alta concentración de personas en espacios pequeños (Bustamante, Encinas, Martínez, Brahm e Ibaceta, 2009). Ello provoca elevados niveles de CO₂ que, combinados con sistemas de ventilación inadecuados o nulos, incrementan la exposición de sus ocupantes a ambientes poco saludables, poniendo en grave riesgo su salud y disminuyendo su calidad de vida (Cortés y Ridley, 2013; Dirección General de Industria - Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2016; Huneus et al., 2020). Para enfrentar esta realidad se han desarrollado diferentes estrategias reglamentarias o normativas como las exigencias térmicas establecidas en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.U.C) o los Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) en zonas consideradas como saturadas. Dentro de sus medidas se incluye la implementación de mayor exigencia a la envolvente térmica de la vivienda. El Covid-19, el teletrabajo y, de manera general, la

extensión de horas de permanencia al interior del hogar (Red de Pobreza Energética, 2019) han dejado en manifiesto la precariedad en los modos de vida, estándares de habitabilidad y confort al interior de las viviendas en Chile (Guerra, 2020). Esta situación se agrava en familias más vulnerables de la zona centro-sur del país cuyos hogares son de carácter social y no ofrecen las prestaciones de habitabilidad adecuada, presentando un ambiente intradomiciliario inseguro ante enfermedades que afectan el sistema respiratorio (Encinas, Truffello, Urquiza y Valdés, 2020)(Dai & Zhao, 2022) (Bi, Aganovic, Mathisen y Cao, 2022)(Lu, Niu, Zhang, Chang y Lin, 2022).

El objetivo del trabajo expuesto es analizar la calidad del aire al interior de las viviendas sociales a partir de la cuantificación y caracterización las concentraciones de CO₂. Se emplea un método de simulación energética y modelación aplicado a cuatro casos de estudio en Coronel, Región del Biobío, Chile, a fin de determinar y comprender el impacto que generan en ella los sistemas constructivos y sus niveles de hermeticidad, considerando el número de ocupantes y el tiempo de permanencia al interior de sus hogares, tanto en periodos normales como en periodos de uso intensivo, producto del Covid-19.

METODOLOGÍA

El estudio se centró en viviendas de tipo social pertenecientes a cuatro conjuntos habitacionales

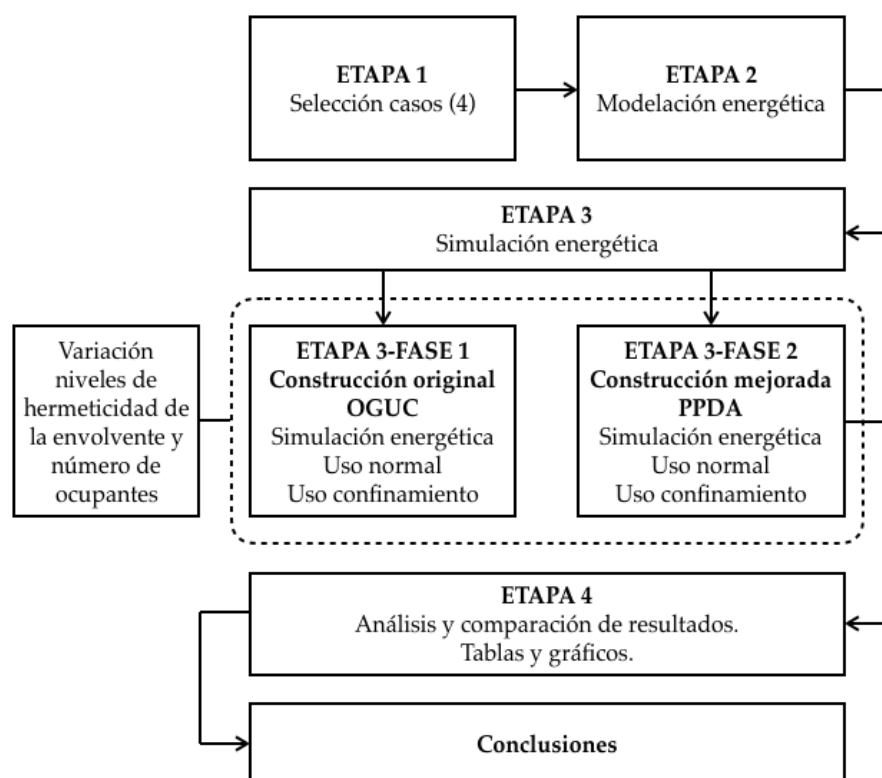


Figura 1. Esquema secuencial de las etapas del estudio. Fuente: Elaboración de autores.



Figura 2. Imágenes de fachadas principales de casos seleccionados como muestra. Fuente: Elaboración de autores.

ubicados en la comuna de Coronel, Región del Biobío. Para el desarrollo de la investigación se empleó una metodología de tipo experimental a partir de simulación energética y modelación de niveles de concentración de CO₂ mediante el software Design Builder.

Se seleccionó una muestra no probabilística, consistente en cuatro viviendas de dos niveles elaboradas con diferentes sistemas constructivos con el propósito de comprender y determinar cómo inciden las variables independientes de envolvente, cambios en regímenes de ocupación y número de usuarios sobre la variable dependiente, correspondiente a los niveles de concentración de CO₂; y así estimar cómo afecta la incorporación de criterios de aislación térmica y mejora en los niveles de hermeticidad definida en los PPDA de Concepción Metropolitano, sobre la calidad del aire interior de estos recintos. La Figura 1 explica las etapas del estudio.

La definición de los parámetros de simulación, como las condiciones de borde y la caracterización y cuantificación de la exigencia para calidad del aire, se basaron en la metodología de determinación de caudal de ventilación para locales habitables de las viviendas, definida en el Apéndice C del Documento Básico HS 3 (DB HS 3) del Ministerio de Fomento de España, a partir de la cual se adaptó ciertos parámetros y valores, debidamente referenciados a la realidad local, a fin de obtener resultados más representativos.

CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LA EXIGENCIA

La calidad del aire interior en una vivienda estará determinada por la concentración y tipos de contaminantes que estén presentes en él. Uno de los principales contaminantes al interior de las viviendas

es el dióxido de carbono (CO₂), proveniente de la respiración humana y la humedad. Este gas incoloro suele ser empleado como indicador de estándares de calidad de aire interior y como parámetro para evaluar desempeños de ventilación (CITEC-UBB-Decon UC, 2014).

La caracterización y cuantificación de la exigencia para calidad del aire interior fue determinada de acuerdo a las concentraciones de CO₂ definidas en el Apéndice C del Documento Básico HS 3, teniendo como valores límites una media anual menor a 900 ppm y un acumulado anual de más de 1.600 ppm menor que 500.000 ppm*h. En base a lo anterior, se evaluaron distintos casos bajo los escenarios previamente mencionados y sus resultados se contrastaron con los valores límites del indicador, lo que permitiría establecer el cumplimiento o incumplimiento de la condición de calidad de aire aceptable al interior de los recintos.

Etapa 1: selección de los casos

La muestra seleccionada consideró cuatro tipologías de vivienda de carácter social (Figura 2), pertenecientes a distintos conjuntos habitacionales construidos en la comuna de Coronel entre los años 2011 y 2019, bajo la asignación de programas o fondos solidarios de vivienda otorgados por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) de manera directa, o bien, a través de Serviu Biobío.

En la Tabla 1 se entregan datos y se detalla la materialidad de los elementos que conforman la envolvente de estos recintos. Cabe destacar que aquellos con mayor superficie en contacto con el ambiente exterior (muros) cuentan con diferentes soluciones constructivas, lo que hizo posible obtener datos de calidad del aire interior ante distintos tipos de envolventes.

N° Caso	Materialidad de la envolvente			Modo agrup.	Sup. [m2]
	Muros	Techumbre	Ventanas		
Caso 1	Hormigón armado e=10[cm] + placa Poligyp 30[mm] adosada por el interior.	Estructura de madera + lana de vidrio 11[kg/m3] e= 100[mm]	PVC, cristal simple	Pareada	48,5
Caso 2	*1° nivel: Hormigón armado e=10 cm + Sistema EIFS (EPS 20[kg/m3] e=60[mm]) *2° nivel: estructura de madera + terciado ranurado 9[mm] + aislación con EPS 20[kg/m3] e=60[mm] + EPS 30[kg/m3] e=30[mm]	Estructura de madera + lana de vidrio 12[kg/m3] e= 140[mm]	PVC, cristal simple	Aislada	47,33
Caso 3	Estructura de madera + Aislación EPS 15[kg/m3] e= 70[mm] y 40[mm]/lana mineral 40[kg/m3] e=80[mm]	Estructura de madera + lana de vidrio 11[kg/m3] e= 120[mm]	PVC, cristal simple	Aislada	63,66
Caso 4	*1° nivel: Hormigón armado tipo EXACTA® e= 18[cm] (Ladrillo EPS 30[kg/m3] + yeso cartón st 10[mm] por interior + estuco de mortero e=6[mm] por exterior *2° nivel: igual solución, solo cambia espesor de ladrillo a 12[cm]	Aislación bovedilla tipo TE-130: EPS 15[kg/m3] e=100[mm]	PVC vidrio termopanel	Pareada	51,75

Tabla 1. Datos y características constructivas de la envolvente de los casos seleccionados. Fuente: Elaboración de los autores, en base a datos obtenidos de planos y EETT de cada proyecto seleccionado.

Etapa 2: modelación energética

El programa de simulación se carga con los antecedentes constructivos de los casos a evaluar, indicados en Tabla 1 y con las condiciones de borde que se detallan a continuación.

- **Generación de CO2:** 19 l/h por ocupante, sin diferenciar entre periodos de vigilia o de sueño.
- **Número de ocupantes:** 4 ocupantes, basado en datos estadísticos del Ministerio de Desarrollo Social (2019).
- **Escenarios de ocupación en régimen de uso normal:**
 - I. Periodos de sueño: 8 horas ininterrumpidas para cada uno de los ocupantes (entre las 24:00 y 08:00).
 - II. Ausencias diurnas: 13 horas al día para uno de los ocupantes y de 8 horas para el resto. Sábados y domingos, dos ausencias de 2 horas por día, para cada uno de los ocupantes.

- **Escenarios de ocupación en régimen de uso en periodo de confinamiento:**
 - I. Periodos de sueño: 8 horas ininterrumpidas para cada uno de los ocupantes (entre las 24:00 y 08:00 horas).
 - II. Ausencias diurnas: 13 horas al día para uno de los ocupantes, el resto de los ocupantes realiza actividades desde la vivienda (estudios, teletrabajo). Sábados y domingos sin ausencias².
- Puertas exteriores y ventanas de las distintas estancias cerradas
- **Concentración de CO2 en el aire exterior:** media anual de 400 ppm (CITEC-UBB-Decon UC, 2014; Ministerio de Fomento, 2007)
- **Datos climáticos:** archivo climático del Weather Data de Energyplus, correspondiente a localidad de Concepción. Se ajustan datos asociados a Coronel: latitud, longitud, altura respecto al mar.
- **Ganancias internas y externas:** equipos 3,9 W/m², iluminación 7,5 W/m²

² Las horas de ocupación en periodos de confinamiento se basaron en los datos de encuestas para la medición de pobreza energética, asociadas a proyecto Fondecyt Regular 1200551 "Energy poverty prediction based on social housing architectural design in the central and central – southern zones of Chile: an innovative index to analyze and reduce the risk of energy poverty".

Materialidad predominante de la envolvente	Valor n50 Línea base	Desviación estándar
Hormigón	9,0	5,3
Entramado de madera	24,6	12,4
Otras materialidades	10,2	4,3

Tabla 2. Infiltraciones según sistemas constructivo. Fuente: Elaboración de los autores. Adaptado de "Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones" (Citec UBB - Decon UC, 2014, p. 32).

Casos	U [W/m2K] Muros	U [W/m2K] Techumbre	U [W/m2K] Piso ventilado	U [W/m2K] Ventanas
Adela Ester	1,26	0,43	0,67	4,87
Paso Seco I, II y III	0,44	0,30	-	4,87
Paso Seco IV	0,37	0,36	-	4,87
Barrio Sustentable	0,61	0,41	-	2,8

Tabla 3. Valor transmitancias térmicas de envolvente en casos de estudio. Fuente: Elaboración de los autores (basada en datos obtenidos de planos y EETT de cada proyecto seleccionado).

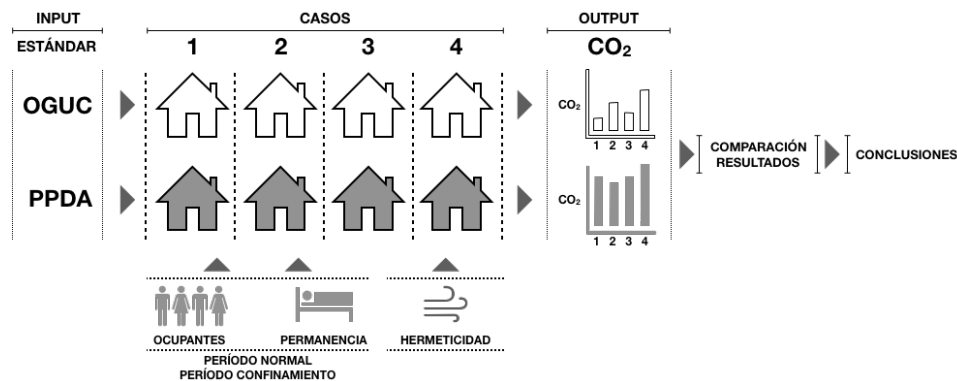


Figura 3. Resumen del procedimiento y las principales variables consideradas. Fuente: Elaboración de autores.

- HVAC apagado y ventilación natural activada.
- **Periodo de simulación:** mayo a septiembre (correspondiente a meses más fríos según datos climáticos).
- **Caudales de ventilación:** 6 l/s-persona, adaptado de Addendum m de ANSI/(American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE], 2016) Standard 62.2-2013, Tabla 4.1b, para viviendas con superficies entre 47 y 93 [m²] y dos dormitorios, generando el equivalente en litros por persona considerando 4 ocupantes.
- **Infiltraciones:** las asociadas a cada sistema constructivo (Tabla 2). Para caso mejorado, PPDA considera en 5 el límite de infiltraciones de la envolvente (Decreto 6, 2019).
- **Transmitancias térmicas de la envolvente:** según características de los proyectos de vivienda (Tabla 3).

La Figura 3 resume el procedimiento y las principales variables consideradas en el estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ETAPA 3 – FASE 1: CONCENTRACIONES DE CO₂ EN LA VIVIENDA ORIGINAL

Durante la primera fase de simulaciones se analizaron las viviendas bajo régimen de uso normal y en confinamiento, considerando sus características constructivas originales y la asignación de niveles de hermeticidad según lo indicado en Tabla 1.

Los resultados bajo régimen de uso normal, que se muestran en Figura 4, permitieron verificar que las concentraciones de CO₂ se mantienen bajo el límite de

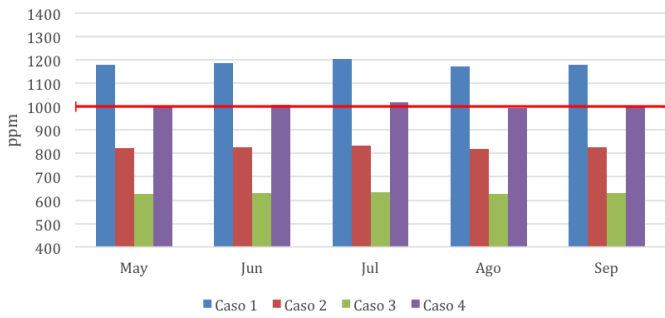


Figura 4. Concentraciones de CO2 bajo régimen de uso normal. Fuente: Elaboración de los autores.

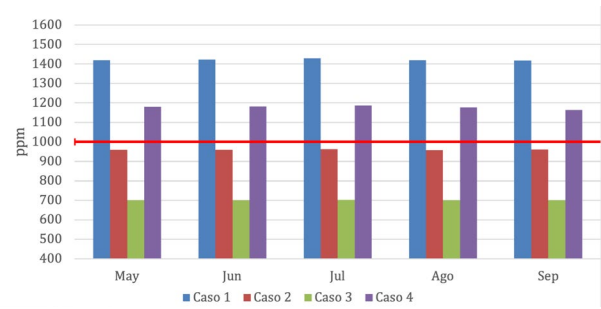


Figura 5. Concentraciones de CO2 bajo régimen de uso en confinamiento. Fuente: Elaboración de los autores.

las 900 ppm para el caso 2 y 3, mientras que el caso 1 y 4 superan estos niveles, llegando a concentraciones que sobrepasan las 1000 ppm.

Respecto al uso de la vivienda en periodos de confinamiento, los resultados que se muestran en la Figura 5 permiten evidenciar un alza en los niveles de CO2, los cuales superan el límite de las 900 ppm en los casos 1, 2 y 4. Sin embargo, el caso 3 continúa bajo el límite, presentando concentraciones de 700 ppm promedio.

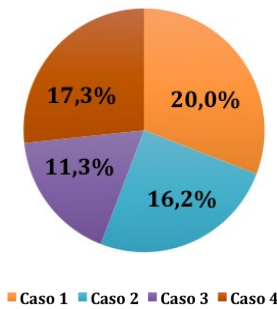


Figura 6. Porcentaje de alza en las concentraciones de CO2 producto del cambio en régimen de ocupación de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

La Figura 6 ilustra el porcentaje de incremento en los niveles de CO₂ al interior de las viviendas en estudio, generado por el cambio en el régimen de ocupación de los recintos a causa del confinamiento. El caso 3 corresponde a la vivienda que presenta el menor porcentaje de alza en los niveles de CO₂, mientras que el más alto corresponde al caso 1.

Estos niveles de concentración de CO₂ obtenidos se relacionan directamente a los niveles de hermeticidad asignados a las viviendas. Es así como el caso 3 corresponde a la vivienda con sistema constructivo en madera cuyo valor de línea de hermeticidad (n50) asignado es de 24,6. Esto representa un alto flujo de aire que pasa a través de la envolvente, lo que evidencia un recinto poco hermético que, por ende, no acumula ni concentra en exceso el CO₂ al interior del hogar; razón por la cual los valores obtenidos se mantienen bajo el límite de las 900 ppm. De manera contraria, el caso 1 corresponde a la vivienda con los más altos niveles de concentración de CO₂ y a la mayor alza porcentual, al pasar de régimen de uso normal a confinamiento, lo cual se debe a su sistema constructivo de hormigón armado. Se trata del caso que registra el valor n50 más bajo.

ETAPA 3 – FASE 2: CONCENTRACIONES DE CO₂ EN LA VIVIENDA CON MEJORAS SEGÚN CRITERIOS PPDA

La Figura 7 grafica los resultados de concentración de CO2 obtenidos por la simulación en los casos de estudio, los cuales fueron adaptados a criterios PPDA:

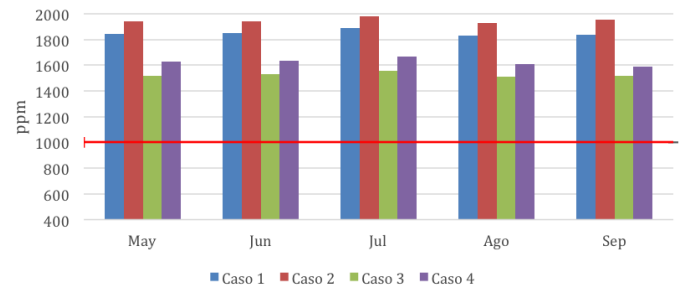


Figura 7. Concentraciones de CO2 en régimen de uso normal, con incorporación de criterios PPDA en envolvente. Fuente: Elaboración de los autores.

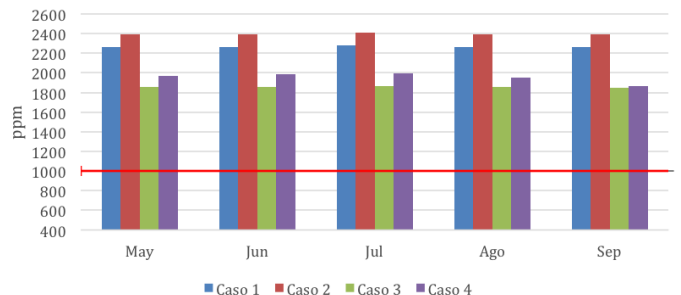


Figura 8. Concentraciones de CO2 en régimen de uso en confinamiento, con incorporación de criterios PPDA en envolvente. Fuente: Elaboración de los autores.

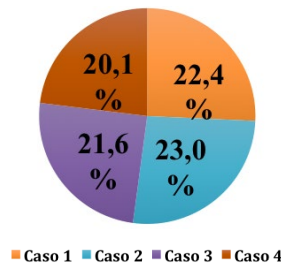


Figura 9. Porcentaje de alza en las concentraciones de CO₂ producto del cambio de régimen de ocupación de la vivienda, considerando adaptación de criterios PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

se modificaron las envolventes según valores de transmitancia térmica exigidos para la localidad y se limitó a 5 las tasas de infiltración. Bajo esta condición, la ocupación normal de la vivienda generó niveles promedio de CO₂ que fluctúan entre las 1500 ppm y 1900 ppm, aproximadamente. Los casos 1 y 2 exhibieron mayor concentración del contaminante en el aire interior.

Al cambiar a régimen de uso en confinamiento se genera un alza en los valores promedio de CO₂ de los casos, que ronda entre las 1900 ppm y 2400 ppm, tal como se evidencia en la Figura 8, superando en más de un 110% el valor límite definido.

Tras contrastar los resultados obtenidos, quedó de manifiesto que el cambio de uso normal de la vivienda al estado en confinamiento generó un incremento porcentual del contaminante cercano al 21,8% promedio (Figura 9).

ETAPA 4: DIFERENCIA DE CONCENTRACIONES DE CO₂ ENTRE VIVIENDA ORIGINAL Y CON MEJORAS PPDA

A través de los resultados que se muestran en las Figuras 10 y 11 se evidencia el impacto en las concentraciones de CO₂ generado por la adaptación de criterios PPDA en los casos analizados. Al evaluar estos cambios bajo régimen de uso normal, los niveles del contaminante se elevaron en un 56,2% para el caso 1 y en más de un 140% para el caso 3. De igual forma, bajo régimen de uso en confinamiento, el caso 1 presentó la menor alza, superando levemente el 59%, mientras que el caso 3 superó el 164%; siendo el caso con la mayor alza en los niveles de concentración de CO₂.

De los resultados expuestos se advierte que las mayores diferencias porcentuales obtenidas de las simulaciones, producto de la adaptación de las envolventes de las viviendas en estudio a criterios PPDA, son, principalmente, consecuencia del diferencial generado entre los valores de hermeticidad de la vivienda en estado original y el modificado, es decir, a mayor diferencial, mayor alza porcentual en las concentraciones de CO₂.

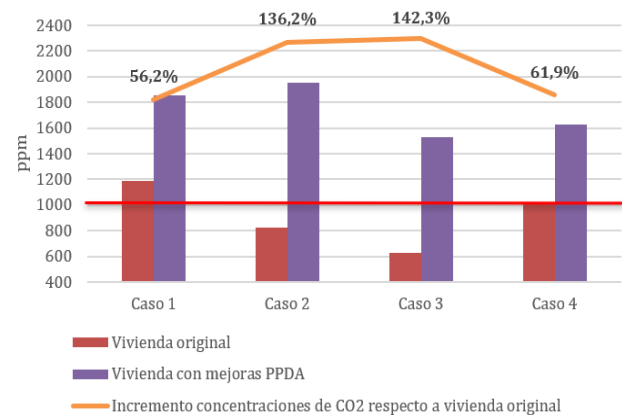


Figura 10. Variaciones de concentraciones de CO₂ para viviendas con envolvente original y adaptada a PPDA, en régimen de uso normal. Fuente: Elaboración de los autores.

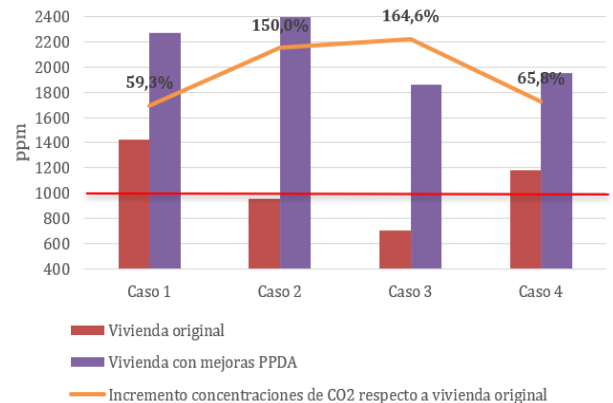


Figura 11. Variaciones de concentraciones de CO₂ para viviendas con envolvente original y adaptada a PPDA, en régimen de uso en confinamiento. Fuente: Elaboración de los autores.

CONCENTRACIONES DE CO₂ SEGÚN RÉGIMEN DE USO Y VALOR DE INFILTRACIONES

Con el objetivo de comprender y analizar cómo las infiltraciones incidieron en los niveles de CO₂ obtenidos, se realizaron simulaciones modificando los niveles de hermeticidad entre 3 y 27. Los resultados se muestran en la Figura 12 y dejan en evidencia que las concentraciones de CO₂, para tasas de infiltración entre las 9 y 27 renovaciones, tienden a mantenerse dentro del rango de las 500 – 1200 ppm, no presentando alzas mayores al 15% entre valores de hermeticidad consecutivas, sin embargo, hacia las tasas de infiltración más bajas, es decir, entre 3 y 9, se producen alzas considerables. Por ejemplo: al pasar de 7 a 5 renovaciones aire por hora, el incremento es de un 30% aproximado, y de 5 a 3 tasas de infiltración los niveles de CO₂ aumentan en más de un 50%. Además, se constata que hasta 13 renovaciones aire hora es posible mantener niveles de CO₂ dentro de la media límite de las 900 ppm, para los cuatro casos analizados y según los criterios definidos.

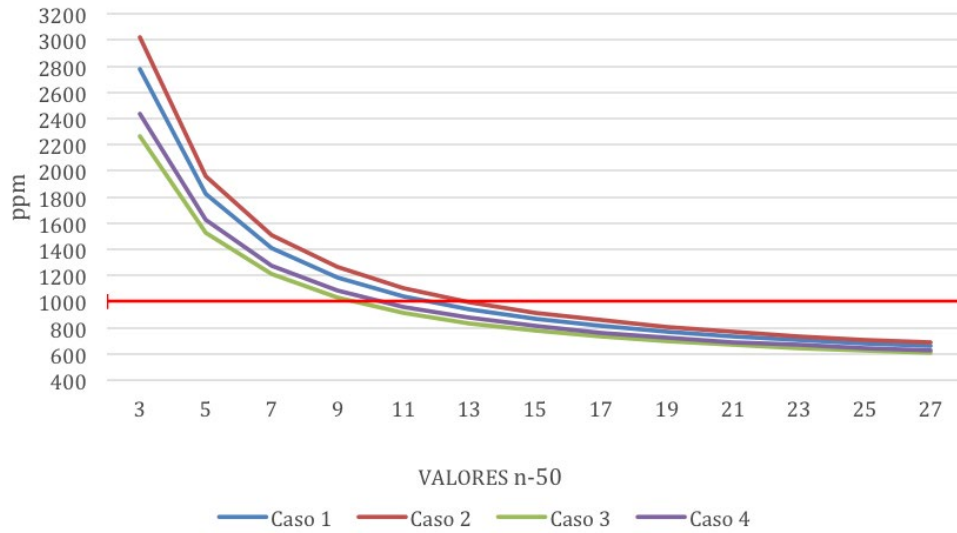


Figura 12. Concentración de CO2 según valor de hermeticidad al aire de la vivienda, para régimen de uso normal. Fuente: Elaboración de los autores.

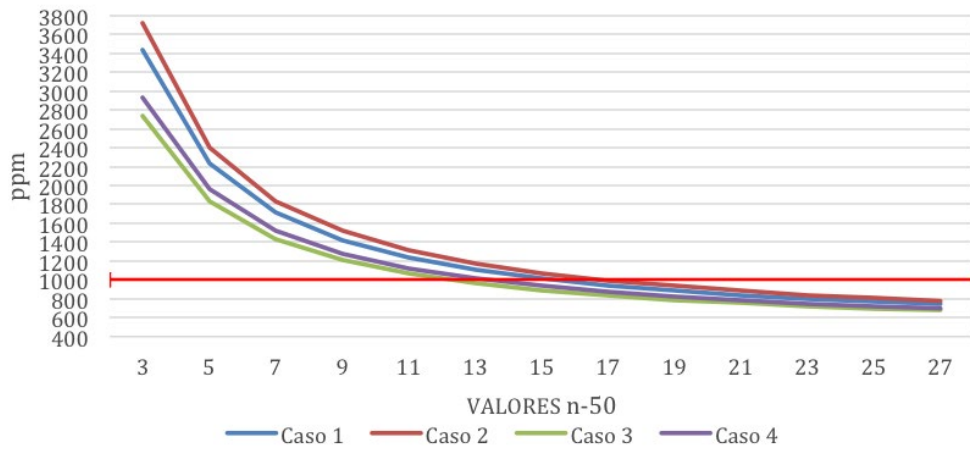


Figure 13. Concentración de CO2 en ppm según valor de hermeticidad al aire de la vivienda, para régimen de uso en confinamiento. Fuente: Elaboración de los autores.

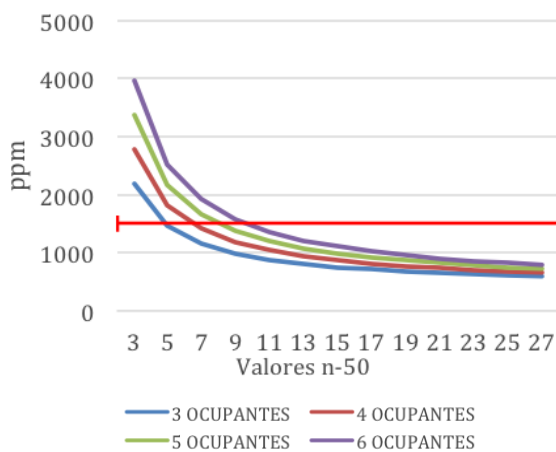


Figura 14. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 1. Fuente: Elaboración de los autores.

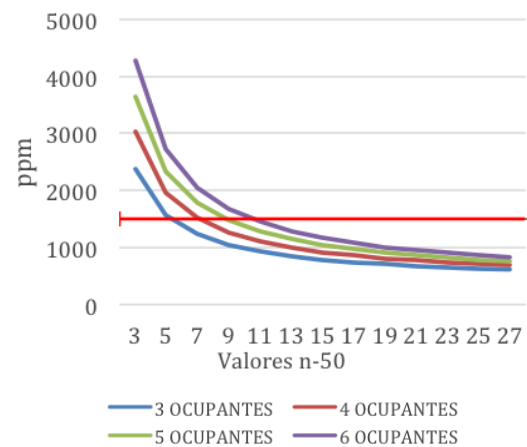


Figura 15. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 2. Fuente: Elaboración de los autores.

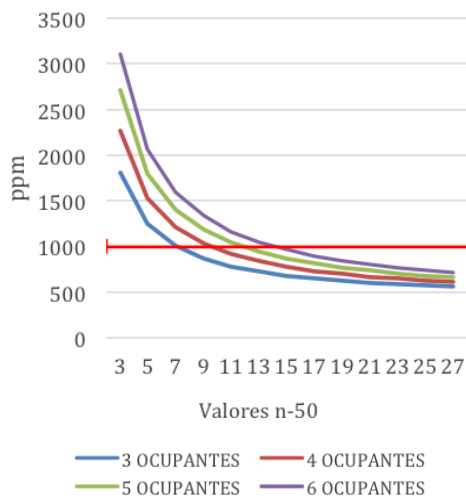


Figura 16. Variación en las concentraciones de CO₂ respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 3.
 Fuente: Elaboración de los autores.

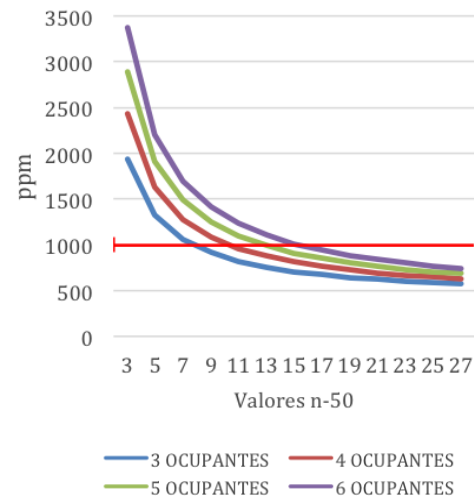


Figura 17. Variación en las concentraciones de CO₂ respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 4.
 Fuente: Elaboración de los autores.

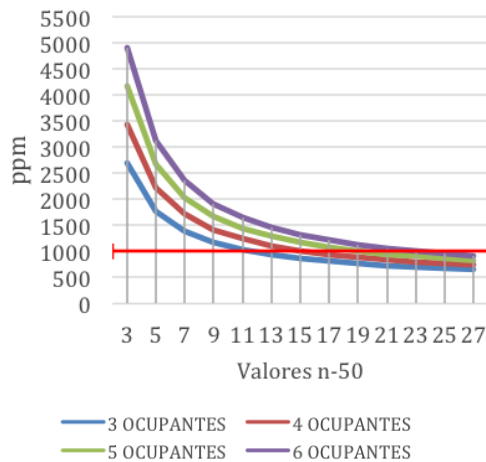


Figura 18. Variación en las concentraciones de CO₂ respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 1.
 Fuente: Elaboración de los autores.

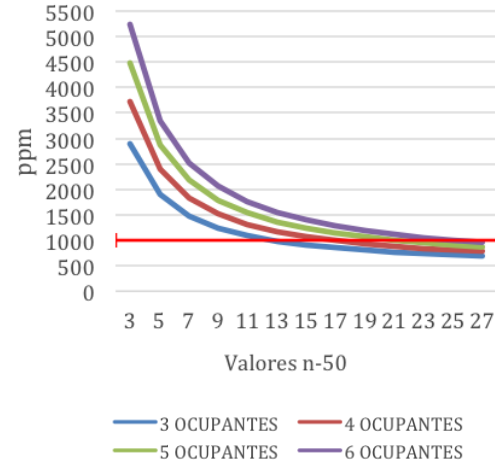


Figura 19. Variación en las concentraciones de CO₂ respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 2.
 Fuente: Elaboración de los autores.

En el escenario de uso en confinamiento (Figura 13) los resultados presentan una tendencia similar a la anterior, puesto que se generan concentraciones que van desde las 500 y 1200 ppm promedio de CO₂ para tasas de infiltración entre 11 y 27. Con tasas de infiltración más bajas, los niveles de CO₂ se incrementan en un 30% al pasar de 7 a 5 renovaciones y, en más de un 50% al reducir de 5 a 3 renovaciones de aire, llegando a niveles de más 3700 ppm en algunos de los casos estudiados.

CONCENTRACIONES DE CO₂ SEGÚN RÉGIMEN DE USO, NÚMERO DE OCUPANTES Y VALOR DE INFILTRACIONES

La Figura 14, figura 15, figura 16 y figura 17 exhiben los resultados de variación en las concentraciones de CO₂ para la vivienda en régimen de uso normal, considerando

3, 4, 5 y 6 ocupantes al interior de ella, en combinación con diferentes niveles de hermeticidad de la vivienda. En los cuatro casos estudiados se produce un aumento en los niveles del contaminante en el aire interior por el incremento en el número de ocupantes en el recinto. No obstante, ante bajos niveles de hermeticidad esta alza no tiende a ser proporcional a la cantidad de personas que se añaden. Como promedio, en los cuatro casos evaluados, pasar de 3 a 4 ocupantes con una tasa de 3 renovaciones de aire hora aumenta las concentraciones de CO₂ en un 26,6%; de 4 a 5 personas, en un 20%, y de 5 a 6, en un 16,5%.

La figura 18, figura 19, figura 20 y figura 21 muestran los valores obtenidos para niveles de concentración de CO₂ en régimen de uso en confinamiento, donde varía el número de ocupantes y los niveles de hermeticidad

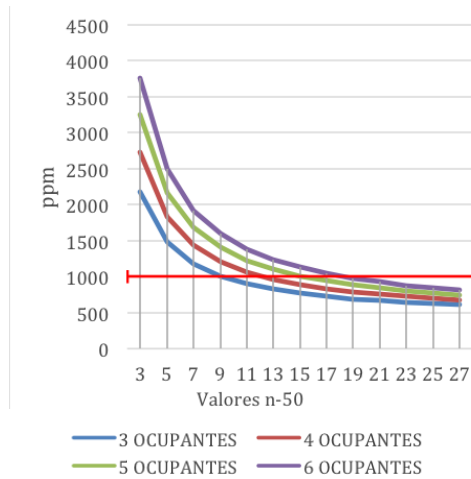


Figura 20. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 3. Fuente: Elaboración de los autores.

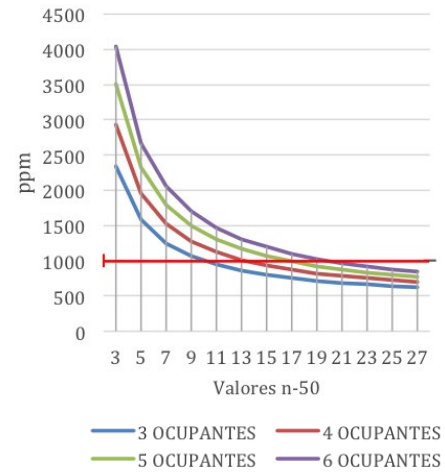


Figura 21. Variación en las concentraciones de CO2 respecto al número de ocupantes y nivel de hermeticidad de la vivienda – caso 4. Fuente: Elaboración de los autores.

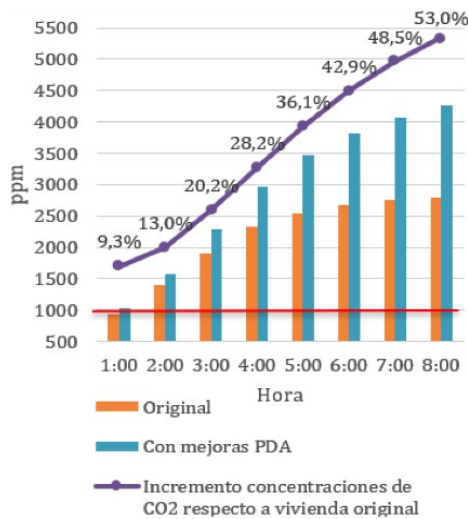


Figura 22. Concentraciones de CO2 en dormitorio caso 1, con envolvente original y con mejoras PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

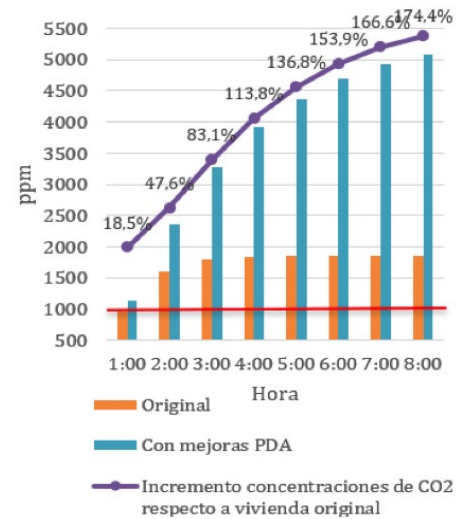


Figura 23. Concentraciones de CO2 en dormitorio caso 2, con envolvente original y con mejoras PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

de los casos estudiados. Los resultados revelan que los niveles de concentración se elevan paulatinamente entre las 11 y 27 renovaciones de aire asignados, mientras que, al descender las tasas de infiltración, los incrementos comienzan a ser sustanciales. Por ejemplo, al reducir de 5 a 3 las tasas de infiltración, los niveles de concentración se incrementan desde las 500 ppm para 3 ocupantes y en más de 1000 ppm para la misma condición, pero con 6 ocupantes en su interior, pudiéndose alcanzar las 2000 ppm en el Caso 2. Los cuatro casos cumplen concentraciones bajo las 900 ppm, principalmente en los niveles de hermeticidad más altos y con el menor número de ocupantes. Ahora bien, en tasas bajo 13 renovaciones las concentraciones se elevan sobre el parámetro, quedando fuera del rango admisible.

Tras comparar los resultados de concentración de CO2 se constató en los diferentes escenarios que, variando el número de ocupantes y las tasas de infiltración, el régimen de uso en confinamiento presenta alzas en los niveles del contaminante respecto al uso normal que van desde un 10%, en el caso de los niveles de hermeticidad más altos, y cercanos al 23%, en el caso de los niveles de hermeticidad más bajos.

CONCENTRACIONES DE CO₂ POR RECINTOS

Para la cuantificación y verificación del segundo criterio se simuló los niveles de CO₂ en recintos de dormitorios, en periodos horarios de uso a capacidad completa, es decir, entre las 00:00 y 08:00 horas, con

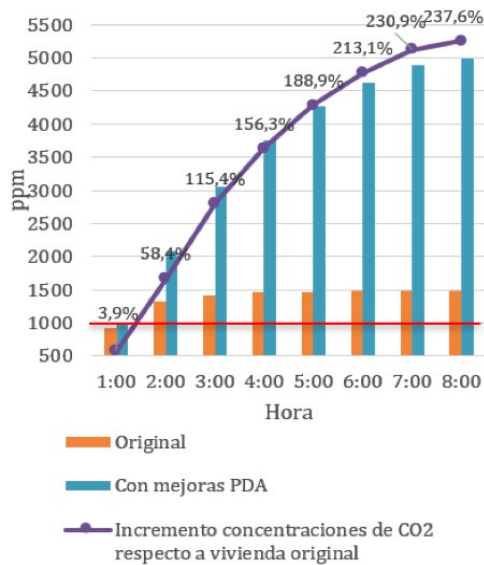


Figura 24. Concentraciones de CO₂ en dormitorio caso 3, con envolvente original y con mejoras PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

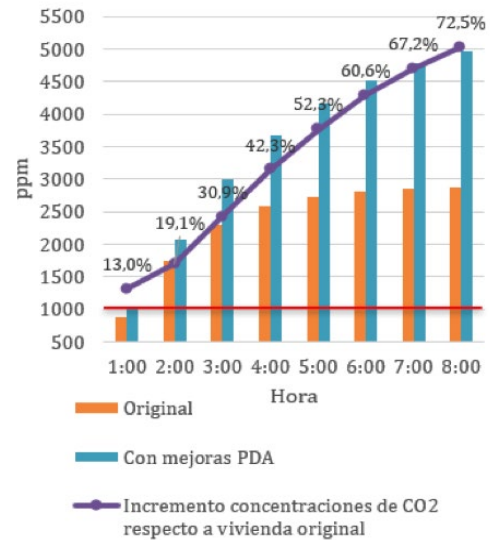


Figura 25. Concentraciones de CO₂ en dormitorio Caso 4, con envolvente original y con mejoras PPDA. Fuente: Elaboración de los autores.

dos ocupantes y se contrastó el caso de la vivienda original y el caso con criterios PPDA bajo régimen de uso en confinamiento. La figura 22, figura 23, figura 24 y figura 25 ilustran los niveles de concentración de CO₂ obtenidos en los recintos: para régimen de uso normal, se alcanzaron máximas de hasta 2800 ppm (caso 1 y 4) y, en el caso más favorable, correspondiente al 3, no se superaron las 1600 ppm. En cuanto a los niveles con envolvente PPDA, las cifras de concentración se elevaron en más de un 50% para el caso más favorable (caso 1) y en más de un 230% para el más crítico (caso 3). De esta manera, se evidencia que, al limitar a 5 las infiltraciones a través de la envolvente, se expone a los usuarios a niveles de CO₂ cercanos a las 5000 ppm, durante un extendido periodo horario, todas las noches; incumpliendo con el parámetro de concentraciones acumuladas anuales.

CONCLUSIÓN

El análisis de variación de concentraciones de CO₂ al interior de la vivienda, producto de la modificación de características de la envolvente y de los escenarios de ocupación a causa del confinamiento por Covid-19, permitió cuantificar el impacto que éstas generan en la calidad del aire interior en los hogares.

Los resultados obtenidos durante la primera fase de simulación, correspondiente a la obtención de concentraciones de CO₂ a partir de la envolvente original, no permitieron generar un panorama representativo del impacto que tiene la hermeticidad y los cambios de uso y ocupación de la vivienda en la presencia del contaminante en el aire interior, ya

que, si bien se asignaron las mismas condiciones de borde, la disparidad en las tasas de infiltración generó resultados complejos de comparar; razón por la cual se simularon escenarios iterando niveles de hermeticidad para los casos de estudio. Esto dejó en evidencia que, ante tasas de infiltración altas, es decir, entre 11 y 27 renovaciones de aire por hora, los diferenciales de CO₂ entre valores consecutivos analizados se incrementan de manera paulatina. A medida que se reducen los niveles de infiltración, se presentan alzas que van desde un 3% hasta menos de un 12%. Para las tasas de renovación más bajas, las alzas se incrementan casi de manera exponencial: las más críticas corresponden a la reducción de 7 a 5 renovaciones de aire, la cual genera un aumento de más de un 27% en los niveles de concentración del contaminante, y el paso de 5 a 3, que lo hace en más de un 48%.

Mediante los resultados obtenidos fue posible cuantificar el impacto que el confinamiento producto del Covid-19 puede generar sobre la calidad del aire interior de la vivienda de tipo social, estimándose en alrededor de un 16,4% el alza promedio en las concentraciones de CO₂, producto de la mayor permanencia al interior del hogar. Así también, los dormitorios resultaron ser los recintos con mayor exposición a ambientes insalubres, debido a que sus ocupantes permanecen por extendidas horas al interior de ellos y son el área donde se generaron las más altas concentraciones del contaminante.

Dado el alcance de la investigación y bajo los criterios de diseño y condiciones de borde definidas en las simulaciones, se logró verificar que es el nivel de

hermeticidad de la vivienda la principal variable incidente en los niveles de CO₂ interior. Esto permite estimar que, si la vivienda en Chile se ajusta a criterios PPDA (considerando como 13 el valor de línea de base para la hermeticidad según definición del CITEC), las alzas que se generan rondarían el 83% en escenario de uso normal y un 97%, en periodos de confinamiento.

La relevancia de un buen diseño y un sistema de ventilación que respondan a las reales necesidades de las familias chilenas, es decir, que aporten caudales de ventilación suficientes para remover las altas concentraciones de CO₂ que pueden generarse al interior de los hogares, resultan ser la clave para contar con viviendas herméticas pero, a la vez, confortables en todas las variables de habitabilidad asociadas. Recordemos que hoy en día la tendencia es contar con recintos más eficientes, herméticos y capaces de brindar el confort adecuado para las distintas actividades que desarrollen sus ocupantes en su interior. Lo anterior trae consigo múltiples beneficios a nivel medioambiental y económico, sin embargo, requiere análisis y estudios apropiados para evitar generar impactos negativos a nivel de salud de los usuarios.

El trabajo desarrollado tuvo un enfoque experimental, basado en simulaciones ante condiciones predefinidas, que se ajustan a criterios normativos, datos estadísticos e información recabada de la literatura asociada, de todo lo cual se obtuvo resultados estimativos para cada uno de los casos y escenarios evaluados. En futuras líneas de investigación será posible emplear esta metodología para determinar requerimientos de ventilación en viviendas y cómo la capacidad de ventilación natural disponible incide o impacta sobre la calidad del aire, además de comprender cómo afectan otro tipo de indicadores en estos recintos, por ejemplo, la temperatura interior. De igual manera, es factible desarrollar un trabajo de campo enfocado en mediciones *in situ* de los niveles de CO₂ en las distintas tipologías de viviendas analizadas en esta investigación, a partir de lo cual se puede verificar si las tendencias de variación de concentraciones del contaminante se asemejan a las obtenidas mediante el uso de software de simulación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2016). Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings. *ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2016.*, 8400(62.2).

Bi, Y., Aganovic, A., Mathisen, H. M. y Cao, G. (2022). Experimental study on the exposure level of surgical staff to SARS-CoV-2 in operating rooms with mixing ventilation under negative pressure. *Building and Environment*, 217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109091>

Bustamante, W., Encinas, F., Martínez, P., Brahm, M. e Ibaceta, I. (2009). *Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de: http://old.acee.cl/576/articles-61341_doc.pdf

Citec-UBB – Decon UC (2014). *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. Concepción, Chile. Recuperado de: <https://citecubb.cl/publicaciones>.

Corporación de Desarrollo Tecnológico (2019). *Informe Final Uso de la Energía Hogares Chile 2018*. Santiago de Chile. Recuperado de: https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf

Cortés, A. y Ridley, I. (2013). Efectos de la combustión a leña en la calidad del aire intradomiciliario: La ciudad de Temuco como caso de estudio. *Revista INVI*, 28(78), 257–271. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-83582013000200008>

Dai, H. y Zhao, B. (2022). Reducing airborne infection risk of COVID-19 by locating air cleaners at proper positions indoor: Analysis with a simple model. *Building and Environment*, 213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108864>

Decreto 6 de 2019. Establece Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitana. 25 de enero de 2018. Recuperado de: <https://bcn.cl/2jf1a>

Dirección General de Industria - Energía y Minas de la Comunidad de Madrid (2016). *Guía de Calidad del Aire Interior*. Madrid: Fenercom.

Encinas, F., Truffello, R., Urquiza, A. y Valdés, M. (15 mayo 2020). COVID-19, pobreza energética y contaminación: redefiniendo la vulnerabilidad en el centro-sur de Chile. *Ciper*. Recuperado de: <https://www.ciperchile.cl/2020/05/15/covid-19-pobreza-energetica-y-contaminacion-redefiniendo-la-vulnerabilidad-en-el-centro-sur-de-chile/>

Guerra, J. (18 julio 2020). Realizan diagnóstico que vincula calidad de la vivienda social, pandemia y cuarentenas. *Noticias UCN al día – Universidad Católica del Norte*. Recuperado de: <https://www.noticias.ucn.cl/destacado/realizan-diagnostico-que-vincula-calidad-de-la-vivienda-social-pandemia-y-cuarentenas/>

Huneus, N., Urquiza A., Gayó, E., Osses, M., Arriagada, R., Valdés, M., ... y Cortés, S. (2020). *El aire que respiramos: pasado, presente y futuro. Contaminación atmosférica por MP2,5 en el centro y sur de Chile*. Recuperado de: <https://www.cr2.cl/contaminacion/>

Lu, Y., Niu, D., Zhang, S., Chang, H. y Lin, Z. (2022). Ventilation indices for evaluation of airborne infection risk control performance of air distribution. *Building and Environment*, 222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109440>

Ministerio de Desarrollo Social (2019). *Informe Desarrollo Social 2019*, 14. Recuperado de: https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/Informe_de_Desarrollo_Social_2019.pdf

Ministerio de Energía (2020). Estrategia de transición energética de residencial. *Vivienda y Densidad*, 34. Recuperado de: <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/3774>

Ministerio de Fomento (2007). Documento Básico. *Septiembre, 2013*. Recuperado de: https://www.minrel.gob.cl/minrel_old/site/artic/20080902/asocfile/20080902204316/documento_b_sico_com_n_chile___actualizaci_n_sept_2013_final_con_correcciones_monu.pdf

Red de Pobreza Energética (2019). *Pobreza energética. El acceso desigual a energía de calidad como barrera para el desarrollo en Chile*. Policy Paper. Santiago: Universidad de Chile.

